

طراحی سوییچ

جهت سوییچینگ پالسهای لورن در سامانه مکان یاب محلی LPS

نگارش:

فرشاد رحیمی

## فصل یک: مروری بر سوئیچ های توان بالای مبتنی بر ادوات نیمه هادی و کلید های قدرت مکانیکی .....1

- 1-1-1 مقدمه الف (سوئیچ های مبتنی بر ادوات نیمه هادی).....1
- 2-1-1 ترستورها .....3
- 1-3-1 ماسفت های قدرت (Power Mosfet).....4
- 4-1-1 ترستور دارای قابلیت خاموش شدن از طریق گیت (IGCT , GTO).....6
- 5-1-1 ترانزیستورهای پیوندی دو قطبی با گیت عایق شده (IGBT).....8
- 1-6-1 ترانزیستورهای دو قطبی پیوندی (BJT).....9
- 1-7-1 بررسی تلفات توان در سوئیچ های کنترل پذیر .....11
- 8-1-1 نتیجه گیری (سوئیچ های مبتنی بر ادوات نیمه هادی).....14
- 9-1-1 مقدمه ب (سوئیچ های مکانیکی) .....17
- 10-1-1 انتخاب کلید قدرت .....18
- 11-1-1 انواع کلید های قدرت .....19
- کلید های بدون قابلیت قطع زیر بار (سکسیونرها).....19
- سکسیونر های قابل قطع زیر بار .....19
- کلید های با قابلیت قطع زیر بار (دژنکتورها).....19
- 1-11-1 سکسیونرها .....19
- 2-11-1 دژنکتورها .....21
- 12-1-1 عملکرد قطع جرقه در کلید های فشار قوی .....22
- 1-12-1 طبقه بندی کلیدها از لحاظ خاموش کننده قوس الکتریکی .....23
- 13-1-1 کلید های قدرت یا دژنکتور (کلید روغنی) .....28
- 1-13-1 دژنکتور .....28
- 2-13-1 کلید روغنی (OIL CIRCUIT BREAKER).....32
- 3-13-1 کلید های کم روغن .....38
- 14-1-1 کلید های اکسپانزیون .....46
- 15-1-1 کلید های هوایی .....50
- 1-15-1 عملکرد .....50
- 2-15-1 معایب .....51
- 16-1-1 کلید های گاز سخت (جامد) .....57
- 17-1-1 کلید SF6 .....58
- 18-1-1 کلید خلا .....62

- 67.....1-19 تقسیم بندی کلید ها از نقطه نظر مکانیزم عملکرد .....
- 67.....1-19-1 مکانیزم فنری : .....
- 68.....1-19-2 مکانیزم هیدرولیکی : .....
- 70.....1-19-3 مکانیزم هوای فشرده یا پنیوماتیکی : .....
- 71.....20-1 کلید های باز شونده فوق سریع .....
- 72.....1-20-1 استفاده از کلید قدرت فوق سریع در SFCL .....

### فصل دو: انتخاب توپولوژی و سوئیچ مناسب و شبیه سازی عملکرد آن در فرستنده لورن با توجه به قیود

#### 76..... طراحی

- 77.....1-2 مقدمه .....
- 78.....2-2 بررسی پالسهای لورن .....
- 79.....1-2-2 رابطه سیگنال لورن .....
- 80.....3-2 شبیه سازی فرستنده لورن .....
- 82.....4-2 طراحی سوئیچ مناسب جهت سویچ زنی پالس های با ولتاژ و جریان بالا .....
- 87.....1-4-2 اتصال سری و موازی IGBT ها جهت افزایش رنج ولتاژ و جریان سویچ .....
- 91.....2-4-2 طراحی سوئیچ مناسب جهت سوئیچینگ پالسهای لورن بعنوان یک سیگنال سریع با رنج ولتاژ و جریان بالا .....
- 101.....5-2 بررسی تلفات گیت IGBT .....
- 103.....1-5-2 تلفات توان در مقاومت گیت .....
- 107.....2-6 انتخاب توپولوژی مناسب جهت سویچ زنی بین بار اصلی و رزرو توسط مولد سیگنال اصلی و رزرو .....

### فصل سه : انتخاب و شبیه سازی روشهای حفاظتی مناسب و طراحی مدارها به همراه تعیین المانهای مورد

#### 109..... نیاز

- 110.....1-3 مقدمه .....
- 111.....2-3 مدار متعادل کننده ولتاژ برای IGBT های سری .....
- 113.....1-2-3 مدار متعادل کننده استاتیکی ولتاژ .....
- 114.....2-2-3 مدار متعادل کننده ولتاژ در حالت دینامیکی (مدار اسنابر) .....
- 117.....3-2-3 روشی دیگر جهت طراحی مدار اسنابر .....
- 123.....3-3 مدار کلمپ اکتیو .....



فصل یک: مروری بر سوئیچ های توان بالای  
مبتنی بر ادوات نیمه هادی و کلید های  
قدرت مکانیکی

## 1-1 مقدمه الف (سوییچ های مبتنی بر ادوات نیمه هادی)

توان پالسی شاخه ای از علم مهندسی فشار قوی الکتریکی می باشد که اخیرا پیشرفت های بسیاری را به صورت روز افزون به خود دیده است. در این مبحث با اعداد و مقادیر فوق العاده بزرگ ولتاژ و جریان و توان و همچنین با مقادیر بسیار کوچک زمان سر و کار داریم؛ توان های تا وات، ولتاژهای تا ولت و جریان هایی با دامنه آمپر و بیشتر. زمان تناوب پالس های تولید شده در این مبحث در حدود ثانیه می باشد. با توجه به کاربردی که از سیستم توان پالسی انتظار داریم می توانیم توان تولید شده را بصورت تک پالس یا پالس های تکرار شونده طراحی نماییم. کاملا واضح است که در صورت تولید تک پالس می توان با داشتن امکانات معین، مقادیر بزرگتر ولتاژ و جریان (و در نتیجه توان) را تولید نمود. در مورد پالس های تکرار شونده فرکانس های در حد 10 کیلو هرتز کاملا قابل دسترسی می باشند. تکامل و پیشرفت علم توان پالسی مشروط به به پیشرفت و در واقع تغییر ساختار کلید ها در سیستم می باشد. مهمترین ویژگی یک سیستم توان پالسی این است که تمام اجزا و دستگاههای آن بایستی در محدوده نانو ثانیه عمل کنند. یکی از کاربرد های توان پالسی در زمینه های نظامی (رادار، فاصله یاب، سیستم های هدایت شونده راه دور) می باشد.

در بسیاری از کاربرد های توان پالسی نیازمند سوئیچ های بسیار سریع با سرعت باز آرایبی بالا و قدرت تحمل ولتاژ و جریان بالا هستیم، کلید هایی که تا کنون در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته شده است بیشتر بر مبنای تکنولوژی اسپارک گپ، تیراترون (*Thyratrons*)، ایگنایترون (*Ignitron*) و کلید های مکانیکی بوده است، ولی تکنولوژی های یاد شده داری مشکلات متعددی همچون کوتاهی عمر و قیمت بالا هستند که در طراحی ها یک مشکل محسوب می شوند بنابراین باتوجه به پیشرفت تکنولوژی بایستی روش های جدیدی جهت کنترل توان های پالسی ابداع نمود.

افزایش ظرفیت های توان، ساده تر شدن کنترل و کاهش هزینه قطعات جدید نیمه رسانا در مقایسه با قطعاتی که چندین سال پیش ساخته می شدند، باعث شده است مبدل ها در کاربردهای بسیار زیاد و ساختارهای گوناگون الکترونیک قدرت به کار گرفته شوند. برای درک کامل امکان استفاده از این فن آوری، لازم است ویژگی های قطعات قدرت موجود بررسی شوند. برای این کار، برخی مشخصات مربوط به ترمینال ها، ولتاژ، جریان، و سرعت سوئیچینگ قطعات موجود در این فصل ارائه می شوند. اگر قطعات نیمه رسانای قدرت را بتوان بعنوان سوئیچ ایده آل در نظر گرفت، تحلیل ساختار مبدل ها ساده تر می

شود. مزیت این روش آن است که جزییات کار قطعات باعث پیچیدگی کار اصلی مدار نمی شود. در حال حاضر، قطعات نیمه رسانای موجود را می توان با توجه به کنترل پذیری به سه دسته تقسیم کرد. این سه دسته عبارتند از:

**1- دیود ها:** حالت قطع و وصل با مدار قدرت کنترل می شود.

**2- تریستورها:** حالت وصل آنها با سیگنال کنترل ایجاد می شود، اما برای قطع باید مدار قدرت وارد عمل شود.

**3- سوئیچ های کنترل پذیر:** با سیگنال کنترل خاموش و روشن می شود.

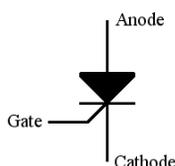
دسته مربوط به سوئیچ های کنترل پذیر در انواع مختلف قطعات ، از جمله ترانزیستورهای دو قطبی ، ترانزیستورهای اثر میدان *MOS*، ترانزیستورهای خاموش شونده با گیت و ترانزیستورهای دو قطبی با گیت عایق را شامل می شود. در سال های اخیر پیشرفت های زیادی در این دسته از قطعات صورت گرفته است.

توسعه ادوات نیمه هادی سبب شده است تا از آنها بتوان در طراحی کلید های پالس پاور استفاده کرد و از مزایای خوب آنها بهره برد. تکنولوژی امروز ادوات نیمه هادی این امکان را ایجاد کرده است تا بتوانیم کلید هایی با قدرت بلوکه کردن ولتاژهای بالا را که توانایی کنترل جریان را هم داشته باشند طراحی کنیم، بسته به طراحی و ساختار دستگاه نرخ سعود سیگنال جریان در حدود چند هزار آمپر بر میکرو ثانیه می تواند باشد و همچنین سرعت بازآرایی بالایی در مقایسه با سایر قطعاتی که به این منظور مورد استفاده قرار گرفته اند، مانند تیراترون (*Thyratron*) و ایگنایترون (*Ignitron*) و اسپارک گپ (*Spark Gap*) می باشند. مهمترین مزیت های کلید های مبتنی بر ادوات نیمه هادی ، قابلیت اطمینان ، طول عمر و سازگاری با محیط زیست می باشد. قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری بالای این نوع از کلید ها هزینه های اولیه بالای طراحی و ساخت کلید های مبتنی بر ادوات نیمه هادی را جبران می کند. نوع نیمه هادی استفاده شده و توانایی قطعه استفاده شده به شدت طراحی را تحت تاثیر قرار می دهد و نیاز به دانش عمیق از نحوه عملکرد و کاربرد ادوات سوئیچینگ دارد.

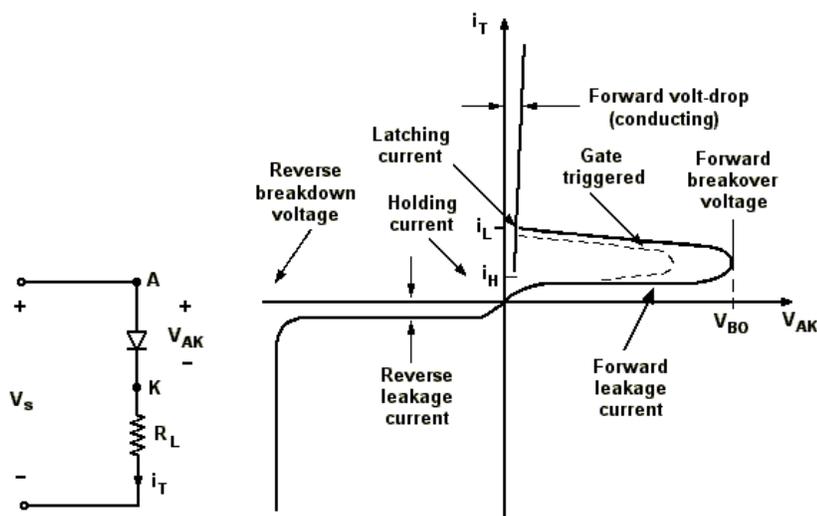
در ادامه به بررسی انواع ادوات قدرت نیمه هادی می پردازیم و در قسمت نتیجه گیری با مقایسه قطعات بهترین و بهینه ترین قطعه را با توجه به نیازهای پروژه انتخاب خواهیم کرد.

## 2-1- ترستورها

نماد مداری ترستور و مشخصه ولتاژ-جریان آن در شکل های نشان داده شدن اند. جریان اصلی از آند (A) به سمت کاتد (K) جریان می یابد. ترستور در حالت قطع می تواند ولتاژ دارای پلاریته مستقیم را مسدود کند و همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است ترستور در ناحیه قطع هدایت نمی کند.



شکل 1-0: نماد مداری ترستور



شکل 2-0: مشخصه ولتاژ-جریان ترستور

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

- 1- ولتاژ آند نسبت به کاتد مثبت باشد
- 2- گیت یک پالس مثبت دریافت کند (ولتاژ گیت بیشتر از ولتاژ کاتد شود)
- 3- برای روشن ماندن ترستور جریان آند باید به اندازه کافی زیاد باشد.

مداری که پالس جریان گیت را تولید می کند مدار آتش می نامند. پس از روشن شدن تریستور ولتاژ آند کاتد بسیار ناچیز خواهد شد به طوری که در مقاصد عملی  $V_{AK} \approx 0$  در نظر می گیرند و می توان گفت که تریستور در هنگام هدایت تقریباً مانند یک اتصال کوتاه عمل می کند. تریستور بسیار سریع روشن می شود، به مدت زمان لازم برای روشن سازی تریستور زمان روشن سازی می گویند که با  $t_{on}$  نمایش داده می شود و حدود ۱ تا ۳ میکروثانیه است. پهنای پالس اعمالی به جریان گیت که برای روشن شدن تریستور استفاده می شود حدود ۱۰ تا ۵۰ میکروثانیه است و دامنه ای حدود ۲۰ تا ۲۰۰ میلی آمپر دارد.

روش های خاموش کردن تریستور کموتاسیون می گویند. در مدارهای جریان متناوب به علت تغییر خودکار پلاریته دو سر آند و کاتد تریستور به صورت خودکار خاموش می شود که به این حالت کموتاسیون طبیعی می گویند. در مقابل اگر جریان بالاجبار صفر شود کموتاسیون اجباری رخ داده است.

برای خاموش کردن تریستوری که روشن شده است باید یکی از شرایط زیر برقرار شود:

1- ولتاژ آند نسبت به کاتد منفی شود.

2- جریان عبوری از آند قطع شود (به کمتر از مقدار بحرانی برسد)

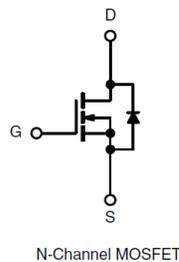
اگر تریستور روشن شده باشد، با صفر شدن جریان گیت تریستور خاموش نخواهد شد. برای وصل کردن تریستور می توان پالس مثبتی را برای مدت زمان کوتاهی به گیت اعمال کنیم، مشروط بر اینکه قطعه در حالت بایاس مستقیم باشد. رابطه ولتاژ-جریان بدست آمده در ناحیه وصل در مشخصه ولتاژ-جریان دیده می شود. افت ولتاژ مستقیم در حالت وصل حدود چند ولت است (معمولاً بین 1 ولت تا 3 ولت که بسته به مسدود کننده تغییر می کند). بعد از اینکه قطعه شروع به هدایت می کند، روشن شده و می توان جریان گیت را حذف کرد. تریستور را نمی توان با استفاده از گیت خاموش کرد و در این حالت همانند دیود هدایت می کند. تریستور تنها در صورتی خاموش می شود که با توجه به ولتاژ و جریان های مدار جریان آند منفی شود. بعد از خاموش شدن تریستور جریان آند صفر می شود. به این ترتیب گیت می تواند دوباره کنترل قطعه را در زمانی مشخص بعد از ورود به حالت مستقیم در دست بگیرد.

### 3-1 ماسفت های قدرت (*Power Mosfet*)

نماد مداری یک *Mosfet* نوع N در شکل 3 نشان داده شده است. همانطور که در مشخصه ولتاژ و جریان در شکل 4 دیده می شود این قطعه با ولتاژ کنترل می شود. اگر ولتاژ گیت سورس به اندازه کافی

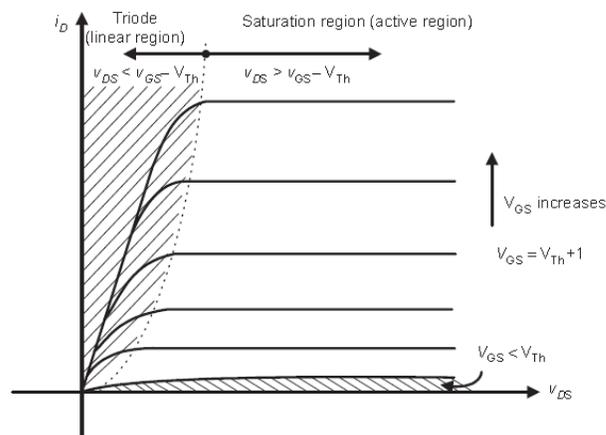
بزرگ باشد، این قطعه کاملاً روشن بوده و بصورت یک سوئیچ تقریباً بسته عمل می‌کند. *Mosfet* زمانی خاموش می‌شود که ولتاژ گیت سورس آن کمتر از ولتاژ گیت سورس آستانه  $V_{GS(th)}$  باشد. *Mosfet* ها برای اینکه در حالت روشن باقی بمانند نیاز به ولتاژ گیت سورس پیوسته با دامنه مناسب دارند. به جز در حالت گذرا در زمان خاموش به روشن و برعکس، هیچ جریانی از گیت عبور نمی‌کند و در این زمان ها خازن گیت شارژ یا دشارژ می‌گردد. زمان سوئیچینگ این قطعه بسیار کوچک است و بسته به نوع قطعه در بازه چند ده نانو ثانیه تا چند صد نانو ثانیه می‌باشد.

مقاومت حالت روشن  $R_{ds}$  در ماسفت بین سورس و درین قرار دارد با افزایش قابلیت انسداد ولتاژ به سرعت افزایش می‌یابد.



N-Channel MOSFET

شکل 3-0: نماد مداری ماسفت نوع N



شکل 4-0: مشخصه ولتاژ-جریان ماسفت

به دلیل سرعت سوئیچینگ بالا، تلفات سوئیچینگ این قطعه با توجه به فرمول 1 کاهش می‌یابد.

$$P_s = \frac{1}{2} v_d I_Q f_s (t_{c(on)} + t_{c(off)}) \quad (1-1)$$

از دید تلفات توان کل، می توان گفت که *Mosfet* های 300 ولت تا 400 ولت می توانند تنها در صورتی با ترانزیستور دوقطبی رقابت کنند که فرکانس سوئیچینگ بیشتر از 30kHz تا 100kHz باشد. اما نمی توان بصورت قطعی در مورد فرکانس قطع این قطعات نظر داد ، زیرا این فرکانس به ولتاژ کاری بستگی دارد و کار در ولتاژ های پایین برای ماسفت بهتر است.

*Mosfet* ها در ولتاژ نامی بالاتر از 1000 ولت نیز ساخته می شوند، اما جریان نامی آنها کوچک و در ولتاژ های کم در حدود 100 آمپر است. حداکثر ولتاژ گیت سورس  $\pm 20$  است، اگرچه برخی ماسفت های جدید را می توان با سیگنال کنترل 5V کنترل نمود. *Mosfet* ها به راحتی با یکدیگر موازی می شوند زیرا مقاومت حالت روشن آنها دارای ضریب حرارتی مثبت است. به این ترتیب ، با افزایش دما، جریان عبوری از قطعه بیشتر می شود و این جریان بصورت یکسان بین ماسفت ها تقسیم می شود.

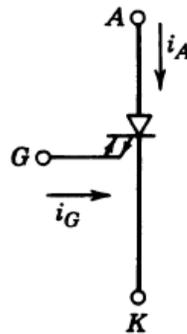
راه اندازی ماسفت های قدرت به نظر راحت می رسد. این ترانزیستورها دارای یک پایه گیت هستند که با اعمال ولتاژ می توان ترانزیستور را خاموش و یا روشن کرد. به علت مقاومت داخلی بالای آن تقریباً نیاز به جریان اضافی نیز ندارند. این ترانزیستور ها بیشتر در مدارات سوئیچینگ استفاده می شوند که یا کامل خاموش یا روشن هستند. ولی هنگام روشن و یا خاموش شدن آنها اگر ولتاژ گیت کافی نباشد و یا با شیب آنها را روشن کنیم باعث داغ شدن ترانزیستور خواهیم شد. این ترانزیستور ها معمولاً دارای ظرفیت خازنی در گیت خود هستند که مانع سریع روشن و یا خاموش شدن ترانزیستور خواهد شد.

تقریباً تمامی مدارات فرکانس بالا و توان متوسط با استفاده از ترانزیستور های دو قطبی ساخته می شدند. ظهور این عنصر در عرصه قطعات نیمه هادی باعث شد که ساخت مدارات با سرعت بیشتر و توان تلفاتی کمتر ممکن شود. همچنین مزایای دیگر آن باعث گردید که امروزه بسیاری از مدارات توان متوسط از قبیل کنترل کننده های دور موتورها، منابع تغذیه سوئیچینگ، بالاست لامپ های فلوروسنت، و بسیاری از مدارات دیگر به کمک این عنصر محقق شوند. مهمترین نقطه ضعف ماسفت ها نسبت به ترانزیستورها توانایی کمشان در بلوکه کردن ولتاژ های بالا و تحمل جریان های بالا می باشد و توان کمی دارند.

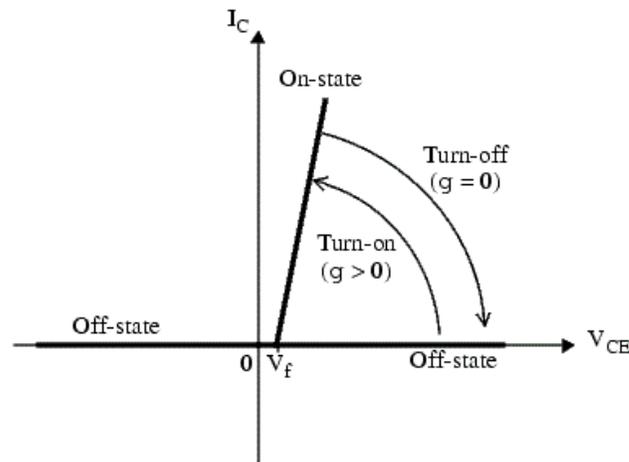
#### 4-1-1 ترانزیستور دارای قابلیت خاموش شدن از طریق گیت (*IGCT, GTO*)

نماد مداری *GTO* در شکل 5 و مشخصه ولتاژ و جریان آن در حالت ماندگار در شکل 6 دیده می شود. *GTO* همانند ترانزیستور با اعمال سیگنال جریانی در زمان کوتاه به گیت قابل روشن شدن است و بدون جریان گیت می تواند در حالت روشن باقی بماند. اما برخلاف ترانزیستورهای معمولی ، *GTO* را می

توان با اعمال ولتاژ منفی گیت-کاتد خاموش نمود و به این ترتیب جریان منفی بزرگی در گیت ایجاد نمود. این جریان منفی گیت تنها لازم است به مدت چند میکروثانیه (در زمان قطع) از گیت عبور کند، اما دامنه آن باید خیلی بزرگ باشد. این دامنه معمولاً در حدود یک سوم جریان آند در حالت قطع است. *GTO* ها می توانند ولتاژهای منفی را با دامنه های مختلف بسته به طراحی قطعه مسدود نمایند.



شکل 1-5: نماد مداری *GTO*



شکل 0-6: مشخصه ولتاژ-جریان *GTO*

اگرچه *GTO* یک کلید کنترل پذیر است که در همان دسته *BJT* ها و *Mosfet* ها قرار می گیرند، *GTO* ها را نمی توان برای حالت قطع سلفی بکار برد، مگر اینکه یک مدار محافظ به *GTO* متصل شود. این مسئله نتیجه این واقعیت است که مقدار بالای  $\frac{dv}{dt}$  در حالت قطع سلفی در حد تحمل *GTO* ها نیست. پس بنابراین برای قطع و وصل آن بایستی از مدار اسنابر استفاده شود. در جدول 1 به مقایسه برخی ویژگی های *GTO* و تریستور پرداخته شده است.

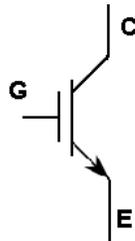
جدول 1-1: مقایسه تریستور و GTO

Characteristic	Description	Thyristor (1600 V, 350 A)	GTO (1600 V, 350 A)
$V_{T(on)}$	On state voltage drop	1.5 V	3.4 V
$t_{on}, I_{g(on)}$	Turn on time, gate current	8 $\mu$ s, 200 mA	2 $\mu$ s, 2 A
$t_{off}$	Turn off time	150 $\mu$ s	15 $\mu$ s

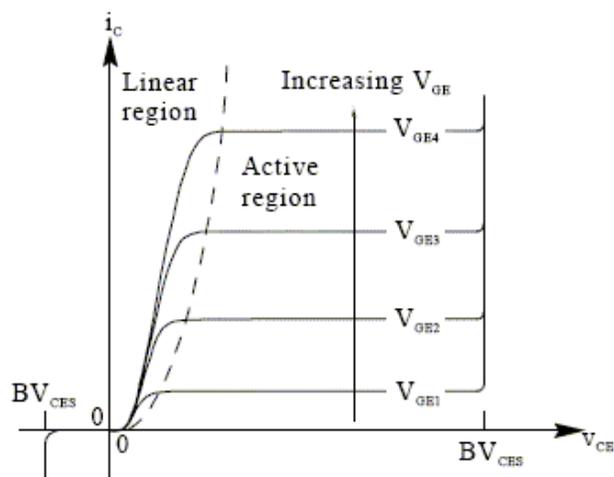
همانطور که از جدول 1 مشاهده می شود. تلفات حالت وصل *GTO* از تریستور بیشتر است. *IGCT* نوع خاصی تریستور است که عملکردی مشابه *GTO* دارد، با سیگنال اعمالی به گیت می تواند روشن و خاموش شوند و تلفات هدایتی کمتری نسبت به *GTO* ها دارند و توانایی بالاتری در مقابل تغییرات زمانی ولتاژ دارند و در کاربردهای بسیاری نیاز به مدار اسنابر ندارد. در *IGCT* سیگنال جریان خاموش کننده بسیار بیشتر از جریان آند است، مهم ترین تفاوت آن با *GTO* کاهش اندازه آن و همینطور سریعتر خاموش شدنش نسبت به *GTO* می باشد و این قابلیت را به آن می دهد تا در فرکانس های بالاتری کار کند ولی به دلیل تلفات سوئیچینگ زیاد بایستی این قطعه در فرکانس کاری در حدود 500Hz کار کند.

### 5-1 ترانزیستورهای پیوندی دو قطبی با گیت عایق شده (*IGBT*)

نماد مداری *IGBT* در شکل 7 و مشخصه ولتاژ-جریان آن در شکل 8 نشان داده شده است. *IGBT* برخی مزایای *Mosfet* و *GTO* و *BJT* را در کنار یکدیگر دارد. *IGBT* مشابه *Mosfet* ها دارای امپدانس بالا است و به همین دلیل انرژی لازم برای سوئیچینگ در آنها پایین است.



شکل 7-0: نماد مداری *IGBT*



شکل 8-0: مشخصه ولتاژ-جریان IGBT

IGBT همانند BJT ولتاژ حالت وصل کمی دارد و حتی در قطعاتی که دارای ولتاژ انسداد بالا هستند، بازهم ولتاژ وصل کم است (برای قطعاتی که در ولتاژ کاری 1000 ولت هستند در حدود 2 تا 3 ولت است) IGBT همانند GTO می تواند طوری طراحی شود که ولتاژهای منفی را هم مسدود کند. زمان روشن شدن و خاموش شدن در IGBT در حدود 1 میکرو ثانیه می باشد و ولتاژ و جریان نامی آنها گاهی به 6500 ولت و 1000 آمپر می رسد و به دلیل ضریب حرارتی مثبت آن در نوع NPN می توان تعداد زیادی از آنها را با هم موازی کرد و تقسیم جریان متعادلی را داشت.

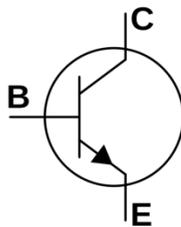
### 6-1 ترانزیستورهای دوقطبی پیوندی (BJT)

نماد مداری ترانزیستور پیوندی دو قطبی نوع NPN در شکل 9 آمده است و مشخصه ولتاژ-جریان حالت ماندگار آن در شکل 10 نشان داده شده است. همانطور که در مشخصه های ولتاژ-جریان دیده می شود، اگر جریان بیس به اندازه کافی بزرگ باشد (بسته به جریان کلکتور)، قطعه بصورت کامل روشن می شود. برای این کار لازم است مدار کنترل، جریان بیس را تامین کند که در رابطه زیر صدق کند:

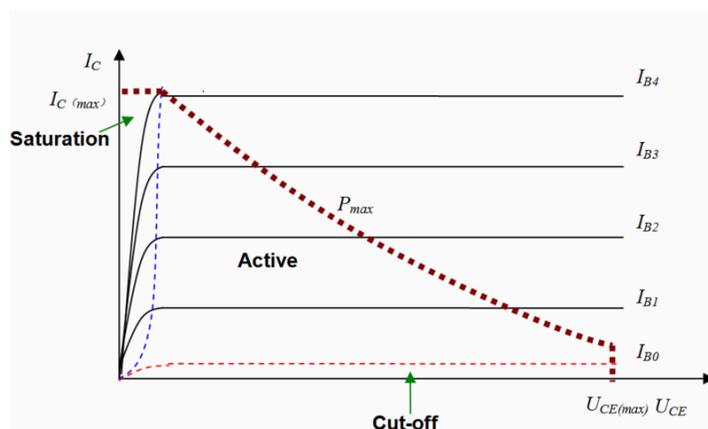
$$I_B > \frac{I_C}{h_{FE}}$$

در این رابطه  $h_{FE}$  بهره جریان dc قطع می باشد.

ولتاژ حالت وصل  $V_{CE(sat)}$  در ترانزیستورهای قدرت در بازه 1V تا 2V است و به همین دلیل تلفات توان در حالت وصل در ترانزیستور  $BJT$  بسیار پایین است.  $BJT$  ها قطعاتی هستند که با استفاده از جریان کنترل می شوند و جریان بیس آنها باید بصورت پیوسته تامین شود تا قطعه در حالت وصل باقی بماند. بهره dc در ترانزیستورهای فشارقوی در حدود 5 تا 10 است و به همین جهت این قطعات معمولا در ساختار دارلینگتون یا دارلینگتون 3 تایی قرار می گیرند تا بهره جریان افزایش یابد. برخی معایب این ساختار عبارتند از  $V_{CE(sat)}$  بالا و سرعت سوئیچینگ پایین و در حدود میلی ثانیه است.  $BJT$  ها در ولتاژهای نامی تا سقف ولتاژ 1400 ولت و جریان نامی چند صد آمپر وجود دارند. با وجود ضریب حرارتی منفی مقاومت در حالت روشن،  $BJT$  های جدید با کنترل کیفیت مناسبی ساخته می شوند و در صورتی که در طراحی مدار دقت شود و حاشیه اطمینان ایجاد شود، می توان چهار  $BJT$  را با تقسیم جریان مساوی و یا پنج  $BJT$  را با تقسیم جریان اندکی نا متعادل با یکدیگر موازی نمود. مدار راه انداز  $BJT$  ها بسیار پیچیده است و با توجه به اینکه رنج معمول این عنصر در ولتاژ و جریان پایین است و فرکانس کاری این قطعه نیز پایین می باشد و برای طراحی یک سوئیچ با قابلیت ولتاژی و جریانی بالا لازم است تعداد زیادی  $BJT$  را با هم سری و موازی نمود و همینطور لازم است مدار راه انداز پیچیده ای طراحی نمود تا  $BJT$  ها بطور سنکرون روشن و خاموش شود به نظر می رسد که عنصر  $BJT$  نیز انتخاب مناسبی برای ساخت یک سوئیچ با رنج ولتاژ و جریان بالا و فرکانس کاری بالا مناسب نمی باشد.



شکل 9-0: نماد مداری  $BJT$

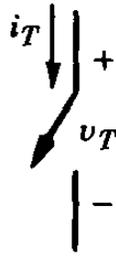


شکل 10-0: مشخصه ولتاژ-جریان BJT

## 7-1 بررسی تلفات توان در سوئیچ های کنترل پذیر

همانطور که پیشتر بحث شد برخی از انواع مختلف قطعات قدرت نیمه رسانا از جمله BJT ها ، Mosfet ها و IGBT ها را می توان با سیگنال اعمالی به پایه کنترل آنها خاموش و روشن نمود. این قطعات، سوئیچ های کنترل پذیر نامیده میشوند که بطور کلی با نماد مداری شکل 11 نشان داده می شوند . وقتی سوئیچ قطع است هیچ جریانی از آن عبور نمی کند و وقتی قطعه روشن است جریان فقط در جهت مشخص شده در شکل 11 جریان می یابد. سوئیچ کنترل پذیر ایده آل دارای مشخصات زیر است.

- 1- ایجاد ولتاژهای بزرگ مستقیم و معکوس و عبور جریان صفر در هنگام خاموش بودن
- 2- هدایت جریان های بزرگ با افت ولتاژ صفر در هنگام وصل بودن
- 3- سوئیچ شدن بلافاصله از حالت قطع به وصل و برعکس در زمان تحریک
- 4- توان اندک لازم از منبع کنترل جهت سوئیچ کردن قطعه



شکل 0-11: شکل کلی سوئیچ کنترل پذیر

اما همانطور که می توان حدس زد، قطعات واقعی دارای این مشخصه ایده آل نیستند و به همین دلیل وقتی در موارد مختلف استفاده می شوند اتلاف توان دارند. اگر اتلاف توان در آنها خیلی زیاد باشد، ممکن است قطعه از کار بیفتد و در این حالت نه تنها خود قطعه از کار می افتد بلکه سایر اجزای سیستم آسیب می بینند.

ماهیت اتلاف توان در قطعات نیمه رسانای قدرت تقریباً به یک شکل است. یعنی در تمام این قطعات عوامل مشابهی در اتلاف توان نقش دارند. در اینجا از تلفات سوئیچینگ در حالت وصل یا قطع شدن به دلیل مقدار کمشان صرفنظر میکنیم. در یک کلید نیمه رسانا زمانی که کلید وصل است جریان  $I_0$  و ولتاژی برابر ولتاژ حالت وصل قطعه ( $V_{on}$ ) بسته به نوع قطعه در دوطرف آن ظاهر میشود و در مدت زمانی که قطعه هدایت می کند یعنی زمان روشن بودن قطعه ( $t_{on}$ ) این ولتاژ و جریان بر قطعه اعمال می شود. این زمان عموماً خیلی بزرگتر از زمان های گذرای خاموش یا روشن شدن قطعه است. اتلاف انرژی ( $W_{on}$ ) در سوئیچ در زمان هدایت را با رابطه زیر می توان تقریب زد:

$$W_{on} = V_{on} I_0 t_{on} \quad (2-1)$$

عامل مهم دیگر در تلفات توان در سوئیچ ، توان متوسط تلف شده در دوره وصل است ( $P_{on}$ ) است که متناسب با ولتاژ این دوره تغییر می کند ، با توجه به رابطه 2  $P_{on}$  بصورت زیر بدست می آید.

$$P_{on} = V_{on} I_0 \frac{t_{on}}{T_s} \quad (3-1)$$

این رابطه نشان میدهد که ولتاژ در حالت وصل سوئیچ بایستی کوچک باشد. جریان نشتی در طول دوره قطع (باز بودن سوئیچ) در سوئیچ های کنترل پذیر کوچک و قابل چشم پوشی است و به همین دلیل ، تلفات توان در زمان قطع را عملاً می توان نادیده گرفت.

با توجه به مسایلی که بحث شد. مشخصات مطلوب برای سوئیچ های کنترل پذیر عبارتند از:

1- جریان ناشی ( $I_{CES}$ ) کوچک در هنگام قطع

2- ولتاژ کوچک ( $V_{on}$ ) در حالت وصل جهت کاهش اتلاف توان

3- زمان های گذرای کوچک در هنگام روشن و خاموش شدن. در این حالت می توان قطعه را در فرکانس های بالا مورد استفاده قرار داد.

4- امکان مسدود کردن ولتاژهای بزرگ در حالت مستقیم و معکوس. این کار باعث کم شدن تعداد قطعات سری می شود. افزایش تعداد قطعات باعث پیچیده تر شدن سیستم کنترل و محافظت از سوئیچ ها می شود. به علاوه ، بیشتر انواع قطعات ، فارغ از میزان ولتاژ مسدود شده ، دارای ولتاژ حالت روشن پایینی می باشند. اتصال سری چندین قطعه با این مشخصات باعث افزایش ولتاژ حالت وصل شده و به این ترتیب تلفات در هنگام هدایت بیشتر می شود.

5- جریان بالا در حالت وصل. در کاربردهایی که در آن جریان بالاست، این مشخصه باعث کاهش نیاز به اتصال قطعات بصورت موازی می شود و به این ترتیب مسئله تقسیم جریان حل می شود.

6- ضریب مثبت حرارتی برای مقاومت در حالت وصل. در صورت داشتن این مشخصه ، قطعات موازی جریان را به نسبت مساوی تقسیم می کنند.

7- توان کم کنترل لازم برای سوئیچینگ. این مشخصه باعث ساده تر شدن طراحی مدار کنترل می شود.

8- قابلیت کار در ولتاژ و جریان نامی به طور همزمان و در حین سوئیچینگ. این مشخصه باعث حذف نیاز به مدارهای اسنابر خارجی می شود.

9- رنج بالای  $\frac{dv}{dt}$  و  $\frac{di}{dt}$ . این مشخصه باعث کاهش نیاز به مدارهای خارجی می شود. زیرا این مدارها معمولاً برای محدود کردن  $\frac{dv}{dt}$  و  $\frac{di}{dt}$  و محافظت مدار نیاز دارند.

بنابراین مهمترین عامل در تلفات هدایتی ولتاژ حال وصل عناصر الکترونیک قدرت می باشد، جدول 2 این مشخصه بصورت کیفی در مورد قطعات مقایسه شده است.

جدول 1-2: مقایسه ضریب حرارتی و افت ولتاژ وصل ادوات نیمه هادی

نام عنصر	Thyristor	Power BJT	GTO	Power MOSFET	IGBT (NPT)
ضریب حرارتی	منفی	منفی	مثبت	مثبت	مثبت
افت ولتاژ حالت وصل	عالی	عالی	عالی	بد	خوب

از جدول 2 مشاهده می شود که *GTO* و *MOSFET* و *IGBT (NPT)* دارای ظریب حرارتی مثبت هستند و با توجه به این نکته که در قطعاتی که دارای ظریب حرارتی مثبت هستند می توان قطعات را به خوبی با تقسیم جریان مساوی با هم موازی کرد به نظر می رسد *IGBT* و *GTO* بهترین انتخاب برای سری و موازی نمودن قطعات است و از طرفی به دلیل آنکه افت ولتاژ در این دو قطعه بهتر از ماسفت قدرت می باشد پس تلفات توان کمتری دارند و گزینه های بهتری برای انتخاب ، جهت طراحی سوئیچ مد نظر پروژه می باشند.

## 8-1 نتیجه گیری (سوئیچ های مبتنی بر ادوات نیمه هادی)

همانطور که در قسمت های قبل بحث شد می توان به این نتیجه رسید که کدام قطعه می تواند با توجه به اهداف پروژه مناسب باشد، بدین منظور با مقایسه ادوات معرفی شده سعی می شود تا به مناسب ترین عنصر جهت اجرای طرح رسید، با توجه به بررسی های صورت گرفته بر روی تریستور به این نتیجه میرسیم که زمانی که تریستور با فرمان گیت روشن می شود دیگر نمی توان آن را با استفاده از گیت خاموش کرد و در این حالت همانند دیود هدایت می کند. تریستور تنها در صورتی خاموش می شود که با توجه به ولتاژ و جریان های مدار جریان آند منفی شود. بعد از خاموش شدن تریستور جریان آند صفر می شود، پس در صورتی که بخواهیم از این عنصر جهت طراحی کلید مد نظر استفاده کنیم در مدت زمان بین دو پالس تریستور ها خاموش می شوند و نیاز داریم دائما به گیت تریستور فرمانی را به منظور روشن شدن دوباره اش بدهیم و این کار تلفات سوئیچینگ را زیاد می کند و طراحی کنترلر و مدار درایو را پیچیده تر می کند و همینطور سرعت کلید زنی در تریستورها کم است، عدم کنترل خاموشی تریستور بوسیله گیت آن می تواند نقطه ضعف این قطعه برای عدم انتخابش باشد از طرفی ظریب حرارتی تریستور منفی است و اگر تعدادی از آنها را با هم موازی کنیم تقسیم جریان متعادلی را نخواهیم داشت و امکان دارد تعدادی از آنها در طی کار بسوزند، امکان بعدی استفاده از ماسفت قدرت می باشد، در ماسفت ها اگر ولتاژ گیت سورس به اندازه کافی بزرگ باشد، این قطعه کاملا روشن بوده و بصورت یک سوئیچ تقریبا بسته عمل می کند. *MOSFET* زمانی خاموش می شود که ولتاژ گیت سورس آن کمتر از ولتاژ گیت سورس آستانه باشد. *MOSFET* ها برای اینکه در حالت روشن باقی بمانند نیاز به ولتاژ گیت سورس پیوسته با دامنه مناسب دارند پس مدار کنترل کننده ماسفت بایستی جهت روشن ماندن ماسفت ولتاژ

دائمی را به گیت ماسفت اعمال کند. مهمترین نقطه ضعف ماسفت ها نسبت به تریستورها توانایی کمشان در بلوکه کردن ولتاژهای بالا و تحمل جریان های بالا می باشد و توان کمی دارند و همینطور افت ولتاژ حالت وصل آن نسبت به بقیه عناصر الکترونیک قدرت بالا می باشد و تلفات توان حالت وصل آن بالا می باشد و تنها مزیت آن توانایی کار کردن آن در فرکانس های بالا می باشد. امکان دیگر استفاده از *GTO* ها می باشد، *GTO* همانند تریستور با اعمال سیگنال جریانی در زمان کوتاه به گیت قابل روشن شدن است و بدون جریان گیت می تواند در حالت روشن باقی بماند. اما برخلاف تریستورهای معمولی، *GTO* را می توان با اعمال ولتاژ منفی گیت-کاتد خاموش نمود و به این ترتیب جریان منفی بزرگی در گیت ایجاد نمود. این جریان منفی گیت تنها لازم است به مدت چند میکروثانیه (در زمان قطع) از گیت عبور کند، اما دامنه آن باید خیلی بزرگ باشد. این دامنه معمولا در حدود یک سوم جریان آند در حالت قطع است. از طرف دیگر *GTO* هم مانند تریستور یک کلید یک جهته است و جریان در آن همیشه از آند به سمت کاتد برقرار می شود و اگر بخواهیم جریان دوطرفه داشته باشیم باید دو تریستور را به صورت برعکس با هم موازی کنیم. و این امر تعداد *GTO* و هزینه طراحی را به نسبت بقیه عناصر خیلی زیاد می کند زیرا *GTO* قطعه گرانی است و از طرف دیگر به دلیل طراحی مدار اسنابر جهت قطع بار سلفی هزینه طراحی را باز هم زیاد تر می کند و سرعت پایین کلید زنی این عنصر نسبت به بقیه عناصر الکترونیک قدرت آن را جهت استفاده در طرح مد نظر در اولویت های پایینی قرار می دهد ولی تلفات هدایتی آن نسبت به بقیه عناصر کمتر است و ضریب حرارتی مثبت آن باعث می شود که بتوان تعداد زیادی از آنها را با هم موازی کرد و در جایی که بخواهیم از تریستور استفاده کنیم در صورتی که بخواهیم کنترل بهتری روی سوئیچ داشته باشیم بهتر است از *GTO* استفاده کنیم. امکان دیگر استفاده از ترانزیستورهای قدرت (*BJT*) است. *BJT* ها قطعاتی هستند که با استفاده از جریان کنترل می شوند و جریان بیس آنها باید بصورت پیوسته تامین شود تا قطعه در حالت وصل باقی بماند و برای کنترل آن به مدار کنترلی پیچیده تری نیاز داریم و برخی معایب این ساختار عبارتند از  $V_{CE(sat)}$  بالا و سرعت سوئیچینگ پایین است و رنج معمولی از ولتاژ و جریان که این عنصر می تواند در آن کار کند رنج پایینی است و بیشترین رنج کاری آن 1400 ولت و 100 آمپر می باشد که برای کاربری های خاص استفاده می شود و به صرفه نیست که از آن در طراحی سوئیچ مذکور استفاده کنیم. امکان دیگر و بهترین انتخاب استفاده از *IGBT* است، به دلیل آنکه مصالحه بسیار خوبی بین سرعت و نحوه عملکرد این قطعه اعم از توانایی بلوکه کردن ولتاژهای بالا و کنترل جریان های بالا و پالسی وجود دارد می توان از آنها در طراحی کلید های پالسی استفاده کرد. همچنین این عنصر به دلیل

کنترل پذیری خوبی که دارد با فرمانی که به گیت داده می شود به آسانی روشن و خاموش می شود و نیاز به طراحی کنترلر پیچیده ای نخواهیم داشت و از این لحاظ هم دارای مزیت است. زمان روشن شدن و خاموش شدن در *IGBT* در حدود 1 میکرو ثانیه می باشد و سرعت سوئیچینگ بسیار خوبی را دارد و ولتاژ و جریان نامی آنها گاهی به 6500 ولت و 1000 آمپر می رسد و به دلیل ضریب حرارتی مثبت آن در نوع NPN می توان تعداد زیادی از آنها را با هم موازی کرد و تقسیم جریان متعادلی را داشت.

## 9-1 مقدمه ب (سوییچ های مکانیکی)

منظور از یک کلید قدرت، وسیله ای است که بتواند مدار الکتریکی فشار قوی را در شرایط عادی و شرایط خطا (با زمان تعریف شده محدود) قطع و وصل نماید و در این حالت طوری عمل کند که خود آسیب ندیده و شبکه نیز به نحو مطلوبی کنترل شود. کلیدهای قدرت برای قطع جریانهای عادی و اتصال کوتاه طراحی می شوند. آنها مانند کلیدهای بزرگی رفتار میکنند که توسط شستی های محلی و یا سیگنالهای مخابراتی توسط سیستم حفاظت از دور می توانند باز و یا بسته شوند. بنابر این، کلیدهای خودکار در صورتی که جریان و ولتاژ خط فرکانس و غیره از حد معینی که از پیش تنظیم شده است تنظیم شود، قطع می گردند.



شکل 1-12: انواع کلید های قدرت

کلید های فشار قوی تنها یک وسیله ایجاد ارتباط یا جدا کننده ارتباط بین مولد ها و ترانسفورماتور ها با مصرف کننده ها و سیستم ها انتقال انرژی نمی باشند. بلکه وظیفه اصلی آنها حفاظت دستگاه ها و سیستم های الکتریکی در مقابل اضافه جریان ها (بار زیاد و اتصال کوتاه ها) می باشند. بنابراین این کلید

ها باید هر نوع جریانی اعم از جریان های کوچک (جریانهای خازنی خطوط) و غیره تا بزرگترین جریانی که ممکن است در شبکه بوجود آید (جریان اتصال کوتاه) را از خود، بدون تاثیر پذیری از اثرات حرارتی و یا دینامیکی عبور دهد.

در ضمن نوعی از کلیدها، (کلیدهای قدرت) باید قادر باشند تا هر نوع جریانی را با هر شدتی در کوتاه ترین مدت قطع یا وصل نمایند و همچنین کلیدهای قدرت باید قادر باشند در حالت قطع هر نوع ولتاژی که بین دو سر باز کلید برقرار باشد بدون کوچکترین احتمال قوس الکتریکی تحمل کنند.

کلیدهای قدرت در حالت های مختلف باید دارای شرایط و مشخصاتی باشند:

- در حالت بسته: همه کلیدهای قدرت باید در مقابل عبور جریان بار و یا اتصال کوتاه از خود مقاومت قابل ملاحظه نشان ندهند و دارای استقامت الکتریکی، دینامیکی و حرارتی مطمئن بر خوردار باشند.

- در حالت باز: باید قادر به تحمل ولتاژهای موجود بین دو کنتاکت خود باشد.

- کلیدها باید از نظر عایقی کاملاً ایزوله باشند و دارای کمترین نقصان عایقی در برابر شبنم و

آلودگی های سطحی روی کلید، گازها و بخارات متصاعد از خود کلید باشند.

- کلیدهای فشار قوی باید بتوانند مدار را در ضمن جریان باز کنند.

## 10-1 انتخاب کلید قدرت

- ولتاژ نامی کلید که معمولاً برابر ولتاژ شبکه ای است که کلید در آن نصب می شود و می تواند

در حدود 15٪ هم از ولتاژ شبکه کوچکتر باشد. اغلب به خاطر به وجود آوردن اطمینان بیشتر در استحکام

شبکه از کلیدی استفاده می شود که ولتاژ نامی آن از ولتاژ شبکه قدری بزرگتر باشد.

- جریان نامی که مساوی با بزرگترین جریان کار معمولی شبکه است.

- قدرت نامی قطع کلید که باید با قدرت اتصال کوتاه در محل کلید مطابقت کند.

- نوع فرمان وصل کلید: دستی-الکتریکی و یا کمپرسی توسط هوای فشرده

- طریقه نصب کلید: کشویی-ثابت

- نوع قطع کننده اتوماتیک: قطع کننده پریمر یا قطع کننده زکوندر

- برای نصب در شبکه آزاد یا سر پوشیده

- یکی دیگر از مشخصات مهم کلید ، زمان تاخیر در قطع کلید است . این زمان بر حسب تعریف عبارت است از حد فاصل زمانی بین لحظه فرمان قطع توسط رله مربوطه و آزاد کردن ضامن قطع کلید تا خاموش شدن کامل جرعه . این زمان در کلیدهای مدرن امروزی به 0/05 ثانیه می رسد که تقریباً 0/02 ثانیه آن برای قطع جرعه مصرف می شود . کلیدهای قدرت امروزی برای در حدود 25000 قطع و وصل ساخته می شوند و باید سالیانه یک بار یا پس از هر 3000 بار قطع و وصل یک بار سرویس و مورد بازدید اساسی قرار گیرند .

## 11-1 انواع کلید های قدرت

- کلید های بدون قابلیت قطع زیر بار (سکسیونرها)
- سکسیونر های قابل قطع زیر بار
- کلید های با قابلیت قطع زیر بار (دژنکتورها)

### 11-1-1 سکسیونرها

سکسیونر ها یا ایزولاتور ها وسیله ای برای ارتباط دستگاهها و سیستم های برقی و اصولاً در جایی به کار برده می شوند که بدون ولتاژ کردن آن قسمت مد نظر باشد . قطع و وصل این نوع از کلید ها نباید باعث قطع یا وصل جریان شود ، یعنی قطع و وصل این کلید ها باید بدون جرعه باشد زیرا این کلید ها فاقد جرعه خاموش کن می باشند و ممکن است به کلید آسیب برساند.

سکسیونر باید در حالت بسته یک ارتباط گالوانیکی محکم و مطمئن در کنتاکت هر قطب برقرار سازد و مانع افت ولتاژ شود . لذا باید مقاومت عبور جریان در محدوده سکسیونر کوچک باشد تا حرارتی که در اثر کار مداوم در کلید ایجاد میشود از حد مجاز تجاوز نکند . این حرارت توسط ضخیم کردن تیغه و بزرگ کردن سطح تماس در کنتاکت و فشار تیغه در کنتاکت دهنده کوچک نگهداشته می شود . در ضمن موقع بسته بودن کلید نیروی دینامیکی شدیدی که در اثر عبور جریان اتصال کوتاه بوجود می آید . باعث لرزش تیغه احتمالاتی شدن آن نگردد . از این جهت در موقع شین کشی و نصب سکسیونر دقت باید کرد تا تیغه سکسیونر در امتداد شین قرار گیرد . بدین وسیله از ایجاد نیروی دینامیکی حوزه الکترومغناطیسی جریان اتصال کوتاه جلوگیری بعمل آید .

## موارد استعمال سکسیونر:

همانطور که گفته شد اصولاً سکسیونرها وسائل ارتباط دهنده مکانیکی و گالوانیکی قطعات و سیستم های مختلف می باشند و در درجه اول به منظور حفاظت اشخاص و متصدیان مربوطه در مقابل برق زدگی کار برده می شوند . بدین جهت طوری ساخته می شوند که در حالت قطع یا وصل محل قطع شدگی یا چسبندگی بطور واضح و آشکار قابل رویت باشد.

از آنجایی که سکسیونر باعث بستن یا باز کردن مدارالکتریکی نمی شود برای باز کردن یا بستن هر مدار الکتریکی فشار قوی احتیاج به یک کلید دیگری به نام کلید قدرت خواهیم داشت که قادر است مدار را تحت هر شرایطی باز کند و سکسیونر وسیله ای برای ارتباط کلید قدرت و یا هر قسمت دیگری از شبکه که دارای پتانسیل است به شین می باشد. طبق قوانین متداول الکتریکی جلوی هر کلید قدرتی از 1 کیلوولت به بالا و یا هر دو طرف در صورتیکه آن خط از هر دو طرف پتانسیل می گیرد سکسیونر نصب می گردد . برای جلوگیری از قطع و یا وصل بی موقع و در زیر بار سکسیونر معمولاً بین سکسیونر و کلید قدرت چفت و بست «مکانیکی یا الکتریکی» به نحوی برقرار می شود که با وصل بودن کلید قدرت نتوان سکسیونر را قطع و یا وصل کرد. بر خلاف کلید های هوایی ، سکسیونرها قادر به قطع هیچ جریانی نیستند. آنها فقط در جریان صفر باز و بسته می شوند . این کلیدها اصولاً جدا کننده هستند که ما را به جدا کردن کلیدهای قدرت روغنی ، ترانسفورماتورها ، خطوط انتقال و امثال آنها از شبکه زنده قادر می سازند. سکسیونرها از لوازمات تعمیراتی و تغییر مسیر جریان می باشند.

## انواع سکسیونر:

1. سکسیونر تیغه ای یا اره ای
2. سکسیونر کشویی
3. سکسیونر دورانی
4. سکسیونر فیچی ای یا پانتوگراف

که بدلیل در این پروژه هدف توضیح و بررسی کلید های قطع زیر بار می باشد از توضیح در مورد سکسیونرها خود داری می کنیم .

## 1-11-2 دژنکتورها

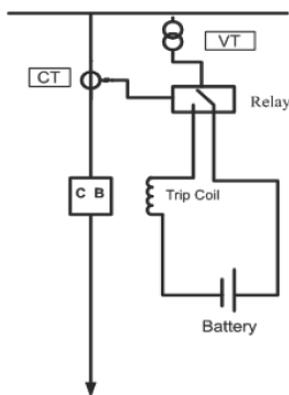
این کلیدها قادر هستند مدار الکتریکی را در ضمن عبور هر نوع و هر شدت جریانی قطع و هر شبکه اتصالی شده را به مولد برق وصل نماید به شرط عبور جریان مجازی که برای کلید در نظر گرفته شده است .

کلیدهای قدرت برای قطع جریانهای عادی و اتصال کوتاه طراحی می شوند. آنها مانند کلیدهای بزرگی رفتار می کنند که توسط سویچ های محلی و یا سیگنالهای مخابراتی توسط سیستم حفاظت از دور می توانند باز و یا بسته شوند . بنابر این ، کلیدهای خودکار در صورتی که جریان و ولتاژ خط از مقدار تنظیم شده کمتر و یا بیشتر شوند ، دستور قطع را از طریق رله دریافت می کند.

قسمتی از مدار شکن ها که به یک فاز متصل شده اند قطب نامیده می شود . مدار شکنی که برای سیستم سه فاز مناسب باشد مدار شکن سه قطبی نامیده می شود . هر قطب مدار شکن از یک یا چند قطع کننده جریان با محفظه های قطع کننده قوس الکتریکی تشکیل شده اند . قوس الکتریکی ایجاد شده توسط کنتاکتهای حامل جریان توسط یک واسطه مناسب و تطبیق تکنیکهای مناسب برای خاموشی قوس الکتریکی قطع می گردد . کلید های فشار قوی می تواند بر اساس واسطه خاموش کننده قوس الکتریکی طبقه بندی شود .

در حین شرایط عملیاتی ، مدار شکن می تواند توسط یک اپراتور ایستگاهی به منظور نگهداری و کلید زنی باز یا بسته شود . در شرایط غیر عادی با بروز نقص فیوز های خودکار خطا را احساس کرده و مدار های قطع برق مدار شکن را می بندند.

مدار قطع یک کلید قدرت (مدار شکن) به صورت زیر می باشد :



شکل 1-13: مدار قطع یک کلید قدرت

مهمترین کلید های قدرت به شرح زیر می باشند :

1. کلید قدرت روغنی (OCBS)
2. 7. کلید خلاء
3. کلید کم روغن
4. کلید اکسپانزیون
5. کلید قدرت هوایی
6. کلید گاز سخت (جامد)
7. کلید قدرت SF6

که هر کدام از کلید های بالا در فصل های بعد به صورت کامل بررسی خواهند شد.

## 12-1 عملکرد قطع جرقه در کلید های فشار قوی

روش های خاموش کردن قوس در کلید های فشار ضعیف بصورت زیر است:

- استفاده از یک کلید فرعی با یک مقاومت سری
- ازدیاد طول قوس
- تشدید خنک کردن
- مقطع کردن قوس
- خاموشی در نقطه صفر
- خازن موازی با کنتاکتها

- خلا

- روغن

روش های خاموش کردن قوس الکتریکی در کلید های فشار قوی بصورت زیر است:

- خاموش کننده های جامد

- خاموش کننده مایع

- خاموش کننده گازی

روش های مختلفی که تا به امروز در ساختمان کلید های فشار قوی استفاده شده اغلب زائیده تجربیات و مشاهدات مخترعان آن در جریان و فشار مخصوص و معینی بوده است که بعدها تکمیل تر شده است . در تقسیم بندی کلید های فشار قوی و تعیین روش های مختلف خاموش کردن جرقه در کلید های فشار قوی عوامل مختلفی در قطع جرقه موثر واقع می شوند به طوریکه ممکن است هر کدام از آن عوامل نتوانند به تنهایی قادر به قطع جرقه باشند .

به طور کلی در طبقه بندی کلید ها می توان سه عامل مختلف را در نظر گرفت که عبارتند از :

- مدت اثر

- عامل موثر

- تهیه عامل موثر

## 1-12-1 طبقه بندی کلیدها از لحاظ خاموش کننده قوس الکتریکی

### 1-1-12-1 مدت اثر

در برخی از کلید های قدرت ، خاموش کننده جرقه در زمانی که جریان از صفر و یا حوالی آن می گذرد وارد عمل می شود و در برخی دیگر عامل خاموش کننده جرقه به محض صدور فرمان قطع به کلید و جدا شدن تیغه ها از هم وارد عمل می شوند و در تمام مدتی که جریان از قوس عبور می کند در قطع جرقه موثر می باشد . این اثر مداوم برای خنک کردن و خارج کردن الکترونها و حامل های بار در ضمن این که باعث انجام کار بیشتر و صرف انرژی بیشتری می شود ، باعث می شود که استقامت مکانیکی و حرارتی کلید نیز به مقدار قابل ملاحظه ای بالا برده شود .

ولی در عوض به خاطر موثر بودن عامل قطع جرقه در ضمن عبور جریان و تاثیر مداوم آن به روی قوس الکتریکی (جزئیات فیزیکی قوس ) باعث می شود که قطع جرقه به محض عبور جریان از صفر راحت

تر و مطمئن تر صورت بگیرد . زیرا عمل خنک کردن و خارج کردن حاملهای بار هرچه ستون جرقه لاغر تر باشد سریع تر انجام می گیرد . در بعضی از کلید ها که به کلید های خود کار معروفند ، کلید انرژی لازم جهت خاموش کردن قوس را خود به وجود می آورند یعنی قسمتی از انرژی حرارتی قوس را صرف خاموش کردن قوس می کنند .

#### 2-1-12-1 عامل اثر

بطور کلی در تمامی کلید های قدرت به استثنای کلید های خلاً برای خنک کردن و خارج کردن حامل های بار از یک ماده اولیه مناسبی استفاده می شود که ممکن است جامد ، مایع و یا گاز باشد . در کلید های خلا جرقه در یک محفظه خلا ایجاد می شود و عامل جرقه ایون ها بی هستند که در اثر بخار شدن فلز الکترودها بوجود می آیند و سپس این ایون ها با الکترون های آزاد جدار محفظه کلید مجدداً ترکیب و از بین می روند .

در تمامی کلید های دیگر مواد موجود در اطراف جرقه در اثر حرارت زیاد (50000-10000) در جه سانتیگراد تجزیه می شود . زیرا هیچ عنصر جامد یا مایعی وجود ندارد که بدون تجزیه شدن این شدت گرما را تحمل کند . لذا همیشه اطراف جرقه بدون توجه به نوع ماده ای که قبل از جرقه الکترودها را احاطه کرده بود ، گاز جمع می شود ، و لذا بدلیل اینکه هدایت حرارتی گاز ها بسیار خوب است ، لذا وجود این گاز ها در اطراف قوس برای خنک کردن آن بسیار مفید می باشد .

#### کلید ها از نظر نوع عایقی به شرح زیر می باشد :

#### 1-2-1-12-1 خاموش کننده جامد

خاموش کننده جامد سه نوع می باشد :

1. خاموش کننده ای که در اثر حرارت می سوزد :

این خاموش کننده ها به خاموش کننده دانه ای معروف می باشند مثل خاک کوارتز که اغلب در فیوز های فشار قوی با قدرت قطع زیاد به کار برده می شوند .

2. خاموش کننده ای که حرارت را جذب می کند بدون اینکه تغییر شکل دهد :

این وسیله ها در تماس مستقیم با جرقه قرار می گیرند و ظرفیت حرارتی زیاد آن به عنوان یک خنک کننده موثر واقع می شود . در این نوع کلید ها بخصوص از سرامیک و سופال استفاده می شود و برای تسریع در خنک کردن جرقه ، قوس بوسیله نیروی الکترودینامیکی قوسی که توسط یک حوزه مغناطیسی شدید بوجود می آید به دیواره های این عنصر خاموش کننده فشرده می شود و برای جلوگیری از حرارت موضعی و محلی جرقه ، قوس را خیلی سریع در روی سطح دیواره سرامیک می دوانند .

3. خاموش کننده ای که در اثر حرارت تبخیر می شود :

در این نوع کلید قشر بسیار نازکی از سطح عایق که در تماس با جرقه الکتریکی می باشد (آمینو پلاست ها و انواع فیبر ها ) در اثر حرارت شدید قوس تبخیر می شود و گاز متصاعد شده اطراف قوس را می پوشاند و باعث خاموش شدن جرقه می شود . به این کلید ها کلید با گاز جامد گویند .

## 1-2-1-12-2 خاموش کننده مایع

مایعاتی که در قطع جرقه موثر می باشند عبارتند از روغن و آب .

1- روغن:

اولین مایعی که در سطح ساختمان کلید های فشار قوی به کار برده شد روغن معدنی بود . در ابتدا فکر می کردند که بمحض عبور جریان از صفر ، روغن جانشین ستون قوس بین دو کنتاکت می شود و به علت داشتن استقامت الکتریکی خیلی زیاد (80-120 KV/cm) قوس نمی تواند برگردد و همیشه خاموش می ماند .

اما در بررسی های بعدی متوجه شدند که با عبور جریان روغن بخار شده و گاز حاصله (هیدروژن ) اطراف الکتروود ها را می گیرد . با توجه به اینکه گاز ها بخصوص هیدروژن دارای هدایت گرمایی بسیار خوبی می باشند در خنک کردن قوس بسیار موثر می باشند یکی از معایب روغن های معدنی اشتعال پذیری آنها می باشد . که این عیب در صورتی که کلید قادر به قطع جرقه باشد مشکلاتی را برای اشتعال روغن فراهم نمی کند و تاثیری در قطع جرقه ندارد . اما در این دهه اخیر به دلیل بالا رفتن جریان های اتصال کوتاه و بزرگ شدن قدرت الکتریکی شبکه کلید های روغنی قادر به تحمل قدرت شبکه یا جریان های اتصال کوتاه نمی باشند . به همین دلیل همزمان با بالا رفتن قدرت شبکه تلاش برای دستیابی به یک روغن نسوز نیز افزایش یافته است ، که از این گونه مواد می توان به فلور سلیکن اشاره کرد که ضمن

نسوز بودن تمامی خواص روغن معدنی را دارا می باشد و لی به دلیل هزینه زیاد آن استفاده از آن مرسوم نمی باشد .

## 2- آب :

یکی دیگر از مایعات که برای خاموش کردن جرقه بسیار مناسب می باشد آب است ولی به علت اینکه آب عایق الکتریکی نمی باشد ، در کلید های فشار قوی استفاده نمی شد ، تا اینکه در سال 1930 کارخانه زیمنس موفق به ساخت نوعی کلید قدرت آبی به نام اکسپانزیون شدند .

در این کلید آب در تماس با قوس که دارای حرارت بسیار زیادی می باشد به اکسیژن و هیدروژن تجزیه شده و قسمت اعظم آن به بخار آب تبدیل می شود .

یکی از معایب آب تبخیر سریع آن در محل های خشک و گرم و نقطه انجماد آن در درجه حرارت صفر می باشد و بدین جهت نمی توان از آن به طور خالص در محیط آزاد و در مناطقی که در جه برودت هوا از صفر می گذرد استفاده نمود .

برای پایین بردن نقطه انجماد از ضد یخ استفاده می شود که با اضافه کردن تنها 20 در صد می توان از آب در مناطق سرد سیر به راحتی استفاده نمود . با اضافه کردن 70 در صد ضد یخ دمای انجماد آب از 70- پایین تر می آید و لی اشتعال پذیری آن بیشتر می شود .

مخلوط آب و ضد یخ در کلید ایجاد دوده نمی کند و به همین دلیل در کلید هایی با قطع و وصل زیاد بسیار مناسب می باشد . همان گونه که بیان شد بدلیل عدم خاصیت عایقی آب دو تیغه کلید در حالت قطع نمی توانند در داخل آب قرار گیرند بلکه باید پس از قطع جرقه یک فاصله هوای نیز برای کلید در نظر گرفت .

## 3-2-1-12-1 خاموش کننده گازی

### 1- ازت :

ساختمان کلید های فشار قوی اصولاً در ابتدا با کلید های هوایی شروع شد . در این کلید ها ماده خاموش کننده جرقه در همان هوایی است که اطراف کنتاکت های کلید را پوشانده و موثرترین آنها گاز ازت می باشد که در هوا وجود دارد .

البته بدلیل اینکه گاز ازت دارای هدایت گرمایی چندان خوبی نمی باشد اثر خنک کننده آن نیز کم می باشد و به همین دلیل استفاده ساده آن در کلید های قدرت زیاد مرسوم نیست . لذا در کلید های

قدرت از هوای فشرده یا گاز دیگری که دارای اثر خنک‌کنندگی است استفاده می‌شود. اما در کلیدهای با قدرت کم از هوا بدلیل ارزانی یک عامل موثر و عالی می‌باشد.

2- هیدروژن:

اثر خنک‌سازی و خاموش‌کنندگی گاز هیدروژن از ازلت بسیار بیشتر می‌باشد زیرا هیدروژن دارای قابلیت هدایت حرارتی بهتری از گازهای دیگر می‌باشد. ولی بدلیل گرانی کلیدی با ماده اولیه هیدروژن ساخته نمی‌شود. بلکه از عایق‌هایی که در هنگام جرقه زدن تولید هیدروژن می‌کنند استفاده می‌شود. مانند عایق‌های مایع و جامد که در زمان جرقه زدن از خود گاز هیدروژن تولید می‌کنند.

3- گاز SF6:

در دهه اخیر از گازی به نام SF6 که دارای قابلیت هدایت الکتریکی بسیار عالی می‌باشد استفاده می‌شوند. خواص عایقی بسیار عالی این گاز یکی دیگر از عوامل استفاده این گاز در کلیدهای قدرت است. اما بدلیل گران بودن این گاز معمولاً در کلیدهای قدرت از این گاز در یک مدار بسته استفاده می‌کنند.

### 3-1-12-1 تهیه عامل موثر

کلیدهای فشار قوی از لحاظ نوع تهیه عامل موثر در خاموش‌کننده جرقه به دو دسته خاموش‌کننده خارجی و خاموش‌کننده داخلی تقسیم نمود.

در کلیدهایی که ماده خاموش‌کننده مستقل از شدت جریان و حرارت قوس می‌باشد (تابع شدت جریان نیست) باید این ماده از خارج تهیه شود. این کلیدها کلیدهایی با خاموش‌کننده خارجی می‌باشند. (کلیدهای هوای فشرده).

در کلیدهای دیگر که شدت اثر خاموش‌کننده تابع شدت جریان می‌باشد باید ماده خاموش‌کننده توسط خود جرقه و قوس الکتریکی ایجاد شود. لذا این کلیدها را کلید با خاموش‌کننده خودی می‌نامند. (کلید روغنی).

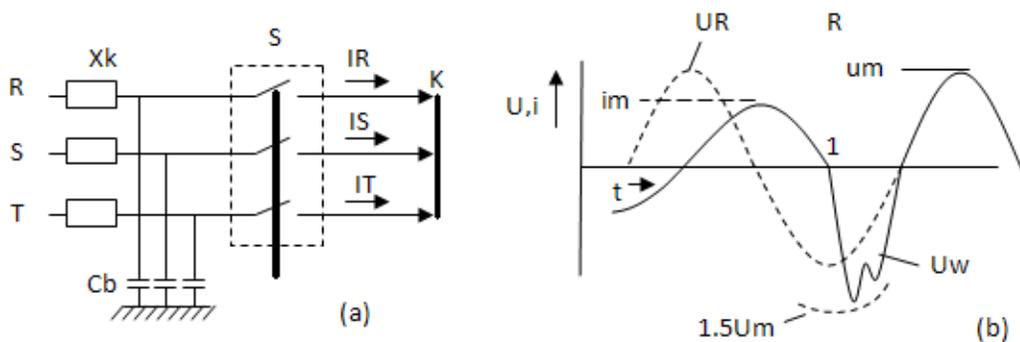
ساختمان بعضی از کلیدها طوری می‌باشد که در جریان‌های کم و متوسط نوع اول و در جریان‌های زیاد نوع دوم موثر واقع می‌شود. در نتیجه این کلیدها جریان‌های کم را نیز به خوبی و سرعت جریان‌های زیاد قطع می‌کنند. و از این جهت دارای مزیت بهتری نسبت به کلیدهایی هستند که فقط از یک نوع تولید ماده خاموش‌کننده بهره می‌گیرند. کلیدهایی که ماده خاموش‌کننده را متناسب با شدت جریان قوس ایجاد می‌کنند قادر هستند تا آنجا که نیرو و استقامت مکانیکی و دینامیکی کلید اجازه می‌

دهد جریان های زیاد را بسیار سریع قطع و جرقه ها را خاموش کنند. ولی بر عکس در جریان های کم به خاطر اینکه اثر ماده خنک کننده و خاموش کننده نیز کم است ، عمل قطع جرقه طولانی تر می شود . مثالا در کلید های روغنی هر چه شدت جریان بیشتر باشد گاز بیشتری متصاعد شده و فشار داخلی منبع کلید نیز بیشتر می شود . ولی در جریان کم بعلت تولید گاز هیدروژن کم جرقه ممکن است مدتی ادامه یابد . در کلید های که ماده خاموش کننده از خارج در اختیار کلید قرار می گیرد ، چون جرقه جریان های کم نیز براحتی و با اطمینان کامل خاموش می شود ، لذا این کلید ها فاقد حد پایین می باشند. ولی مسلما قطع جریان های زیاد در این کلید بسیار مشکل تر از کلید هایی که ماده خاموش کننده جرقه را خود متناسب با شدت جریان تهیه می کند .

### 13-1 کلید های قدرت یا دژنکتور (کلید روغنی )

#### 1-13-1 دژنکتور

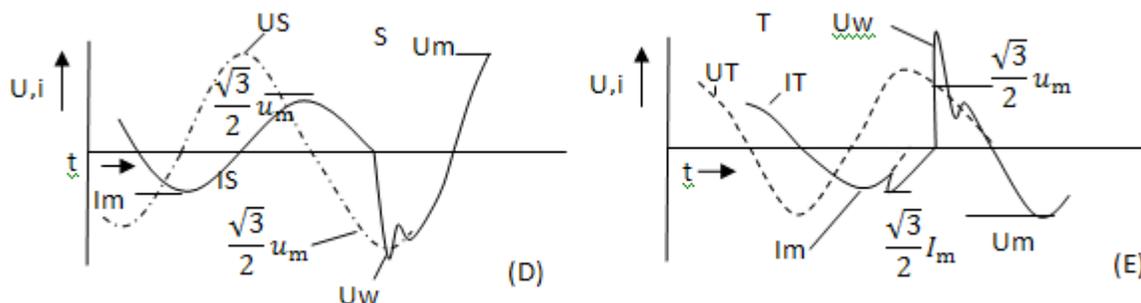
دژنکتور کلیدی است که می تواند در موقع لزوم جریان عادی شبکه و در موقع خطا جریان اتصال کوتاه و جریان اتصال زمین و یا هر نوع جریانی با هر اختلاف فازی را سریع قطع کند. در اتصال سه فاز که یک حالت خاصی از بار متعادل است با اینکه فرمان قطع به هر سه قطب کلید یک جا و در یک زمان داده می شود ، ابتدا فقط یکی از قطبها (در شکل (a) قطب R) که جریان آن اول مرتبه از صفر می گذرد قطع می شود. (در شکل (b) نقطه (1) ) .



شکل 14-1 : حالت قطع بار متعادل سه فاز

در این لحظه اتصال کوتاه سه فاز تبدیل به یک اتصال کوتاه دو فاز می شود که پس از گذشت 0.25

پریود جرقه در این دو قطب همزمان از بین می رود و اتصالی قطع می گردد (شکل (b,D,d))



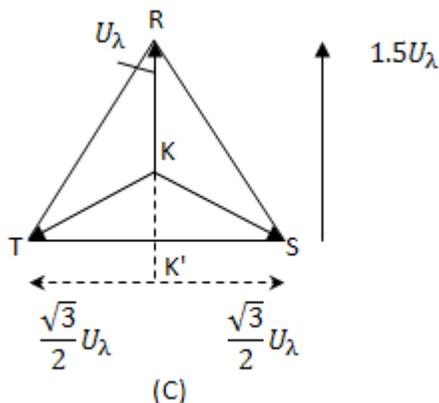
شکل 0-15: تبدیل اتصال کوتاه سه فاز به دو فاز

زمان خاموش شدن جرقه در دو قطب بعدی معادل صفر شدن جرقه با نقطه 2 مشخص شده است . در

یک شبکه با صفر آزاد نقطه اتصال کوتاه شده  $\underline{k}$  که قبل از خاموش شدن جرقه فاز  $\underline{R}$  مرکز صفر ستاره را

تشکیل می داد ، بعد از خاموش شدن جرقه در فاز  $\underline{R}$  از مرکز ستاره  $\underline{M_p}$  به نقطه  $\underline{k}$  در وسط بردار

همبستگی ولتاژ  $ST$  نقل مکان می یابد. (شکل (C)).



شکل 0-16 : بعد از خاموش شدن قوس

در نتیجه ولتاژ دو سر قطبی از کلید که جرقه آن زودتر از قطبهای دیگر خاموش شده به مقدار

ماکسیمم  $1.5 U_Y$  می رسد که البته این ازدیاد ولتاژ آنقدرها در استحکام کلید موثر نیست . ولی جرقه

طولانی تر در دو قطب دیگر در استقامت الکتریکی و حرارتی کلید بسیار موثر واقع می شود. در یک شبکه

با نقطه صفر زمین شده ، اگر اتصال سه فاز با تماس در یک شبکه با نقطه صفر زمین شده ، ایجاد شود ،

پس از خاموش شدن جرقه در یکی از فازها یعنی قطع یکی از اتصالی ها با زمین ، ولتاژ بین دو کنتاكت

آن قطب از  $U_Y$  تجاوز نمی کند . اگر اتصال کوتاه در نقطه دوری از کلید در شبکه باشد ، ممکن است در موقع قطع کلید برگشت ولتاژ  $U_w$  (ولتاژ ضربه ای که با نوساناتی به ولتاژ اصلی با فرکانس 50 منتهی می شود ) در تحت شرایط خاصی با ضریب زاویه زیاد شروع به نوسان کند (شروع جهش آن عمودی می باشد) در این حالت فاصله بین دو قطب کلید بیشتر تحت تاثیر ولتاژ قرار می گیرد تا جریان وطبیعی است در صورتیکه دو شبکه با اختلاف فاز 180 درجه با هم کوپله شوند. در بین دو قطب هر فاز کلید کوپلاژ اختلاف سطح  $2 U_Y$  موثر خواهد افتاد که عمل قطع جرقه را به مراتب مشکل تر می کند.

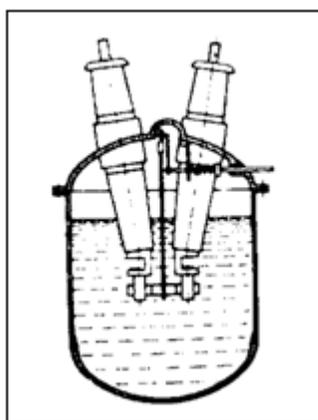
جدول زیر مشخصات کلید های نرم شده را نشان می دهد در این جدول I دیژنگتور برای نصب در شبکه سر پوشیده و F برای نصب در شبکه آزاد می باشد .

جدول 3-1: مشخصات کلید های نرم شده

سری	ولتاژ نامی KV	ماکسیمم ولتاژ مجاز شبکه KV	قدرت قطع نامی MVA	جریان نامی									
				400 A	630 A	800 A	1250 A	1600 A	2000 A	2500 A	4000 A	6300 A	
10	6	7.2	100	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			150	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-
			250	-	I	-	I	-	-	-	-	-	-
			350	-	I	-	I	I	-	-	-	-	-
			500	-	-	-	I	I	-	I	I	-	-
	10	12	150	I	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			250	-	I	-	-	-	-	-	-	-	-
			350	-	I	-	I	I	-	-	-	-	-
			500	-	I	-	I	I	-	-	I	I	-
			750	-	-	-	I	I	-	I	I	I	-
1000	-	-	-	-	-	-	-	I	I	I			
20	20	24	250	I	I	-	-	-	-	-	-	-	
			350	-	I	-	-	-	-	-	-	-	
			500	-	I	-	I	-	-	-	-	-	
			1000	-	-	-	I	-	-	-	-	-	
30	30	36	500	-	I	-	-	-	-	-	-	-	
			750	-	-	-	I	-	-	-	-	-	
			1000	-	-	-	I	-	-	I	-	-	
			1500	-	-	-	I	-	-	I	-	-	
60	60	72.5	1000	-	I.F	-	-	-	-	-	-		
			1500	-	I.F	-	I.F	-	-	-	-		
110	110	123	2500	-	-	I.F	-	-	-	-	-		
			3500	-	-	-	I.F	-	-	-	-		
			5000	-	-	-	F	F	-	-	-		
			7500	-	-	-	-	F	-	-	-		
150	150	170	3500	-	-	F	-	-	-	-			
			5000	-	-	-	F	-	-	-			
220	220	245	5000	-	-	F	-	-	-	-			
			7500	-	-	-	F	-	-	-			
			10000	-	-	-	F	-	F	-			
380E	380	420	15000	-	-	-	-	F	F	-	-		

## 1-13-2 کلید روغنی (OIL CIRCUIT BREAKER)

این کلید که در سالهای 1910 تا 1925 از متداول ترین کلیدهای فشار قوی با قدرت زیاد به شمار می رفت ، امروزه توسط کلیدهای مدرن دیگر ( گازی و کم روغن ) بخصوص در اروپا بکلی کنار زده شده است. در کلید روغنی در درجه اول از روغن بعنوان عایق استفاده می شود و بدین جهت هر چه فشار الکتریکی شبکه بیشتر باشد حجم روغن داخل کلید نیز زیادتر می گردد . بطوریکه وزن روغن در کلید روغنی 220 KV نزدیک به 20 تن می رسد و همین حجم زیاد روغن یک از بزرگترین معایب این نوع کلید بخصوص در موقع آتش سوزی است .



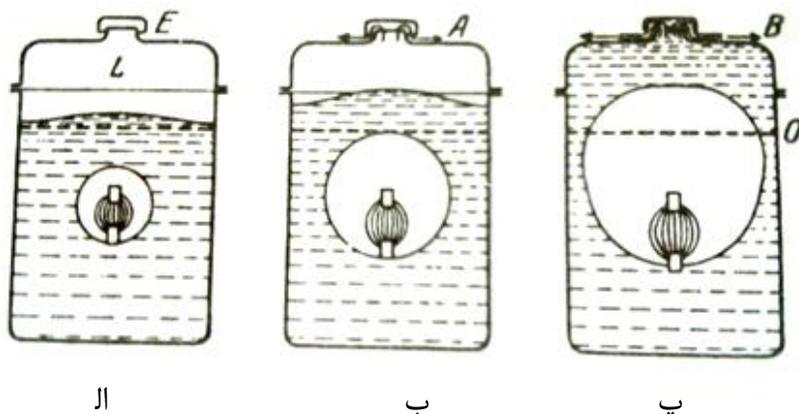
شکل 1-17 : کلید روغنی

شکل بالا یک کلید روغنی یک قطبه را بطور شماتیک نشان می دهد . در این کلید بخاطر اینکه از مکانیسم خاصی برای خاموش کردن جرقه استفاده نشده است ، جرقه در اثر ازدیاد طول باید از بین برود و بدین جهت کنتاکتهای کلید طوری ساخته شده اند که جرقه در دو نقطه بطور متوالی شروع شده ، و با یک حرکت قطع کلید ، مدار جریان در دو نقطه قطع گردد . بدین جهت این کلید از دو کنتاکت ثابت که به انتهای دو مقره عبور نصب شده تشیل شده است و تیغه متحرکی که توسط اهرم عایقی فرمان می گیرد ، ارتباط بین دو کنتاکت ثابت را فراهم می کند.

در موقع قطع کلید و جدا شدن تیغه از کنتاکت همانطور که گفته شد تراکم جریان در یک نقطه از کنتاکت ها بقدری زیاد می شود که باعث شروع جرقه در آن محل می گردد . در اثر حرارت شدید جرقه ، روغن تجزیه شده و ایجاد گاز می کند که بصورت حبابی اطراف جرقه را می پوشاند . با جدا شدن هرچه

بیشتر تیغه از کنتاکت ثابت و طویل شدن جرقه ، حباب گازی نیز بزرگتر و بزرگتر می گردد و در ضمن اینکه مقداری از حرارت جرقه صرف بخار کردن و تجزیه روغن می شود، در اثر ازدیاد بیش از حد طول جرقه ، قوس می شکند و جرقه قطع می شود .

شکل زیر نحوه بزرگ شدن حباب گاز در سه مرحله را نشان می دهد .

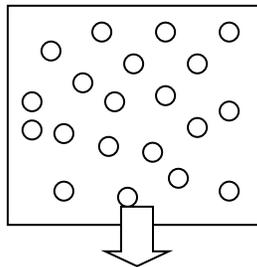


شکل 1-18 : نحوه بزرگ شدن حباب گاز در سه مرحله

با توجه به اینکه حجم حباب بستگی به شدت جرقه و شدت جرقه به شدت جریان بستگی دارد که کلید قادر به قطع آن می باشد ، باید فضای خالی بالای روغن L متناسب با شدت جریان اتصال کوتاه شبکه باشد . زیرا اگر شدت جریان اتصال کوتاه بحدی باشد که جرقه قبل از رسیدن سطح روغن به زیر در پوش منبع خاموش نشود ، امکان ترکیدن منبع در اثر ازدیاد فشار داخلی بسیار زیاد می باشد . (فشار معمول منبع کلید 7 اتمسفر می باشد .)

کلید قدرت علاوه بر اینکه جریان اتصال کوتاه را قطع می کند باید قادر باشد مدار اتصال کوتاه شده ای را نیز به شبکه برق وصل کند یا بعبارت دیگر در زیر اتصال کوتاه وصل شود. از آنجا که در این حالت در لحظه وصل ، جریان اتصال کوتاه ضربه ای شدیدی از کلید می گذرد ، در اطراف کلید حوزة الکترومغناطیسی شدیدی ایجاد می شود ( شکل زیر ) ، که سبب لرزش کنتاکتها و کم شدن سطح تماس کنتاکتها می شود که نتیجه آن بوجود آمدن نقطه جوشهایی در سطح کنتاکتها و از کار افتادن کلید می شود . برای جلوگیری از این ارتعاشات بخصوص در کلیدهای فشار قوی هر قطب کلید دارای محفظه احتراق مخصوص بخود می باشد.

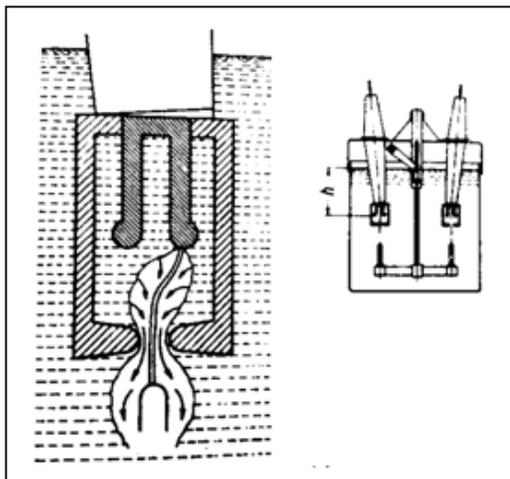
### خطوط الکترومغناطیسی



### نیروی الکترودینامیکی

شکل 1-19: حوزه الکترومغناطیسی اطراف کلید

اشکال زیر نمونه ساده از محفظه های احتراق می باشد :



شکل 1-20: زیر نمونه ساده از محفظه های احتراق

همان طور که مشاهده می شود کنتاکت ثابت از دو تیغه موازی تشکیل شده است تا در موقع عبور جریان اتصال کوتاه در ضمن وصل کلید ، حوزه های الکترومغناطیسی باعث فشرده شدن تیغه ها به میله کنتاکت دهنده شده و مانع لرزش آن شود . در ضمن موقع عبور قطع کلید حباب های گازی که در محفظه احتراق ایجاد می شود ، به محض خارج شدن میله از محفظه با سرعت به طرف خارج کشیده می شوند و در قطع سریع جرقه موثر واقع می شود . شکل زیر یک کلید سه فاز 10KV را با قطع کننده های پریمر نشان می دهد .



شکل 1-21 : کلید سه فاز 10KV را با قطع کننده های پریمر

طرح های مختلف بر اساس سلیقه نوع نیازمندیها ی کارخانه های سازنده و طراحان وجود دارد مانند :  
cross jet type , explosion pot , baffle pot و غیره . بسیاری از مدار شکن های روغنی دارای دستگاه های کنترل قوس خاص می باشند که بیشتر آنها به اصول محفظه فشار ساده مبتنی شده اند که برای بهبود ظرفیت قطع جریان با یک سری اصطلاحات معینی همراه شده است .

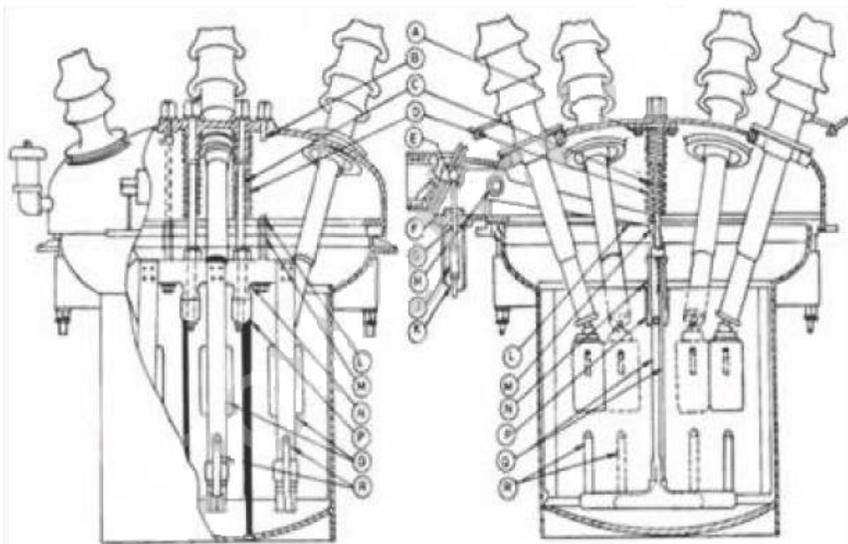
بسته به اصول کار محفظه های فشار خاص ، مدار شکنها به انواع زیر طبقه بندی می شوند :

1. مدار شکن های روغنی ضربه ای با قطع کننده های شبکه ای

2. قطع کننده با دو محفظه فشار قوس

3. مدار شکن های روغنی با محفظه فشار جهت محوری

شکل زیر نمای مکانیزم قرار گرفتن کنتاکتهای 33kv نوع okm ساخته شرکت الکترونیکی انگلیسی M/S را نشان می دهد .

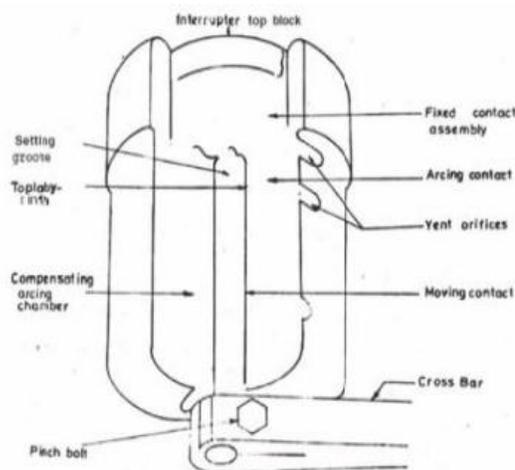


شکل 1-22: مکانیزم قرار گرفتن کنتاکتهای 33kv نوع okm

کنتاکتها توسط یک اهرم (L) به صفحه بالایی بسته و از طریق رابطه های M به پل بالا و N متصل شده است . اهرم (L) بر روی شفتی (H) که به یاتاقان ها در صفحه بالایی متصل شده است قرار گرفته است . این اهرم یک میله مهار (G) که بوسیله یک کوپلینگ (J) قابل تنظیم به میله فنری X متصل شده است . یک واشر روغن (F) برای جلوگیری از نشتی از صفحه بالایی به خوبی درز بندی شده است و یک بازوی شاخص به وسیله یک خار (E) بر روی انتهای متحرک اهرم کار گذاشته شده است . پل بالا رونده (N) میله های بالا رونده را نگه می دارد و کنتاکتهای متحرک (R) به شکل عمودی بر روی میله های راهنمای (I) حرکت می کنند . میله های (D) به قسمت انتهای بالای میله راهنما بسته شده اند و خود میله های راهنما نیز به وسیله گیره هایی (A) که از جنس فنر شتاب دهنده (C) است به صفحه بالایی متصل شده اند . این فنر ها به واسطه ضربه وارد شده حاصل از بسته شدن پل بالا فشرده می شوند و نیروی پرتابی از قطع مدار در حین باز شدن ایجاد می شود . این مکانیزم از حرکت بیش از اندازه در هنگامی که مدار در حالت بسته است توسط گیره های B قابل تغییر در صفحه بالایی ، جلوگیری می کند . در انتهای پایینی هر میله راهنما یک ضربه گیر (P) روغن وجود دارد .

این ضربه گیر های روغنی از حرکت رو به پایین و حرکت آزادانه کنتاکتها جلوگیری می کند . قطعه در حال کار از این نوع مدار شکن محفظه سیلندری است که به عنوان یک قطع کننده است . نمای یک

قطع کننده در شکل زیر نشان داده شده است . این قطع کننده به قطع کننده جریان که در قسمت بالا است وصل شده است .



شکل 1-23: نمای یک قطع کننده

درون محفظه صفحه های تقسیم نارسانا به شکل مارپیچ و مسیر های جریان روغن می باشد . قطعه سوار شده در بالای محفظه یک کنتاكت حامل جریان چند شاخه ای فنری است . انگشتیهایی که به شکل مدور می باشند برای در گیر شدن با کنتاكت متحرکی که از نوع میله یک تکه شمعی است ، می باشند. انگشتیهای چند شاخه ای متناوب برای تشکیل کنتاكتهای جرقه زن ایجاد شده است . این قطعات حامل جریان قوسی می باشند و از قسمت های حامل جریان طبیعی در مقابل سوختن محافظت می کنند .

#### 1-2-13-1 مزایا و معایب کلید های روغنی

معایب این کلید ها عبارتند از :

1. حجم و ابعاد بزرگ
2. حمل و نقل مشکل
3. اشغال فضای زیاد
4. قابل اشتعال بودن و در نتیجه آتش سوزی
5. قدرت خاموش کنندگی بر اساس جریان
6. تحمل قدرت های کم

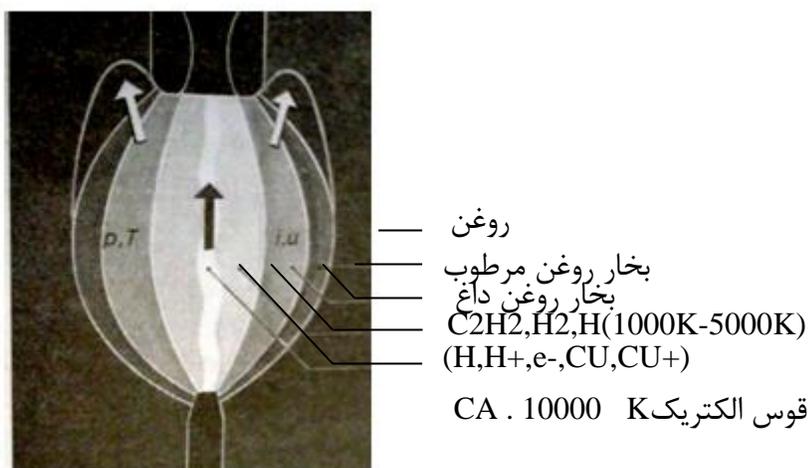
مزایا :

1. هزینه کم و ارزانی ماده خاموش کننده(روغن)
2. با توجه به معایب فوق و پیشرفت تکنولوژی تغییرات اساسی در ساختمان کلیدها روغنی بوجود آمد و در نتیجه آن کلید های کم روغن طراحی و ساخته شد .

### 1-13-3 کلید های کم روغن

برای تشریح طرز کار کلید کم روغن وقایعی که در موقع جرقه زدن در روغن اتفاق می افتد و عواملی که در خاموش شدن جرقه موثر هستند ذیلاً" توضیح داده می شود .

در موقع جدا شدن دو کنتاکت کلید زیر بار در محفظه روغنی جریانی که از آخرین نقطه تماس فلزی کنتاکتها می گذرد باعث گداخته شدن و تبخیر فلز (مس) می شود و با آن پایه واساس جرقه یا قوس الکتریکی بین دو کنتاکت جدا شده گذاشته می شود. حرارت زیاد جرقه روغن اطراف قوس را تبخیر و ایجاد یک حباب گازی می کند . (شکل زیر).



شکل 1-23 : حباب گازی ناشی از تخلیه الکتریکی

این حباب گازی از لایه های مختلفی تشکیل شده که از دیدگاه روغن بطرف مرکز قوس عبارتند از:

1. لایه بخار مرطوب روغن

2. لایه بخار داغ و خشک

3. لایه اطراف قوس مرکب از  $C_2H_2$  و  $H_2$  و H با حرارتی در حدود 1000 تا 5000 درجه کلوین وهمینطور که بعدا خواهیم دید وجود همین اتم ها و مولکولهای هیدروژن است که با خواص خوب حرارتی که دارند روغن را برای قطع جریان مناسب می کنند.

در وسط حباب جریان بصورت یک قوس الکتریکی عبور می کند و قوس قسمتی از گاز است که بعلت درجه حرارت زیادی که دارد ( 5000 - 10000 K ) باعث ایونیزاسیون حرارتی می شود و قسمتی از اتمهای هیدروژن را یونیزه کرده و یک مجرای هادی بین دو کنتاکت کلید برای عبور جریان بوجود می آورد. حرارت شدید قوس توسط گازهای مجاور که بیشتر از مولکول و اتم هیدروژن تشکیل شده و دارای قابلیت هدایت حرارتی بسیار زیاد است (20 برابر هوا) بخارج یعنی به روغن مجاور پس داده می شود. این عمل تبادل حرارتی را می توان با به جریان انداختن گاز که دارای فشار P و درجه حرارت T است به محفظه دیگری با درجه حرارت  $T_0$  و فشار  $P_0$  تشدید نمود .

با توجه به توضیحات بالا عمل قطع جریان باید به صورت زیر انجام گیرد .

در نزدیکی صفر شدن جریان ، قدرت حرارتی جرقه که برابر حاصلضرب جریان I در اختلاف سطح UL می باشد ، تقریبا صفر می شود . اگر در این موقع هدایت حرارت بخار به خارج بسیار سریع انجام گیرد ، حرارت اطراف جرقه با صفر شدن جریان آنقدر پایین می آید که قوس هدایت الکتریکی خود را از دست می دهد و جرقه خاموش می شود . اما برای این تبادل حرارتی فقط یک فرصت بسیار کوتاهی که جریان از صفر یا حوالی صفر می گذرد موجود است . به این ترتیب باید عناصری را که جرقه را در بر دارند باید آنچنان قابلیت حرارتی داشته باشند که بتوانند سریع و بی درنگ حرارت را به خارج منتقل کنند که از این گاز ها می توان به هیدروژن متصاعد شده از روغن اشاره نمود . بفرض اینکه هدایت حرارتی با موفقیت انجام گیرد و جرقه هم قطع شود ، برای نگهداشتن این وضعیت و جلوگیری از برگشت جرقه در نیم موج بعدی ، شرط دیگری نیز نیاز می باشد و آن استقامت الکتریکی بین دو کنتاکت می باشد . به این معنی که حباب گازی که بین دو کنتاکت موجود است گرچه دیگر هادی نمی باشد ولی باید دارای آن چنان استقامت الکتریکی باشد که در اثر برگشت ولتاژ شبکه به محض صفر شدن جریان بین دو کنتاکت باعث انهدام الکتریکی و برگشت مجدد قوس نشود .

UD اختلاف سطحی که باعث جرقه مجدد می شود که به آن اختلاف سطح شکست الکتریکی عایق می‌گوییم. این پارامتر برای گازها در فاصله بین دو الکترود بستگی به تراکم گاز دارد (P/T). بنابراین برای جلوگیری از برگشت جرقه باید در زمان صفر شدن جریان تراکم گاز زیاد باشد تا استقامت بین کنتاکت‌ها که فاصله آنها خیلی زیاد نشده استقامت الکتریکی مناسب را پیدا کند. و برای این کار باید علاوه بر افزایش فشار روغن باید همزمان با به جریان انداختن و خارج کردن گاز گرم در خنک کردن آن کوشید.

### 1-13-3 قطع جریان زیاد

با توجه به توضیحات بالا می‌توان نتیجه گرفت که:

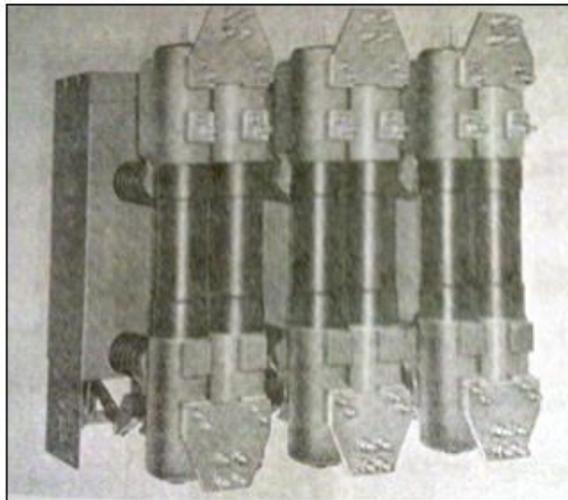
ایجاد فشار و به جریان انداختن گاز

خارج کردن گازهای گرم و خنک کردن آن

تنها راه حل صحیح قطع جرقه در روغن می‌باشد.

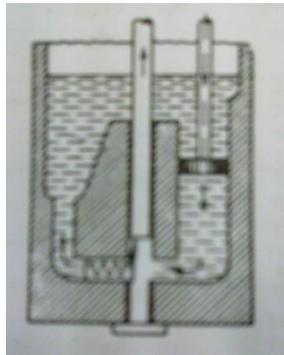
قطع سریع جرقه علاوه بر اینکه برای تاسیسات بسیار مهم و با ارزش می‌باشد در ساختمان خود کلیدها نیز بسیار مهم است زیرا با قطع سریع جرقه باعث کاهش اثرات حرارتی و مکانیکی کمتری بر کلید و اجزای آن می‌شود.

شکل زیر یک کلید کم روغن سه فاز را برای جریان نامی 3150A نشان می‌دهد.

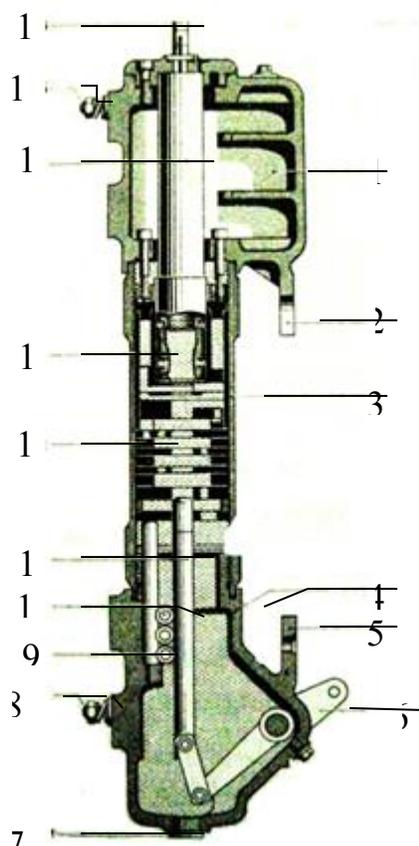


شکل 1-23: زیر یک کلید کم روغن سه فاز 3150 آمپر

در موقع قطع جریان کم که مسلماً باعث می شود جرقه نیز قدرت کمی داشته باشد ممکن است مقدار گازی که در این زمان بسیار کوتاه (حداکثر نیم پریود) ایجاد می شود آنقدر کم باشد که نتواند فشار لازم برای بالا بردن استقامت الکتریکی بین دو کنتاکت را بوجود آورد. لذا در اثر برگشت ولتاژ، جرقه مجدداً شروع می شود و تا حدود چند پریود نیز ادامه خواهد داشت. در این زمان باید دو کنتاکت به اندازه کافی از هم جدا شده باشند. چنانچه دیده می شود قطع جرقه در یک چنین کلیدی تابع شدت جریان می شود، بطوریکه هرچه جریان اتصال کوتاه بیشتر باشد جرقه زودتر خاموش می گردد. از این جهت در اغلب کلیدها برای کوتاه کردن زمان جرقه در جریان کم قسمت فوقانی محفظه را خیلی کوچک درست می کنند، در نتیجه تراکم گاز زیاد شده جرقه زودتر قطع می گردد و بهمین منظور با خارج شدن میله کنتاکت دهنده از محفظه جرقه گیر، باندازه فضای هم حجم آن روغن از مجراهای عرضی وارد محفظه می شود. در بعضی از کلیدهای کم روغن برای قطع سریع جریان کم از یک پمپ مخصوصی استفاده می شود. شکل زیر مقطع یک قطب کلید را نشان می دهد.



شکل 1-24: مقطع یک قطب کلید



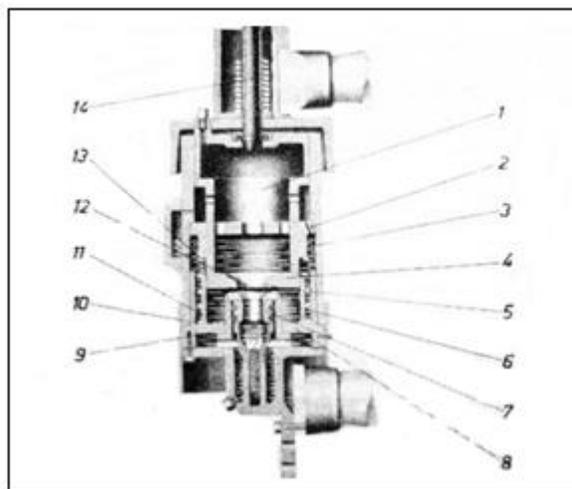
شکل 1-25: طریقه پمپاژ روغن به طور ساده

در این شکل:

1 - فضای تبادل فشار، 2 - فلانش بالایی، 3 - پوسته خارجی محفظه احتراق، 4 - قسمت تحتانی کلید، 5 - فلانش تحتانی، 6 - دسته قطع و وصل کلید، 7 - پیچ مخصوص خارج کردن روغن، 8 - محل اتصال شین یا کابل، 9 - میله هدایت کننده متحرک، 10 - بلبرینگ کنتاکت دهنده، 11 - میله کنتاکت دهنده (قطب متحرک کلید)، 12 - مجراهای عرضی روغن، 13 - کنتاکت ثابت (اغلب لاله ای شکل یا به شکل انگشت دانه)، 14 - میله هادی جریان، 15 - محل ورود کابل یا شین، 16 - لوله شیشه ای روغن نما.

چنانچه مشاهده می شود، روغن در کلید کم روغن بعنوان ایزولاسیون و باعایق کننده بین فازها و یافاز و زمین بکاربرده نمی شود، بلکه از آن فقط بعنوان خاموش کننده جرقه استفاده می شود و به همین جهت مقدار روغنی که در کلیدهای کم روغن بکار برده می شود نسبت به کلیدهای روغنی خیلی کمتر است. مثلاً مقدار روغن در یک کلید روغنی KV و MVA در حدود کیلوگرم است در

صورتیکه در کلید کم روغن با همان مشخصات فقط ۸ کیلو گرم روغن کافی است. شکل زیر یک نوع دیگر محفظه احتراق کلید کم روغن را که در آن ورود روغن به محل جرقه (خنک کردن و دیونیزه کردن) توسط خود جرقه و بصورت انژکسیونی (تزریق) انجام می شود نشان می دهد.



شکل 1-26: نوع دیگر محفظه احتراق کلید کم روغن

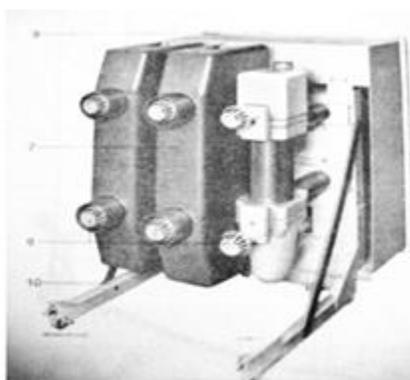
در این کلید محفظه احتراق با فشار زیاد (6) توسط صفحه (4) از محفظه انبساط (1) جدا شده است. کنتاکت ثابت انگشت دانه ای (لاله ای شکل 7) توسط پیستون بالا رونده (8) در محفظه احتراق قرار دارد. عملکرد این کلید به این گونه می باشد که به محض جدا شدن میله کنتاکت دهنده (14) از کنتاکت ثابت لاله ای شکل (7) و ایجاد جرقه مقداری از روغن داخل محفظه تبخیر می شود. از آنجا که میله (14) هنوز مجرای روغن محفظه انبساط را باز نکرده، نما تواند گاز ایجاد شده راه به محفظه انبساط پیدا کند و از فشار آن کاسته می شود. در نتیجه فشار زیادی در محفظه ایجاد شده که این فشار تابع جریان می باشد.

این فشار روی سطح (11) و از طریق کنتاکت لاله ای شکل روی سطح (9) پیستون موثر واقع می شود. چون روغن روی قسمتی از سطح فوقانی پیستون (10) که فنر مارپیچی را نیز شامل است، به وسیله مجرای 3 و سوراخ باریک 2 به محفظه انبساط بدون فشار راه دارد، فشاری که به سطوح 9 و 11 پیستون وارد می شود متفاوت خواهد شد. تفاوت فشارها باعث می شود پیستون (8) به طرف بالا فشرده شود و در نتیجه از کانال 5 روغن با شدت از اطراف میله (14) و قوس الکتریکی به داخل محفظه (14) تزریق شود که سبب خنک شدن جرقه و دیونیزه شدن حبابها و گازهای اطراف جرقه در زمان عبور جریان صفر شود. پس از اتمام جرقه، فنر (13) پیستون را مجدداً به محل اولیه خود بر می گرداند.

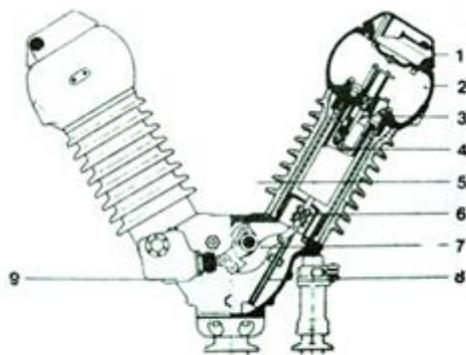
بدلیل موثر بودن این روش (خاموش کردن جرقه در نیم موج اول یا دوم) در بیشتر کلیدهای قدرت قطع زیاد استفاده می شود. در این کلیدها برای اینکه فشار روغن وابسته به جریان نباشد از یک پمپ مخصوص تشدید استفاده می کنند.

شکل 5-5 دژنکتور کشویی کم روغن (12 هزار ولت و 800 آمپر) ساخت ABB را نشان می دهد. کلید کم روغن برای هر ولتاژی تا 765 کیلوولت و قدرت قطع زیاد (50 GVA) ساخته می شود. کلیدهای ولتاژ زیاد (از 60 تا 110 هزار ولت) اغلب دارای قطع متوالی هستند و محفظه احتراق آنها معمولا در یک ایزولاتور بشکل 5-6 قرار دارد.

در ولتاژهای بالاتر می توان تعدادی از این کلیدها را بطور متوالی (سری) نصب کرد. شکل 5-7 یک چنین کلیدی را برای فشار 220 هزار ولت نشان می دهد.



شکل 1-27: دژنکتور کشویی کم روغن



شکل 1-28: کلیدهای ولتاژ زیاد



شکل 1-29: متوالی بستن کلیدها برای ولتاژ بالاتر

### 3-3-13-1 مزایا و معایب کلید های کم روغن

مدار شکن های با حجم روغن کم به ترانسفور ماتور های جریان جدا از نوع پیچی نیاز دارند . هنوز این نوع مدار شکن ها در همه ولتاژ ها از 33kV به بالا از نظر هزینه حتی همراه ترانسفور ماتور با مدار شکن های روغنی غربی رقابت می کند .

مزایا:

1. حمل و نقل آسان به واسطه وزن کم و اندازه کوچک
2. داشتن ساختار ساده که نصب و راه اندازی را ساده می کند .
3. نگهداری سریع و ساده

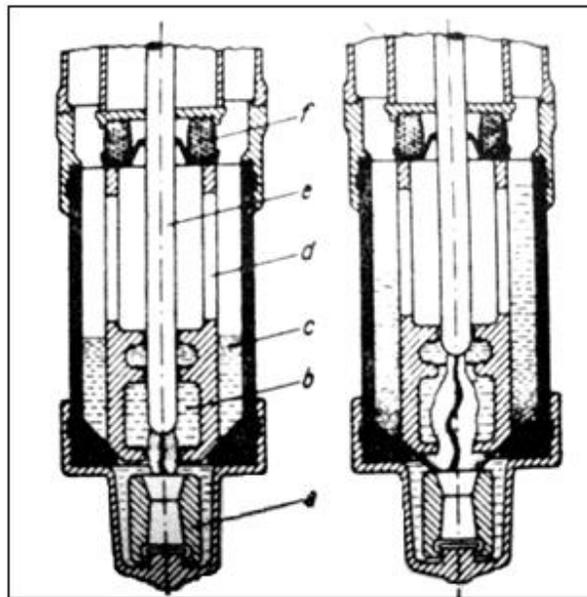
معایب:

نگهداری متوالی

به واسطه حجم کم روغن و آمادگی برای یونیزاسیون سریع ، احتمال بروز قطع و وصل بدلیل وجود نقص زیاد در این مدار ها وجود دارد . به دلایل زیادی تردید هایی درباره توانایی این نوع مدار شکن ها برای عمل باز و بستن بیان شده است ، هرچند این مدار شکن ها توسط سازندگان برای عمل باز و بستن سریع طراحی و ساخته شده اند .

## 14-1 کلید های اکسیپانزیون

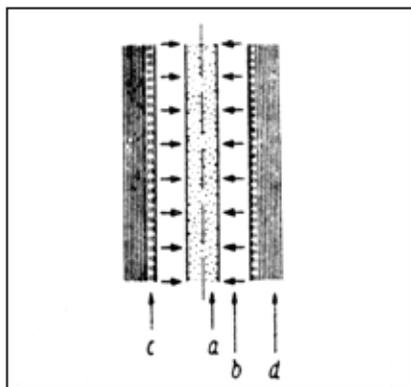
کلید اکسیپانزیون کلیدی است که در آن از آب بعنوان ماده خاموش کننده جرقه استفاده شده است و بهمین جهت اغلب کلید آبی نیز نامیده می شود. یکی از بهترین خواص این کلید این است که چون آب داخل محفظه احتراق قابل اشتعال نیست هیچگونه انفجاری کلید را تهدید نمی کند و مانند کلیدهای روغنی باعث آتش سوزی نمی شود. هر قطب کلید دارای یک محفظه احتراق مخصوص خود است که با مقداری آب و ماده ضد یخ پر شده است. شکل 1-6 حفظه احتراق یک قطب کلید را بطور شماتیک نشان می دهد.



شکل 1-30: محفظه احتراق یک قطب کلید

در موقع جدا شدن کنتاكت میله ای e از کنتاكت ثابت لایه ای شکل a یک قوس الکتریکی بین این دو کنتاكت برقرار می شود که در اثر حرارت زیاد آن، آب داخل محفظه احتراق b را تبخیر و تجزیه می کند. محفظه احتراق توسط دورینگ الاستیکی f در محل خود بطور ثابت نگهداشته می شود و در صورتیکه فشار داخل محفظه به علت تراکم گاز از حد معینی تجاوز کرد، محفظه احتراق قدری بطرف بالا کشیده می شود و مقداری از گاز داخل محفظه به بیرون راه پیدا می کند و در آب سرد محفظه c تقطیر می شود

. برای توضیح طرز کار کلید در موقع قطع جریان اتصال کوتاه شکل 6-2 را که در حقیقت قسمتی از محفظه احتراق است در نظر می گیریم .

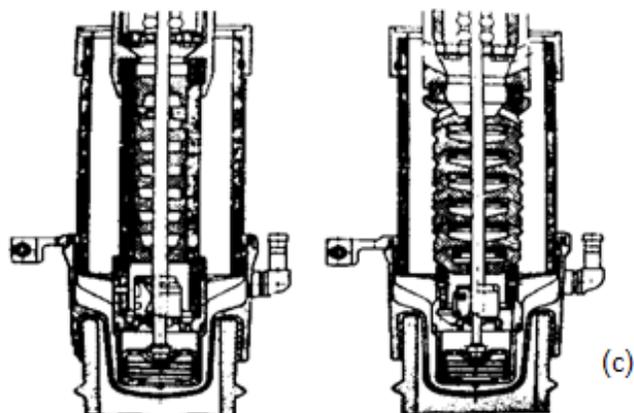


شکل 1-31: قطع جریان اتصال کوتاه

وقتی جرقه از داخل آب (d) می گذرد ، مقداری از آب تجزیه و تبخیر می شود (b) و به شکل ستونی اطراف قوس (a) را که مانند یک کانال هادی در داخل این ستون است می پوشاند تا موقعی که شدت جریان زیاد است ، انرژی حرارتی قوس نیز زیاد است و می تواند بطور دائم و پیوسته مقداری از آب را تجزیه کند . در نتیجه فشار و درجه حرارت گاز بحدی می رسد که مانع تجزیه مجدد آب می شود و لایه نازکی از سطح آب (c) با اینکه دارای درجه حرارت زیادی است در یک حالت پایدار و تعادل فشار و حرارت بصورت مایع باقی می ماند.

در نزدیکی عبور جریان از صفر ، تقریباً انرژی حرارتی قوس قطع می شود و علاوه بر اینکه دیگر عاملی برای تبخیر و تجزیه مجدد وجود ندارد ، گازهایی که تا کنون تحت فشار زیاد قرار داشتند در اثر افت حرارت به جریان می افتند ، بخصوص اگر محفظه احتراق مجرای عبور گاز بخارج را باز کرده باشد . چون گاز دیگری هم بوجود نمی آید ، فشار گاز سریعاً کم می شود . در نتیجه تعادل فشار و حرارت در قشر نازک آب گرم (c) (سطح تماس آب با گاز) بشدت بهم می خورد و باعث تبخیر آن می شود . (اکسپانزیون انجام می گیرد) این بخارها با قطرات آبی که از آب جدا می شوند با سرعت زیاد بداخل قوس الکتریکی رخنه می کنند و باعث خنک شدن سریع جرقه در تمام حجم قوس (طولی و سطحی) و دیونیزه کردن آن می شوند بطوریکه برگشت ولتاژ ، پس از قطع جرقه نمی تواند جرقه جدیدی پدید آورد . اگر کلید آبی با محفظه احتراق شکل 6-1 را روی مدار اتصال کوتاه شده ای ببندیم ، بین دو کنتاکت قبل از تماس فلزی از طریق هدایت آب ، تماس قوسی برقرار می شود و آب داخل محفظه احتراق را بشدت تجزیه و تبخیر می کند و مانع وصل صحیح کلید می شود . بهمین جهت باید عمل وصل بسیار سریع انجام گیرد . زمینس

برای جلوگیری از تجزیه آب در موقع وصل کلید آنرا طوری می سازد که در ضمن وصل کردن کلید ، محفظه احتراق بدون آب است و فقط در موقع قطع کلید آب بداخل محفظه تزریق می گردد. (شکل زیر)

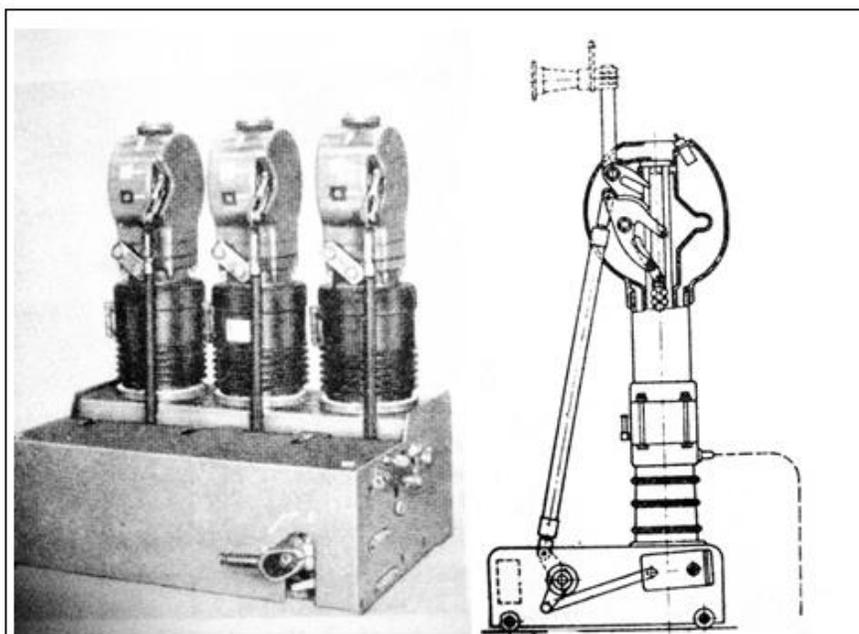


شکل 1-32 : محفظه احتراق بدون آب

در این کلید در زیر کنتکت ثابت لاله ای شکل یک پیستون قرار دارد ، که توسط فنر به بالا فشرده می شود . در موقع فرمان قطع به کلید ، ابتدا پیستون به طرف بالا کشیده می شود و مقداری آب انژکسیون مانند بداخل محفظه احتراق تزریق می شود .

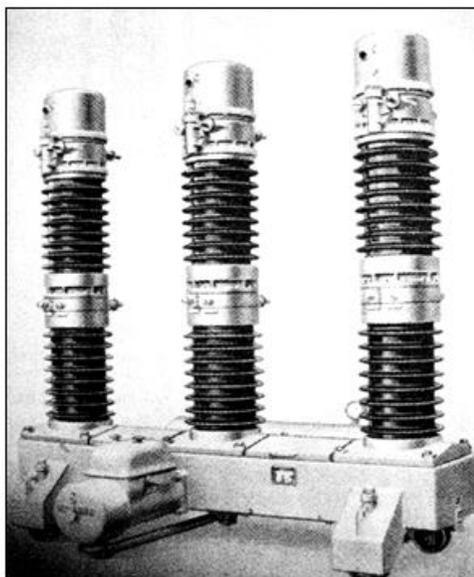
سپس با جدا شدن میله متحرک از کنتاکت لاله ای شکل و تولید جرقه ، آب داخل محفظه تبخیر و تجزیه می شود و چون راه خروج آن در ابتدا بسته است ایجاد فشار بسیار زیادی می کند . این فشار باعث بالا رفتن محفظه احتراق شده و گاز با سرعت از اطراف جرقه و کنتکت به خارج راه پیدا می کند و باعث خاموش شدن جرقه می شود .

شکل زیر یک نوع کلید اکسپانزیون را برای مصرف در شبکه محصور 10 kv با فرمان دستی و کمپرسی نشان می دهد .



شکل 1-33: یک نوع کلید اکسپانزیون

شکل زیر کلید اکسپانزیون 60 kv را با قدرت قطع 1500 میلیون ولت آمپر نشان می دهد.



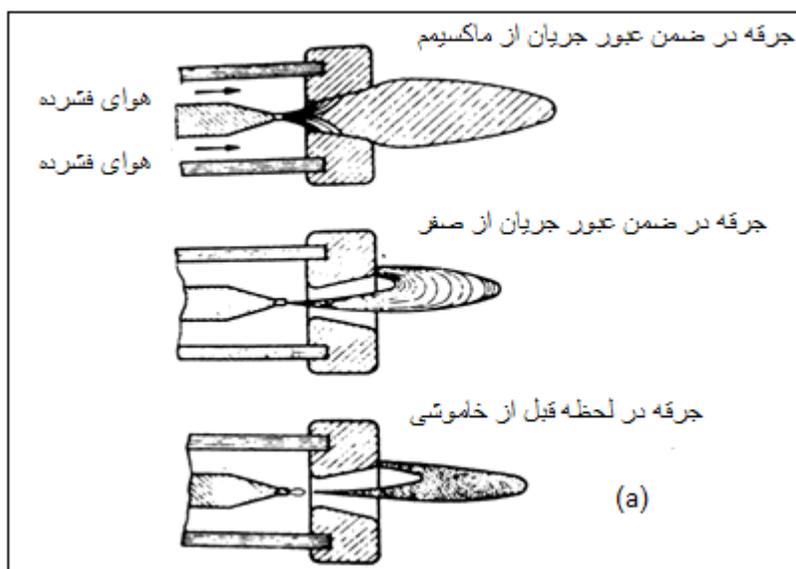
شکل 1-34: کلید اکسپانزیون 60 kv

در کلیدهای اکسپانزیون با ولتاژ زیاد بجای آب از روغن مخصوصی که نقطه اشتعال آن خیلی بالا است استفاده می شود.

## 15-1 کلید های هوایی

### 1-15-1 عملکرد

در تمام کلیدهایی که تا بحال شرح داده شد ماده اولیه خاموش کننده جرقه مایع است و چون در این نوع کلیدها عواملی که در خاموش کردن جرقه موثر هستند در اثر انرژی خود جرقه از تجزیه روغن تهیه و آماده می شوند ، همه آنها کم و بیش تابع شدت جریان زمان قطع هستند . بعبارت دیگر قدرت قطع جرقه تابع شدت جریان است ولی در کلید هوایی اولاً برای خاموش کردن جرقه و خارج کردن یونها ( دیونیزه کردن) و خنک کردن جرقه از هوای سرد تحت فشار استفاده می شود و در ثانی این تنها کلیدی است که قدرت خاموش کنندگی آن مستقل از جریان است و فقط تابع هوای کمپرس شده ایست که قبلاً در یک منبع ذخیره شده و با فشار ثابت و مقدار ثابت برای هر شدت جریانی بداخل محفظه احتراق هدایت می شود . لذا این کلیدها برخلاف کلیدهای دیگر که خود وسیله خاموش کردن جرقه را بوجود می آورند دارای زمان قطع بسیار کوتاهی هستند ، زیرا زمان لازم برای بوجود آوردن عامل موثر ، گرچه کوتاه مدت هم باشد از بین می رود . در کلیدهای هوایی بخصوص در فشار کم و متوسط ، کنتاکت ثابت معمولاً بصورت قیف ساخته می شود که در داخل آن کنتاکت میله ای متحرک جای می گیرد و با تماس با آن کلید بسته می شود . در موقع قطع کلید ، کنتاکت میله ای از کنتاکت ثابت (قیف) جدا می شود و بین این دو کنتاکت ابتدا در هوای ساکن موجود در محفظه ، جرقه حاصل می گردد . طول این قوس را حتی الامکان کوتاه نگه می دارند تا کار کلید کوچک شود . در ضمن باید فاصله دو کنتاکت بحدی باشد که پس از خاموش شدن جرقه این فاصله بتواند فشار برگشت شده روی دو کنتاکت را حفظ کند . بعبارت دیگر باید فاصله هوایی دو کنتاکت استقامت الکتریکی کافی برای ولتاژ شبکه را داشته باشد . بدین جهت وقتی قوس ، طول مناسب را پیدا کرد میله متحرک از حرکت باز می ایستد و هوای فشرده توسط باز شدن سوپاپ مربوطه به محل جرقه راه پیدا می کند و باعث می شود که جرقه پس از اولین یا دومین موج به محض صفر شدن جریان قطع شود (شکل زیر) .

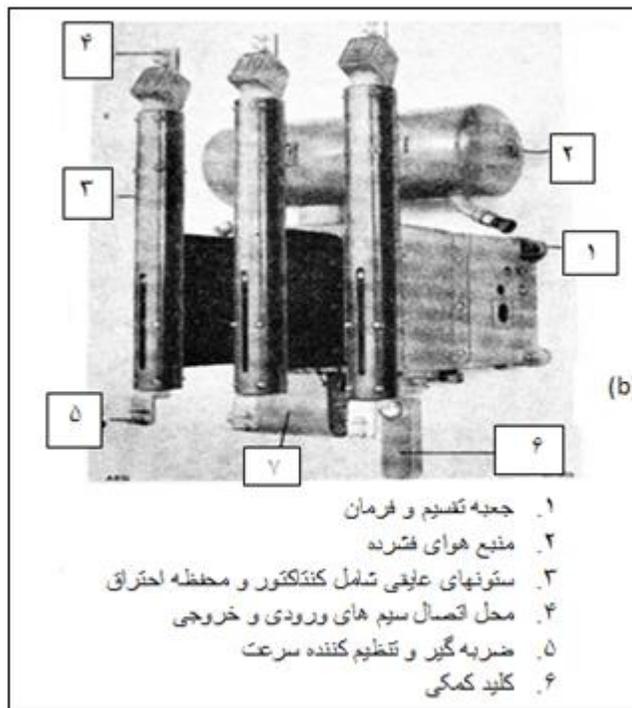


شکل 1-35: قطع شدن جرقه

جریان هوا تا موقعی ادامه می یابد که محفظه احتراق کاملا از گازهای یونیزه شده پاک شده باشد. در این موقع سوپاپ دریچه مخزن هوا را می بندد و میله کنتاکت دهنده تا انتهای مسیر خود پایین می آید و فاصله لازم برای اختلاف سطح شبکه را پیدا می کند.

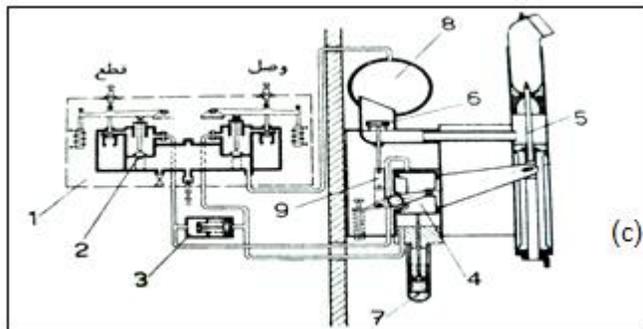
## 1-15-2 معایب

از معایب کلید هوایی می توان قطع جریان کوچک را در زمانی غیر از موقعی که جریان از صفر می گذرد نامید . زیرا همانطور که می دانیم در این حالت امکان بوجود آمدن ولتاژهای ضربه ای خیلی زیاد است . در ضمن چون ماده خاموش کننده از خارج هدایت می شود ، باید قبلا آماده باشد و بدین جهت باید کلید و متعلقات آن دائما تحت مراقبت و کنترل شدید قرار گیرند . بجاست که گفته شود کلید هوایی هر سال یکبار یا حداقل بعد از 3000 قطع و وصل احتیاج به یک سرویس و روغن کاری کامل دارد و پس از 10000 – 25000 قطع و وصل باید بکلی از هم جدا شده و بعضی از قسمت های متحرک آن تعویض و مرمت گردد . برای روغن کاری کلید از روغن کاملا تمیز و بیرنگ (وازلین خالص) استفاده می شود . شکل 2-7 کلید هوایی با محفظه احتراق سرپوشیده را نشان می دهد . این کلید برای شبکه محصور تا 30 kv ساخته می شود .



شکل 1-36: کلید هوایی با محفظه احتراق سرپوشیده

شکل 3-7 طرز کار کلید را بطور شماتیک نشان می دهد.

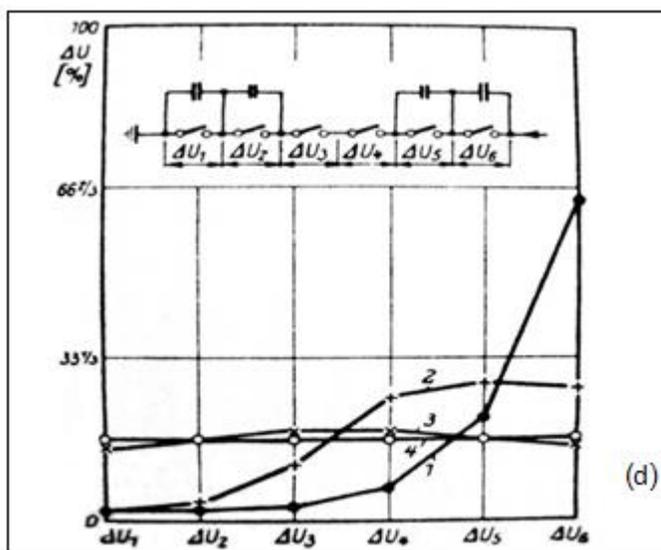


شکل 1-37: طرز کار کلید

در موقع قطع کلید با صدور فرمان قطع ، مجرای هوای فشرده 2 باز می شود (این عمل یا دستی یا با رله الکترومغناطیسی انجام می شود ) هوای فشرده به پیستون 4 فشار آورده آنرا به طرف پایین می راند و به این وسیله میله کنتاکت دهنده 5 از کنتاکت ثابت خود جدا و به طرف پایین کشیده می شود. در ضمن باز شدن کنتاکت ، سوپاپ 6 با بالارفتن میله و اهرم 9 مجرای ورودی هوا را از منبع 8 بداخل محفظه احتراق باز می کند . پس از خاموشی جرعه دريچه ورودی هوا توسط نیروی فنر که به اهرم 9 متصل است مجددا بسته می شود تا از هدر رفتن هوای فشرده جلوگیری کند .

تنظیم کننده روغنی 7 برای کنترل سرعت قطع و وصل و تنظیم طول قوس برای خاموش کردن جرقه می باشد. 3 قسمت تخلیه هوا می باشد.

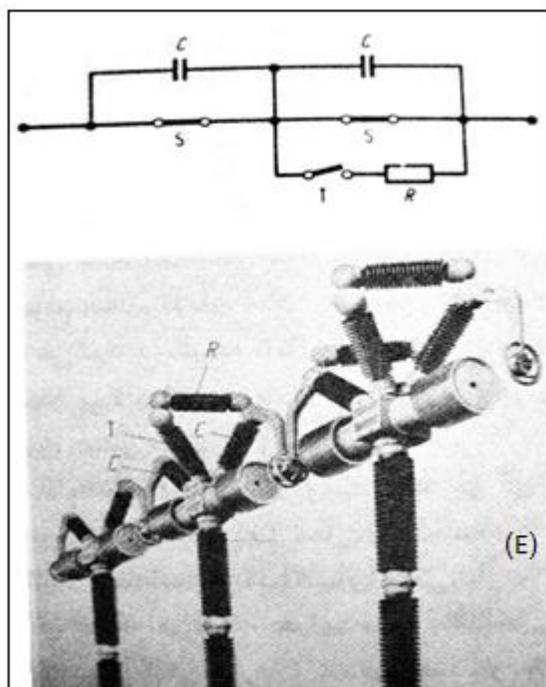
در فشارهای زیاد (از 110 kv به بالا) قطع میله کنتاکت دهنده از کنتاکت ثابت بطریق فوق با مشکلاتی مواجه می شود که از آن جمله سرعت نسبتا کم جدا کننده است. همانطور که می دانیم زمان از صفر به ماکسیمم رسیدن ولتاژ شبکه برگشت شده بین دو کنتاکت بسیار کوتاه است. یعنی منحنی ولتاژ شدیداً صعودی با ضریب زاویه بزرگ از مبداء است. لذا باید در این زمان نسبتا کوتاه فاصله دو کنتاکت آنقدر زیاد شود که پس از صفر شدن جریان، جرقه مجدداً بر نگردد. از این جهت است که در کلیدهای هوایی فشار قوی از قطع مکرر (multi-break breakers) استفاده می شود. در این کلیدها از چند کنتاکت دهنده متوالی استفاده می شود که همگی در یک زمان وصل و یا جدا می شوند بطوریکه از همه کنتاکتورها یک جریان قطع عبور می کند ولی در موقع برگشت ولتاژ این قطع شدگی های مکرر مثل یک پتانسیومتر ولتاژ را روی قطع شدگی های پی در پی تقسیم می کند. بدین ترتیب کلید در یک زمان بسیار کوتاه استقامت الکتریکی لازم را در مقابل ولتاژ برگشت شده پیدا می کند. در ضمن چون تقسیم پتانسیل بین قطع شدگی های مکرر نمی تواند بطور یکنواخت باشد، لذا برای تقسیم یکنواخت ولتاژ در قطع شدگی های پی در پی از خازنهای موازی یا مقاومتهای موازی با کنتاکتور استفاده می شود (شکل زیر منحنی 1).



شکل 1-38: برای تقسیم یکنواخت ولتاژ در قطع شدگی های پی در پی

شکل بالا تقسیم پتانسیل را در یک کلید 220 kv که دارای قطع مکرر است نشان می دهد . منحنی 2 تقسیم پتانسیل را با استفاده از خازن موازی در چند محل کلید نشان می دهد ( یک طرف کلید زمین شده است) منحنی 3 تقسیم پتانسیل را با استفاده از خازن موازی در سیستم سیمتریک نشان می دهد . منحنی 4 تقسیم پتانسیل بین کنتاکتورها را با استفاده از مقاومت های موازی نشان می دهد . در ضمن مقاومت موازی با جرعه باعث می شود که برگشت ولتاژ به کندی انجام گیرد و این فرصت بسیار خوبی است برای خارج کردن حامل های باردار.

از این جهت برای بالا بردن قدرت قطع کلیدهای هوایی فشار قوی معمولاً از مقاومتها و خازنهای موازی استفاده می شود. مقدار این مقاومتها تقریباً در حدود  $100 \Omega/kv$  است. شکل زیر کلید فشار قوی kv 420 با 6 قطع مکرر و موازی را نشان می دهد .

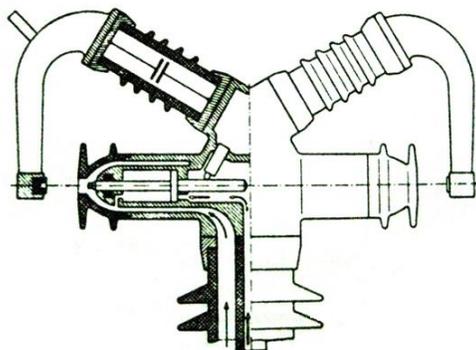


شکل 1-39: بالا بردن قدرت قطع کلیدهای هوایی فشار قوی



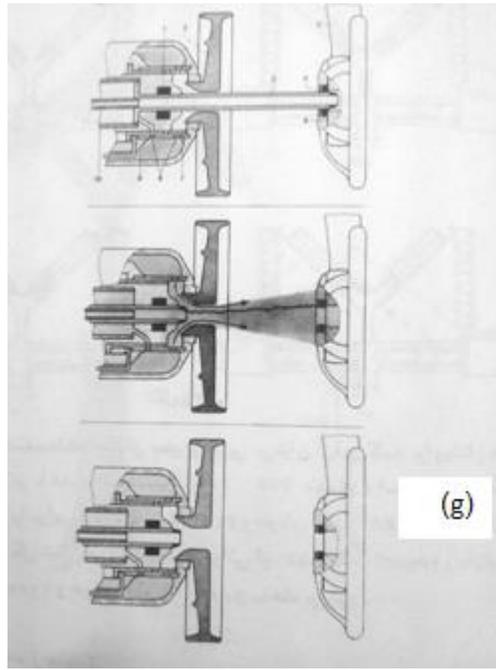
شکل 1-40: نمونه استفاده شده در پست

شکل زیر قسمت قطع کننده کلید را نشان می دهد . چنانچه دیده می شود در این نوع کلید جرقه در هوای آزاد زده می شود . کلیدهای جرقه آزاد نسبت به کلیدهای هوایی دیگر دارای این مزیت هستند که اولاً محل قطع شدگی قابل رویت است و در ضمن اگر قدرت اتصال کوتاه بزرگتر از قدرت قطع کلید باشد ، آسیب زیادی به کلید وارد نمی شود . زیرا اصولاً جرقه و قوس در هوای آزاد خاموش می شود .



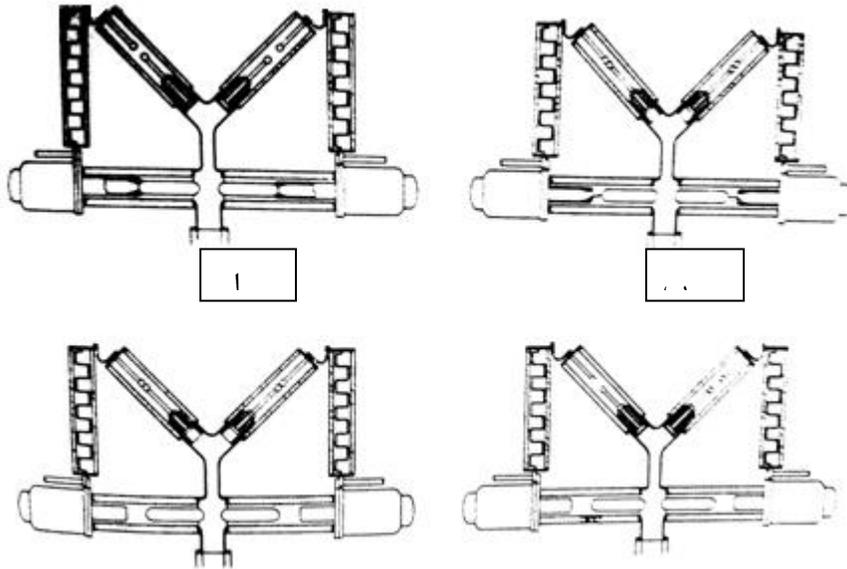
شکل 1-41: قسمت قطع کننده کلید

شکل زیر قسمت اصلی کلید ساخت AEG را در سه حالت وصل ، جرقه و قطع نشان می دهد . در موقع صدور فرمان قطع ، در پوش کشویی 7 با حرکت میله اتصال دهنده 3 به عقب رانده می شود در نتیجه کانال هوایی 8 باز می شود و هوای تحت فشار با قوس الکتریکی تماس پیدا می کند که در ضمن خنک کردن قوس و خارج کردن حامل ها باعث قطع جرقه در ضمن عبور جریان از صفر می شود .



شکل 1-42: زیر قسمت اصلی کلید ساخت AEG در سه حالت

شکل زیر نیز کلید با دو قطع متوالی سر پوشیده را که در آن از مقاومتهای موازی با جرقه استفاده شده در چهار حالت مختلف نشان می دهد .



شکل 1-43: کلید با دو قطع متوالی سر پوشیده

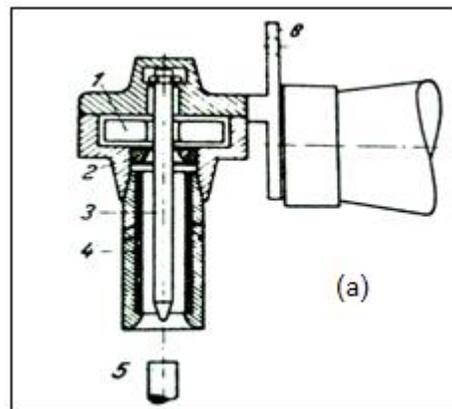
نحوه عملکرد به این صورت می باشد که در شکل (الف) با فرمان قطع هوا فشرده به داخل محفظه احتراق راه پیدا می کند ، کنتاکتهای کمکی بسرعت بسته و مقاومت ها با کلید باز شده (در حال جرقه تا پایان قوس) موازی می شوند .

ب. پس از قطع کامل جرقه کنتاکت کمکی بسته می ماند و باعث عبور جریان های باقیمانده از مقاومت ها می شود و فاصله دو کنتاکت اصلی مساعد می شود .

سپس در یک لحظه کلید کمکی باز می شود و مقاومت ها قطع می شوند . (باز شدن کلید 0.04s)

### 16-1 کلید های گاز سخت (جامد)

در پستها و شبکه های برق کوچک که دارای تاسیسات محدود و فاقد دستگاه کمپرسور و تهیه هوای فشرده می باشند ، نصب کلیدهای هوایی ( هوای فشرده ) مقرون به صرفه نیست و بدین جهت اغلب از کلید اکسپانزیون (آبی) و یا از کلید دیگری به اسم کلید گاز جامد استفاده می شود . در کلید گاز جامد نیز مانند کلیدهای روغنی و کم روغن ، گازی که باعث خاموش کردن و برنگشتن جرقه می شود توسط خود جرقه بوجود می آید . لذا قدرت قطع این کلید نیز تابع شدت جریان قطع است. شکل زیر محفظه احتراق کلید گاز جامد را در حالت قطع نشان می دهد و چنانچه دیده می شود محل قطع شدگی در این کلید قابل رویت است که این خود از محاسن کلید است و به آن حالت سکسیونر قابل قطع زیر جریان اتصال کوتاه را می دهد.



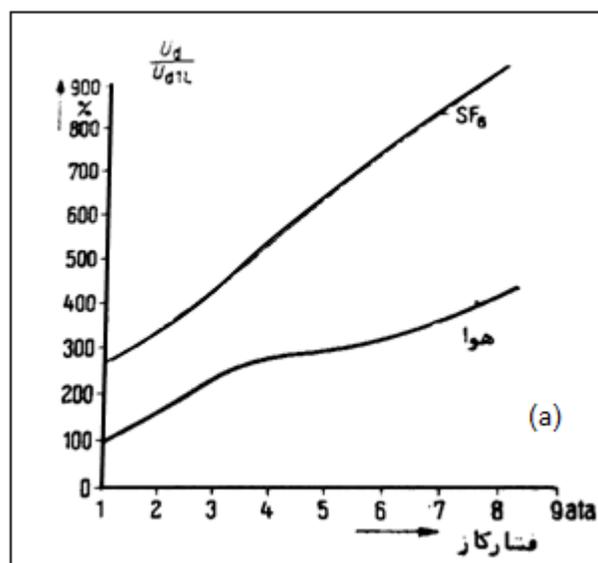
شکل 1-44: محفظه احتراق کلید گاز جامد

در این کلید بجای میله کنتاکت دهنده از یک لوله (5) استفاده شده است ، این لوله که در موقع وصل ، میله عایقی (3) را در میان دارد توسط لوله عایقی (4) نیز احاطه شده است . این دو لوله و میله عایقی از

ماده ای ساخته شده اند که در اثر حرارت جرقه، بدون ایجاد دوده مقدار زیادی گاز تولید می کنند. پس از صدور فرمان قطع به کلید، کنتاکت لوله ای (5) از کنتاکت جرقه زن (2) جدا می شود. جرقه حاصل بین این دو کنتاکت با لوله و میله عایقی (3) و (4) تماس پیدا می کند و باعث می شود قسمتی از سطوح خارجی آن تبخیر شود. این گازها در حد فاصل بین لوله و میله عایقی ایجاد فشار زیادی می کنند که در ضمن خنک کردن جرقه از برگشت مجدد آن به محض صفر شدن جریان نیز جلوگیری می شود. گازها به محض خاموش شدن جرقه قبل از خارج شدن کنتاکتهای لوله ای از محفظه احتراق توسط کانال مخصوصی به خارج راه پیدا می کنند. کلید گاز جامد جریان خیلی زیاد را در اولین نیم پریود بمحض عبور جریان از صفر و درست در همان موقعی که لوله کنتاکت دهنده، مجرای خروج گاز را باز می کند، قطع می کند در صورتیکه جرقه جریانهای کم در فاصله بیشتر دو کنتاکت و در زمان دومین نیم موج قطع می شود. این کوتاه بودن زمان جرقه بعلت گاز شدیدی است که از عایقها متصاعد می شود و بهمین جهت سطوح میله و لوله جرقه گیر عایقی نیز خیلی زود فرسوده و مستعمل نمی شود و معمولا پس از هر چند صد بار قطع احتیاج به تعویض پیدا می کنند. این کلیدها برای اختلاف سطح تا 20 kv و قدرت قطع تا 200 MVA ساخته می شوند.

### 17-1 کلید SF6

در این نوع کلید از گاز SF<sub>6</sub> (گاز هگزا فلورید گوگرد) بعنوان ماده خاموش کننده جرقه و عایق بین دو کنتاکت و نگهدارنده ولتاژ استفاده شده است. گاز SF<sub>6</sub> الکترونهای آزاد را جذب می کند و ایجاد یون منفی بدون تحرک می کند در نتیجه مانع ایجاد ابر بهمنی الکترونها که باعث شکست عایق و ایجاد جرقه می شود می گردد، بطوریکه استقامت الکتریکی گاز SF<sub>6</sub> به 2 تا 3 برابر استقامت الکتریکی هوا می رسد. شکل زیر اختلاف سطح جرقه ای گاز SF<sub>6</sub> را برحسب فشار گاز نشان می دهد.

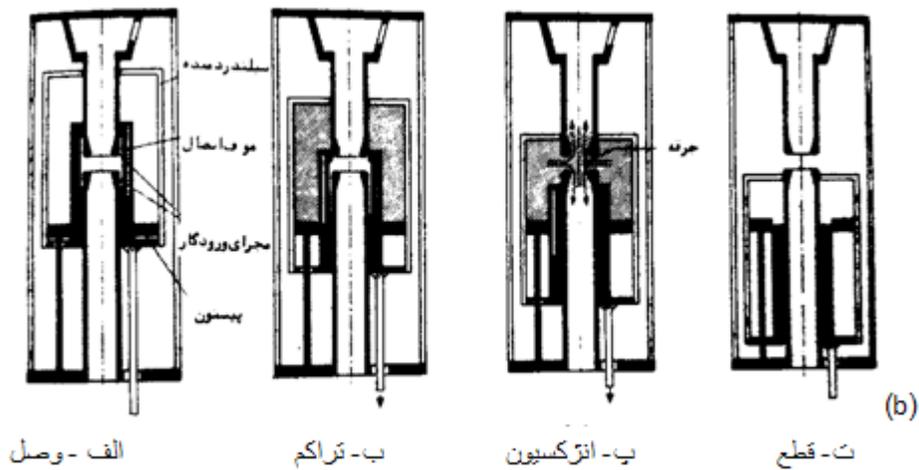


شکل 1-45: اختلاف سطح جرعه ای گاز SF<sub>6</sub>

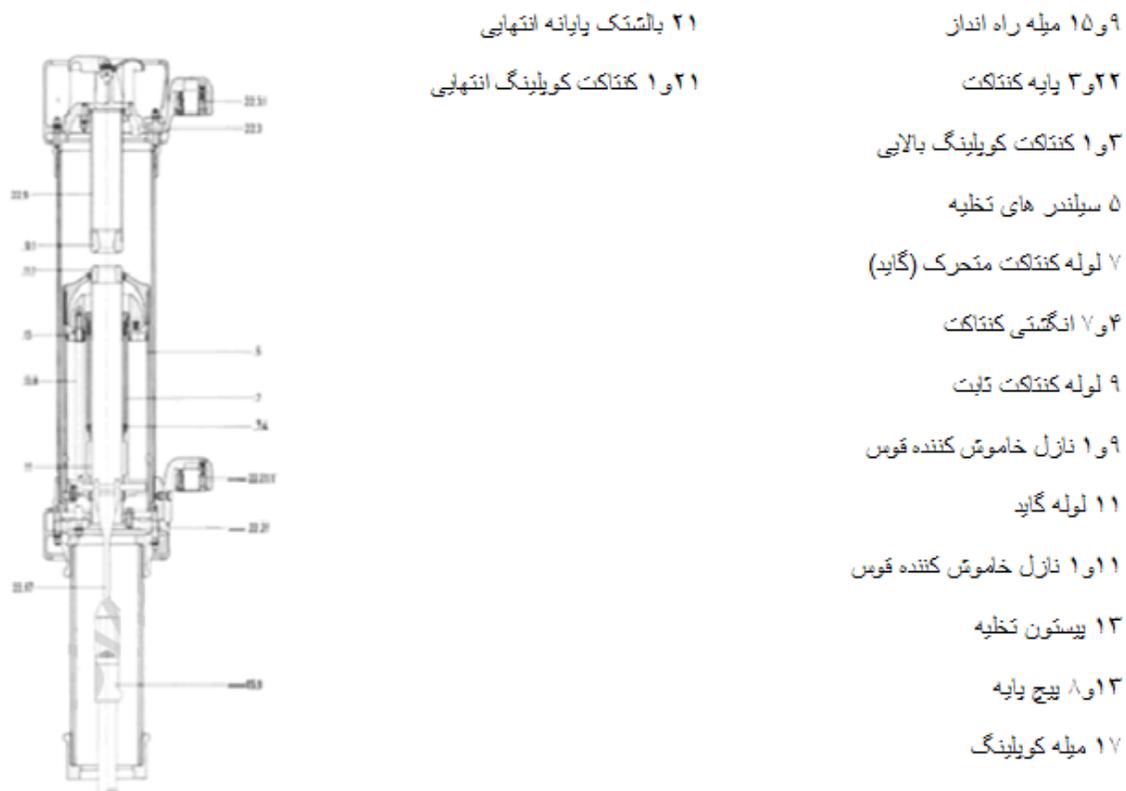
گاز SF<sub>6</sub> از نظر شیمیایی کاملاً با ثبات است و میل ترکیبی آن خیلی کم و غیر سمی می باشد و تقریباً 5 برابر هوا وزن دارد و در مقابل حرارت زیاد نیز پایدار و غیر قابل اشتعال است. در ضمن این گاز دارای قابلیت هدایت حرارتی بسیار زیاد است، لذا علاوه بر اینکه در خاموش کردن جرعه بسیار موثر واقع می شود عایق بسیار با ارزشی نیز می باشد.

در کلید های sf6 از گاز sf6 به عنوان عایق مابین قطعات مختلف و همچنین به عنوان خاموش کننده جرعه یا قوس الکتریکی استفاده می شود. در حال حاضر کلید های sf6 به عنوان مطمئن ترین و مناسب ترین کلید در شبکه های فشار قوی شناخته شده و بکار می روند و می توان گفت هیچ یک از کلید های دیگر قابلیت رقابت با این کلید را ندارند. نکته مهم دیگر قیمت اقتصادی این کلید ها می باشد. طرز استفاده از این گاز در کلیدهای فشار قوی عموماً بر مبنای انژکسیون گاز متراکم شده SF<sub>6</sub> به محل قوس الکتریکی (محفظه احتراق) است.

شکل های زیر کمپرسور و محفظه احتراق کلید SF<sub>6</sub> ساخت زیمنس را نشان می دهد. چنانچه دیده می شود در این کلید از یک کنتاكت ثابت و یک کنتاكت متحرک استفاده نشده است، بلکه قسمت اصلی کلید تشکیل شده از دو لوله ثابت که به فاصله معینی متناسب با ولتاژ نامی کلید در مقابل هم قرار گرفته اند. ارتباط این دو لوله در حالت وصل کلید توسط موف انگشتانه مانند فلزی بنام موف اتصالی انجام می گیرد. (شکل الف)



شکل 1-46: کمپرسور و محفظه احتراق کلید  $SF_6$  ساخت زیمنس

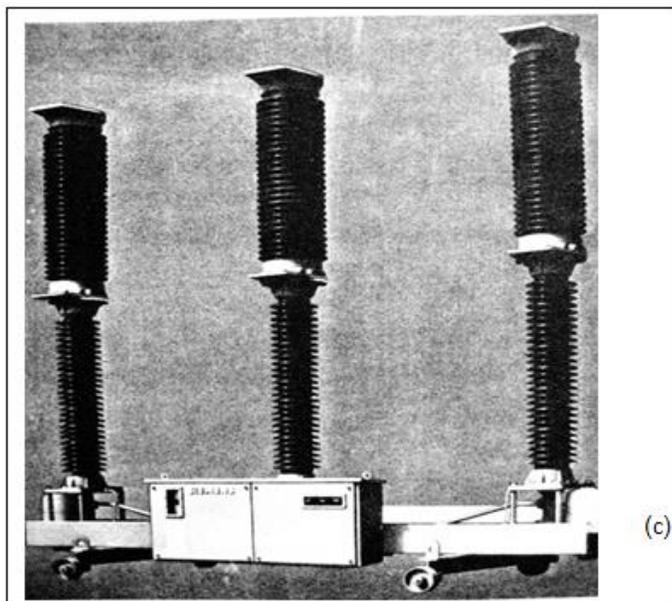


کمپرسور تشکیل شده از یک سیلندر عایقی پر از گاز به وسیله میله فرمان مخصوصی بطرف پایین و بالا حرکت می کند و در ضمن باعث قطع و وصل کلید نیز می شود .

در قسمت تحتانی این سیلندر عایقی یک پیستون رینگ مانند بطور ثابت نصب شده است . این مجموعه در موقع قطع کلید مانند یک کمپرسور و انژکتور عمل می کند . با این تفاوت که گاز داخل کمپرسور با پایین آمدن لوله سیلندر فشرده و متراکم می شود . در موقع قطع کلید کمپرسور که به عنوان متراکم کننده و دمنده گاز عمل می کند بوسیله اهرمی که فرمان قطع را اجرا می کند به طرف پایین کشیده می شود . (شکل 9-2 قسمت ب)).

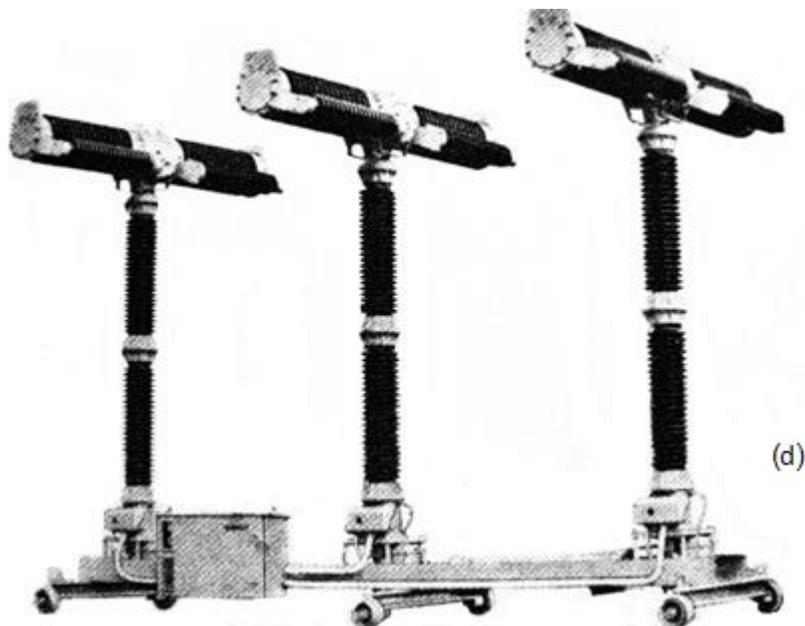
در این حالت گاز SF6 در داخل کمپرسور متراکم شده و زمانی که گاز تراکم لازم برای خاموش کردن جرقه را پیدا کرد ، موف اتصالی از لوله ثابت فوقانی جدا می شود و در ضمن اینکه بین دو کنتاکت لوله ای جرقه ایجاد می شود ، مجرا ورودی گاز از دو طرف جرقه باز شده و کمپرسور تبدیل به انژکتور می شود . گاز با فشار به طور عمودی به قوس وارد می شود و در امتداد قوس در لوله ها جریان می یابد (شکل 9-2 قسمت پ)) ، و باعث قطع سریع جرقه در زمان عبور جریان از صفر می شود .

پس از قطع جریان سیلندر عایقی کمپرسور در محل شکل (ت) بطور ثابت قرار می گیرد . و پس از وصل کلید سیلندر مجدداً بالا می رود و فضای خالی آن از گاز sf6 پر می شود و کلید آماده می شود . شکل زیر یک چنین کلیدی را برای فشار 170 kv و جریان قطع 40 kA و جریان نامی 4000 آمپر نشان می دهد . فرمان قطع و وصل این کلیدها معمولاً هیدرولیکی انجام می گیرد .



شکل 1-47: کلیدی برای فشار 170 kv و جریان قطع 40 kA و جریان نامی 4000 آمپر

شکل زیر نیز کلید  $SF_6$  برای ولتاژ 245 kv و جریان قطع 50 kA را نشان می دهد .



شکل 1-47: کلید  $SF_6$  برای ولتاژ 245 kv و جریان قطع 50 kA

## 18-1 کلید خلاء

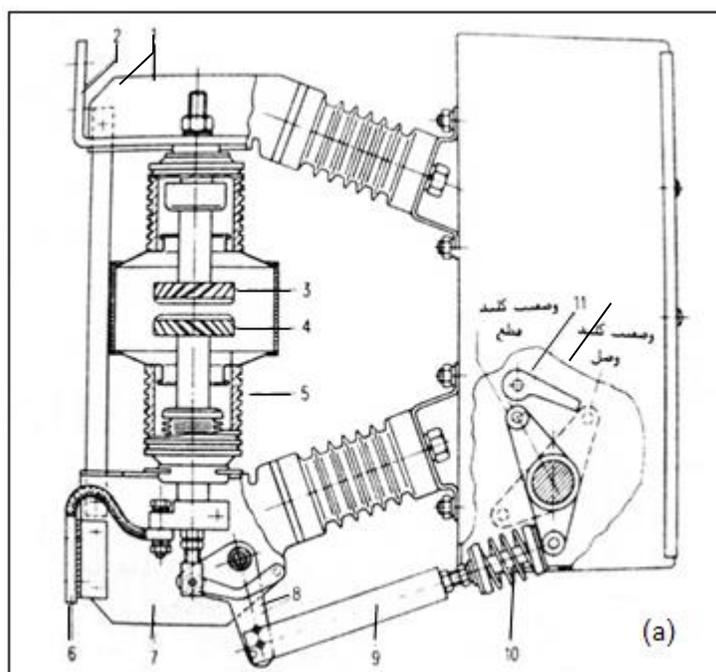
نظر به اینکه اصولاً حاملهای باردار (الکترونهاي آزاد) باعث هدايت جريان در فلزات و ايجاد قوس الکتریکی در عایقها می شوند لذا در خلاء کامل چون هیچ عنصری وجود ندارد که حامل الکترونها باشد ، باید جدا شدن دو کنتاكت فلزی جريان دار به احتمال قوی بدون ايجاد جرقه انجام گیرد . با توجه به این اصل مهم کلیدهای فشار قوی که کنتاکتهای آن در خلاء ازهم جدا می شوند ساخته شده است . کلید خلاء بطور کلی از سه قسمت اصلی زیر تشکیل شده است :

1. کپسول خلاء از فولاد کرم نیکل با کنتاکتورها

2. نگهدارنده کنتاکتورها و ایزولاتورها

3. وسایل مکانیکی رسانای فرمان قطع و وصل

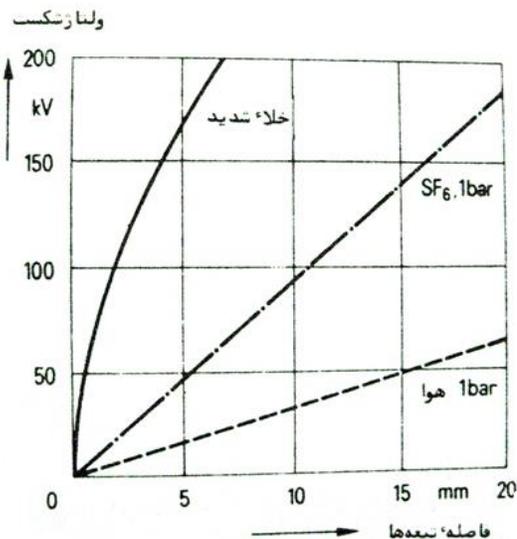
شکل زیر ساختمان کلید خلاء را بطور ساده نشان می دهد.



شکل 1-48: ساختمان کلید خلاء بطور ساده

چنانچه دیده می شود کنتاکت دهنده های (3) و (4) در یک کپسول فلزی خلاء شده قرار دارند و عمل قطع و وصل کلید در این کپسول و در خلاء کامل انجام می گیرد. میله (3) که کنتاکت ثابت کلید است پس از عبور از ایزولاتور (5) به صفحه فلزی (1) که در ضمن باعث هدایت جریان به محل اتصال کابل یا شین (2) می شود محکم شده است. میله (4) کنتاکت متحرک کلید را تشکیل می دهد که پس از عبور از ایزولاتور 5 در ضمن تماس فلزی با پایه ثابت (7) به کمک میله عایقی (9) و فنر (10) به دستگاه فرمان دهنده قطع و وصل کلید متصل می شود. در موقع فرمان وصل (دستی یا موتوری) کنتاکت متحرک (4) به کنتاکت (3) می چسبد و در ضمن هدایت جریان باعث جمع شدن فنر (10) و ذخیره انرژی مکانیکی می شود که در موقع قطع کلید از آن استفاده می شود. در موقع قطع و جدا شدن تیغه متحرک (4) از تیغه (3) مقداری از فلز کنتاکتها (آلیاژی از مس) در ناحیه آخرین تماس سوزنی تبخیر می شود و این پلاسمای بخار فلز که دارای هدایت الکتریکی بسیار خوبی است با دور شدن کنتاکت متحرک از کنتاکت ثابت باعث ادامه عبور جریان و ایجاد قوس الکتریکی می گردد. این قوس فقط تا موقعی که جریان از صفر نگذشته است می تواند وجود داشته باشد. زیرا به محض عبور جریان از صفر (قطع خود بخود جریان) پایه فلزی جرقه خنک می شود و تبخیر قطع می گردد و بخارات فلز در پلاسمای توسط دیفوزیون (Diffusion) و رکمبیناسیون (Recombination) دیونیزه می شود و بر روی

کنتاکتورها می نشینند . در نتیجه فضای خالی بین دو کنتاکت که اکنون فاقد حاملهای باردار است برگشت ولتاژ را بخوبی تحمل می کند و جرقه برای همیشه خاموش می شود.  
 شکل زیر استقامت الکتریکی خلاء را متناسب با فاصله دو الکترود نشان می دهد .

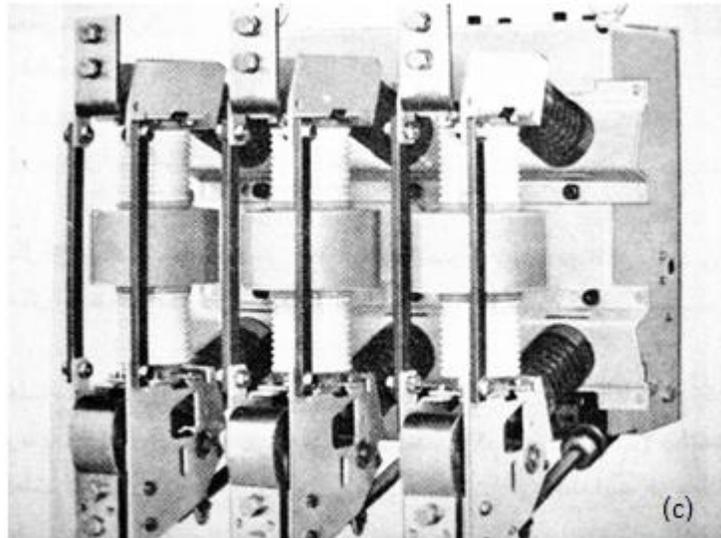


شکل 1-49: استقامت الکتریکی خلاء متناسب با فاصله دو الکترود

در این شکل استقامت الکتریکی گاز و هوا در فشار 1 bar نیز جهت مقایسه رسم شده است . به علت فشار خیلی کم داخل کپسول ( در حدود  $10^{-9}$  bar ) فاصله دو کنتاکت کلید خلاء در حالت قطع برای فشار تا 30 هزار ولت خیلی کم و در حدود 20 میلیمتر است . در نتیجه بعلت کوچک بودن طول جرقه (در حدود 20 میلیمتر) و هدایت خوب پلاسما و کوتاه بودن زمان جرقه که ماکسیمم از 6 میلی ثانیه تجاوز نمی کند ، انرژی قوس الکتریکی در این کلید خیلی کوچکتر از کلیدهای مشابه دیگر می باشد و با توجه به اینکه اغلب قوس قبل از رسیدن جریان به صفر قطع می شود ، می توان کلید را با وسیله قطع و وصل سریع نیز مجهز کرد .

شکل زیر کلید خلاء سه فاز ساخت زیمنس را برای 12 kv و 1250 A و جریان قطع 25 kA نشان

می دهد .



شکل 1-50: کلید خلاء سه فاز ساخت زیمنس

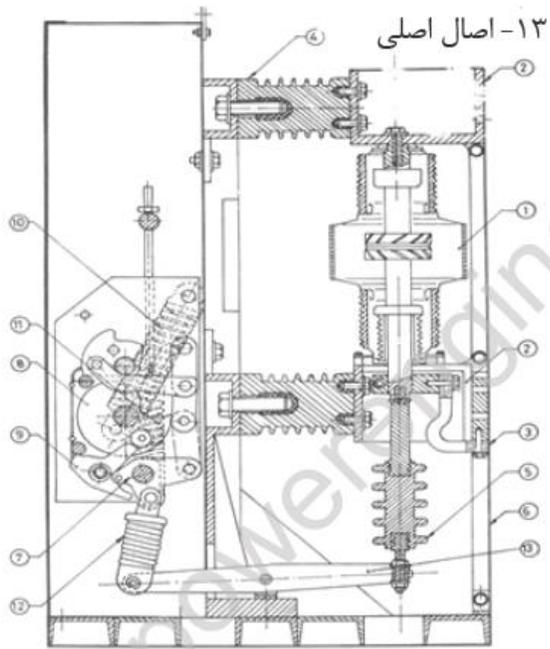
کلید خلاء امروزه بخاطر دارا بودن مزایایی از قبیل دوام زیاد، مراقبت کم، امکان قطع و وصل سریع مکرر، در شبکه های فشار متوسط تا 30 kv بخصوص برای وصل شبکه های کپاسیتیو بسیار مناسب است.

جدول زیر مشخصات کلید خلاء ساخت زیمنس را نشان می دهد:

جدول 1-0: مشخصات کلید خلاء ساخت زیمنس

ولتاژ نامی	جریان قطع				
	8 kA	12,5 kA	16 kA	20 kA	25 kA
7,2 kV	-	-	630 A 1250 A 1600 A	-	630 A 1250 A 1600 A 2500 A
12 kV	-	-	630 A 1250 A 1600 A	630 A 1250 A 1600 A	630 A 1250 A 1600 A 2500 A
15 kV	-	630 A 1250 A	630 A 1250 A 1600 A	-	630 A 1250 A 1600 A 2500 A
17,5 kV	630 A 1250 A	630 A 1250 A	630 A 1250 A	-	-
24 kV	630 A 1250 A	630 A 1250 A	630 A 1250 A	-	-

## ۱۲- فنر بار



- ۱- قطع کننده خلاء
- ۲- پایانه ترمینال
- ۳- اتصال قابل انعطاف
- ۴- عایقهای پشتیبان
- ۵- محور راهاندازی
- ۶- میله رابط
- ۷- شفت عملکردمشترک
- ۸- صفحه عملکرد
- ۹- قفل کننده بادامکی
- ۱۰- فنر نگهدارنده
- ۱۱- فنر قطع کننده

جشکل 1-51: شکل کامل یک کلید خلا

### نتیجه :

در یک مقایسه اقتصادی بین کلید های مختلف به این نتیجه می رسیم که در مواردی که تعداد قطع و وصل تحت خطا دوبار یا کمتر از دو بار در سال باشد و بعکس تعداد قطع و وصل های عادی در حد بالایی قرار دارند ، مانند کابل های داخل شهری ، مناطق صنعتی و همچنین کوره های قوسی کلید های خلا مناسب می باشند و در سایر موارد کلید های sf6 از وضعیت مطلوبی برخوردارند. در مورد کلید های روغنی تنها در مواردی که قیمت آنها کمتر از سایر انواع باشند و یا ملاحظات دیگر از جمله تولید داخلی مد نظر باشد می توان بسته به مورد با مقایسه قیمتها استفاده نمود .

## 19-1 تقسیم بندی کلید ها از نقطه نظر مکانیزم عملکرد

1. مکانیزم فنری

2. مکانیزم هیدرولیکی

3. مکانیزم هوای فشرده یا پنیو ماتیکی

هر سه نوع مکانیزم برای تمام کلیدها کاربرد دارند و در مورد کلید های قدرت از نوع SF6 نیز بکار می روند.

### 1-19-1 مکانیزم فنری :

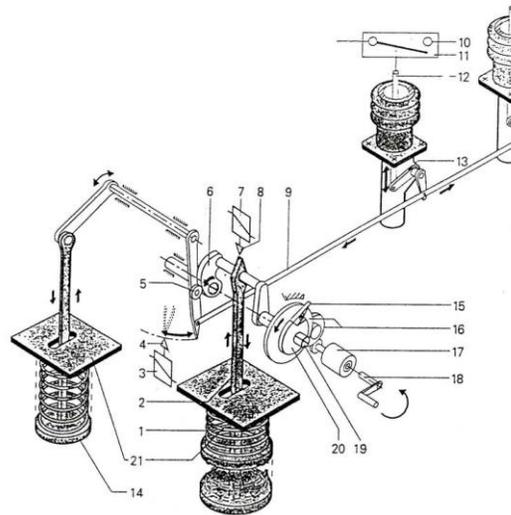
در این مکانیزم ، انرژی لازم برای عملکرد کلید ، انرژی ذخیره شده در فنر می باشد . سیستم بدین صورت است که برای هر بار بسته یا وصل شدن کلید نیاز به شارژ فنر مربوط به وصل می باشد . پس از شارژ شدن این فنر امکان وصل کلید وجود خواهد داشت . با وصل کلید ، بطور همزم آن فنر دیگری شارژ می شود که مربوط به حالت قطع کلید می باشد و نتیجتا با هر بار وصل کلید، کلید آماده قطع است. ضمنا پس از وصل کلید ، لیمیت سوئیچ ها ، ( LIMIT SWITCHES ) فرمان لازم را به موتوری ارسال می کنند که وظیفه این موتور شارژ فنر مربوط به عملکرد و وصل است و پس از شارژ این فنر توسط سوئیچ های دیگری فرمان قطع موتور مربوطه صادر می شود. مطابق بررسی انجام شده توسط CIGRE 80 الی 90 درصد خطاهای کلیدهای فشار قوی مربوط به خطاهای مکانیکی آنها است و لذا هرچه سیستم های مکانیکی ساده تر باشند این خطا ها کاهش می یابد. مکانیزم فنری در مقایسه با مکانیزم های دیگر سادگی لازمه را دارا است لذا هم اکنون بصورت گسترده ای مورد توجه می باشد.

**مزایا:** ارزانی نسبی ، سادگی نصب و نگهداری ، امکان شارژ دستی فنر ، قابلیت اطمینان بالاتر.

**معایب:** محدود بودن میزان انرژی قابل ذخیره که در نتیجه بدون شارژ مجدد فنر وصل ، این مکانیزم

تنها یک سیکل قطع - وصل - قطع را می تواند انجام دهد و برای عمل قطع و وصل تکفاز نیاز به وجود

سه مکانیزم می باشد . شکل شماره زیر نشان دهنده اجزای یک مکانیزم فنری می باشد .



شکل 1-52: اجزای یک مکانیزم فنری

## 19-2-1 مکانیزم هیدرولیکی :

در این مکانیزم از اختلاف فشار دو سیستم هیدرولیک ، در داخل یک مجموعه پیوسته و جدا از محیط خارج استفاده می شود . شکل شماره 11-2 این مکانیزم را نشان میدهد . در حالت قطع کلید دو شیر الکتریکی on و off بسته هستند و روغن پر فشار که متصل به مخزن نیتروژن فشرده ای به عنوان منبع ذخیره انرژی است ، کلید را در حالت باز نگه می دارد . زمانی که تصمیم به وصل کلید گرفته شود ، شیر الکتریکی off باز شده و نتیجتاً روغن پر فشار به پیستون عملکرد فشار وارد می نماید و چون حجم روغن پشت پیستون بیش از حجم روغن جلوی آن است پیستون حرکت کرده و کلید وصل می شود . منبع نیتروژن فشرده فشار مربوطه را علیرغم جابجایی حجم روغن تقریباً ثابت نگه می دارد . در حالت وصل کامل کلید ، در جلو پیستون فشار روغن وجود نداشته و تنها روغن پر فشار پیستون را در حالت بسته نگه می دارد . زمانی که تصمیم به قطع کلید می باشد شیر on بسته و شیر off باز می شود نتیجتاً " روغن کم فشار جایگزین روغن پر فشار در پشت پیستون می گردد و چون جلوی پیستون متصل به سیستم پر فشار است نتیجتاً " پیستون به عقب رانده می شود و کلید قطع می گردد . منبع نیتروژن فشرده انرژی لازم را برای چندین بار عمل قطع و وصل در خود ذخیره دارد و لذا تنها بعد از چند بار عمل قطع و وصل ( معمولاً حداکثر تا پنج عمل قطع - وصل - قطع ) نیاز به عملکرد پمپ روغن است . نتیجتاً انرژی لازم همواره در اختیار کلید می باشد . فشارسنج های لازم جهت کنترل فشار روغن و نیتروژن در سیستم موجود هستند که آلام لازم را ارسال می کنند .

مزایا و معایب مکانیزم مذکور بشرح ذیل میباشد:

مزایا: قابلیت ذخیره انرژی زیاد ، سروصدای کم هنگام قطع و وصل ، کوچکی نسبی مکانیزم

معایب: گرانی نسبی ، مشکل بودن نصب ، تعمیر و نگهداری ، نیاز به بازدیدهای دوره ای بیشتر ، امکان

وجود نشتی روغن و یا نیتروژن.

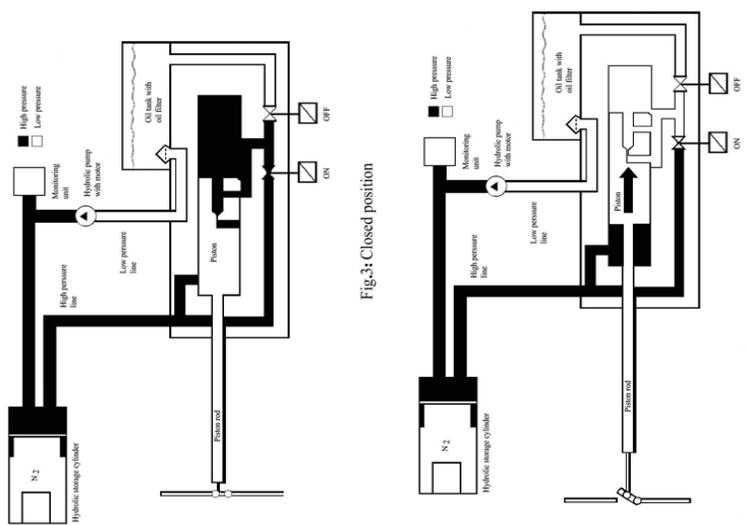


Fig.3: Closed position

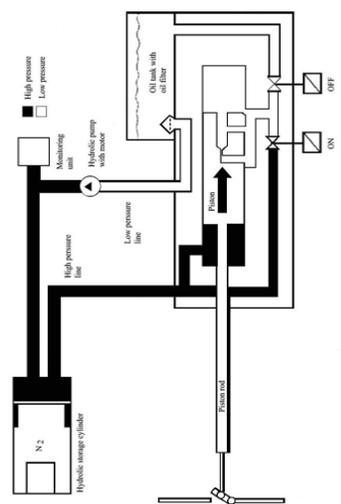


Fig.4: During the opening operation

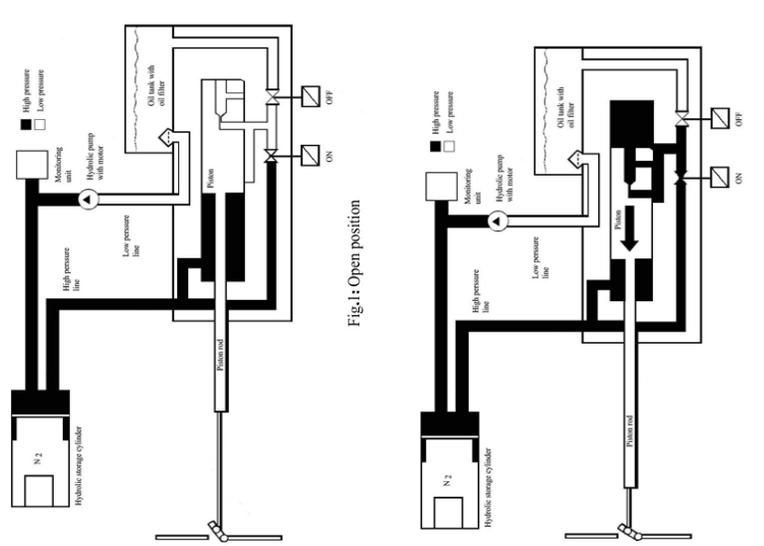


Fig.1: Open position

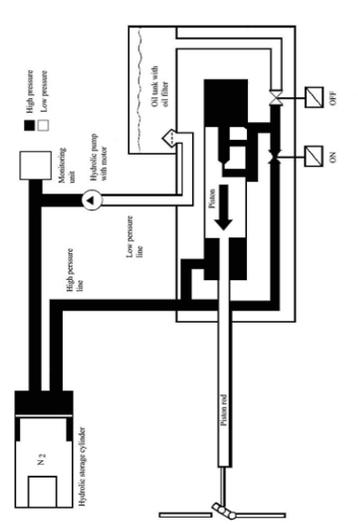


Fig.2: During the closing operation

شکل 1-53: مکانیزم هیدرولیکی

### 19-3-1 مکانیزم هوای فشرده یا پنیوماتیکی :

در این مکانیزم از هوای فشرده که در مخزن خاصی ذخیره شده است بعنوان منبع انرژی عمل کننده استفاده می شود. این مکانیزم پس از چند بار عملکرد کمپرسوری هوای فشرده را در منبع ذخیره می نماید لذا همواره کلید دارای انرژی لازم جهت قطع و وصل می باشد. معمولا دو سیستم، یکی بصورت کمپرسور جداگانه جهت هر کلید و دیگری بصورت کمپرسور مرکزی برای تمام کلیدها پست بکار می رود که البته امروز سیستم کمپرسور مرکزی بعلاوه قابلیت اطمینان پایین آن به جهت وابسته شدن کل کلیدها به یک سیستم مرکزی کمتر مورد توجه است و سیستم کمپرسور جداگانه مد نظر می باشد. فشار هوا توسط فشارسنج های خاصی کنترل می شوند که آلام های لازم را ارسال می کنند. همچنین منبع یا مخزن هوای فشرده دارای شیر اطمینانی است که برای تخلیه هوای اضافه و جلوگیری از اضافه فشار در مخزن هوای فشرده بکار می رود.

#### مزایا: دارا بودن انرژی ذخیره بالا

**معایب:** مشکل بودن نسبی نصب، نیاز به بازدید های دوره ای بیشتر، صدای شدید در هنگام قطع و وصل، امکان وجود نشتی هوا از اتصالات لوله ها و شیر های اطمینان، عدم امکان کنترل دستی. البته هم اکنون نوع نسبتا "جدیدی به عنوان مکانیزم فنری - هیدرولیکی توسط بعضی از سازندگان عرضه شده است که از نظر اصول تقریبا" مشابه مکانیزم هیدرولیکی می باشد ولی به جای منبع فشار در این سیستم از فنر استفاده شده است. تجربیات کافی از این سیستم در دسترس نیست.

### 19-3-1 نتیجه :

از نظر انرژی قابل دسترس برای کلید به ترتیب اولویت با مکانیزم های هوای فشرده، هیدرولیکی و فنری می باشد لذا مشاهده می شود که مکانیزم اول در سطح ولتاژی بالاتر که کلیدها حجم و ابعاد بیشتری دارند و سطح اتصال کوتاه نیز بالاتر است و الزاما" نیاز به قدرت قطع بالاتری برای مکانیزم مطرح می شود، بیشتر مورد توجه هستند تا در سطوح ولتاژی پایین تر.

بطور کلی می توان گفت که تا سطح ولتاژی 145 کیلو ولت تقریبا تمام سازندگان مکانیزم فنری را به لحاظ احتیاج سیستم به منبع انرژی قطع با قدرت کمتر و سادگی این مکانیزم و سهولت تعمیرات آن ترجیح داده اند لکن در ولتاژهای بالاتر به جهت نیاز به منبع انرژی قطع با قدرت بالاتر، تعدادی از

سازندگان مکانیزم هیدرولیکی یا هوای فشرده را مدنظر دارند ولی تعدادی نیز به جهت موارد عنوان شده در فوق و قابلیت اطمینان بالاتر ، مکانیزم فنری را حتی برای این سطوح ولتاژ نیز ارجح دانسته و تامین می نمایند.

## 20-1 کلید های باز شونده فوق سریع

امروزه سیستم های جدید تولید برق مانند: سلول های سوختی، توربین های بادی، سلول های خورشیدی، میکرو گاز توربین ها و میکرو ژنراتورهای هیدرولیکی به خاطر سازگاری با محیط زیست در حال گسترش می باشند. در اینگونه سیستم های تولید برق به دلیل سرعت بالای عملکرد اجزاء، سرعت بالای کلید زنی که در حدود 1ms می باشد نیاز است و این امر به منظور حفاظت تجهیزات سیستم های قدرت، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. اگر خطایی در یک شبکه با ژنراتور گازی رخ دهد به دلیل سرعت بالای پاسخ دهی این ژنراتورها، بار این ژنراتورها با سرعت زیادی افزایش می یابد و این افزایش بار سبب افزایش گشتاور مکانیکی شفت توربین شده و می تواند سبب شکستن یا ترک برداشتن توربین شوند و یا حتی تنش های حرارتی زیادی که ایجاد می شود اگر در مدت زمان اندک برطرف نشود می تواند آسیب جدی به تجهیزات حساس شبکه وارد کند. لذا عملکرد سریع کلیدهای قدرت در اینگونه سیستم ها ضرورت دارد.

یکی از راه حل های رسیدن به سرعت های بالادر کلیدهای قدرت استفاده از درایوهای الکترو دینامیکی<sup>1</sup> می باشد. اساس کار این کلیدها استفاده از نیروی دافعه الکترومغناطیسی جهت شتاب دادن به کنتاکت های کلید می باشد. این کلیدها بایستی دارای قابلیت تحمل ولتاژ بالایی بوده و جریان بالایی را از خود عبور دهند، این کلیدها در مقایسه با کلیدهایی هستند که بطور معمول از آنها استفاده می شود و اصول عملکرد آنها بر مبنای ذخیره انرژی در فنر می باشد (سرعت باز شدن کلیدهای قدرت معمولی در حدود 1.19 تا 2.14 متر بر ثانیه است). و توانایی قطع جریان خطا را در مدت زمان

---

<sup>1</sup> Electrodynamic Drive

حدود 30-45 ms را دارا می‌باشند که در مقایسه با کلیدهای با درایو الکترو دینامیکی که به کلید های باز شونده فوق سریع<sup>۲</sup> موسوم هستند، زمان زیادی است.

در کاربردهای معمولی کلید های قدرت زمان 20 ms برای قطع جریان خطا مناسب می‌باشد. اما همانطور که بیان شد در برخی کاربردهای جدید، این زمان بسیار طولانی بوده و باید زمان عملیات قطع جریان را کاهش داد. برخی از این کاربردها در ادوات محدود کننده جریان خطا می‌باشد.

علت کند بودن کلیدهای قدرت مرسوم به این خاطر است که سیستم به طور کلی مکانیکی است و مسلماً سرعت سیستم های مکانیکی کند تر از الکتریکی است. و به همین خاطر سرعت باز شدن کلید نمی‌تواند زیاد بالا برود. به همین منظور بهتر است از نیروی دافعه الکترومغناطیسی جهت شتاب دادن کنتاکت های کلید استفاده کرد. مزیت این روش این است که سیستم های الکترومغناطیسی برخلاف سیستم های مکانیکی اینرسی ندارند و سرعت پاسخ دهی بالاتری دارند و همین امر موجب می‌شود تا بتوانیم به سرعت های بالاتری برای کنتاکت ها دست یابیم.

### 1-20-1 استفاده از کلید قدرت فوق سریع در $SFCL^3$

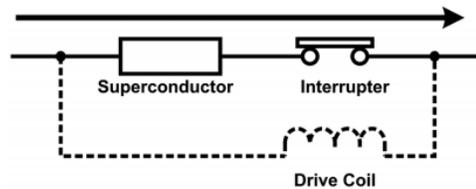
اخیراً تمایل زیادی به استفاده از محدود کننده های جریان خطای با خاصیت ابر رسانایی ایجاد شده است و این به خاطر افزایش امنیت و کارایی شبکه های قدرت می‌باشد. و همچنین استفاده از ابر رساناها در محدود کننده های جریان خطا موجب می‌شود که ساختار کلیدهای قدرت به نحوی تغییر کند که دیگر مجبور نباشیم که از گازهای عایق کننده ای مثل  $SF_6$  و همچنین از روغن های عایق کننده تجهیزات و سبب می‌شود تا کلیدهای قدرت جدید سازگاری بیشتری با محیط زیست داشته باشند. پروژه های بین المللی زیادی در خصوص محدود کننده های جریان خطای با کمک با خاصیت ابر رسانایی در حال انجام است. استفاده از این گونه از محدود کننده های جریان خطا سبب کاهش زمان خاموشی در سیستم های قدرت می‌شود.

---

<sup>2</sup> Ultra Fast Opening Switch

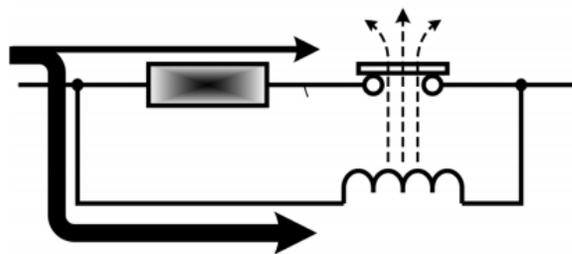
<sup>3</sup> Super Conducting Fault Current Limiter

در حال حاضر تعداد زیادی از این گونه از محدود کننده های جریان خطا ساخته شده است و تعداد زیادی از آنها ساختار مقاومتی یا سلفی دارند. اما مشکلی که در این بین وجود دارد این است که با افزایش سطح ولتاژ و جریان میزان طول ابر رسانا نیز افزایش می یابد و در مجموع توانایی SFCL به ابر رسانا بستگی دارد. در حال حاضر کمپانی های زیادی همچون ABB نمونه کوچکی از این گونه کلیدها را ساخته اند. به طور مثال شرکت ABB یک نمونه آزمایشی با قدرت 1.2 MVA ساخته است اما این در مرحله آزمایشی است و به مرحله فروش تجاری نرسیده است. می توان به منظور بهبود عملکرد SFCL، از آنها در ترکیب با کلید های سریع استفاده کرد. در شکل 1-2 این موضوع نشان داده شده است و در این شکل عملکرد عادی مدار نشان داده شده است، و زمانی که خطایی رخ می دهد و جریان از ابر رسانا عبور می کند و مقاومت آن زیاد می شود<sup>4</sup>. و این افزایش مقاومت به حدی است که جریان را به سمت سیم پیچی



شکل 1-54. عملکرد عادی SFCL به همراه کلید سریع

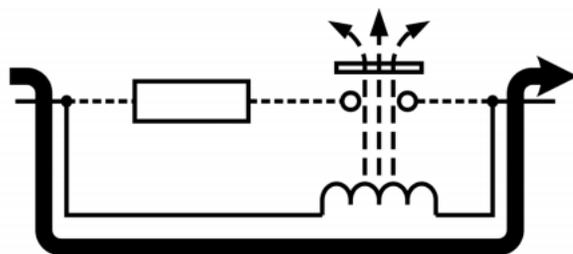
تسلا کوئل منحرف می سازد و متناسب با میزان جریان خطا این سرعت افزایش می یابد و منجر به باز شدن سریع تر کلید سریع می شود (مطابق شکل 1-3) و این باز شدن سریعتر نیز منجر به افزایش بیشتر طول قوس می گردد و اثر محدود کننده جریانی نیز بیشتر می شود.



شکل 1-55: عملکرد SFCL به همراه کلید سریع در شرایط خطا

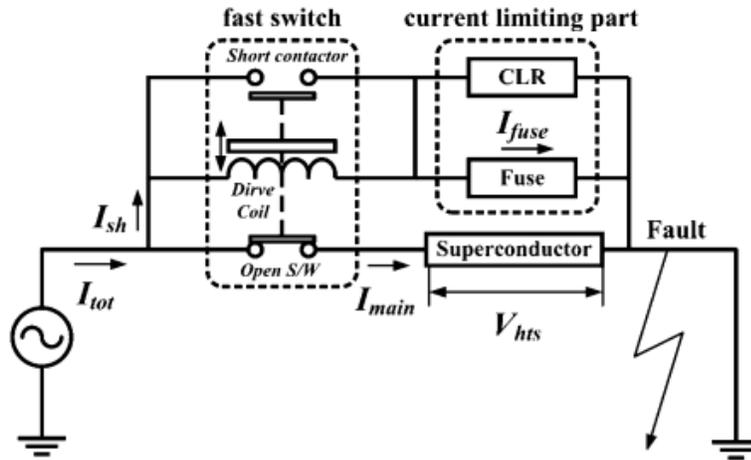
<sup>4</sup> Quench Mode

همانطور که در شکل 1-4 نشان داده می‌شود جریان محدود شده از کلید سریع عبور می‌کند و نهایتاً سریعاً قطع می‌شود. و نهایتاً قوس ایجاد شده بین کنتاکت‌ها خاموش می‌گردد و جریان به مسیر موازی کلید سریع منتقل می‌گردد و سپس با ادوات محدود کننده بیشتر جریان را محدود تر می‌کنند.



شکل 1-56: قطع شدن جریان در SFCL و منتقل شدن جریان به مسیر موازی

مدت زمان تغییر مسیر جریان کمتر از چند میلی ثانیه است. و در طی قطع شدن جریان خطا، کلید سریع باز می‌ماند و جریان بالای ایجاد شده توسط ادوات سنتی محدودکننده جریان محدود می‌گردد و نهایتاً این جریان قطع می‌گردد. نکته جالبی که در این جا قابل توجه است این است که از ابررسانا به منظور محدود کننده جریان خطا استفاده نمی‌کنند و فقط از آن به منظور سنس کردن جریان خطا استفاده می‌شود. و به خاطر همین می‌توان از مقادیر کوچک ابر رسانا استفاده کرد زیرا افت ولتاژ زیادی بر روی آن نمی‌افتد و بیشتر افت ولتاژ بر روی قطع کننده سریع می‌افتد. و این نشان می‌دهد که ظرفیت این نوع از کلید به توانایی تحمل کلید سریع بستگی دارد و در مقایسه با محدود کننده های مقاومتی و سلفی که از ابر رسانا استفاده می‌کنند از میزان کمتری از ابر رسانا استفاده می‌کنند.



شکل 1-57: ساختار کلی SFCL به همراه کلید سریع

شکل 1-5 نمای نهایی محدود کننده جریان خطای با کلید سریع را که در آن از ابررسانا استفاده شده است را نشان میدهد؛ همانطور که قبلاً گفته شد در اثر عبور جریان خطا از ابررسانا، مقاومت آن افزایش می‌یابد و جریان خطا به درون کویل تسلا هدایت می‌گردد و همین جریان شدید عبوری از کویل سبب تحریک شدن کنتاکت های کلید سریع می‌شود و باعث می‌شود تا کنتاکت های بالایی به هم بچسبند و جریان خطا به قسمت محدود کننده جریان<sup>5</sup> که شامل Fuse و مدار RLC می‌شود، برسد و سپس عمل محدود کنندگی بیشتر بر روی جریان خطا صورت می‌گیرد و در نهایت جریانی که در حد نهایی خودش محدود گشته است را می‌توان با کلید با قدرت کمتری قطع کرد و به همین طریق می‌توان از طراحی کلید با رنج های بالا جلوگیری نمود.

<sup>5</sup> Fault Current Limiting Part

فصل دو: انتخاب توپولوژی و سوئیچ  
مناسب و شبیه سازی عملکرد آن در  
فرستنده لورن با توجه به قيود طراحی

## 1-2 مقدمه

توسعه ادوات نیمه هادی سبب شده است تا از آنها بتوان در طراحی کلید های پالس پاور استفاده کرد و از مزایای خوب آنها بهره برد. تکنولوژی امروز ادوات نیمه هادی این امکان را ایجاد کرده است تا بتوانیم کلید هایی با قدرت بلوکه کردن ولتاژهای بالا را که توانایی کنترل جریان را هم داشته باشند طراحی کنیم، بسته به طراحی و ساختار دستگاه نرخ سعود سیگنال جریان در حدود چند هزار آمپر بر میکرو ثانیه می تواند باشد و همچنین دارای سرعت بازآرایی بالایی در مقایسه با سایر قطعاتی که در قدیم به این منظور مورد استفاده قرار گرفته اند، مانند تیراترون (*Thyratron*) و ایگنایترون (*Ignitron*) و اسپارک گپ (*Spark Gap*) می باشند. مهمترین مزیت های کلید های مبتنی بر ادوات نیمه هادی ، قابلیت اطمینان ، طول عمر و سازگاری با محیط زیست می باشد. قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری بالای این نوع از کلید ها هزینه های اولیه بالای طراحی و ساخت کلید های مبتنی بر ادوات نیمه هادی را جبران می کند. نوع نیمه هادی استفاده شده و توانایی قطعه استفاده شده به شدت طراحی را تحت تاثیر قرار می دهد و نیاز به دانش عمیقی از نحوه عملکرد و کاربرد ادوات سوئیچینگ دارد. در طراحی سیستم هایی که با ادوات الکترونیک قدرت کار می کنند، در نظر گرفتن قطعات نیمه رسانای قدرت و مشخصه آنها اهمیت بسیار زیادی دارد. انتخاب قطعه بستگی به کاربری آن دارد. برخی مشخصات قطعات و چگونگی تاثیر گذاری آنها بر فرآیند انتخاب قطعه در زیر آمده اند.

- 1- ولتاژ در حالت وصل یا مقاومت در حالت وصل تلفات رسانایی را مشخص می کند.
- 2- زمان سوئیچینگ تلفات در حالت گذرا و حد بالای فرکانس سوئیچینگ را مشخص می کند.
- 3- ولتاژ و جریان نامی قابلیت توانی قطعه را مشخص می کنند.
- 4- توان لازم برای کنترل مدار مشخص کننده میزان سادگی یا سختی مدار کنترل است.
- 5- ضریب حرارتی مقاومت در حالت وصل میزان سادگی اتصال موازی قطعات را برای کار با جریان های بزرگ مشخص می کند.

قیمت قطعه نیز یکی از عوامل موثر در انتخاب است. از دیدگاه سیستمی باید محدودیت های ولتاژ و جریان در نظر گرفته شود. برخی مسایل مهم دیگر عبارتند از بازدهی قابل قبول انرژی ، حداقل فرکانس سوئیچینگ جهت کاهش فیلترینگ و اندازه مدار، هزینه و غیره. بنابراین در انتخاب قطعه باید بین قابلیت های آن و موارد مورد نیاز در سیستم مد نظر انطباق ایجاد شود.

همانطور که از فصل 1 نتیجه گیری کردیم ، مناسب ترین انتخاب جهت ساخت سوئیچ توان بالا، استفاده از IGBT است، به دلیل آنکه مصالحه بسیار خوبی بین سرعت و نحوه عملکرد این قطعه اعم از توانایی بلوکه کردن ولتاژهای بالا و کنترل جریان های بالا و پالسی وجود دارد می توان از آنها در طراحی کلید های پالسی استفاده کرد. همچنین این عنصر به دلیل کنترل پذیری خوبی که دارد با فرمانی که به گیت داده می شود به آسانی روشن و خاموش می شود و نیاز به طراحی کنترلر پیچیده ای نخواهیم داشت و از این لحاظ هم دارای مزیت است. زمان روشن شدن و خاموش شدن در IGBT در حدود 1 میکرو ثانیه می باشد و سرعت سوئیچینگ بسیار خوبی را دارد و ولتاژ و جریان نامی آنها گاهی به 6500 ولت و 1000 آمپر می رسد و به دلیل ضریب حرارتی مثبت آن در نوع NPN می توان تعداد زیادی از آنها را با هم موازی کرد و تقسیم جریان متعادلی را داشت.

## 2-2 بررسی پالسهای لورن

امروزه ((مکان یابی)) به عنوان یکی از ابزارهای بسیار ضروری محسوب می شود و با توجه به اینکه مکان یاب های عمومی مبتنی بر سیستم موقعیت یاب جهانی (GPS) همیشه در دسترس نبوده و قابل اطمینان نیستند. ساخت، نصب و راه اندازی سامانه های مکان یابی محلی<sup>6</sup> (LPS) برای کشور ضروری می باشد. سامانه لورن<sup>7</sup> به عنوان یک مکمل و پشتیبان قابل اتکا برای GPS می تواند با این اهداف مورد استفاده قرار گیرد. هم اکنون در بسیاری از کشورهای جهان فرستنده های لورن مربوط به این سامانه نصب شده و در حال کار کردن می باشند.

مهمترین سازنده فرستنده های لورن تا سال 2000 شرکت MEGAPULSE آمریکا بوده است. تولید پالس در این فرستنده توسط یک منبع جریان سینوسی مبتنی بر مولد نیم سیکل<sup>8</sup> (HCG) صورت می پذیرد . برای این کار حداقل به چهار HCG شامل دیوده ها، سلف ها، خازن ها و یکسوسازهای کنترل شده سیلیکونی<sup>9</sup> (SCR) می باشد و همه آنها به یک فیلتر تنظیم کننده برای پالس لورن بسته می شوند. از سال 2000 به بعد شرکت های دیگری نیز برای ساخت این فرستنده ها بر اساس تقویت کننده های سوئیچینگ وارد کار شدند که معروف ترین آنها شرکت Nautel می باشد.

---

<sup>6</sup>Local Positioning System

<sup>7</sup>Long Rang Navigation (LORAN)

<sup>8</sup>Half Cycle Generator

<sup>9</sup>Silicon-Controlled Rectifire

## 1-2-2 رابطه سیگنال لورن

سیگنال لورن باید دارای شکل زمانی خاص و دقیق و توان قابل قبولی باشد تا بتواند در فواصل دور و با خطای پایینی آن را آشکار کرد. شکل در نظر گرفته شده برای سیگنال لورن به صورتی است که توانایی برآورده کردن نیازمندیهای این سامانه را دارد. رابطه مربوط به سیگنال لورن نرمالیزه بصورت زیر می باشد.

$$i(t) = e^2 \left( \frac{t}{62.5\mu} \right)^2 e^{-\frac{2t}{62.5\mu}} \sin(2\pi \times 10^5 t) \quad (1-2)$$

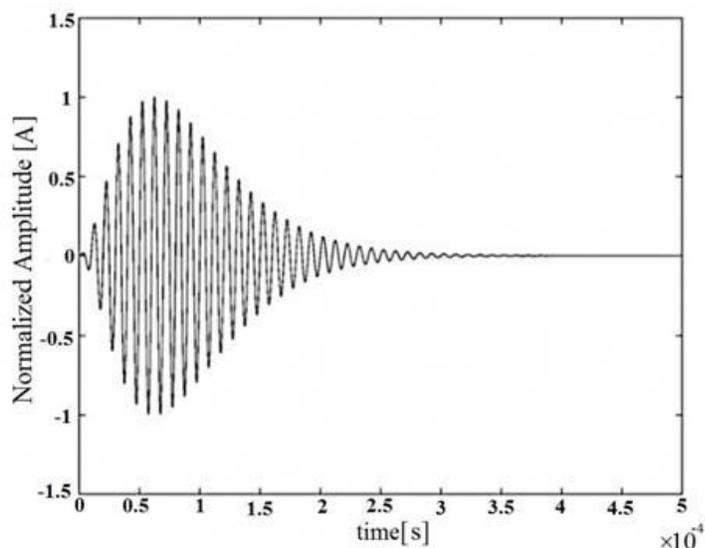
در رابطه اخیر،  $e^2$  ضریب نرمالیزاسیون است و به گونه ای تعیین گردیده که حداکثر دامنه جریان لورن برابر با واحد باشد. همانگونه که از رابطه (1-2) پیداست، پوش سیگنال با یک موج سینوسی 100kHz مدوله شده است. سیگنال لورن نرمالیزه ایده آل در شکل (1-2. الف) و طیف سیگنال لورن در شکل (1-2. ب) نشان داده شده است. این شکل مربوط به FFT سیگنال لورن با حذف مقادیر خارج از محدوده صفر تا 250 میکروثانیه و نرخ 10 نانو ثانیه می باشد. همانگونه که از شکل (1-2. الف) پیداست پالس لورن دارای گستره زمانی تا حدود 250 میکروثانیه می باشد. برای این پالس پارامترهای مهمی از جمله تفاضل پوش به سیکل<sup>10</sup>، پهنای باند،<sup>11</sup> MMSE، خطای نقاط اوج در 13 سیکل اول، زمانهای عبور از صفر لبه های پیشرو و میزان خطای آن ها و درصد افت دامنه پس از 500 $\mu$ s از شروع سیگنال نسبت به دامنه بیشینه نرمالیزه تعریف می شود.

لازم به ذکر است که مدار آنتن در سامانه لورن یک بار RLC می باشد و با فرض اینکه آنتن از نوع TLM<sup>12</sup> و به طول 625 فوت یا 192 متر باشد، مقادیر RLC معمول بصورت  $R = 2.5\Omega$  و  $C = 11.5nF$  و  $L = 179\mu H$  است. از آنجا که محدوده فرکانسی جریان عبوری از آنتن بین 90 تا 110 کیلو هرتز با فرکانس مرکزی 100 کیلو هرتز می باشد برای به حداقل رساندن مقاومت راکتانسی آنتن، یک سلف 40 میکروهانری به مدار آنتن اضافه می شود، بنابراین سلف معادل آنتن 219 میکروهانری خواهد شد.

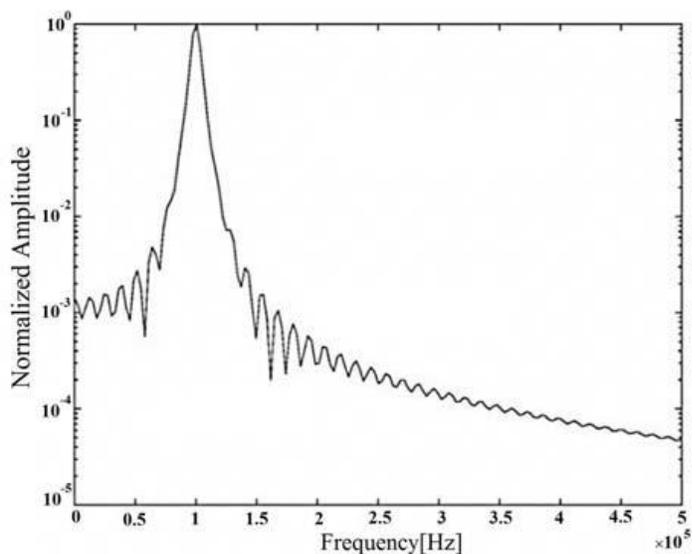
<sup>10</sup>Envelope-to-Cycle Diffrence (ECD)

<sup>11</sup>Minimum Mean Squar Error

<sup>12</sup>Transmission Line Matrix



شکل 2-1. الف) سیگنال لورن نرمالیزه

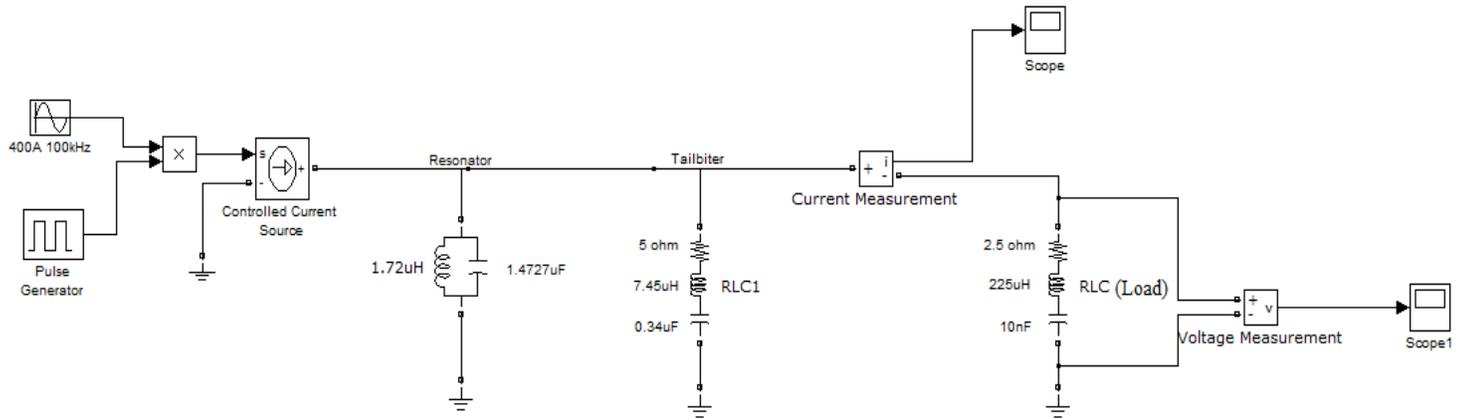


شکل 2-1. ب) طیف نرمالیزه سیگنال لورن

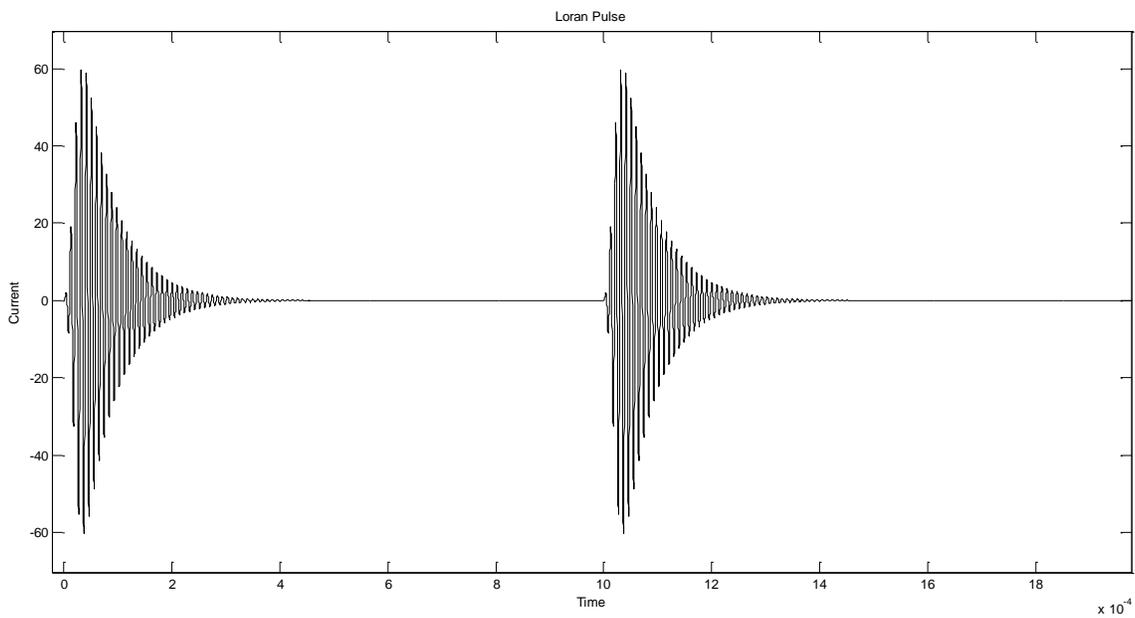
### 3-2 شبیه سازی فرستنده لورن

با ساخت پالس های لازم و قرار دادن بار معادل آنتن، می توان پالس لورن را بعنوان جریان بار مشاهده کرد. در شبیه سازی از یک منبع جریان با دامنه 400 آمپر و فرکانس 100 کیلوهرتز استفاده شده است که از یک مدار رزوناتور LC موازی و یک مدار میرا کننده RLC سری عبور می کند، مدار مذکور در شکل 2-2 نشان داده شده است. این مدار، مدار مولد سیگنال لورن می باشد. همانطور که در قسمت قبل تشریح شد بار در سیگنال لورن یک آنتن می باشد که معادل با یک بار RLC با مشخصات  $R = 2.5\Omega$  و

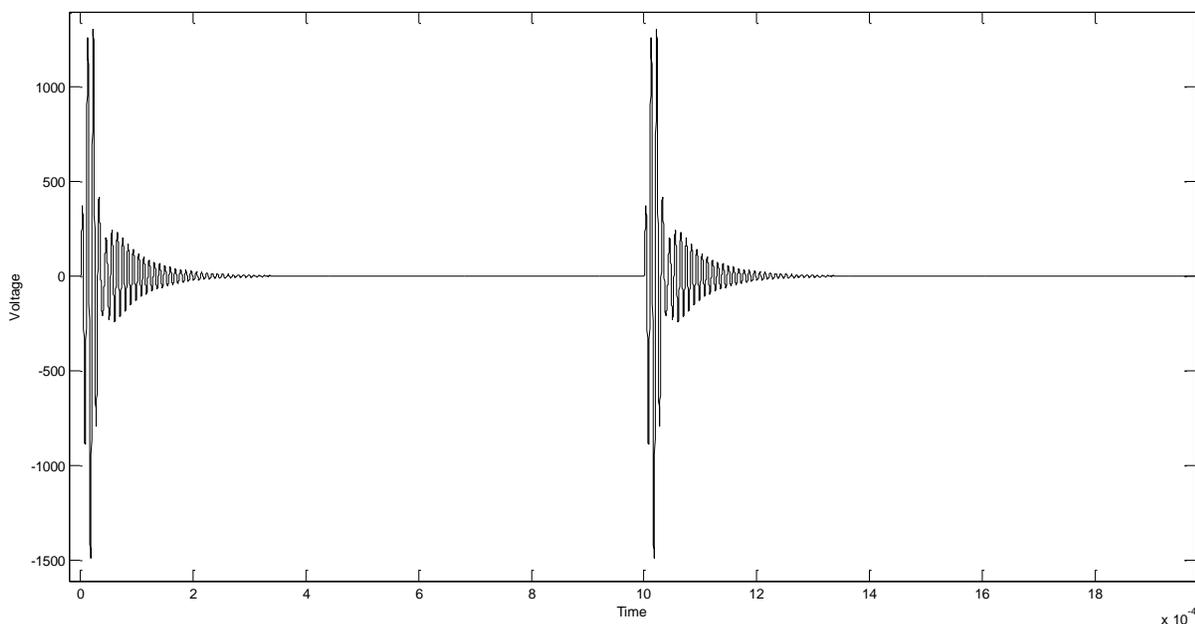
شکل ولتاژهای دو سر بار و جریان عبوری از این بار بعنوان سیگنال لورن معرفی می شود.  
 شکل ولتاژهای دو سر بار و جریان عبوری از بار در شکل های 2-3 و 2-4 نشان داده شده است.



شکل 2-2) مدار مولد سیگنال لورن



شکل 2-3) پالس های لورن بر حسب زمان



شکل 2-4) ولتاژ بار بر حسب زمان

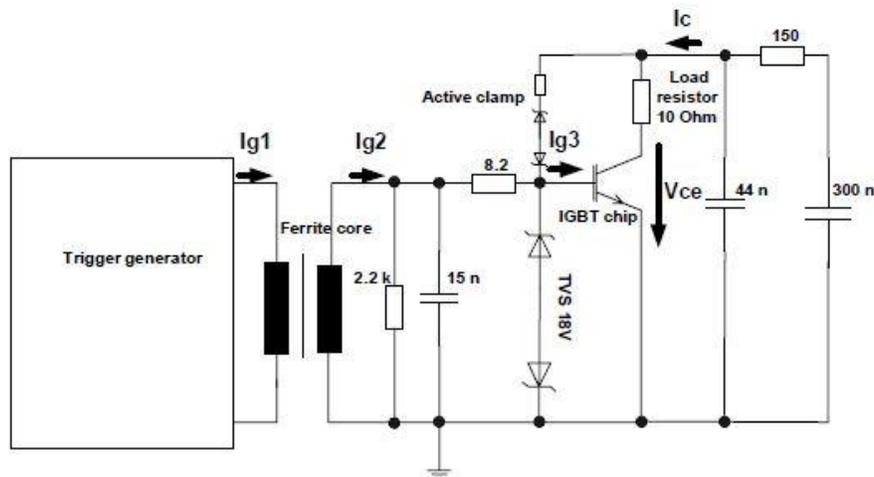
همانطور که در شکل های 2-3 و 2-4 نشان داده شده است و طبق رابطه 2-1، پالس های لوران شکل موج جریان عبوری از آنتن یا مدار RLC می باشد و طبق شک موج بدست آمده پالس های مذکور دارای حداکثر دامنه جریان 60 آمپر و ولتاژی در حدود 1300 ولت می باشند.

## 2-4 طراحی سوئیچ مناسب جهت سویچ زنی پالس های با ولتاژ و جریان بالا

همانطور که در فصل اول نتیجه گیری شد، به دلیل آنکه مصالحه مناسبی بین سرعت و عملکرد IGBT وجود دارد از آن در جهت طراحی یک نمونه کلید، جهت سویچ زنی پالس های سریع و با ولتاژ و جریان بالایی توانیم استفاده کنیم. ایده به کار رفته بر مبنای اتصال سری IGBT های سریع جهت توسعه یک کلید نیمه هادی با توانایی تحمل ولتاژ و جریان بالا می باشد. به منظور سویچینگ هم زمان IGBT های سری بایستی یک سیستم سنکرون جهت فعال سازی گیت IGBT ها داشته باشیم. و همچنین بایستی این سیستم از توزیع نامتوازن ولتاژ بر روی IGBT ها جلوگیری کند. پس بنابراین در این سیستم بایستی یک سیگنال تحریک صادر شود و به IGBT هایی که با هم سری هستند جهت فعال

سازی هدایت گردد. زمان یکسان سعود سیگنال برای هر کلید سبب افزایش امنیت سیستم می شود و از افتادن ولتاژ ناهمگن بر روی هر کلید جلوگیری می کند.

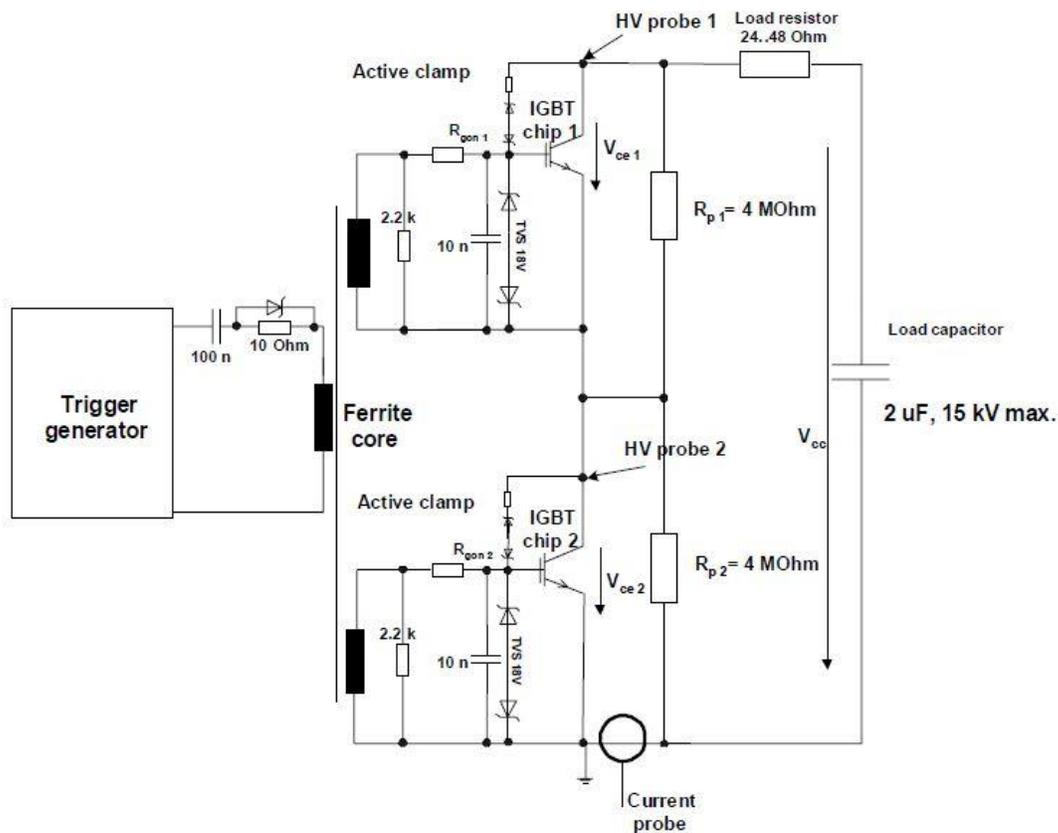
جهت آزمایش قابلیت این نوع سویچ در مقابله با سیگنالهای پالسی اولین تست ها بر روی یک کلید تک IGBT صورت می گیرد و پس از بدست آوردن پارامترهای مدار با سری کردن کلید ها به بلوکه کردن ولتاژهای بالاتر می پردازیم و در واقع رنج به کار گیری کلید را افزایش می دهیم.



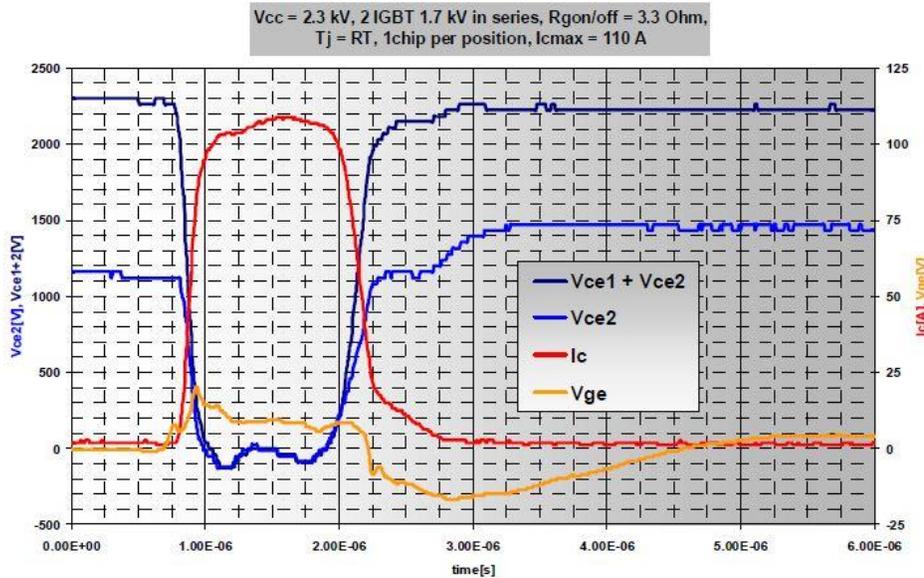
شکل (2-5) کلید تک IGBT به همراه مولد پالس فعال ساز و یک ترانس جهت انتقال سیگنال های فعال سازی گیت

شکل (2-5) مدار یک کلید تک IGBT را نشان می دهد. این سیستم شامل یک مولد سیگنال تحریک جداگانه می باشد که توسط هسته ferrite به IGBT متصل می شود. به وسیله ژل سیلیکون بر روی سرامیک چسبانده می شود، و همچنین یک مدار کلمپ اکتیو جهت محافظت از دستگاه در مقابل اضافه ولتاژها طراحی شده است. پس از فعال سازی IGBT با سیگنال ارسالی از گیت جریان پالسی ناشی از خازن و مقاومت سمت راست مدار از کلید عبور می کند.

جهت رسیدن به ولتاژ بلوکه شونده بالاتر نیاز به چند IGBT خواهیم داشت که بصورت سری به هم متصل شده اند، جهت سوئیچینگ همزمان از یک سیستم تریگر کننده یکسان استفاده می کنیم که سیگنال را از طریق ترانسفورماتور به گیت IGBT ها منتقل می کنند. شکل (2-6) دو کلید تکی را نشان می دهد که شامل دو IGBT سری می باشند.



شکل (2-6) کلید با دو IGBT سری به همراه مولد پالس فعال ساز و یک ترانس جهت انتقال سیگنال های فعال سازی گیت . به همراه مدار کلمپ 1.7kV



شکل 2-7) شکل موج های ولتاژ و جریان ثبت شده برای دو IGBT 1.7kV نمودار آبی پررنگ ولتاژ مجموع کلکتور امیتر را برای دو IGBT نشان می دهد و نمودار آبی کمرنگ ولتاژ کلکتور-امیتر را برای یک IGBT نشان می دهد.

بزرگترین مشکل مربوط به تقسیم ولتاژ بین دو IGBT پس از خاموش شدن می باشد که این مسئله با اضافه کردن مقاومت های موازی با کلکتور امیتر حل شده است. شکل 4 موج های ثبت شده را برای دو عدد IGBT که هر کدام توانایی بلوکه کردن ولتاژ 1.7kV را نشان می دهد که با هم سری شده اند. و ولتاژ شارژ خازن می باشد، شکل (2-7) نشان می دهد که با سری کردن دو IGBT می توان پالس هایی با جریان 100 آمپر و پهنای پالس حدود 1 میکروثانیه را سویچ کرد. توزیع ولتاژ بعد از خاموش شدن IGBT ها خارج از کنترل می باشد و این به خاطر جریان اشباع عبور داده شده از IGBT ها می باشد. این اثر با استفاده از مدار کلمپ متعادل می شود. به دلیل آنکه جریان اشباع چیپ ها بسیار زیاد می باشد (حدود 600 آمپر)، مدار ساخته شده بسیار سریع می تواند روشن شود و هدایت کامل را ایجاد کند و ولتاژ کلکتور امیتر هم کم باشد.

چیپ های با قابلیت بلوکه کنندگی ولتاژ بالاتر توزیع ولتاژشان پس از خاموش شدن نا همگن تر است این اثر از روی شکل 2-7 و بعد از خاموش شدن هر IGBT مشخص است.

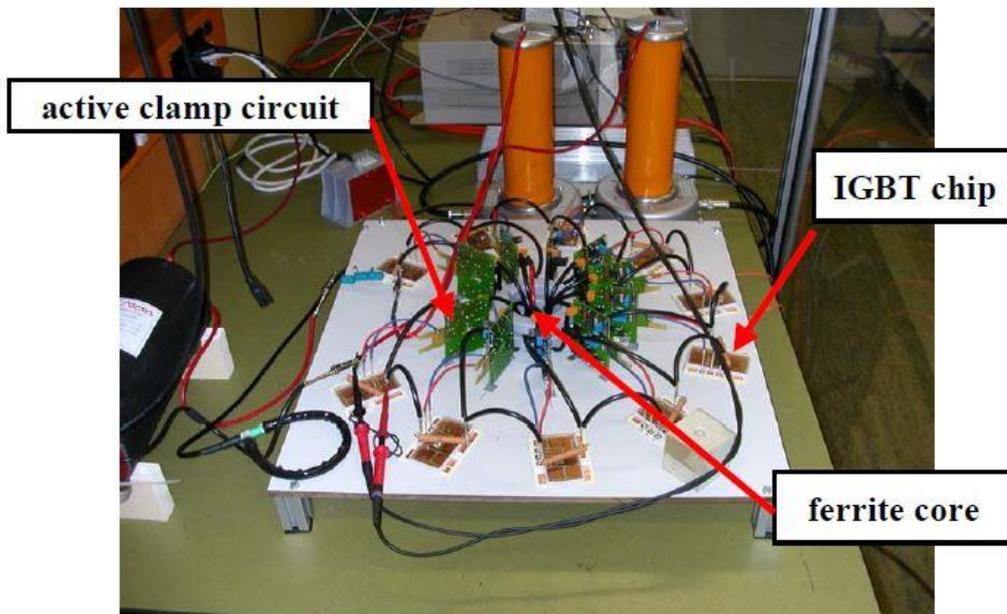
جدول 1-2 مقایسه ای بین انواع مختلف IGBT را جهت طراحی مناسب کلید ارائه داده است و نشان می دهد IGBT ای که ولتاژ بلوکه کنندگی کمتری دارد بهترین عملکرد را در خصوص جریان اشباع ، تقسیم ولتاژ ، تلفات سوئیچینگ و زمان سوئیچینگ دارد. برای همه مدل های تست شده IGBT زمان سعود سیگنال جریان سریعتر از 100 نانوثانیه است. با بررسی جدول 1-2 متوجه می شویم که IGBT ای که می تواند ولتاژ 1.7kV را بلوکه کند می تواند جریان های بالاتر از 500 آمپر را در حالت اتصال کوتاه کنترل کند. به دلیل جریان اشباع کمتر مدل های با ولتاژ بلوکه کنندگی بیشتر می توانند جریان کمتری را کنترل کنند که در حدود 100 آمپر می باشد. با استفاده از چیپ 1.7kV بصورت اتصال سری و موازی نیاز به 24 عدد IGBT خواهیم داشت تا بتوانیم ولتاژ 20kV و جریان 1kA آمپر را کنترل کنیم. برای ساخت کلید مزبور با چیپ 3.3 kV بایستی 7 عدد چیپ بصورت سری و موازی با هم متصل گردند و در مجموع 49 عدد چیپ نیاز خواهیم داشت. و با چیپ با قدرت بلوکه کنندگی 6.5kV به 40 عدد IGBT نیاز داریم که بصورت 10 عدد IGBT موازی که بصورت 4 تایی با هم سری شده اند می شود. بنابراین نتیجه می گیریم که حداقل تعداد چیپ مورد نیاز در حالتی رخ می دهد که از چیپ 1.7 kV ای استفاده می کنیم. بنابراین در مجموع می توان گفت که تنها مزیت چیپ های 3.3kV ای و 6.5kV ای ولتاژ بلوکه کنندگی بالاترشان می باشد. طبق بحث های صورت گرفته می توان استنباط کرد که چیپ kV IGBT 1.7 برای تحقق کلید 20k, 1kA پالسی مناسب می باشد.

جدول 1-2: جدول مشخصات انواع مختلف IGBT

Chip voltage class	1.7 kV	3.3 kV	6.5 kV
Short circuit current [A] (SC1, VGE = 15V, RT)	650.0	160.0	110.0
Peak power [kW] per chip, Turn on	22.0	62.0	90.0
Peak power [kW] per chip, Turn off	36.0	85.0	140.0
Energy losses [mJ] per chip	20.0	150.0	160.0
Voltage slope dv/dt[kV/us] per chip, Turn on	-10.0	-15.0	-30.0
Voltage slope dv/dt[kV/us] per chip, Turn off	6.0	20.0	31.0
Current slope di/dt[A/us] per chip, Turn on	800.0	800.0	600.0
Current slope di/dt[A/us] per chip , Turn off	-400.0	-100.0	-500.0
DC link voltage, Vcc [V]	2300.0	4700.0	9200.0
DC link voltage per chip, Vcc [V]	1150.0	2350.0	4600.0
Collector current Ic[A] per chip	110.0	105.0	105.0
Qtail [uC] integrated after change in di/dt	6.0	4.5	7.0
Rgon/off[Ohm]	3.3	3.3	3.3

## 1-4-2 اتصال سری و موازی IGBT ها جهت افزایش رنج ولتاژ و جریان سویچ

هدف این قسمت بررسی امکان اتصال سری چیپ های IGBT 1.7 kV و تحریکشان به وسیله یک سیستم تحریک ساده می باشد. با استفاده از مدار کلمپ می توانیم تقسیم ولتاژ دینامیکی را بر روی IGBT های سری شاهد باشیم. هر IGBT زمان سویچینگ مربوط به خود را دارد که سبب توزیع دوباره ولتاژ در زمان خاموش شدن IGBT می شود. سریعترین IGBT بایستی کل ولتاژ را بلوکه کند زیرا در زمان فعال بودن آن IGBT های دیگر هنوز فعال نشده اند. مدار کلمپ یک فیدبک از گیت IGBT ایجاد می کند که سبب می شود ولتاژ گیت از حد خودش بالاتر نرود و بتوانیم عملکرد همزمان IGBT هارا شاهد باشیم. به این منظور 10 عدد IGBT 1.7 kv را بر روی تست برد قرار می دهیم تا عملکرد همزمان IGBT ها را تست کنیم.

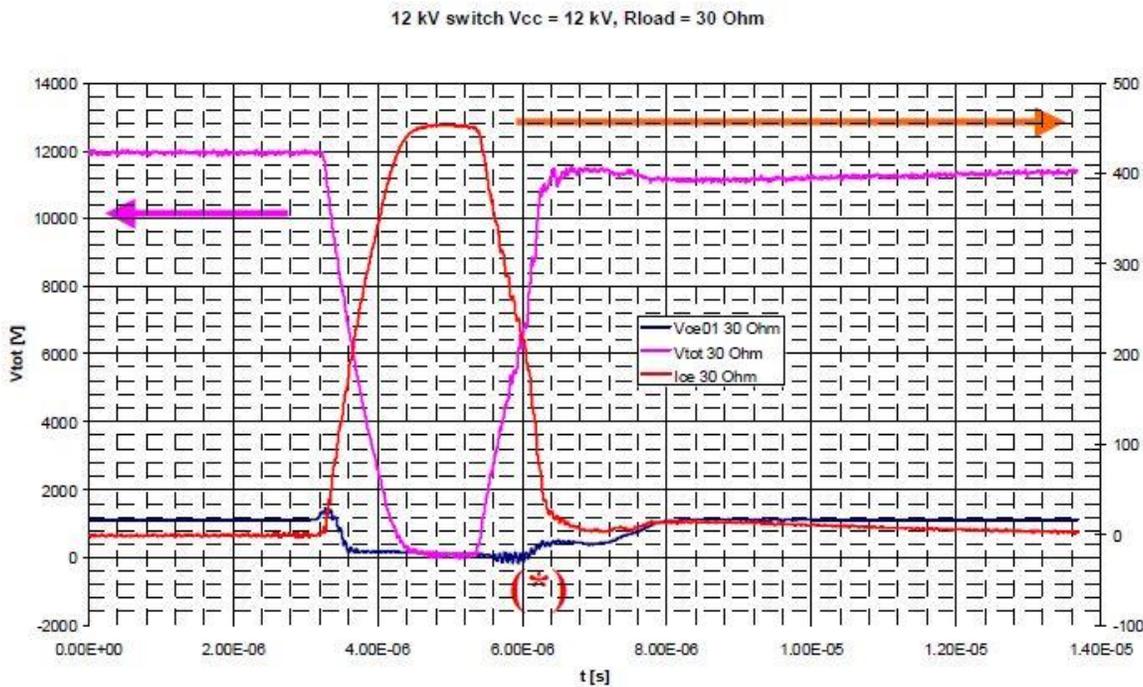


شکل 2-8) اتصال 10 عدد IGBT, 1.7kV جهت

ارزیابی کلید زنی همزمان

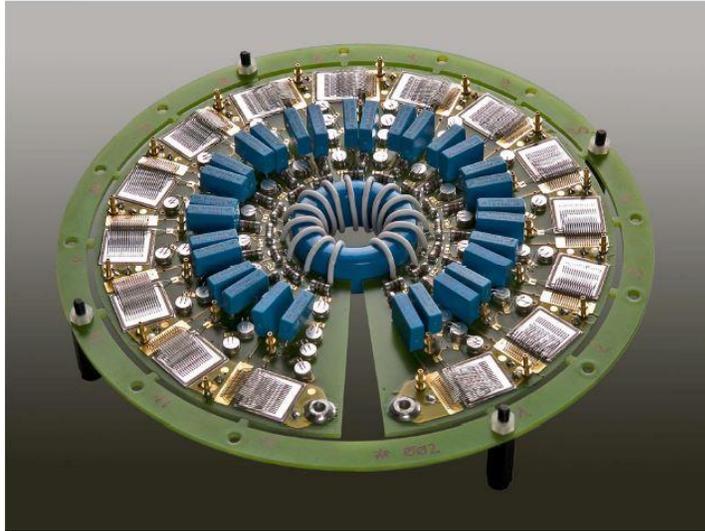
تست هابا ولتاژ کلکتوری در بازه 200 تا 1200 ولت انجام شده اند. مقاومت بار در بازه 20 تا 30 اهم بوده است و جریان کلکتور هم در محدوده 60 تا 600 آمپر می باشد. شکل 2-8 سیستم ساخته شده را جهت سویچینگ پالسها نشان می دهد. شکل 2-9 نتایج تست را در ولتاژ نشان می دهد و می توان ملاحظه نمود که جریان کلکتور امیتر به 450 آمپر افزایش یافته است و اثبات می کند که اتصال سری به درستی عمل نموده است. نمودار آبی ولتاژ کلکتور امیتر را برای یک IGBT تکی به خوبی نشان می دهد. مشاهده می شود که افزایش ولتاژ قابل توجهی در لحظه اولیه روشن IGBT وجود دارد. نمودار آبی همچنین رفتار IGBT ای که توسط مدار کلمپ در زمان خاموش شدن محافظت می شود را نشان می دهد. مدار حفاظتی زمان خاموش شدن را کم می کند. بنابراین احتمال خطر بلوکه شدن ولتاژ توسط یک IGBT از بین می رود. این نقطه در نمودار شکل 2-9 به وسیله \* نشان داده شده است.

بعد از خاموش شدن، ولتاژ نمی تواند به مقدار اولیه 12 کیلو ولت برسد. و این به خاطر تلفات خازن استفاده شده می باشد.



شکل 2-9) نتایج اندازه گیری های صورت گرفته از مدار شکل 2-8، نشان داده شده است که ولتاژ بلوکه کننده 10 عدد IGBT, 1.7kV برابر با 12kV می باشد و این به خاطر محدودیت استفاده از 70 درصد ظرفیت لینک دی سی می باشد.

برای 10 عدد IGBT سری شده ولتاژ  $V_{cc} = 12kV$  یک محدودیت می باشد. به دلیل تغییر پارامتر های مدار کلمپ و همچنین افت ولتاژهای دینامیکی در طول خاموش شدن IGBT ها ، افت ولتاژ هر IGBT می تواند از مقدار مجاز بالاتر برود و سبب از بین رفت IGBT و باز شدن مدار شود. برای ولتاژ های بالاتر نیاز داریم تا تعداد بیشتری IGBT با هم سری گردند.



شکل (2-10) کلید ساخته شده بوسیله 15 عدد IGBT, 1.7kV جهت بلوکه کردن ماکزیمم ولتاژ 18kV و انتقال جریان 500 A

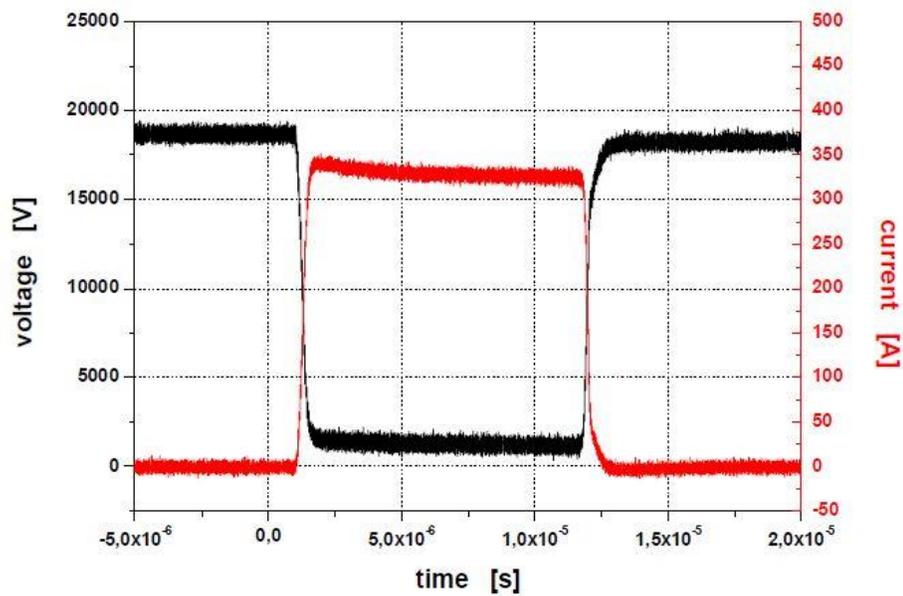
شکل (2-10) کلید ساخته شده با 15 عدد IGBT, 1.7kV جهت بلوکه کردن ماکزیمم ولتاژ 18kV و هدایت جریان 500A با در نظر گرفتن محدودیت اعمال 70 درصد ولتاژ لینک دی سی می باشد. که در آن محدودیت شعاع 140 میلیمتری برای طراحی کلید اعمال شده است. جهت افزایش قابلیت هدایت جریانی سویچ بایستی با توجه به رنج جریانی که لازم است تا هدایت و قطع شود IGBT ها با یکدیگر موازی شوند. فرمول های زیر جهت تخمین تعداد IGBT لازم سری و موازی شونده موثر است.

$$\text{Number of Parallel IGBTs} = \frac{\text{Max Load Current}}{\text{Max Current of IGBT}} \quad (2-2)$$

$$\text{Number of series IGBTs} = \frac{\text{Max Load Voltage}}{\text{Max Blocking Voltage of IGBT}} \quad (3-2)$$



شکل 2-11) نمای نزدیک تر از مدار شکل 2-10

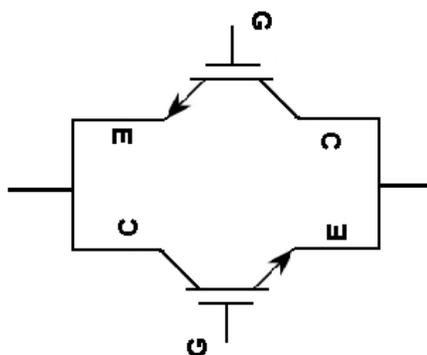


شکل 2-12) نتایج اندازه گیری ولتاژ و جریان مدار شکل 2-10، ولتاژ کلکتور امیتر برابر با 18 کیلو ولت و جریان کلکتور برابر 350 آمپر می باشد. زمان صعود سیگنال 10 نانو ثانیه است.

## 2-4-2 طراحی سوئیچ مناسب جهت سوئیچینگ پالسهای لورن بعنوان یک سیگنال سریع با

### رنج ولتاژ و جریان بالا

با توجه به بحث های صورت گرفته در فصل اول و قسمت 2-4 به این نتیجه می رسیم که مناسب ترین و بهینه ترین قطعه جهت سوئیچ زنی پالسهای لورن استفاده از سویچی مبتنی بر IGBT می باشد. همانطور که در فصل 1 در معرفی سوئیچ های کنترل پذیر گفتیم این قطعات یک جهته جریان را هدایت می کنند و برای آنکه جریان را بصورت دوجته هدایت کنند بایستی دو سویچ را بصورت شکل 2-13 موازی کنیم تا پالس های لورن در حالت عادی بتوانند به آنتن منتقل شوند.



شکل 2-13) اتصال موازی دو IGBT

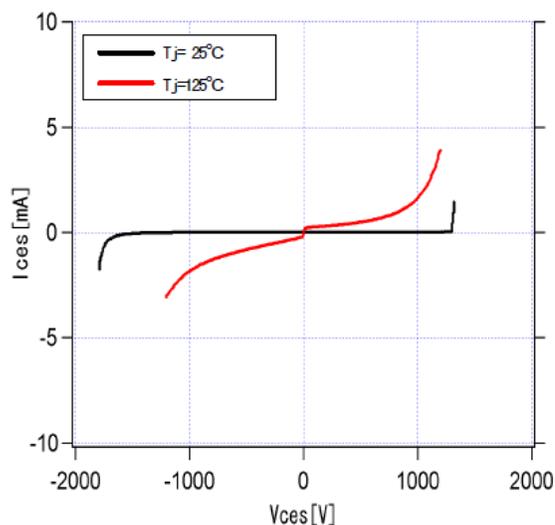
جهت هدایت کامل

IGBT های با قابلیت بلوکه کنندگی معکوس<sup>13</sup> دارای مشخصه بلوکه کنندگی متقارن می باشد، این به این معنی می باشد که این کلیدها قابلیت بلوکه کنندگی ولتاژ را در حالت مستقیم و معکوس را دارا می باشند، در نتیجه به دلیل هدایت دوطرف سویچ حاصل شده نیاز به دیود های سری برطرف می شود، شکل 2-13 مدار معادل این IGBT را نشان می دهد و به دلیل حذف شدن دیودهای سری تلفات توان به طرز شدیدی کاهش می یابد.<sup>14</sup> RB-IGBT همانطور که در شکل (1) نشان داده شده است دارای مشخصه بلوکه کنندگی متقارن ولتاژ می باشد، این قطعه دارای جریان نشستی کم و گرمای ایجاد شده کم و پایداری در هر دو جهت است، شکل (2) ولتاژ حالت روشن بودن IGBT را بعنوان تابعی از جریان

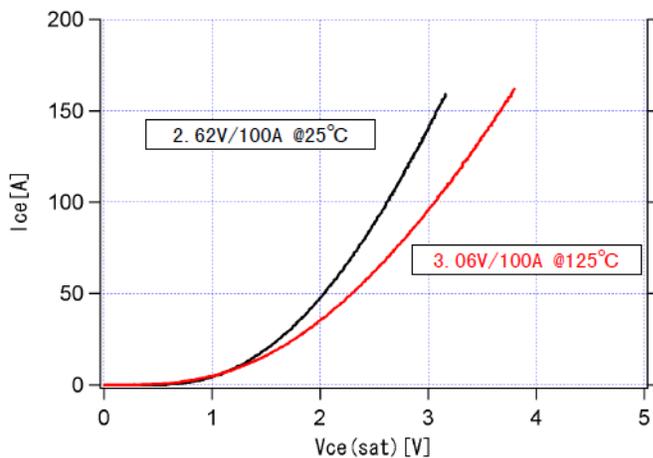
<sup>13</sup> Reverse Blocking IGBT (Bidirectional IGBT)

<sup>14</sup> Reverse Blocking IGBT

کلکتور نشان می دهد. افت ولتاژ حالت وصل کمتر شده است و این تایید کننده این مطلب است که تلفات هدایتی کم شده است. جدول (3) بطور خلاصه مشخصه تلفات سویچینگ حالت بازیابی و حالت روشن RB-IGBT را با IGBT معمولی که با دیود فری ویل همراه است را مقایسه کرده است. تلفات کم حالت خاموش و بازیابی معکوس این نوع کلید ها را جهت کاربرد در فرکانس های بالا مناسب کرده است. شکل (4) نشان دهنده مصالحه  $E_{off}$  در مقابل ولتاژ حالت روشن برای RB-IGBT و نسل چهارم IGBT که به همراه دیود سری می باشند را نشان می دهد. نتایج نشان مویند این مطلب هستند که RB-IGBT تلفات کمتری دارد.



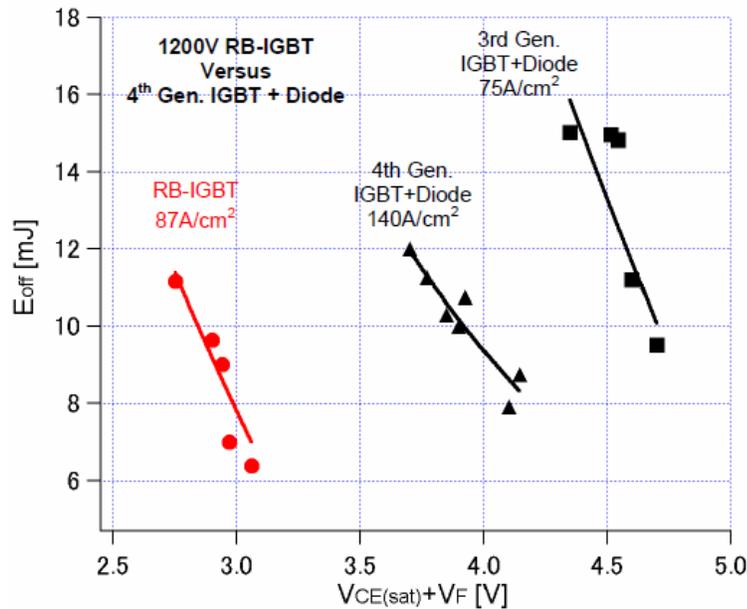
شکل (1). مشخصه ولتاژ جریان RB-IGBT در حالت بلوکه کردن ولتاژ



شکل (2). مشخصه حالت روشن RB-IGBT

جدول (3). مقایسه تلفات RB-IGBT و IGBT+Diode

Item	<i>RB-IGBT</i>	IGBT+Diode
Von (V)	<i>3.06</i>	3.80
Esw (mJ/p)	<i>11.6</i>	19.1
Err (mJ/p)	<i>11.7</i>	12.2



شکل (4). مصالحه تلفات حالت روشن در مقابل ولتاژ حالت روشن

جهت متوقف کردن ارسال پالس های لورن بایستی فرمان همزمانی رو به گیت IGBT ها بدهیم و سویچ را خاموش یا روشن کنیم. جهت سوئیچینگ همزمان از یک سیستم تریگر کننده یکسان استفاده می کنیم که سیگنال را از طریق ترانسفورماتور به گیت IGBT ها منتقل می کند. با توجه به شبیه سازی انجام شده در قسمت 2-3 به این نتیجه می رسیم که سوئیچ مد نظر بایستی توانایی انتقال پالسهای لورن با دامنه جریان 125 آمپر که در واقع جریان بار می باشد و بلوکه کنندگی ولتاژ 2000 ولت که ولتاژ دوسر بار می باشد را داشته باشد. همانطور که در این فصل توضیح داده شد جهت افزایش قابلیت بلوکه کنندگی ولتاژ کلید بایستی IGBT ها را بصورت سری به هم متصل کنیم و جهت افزایش قابلیت هدایت کنندگی جریان بایستی آنها را با هم موازی کنیم.

در صورتی که از IGBT با مدل IRG4PH50UD استفاده کنیم که قابلیت بلوکه کنندگی ولتاژ 1200 ولت را دارد و می تواند جریان 24 آمپر را از خود در حالت روشن بودن عبور دهد. بایستی 2 عدد IGBT را باهم سری کنیم تا بتوانند ولتاژ 1300 ولتی را در حالت خاموشی بلوکه کند و جهت کنترل جریان 60 آمپری پالس های لورن بایستی تعداد 3 عدد IGBT را باهم موازی کنیم و با توجه به اینکه جریان بایستی در دو جهت هدایت شود بنابراین تعداد IGBT ها بایستی دو برابر شود. پس جهت طراحی یک شاخه این سویچ جمعاً به 12 عدد IGBT با مدل ذکر شده نیاز خواهیم داشت. که باتوجه به بحث های صورت گرفته بایستی بصورت سنکرون با هم سویچ شوند. همانطور که در قسمت 2-4 بحث شد، IGBT ای که ولتاژ بلوکه کنندگی کمتری دارد بهترین عملکرد را در خصوص جریان اشباع، تقسیم ولتاژ، تلفات سوئیچینگ و زمان سوئیچینگ دارد. جدول (مقایسه ای بین انواع مختلف IGBT را در رنج ولتاژی 1.7kV, 3.3kV, 6.5kV جهت طراحی مناسب کلید 2kA, 10kV ارایه داده است.

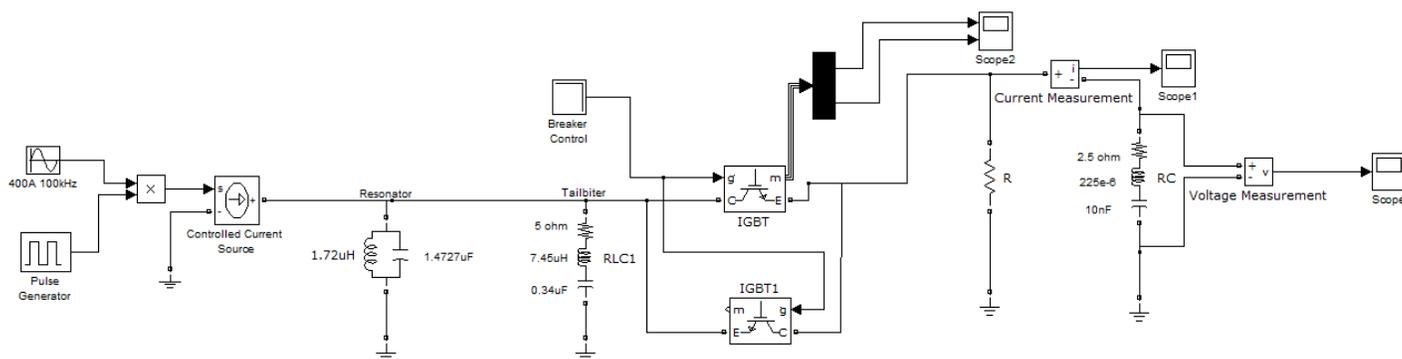
جدول محاسبه تعداد IGBT مورد نیاز و مقایسه تلفات آنها در مجموع

در سویچ 60A و 1300kV

Chip voltage Class	1.7kV	3.3kV	6.5kV
Energy losses [mJ] per chip	20	150	160
Collector current per [A] chip	110	105	105
Number of series IGBTs	1	1	1
Number of parallel IGBTs	1	1	1
Total number of IGBTs	1	1	1
Total Energy losses [mJ]	20	150	160

از جدول ( ) متوجه می شویم که IGBT ای که در رنج ولتاژی 1.7 کیلو ولت کار می کند مناسب ترین گزینه است. پس برای هر شاخه از کلید بایستی از دو IGBT که در ولتاژ 1.7 کیلو ولت کار می کند و بصورت معکوس به هم متصل شده اند استفاده شود.

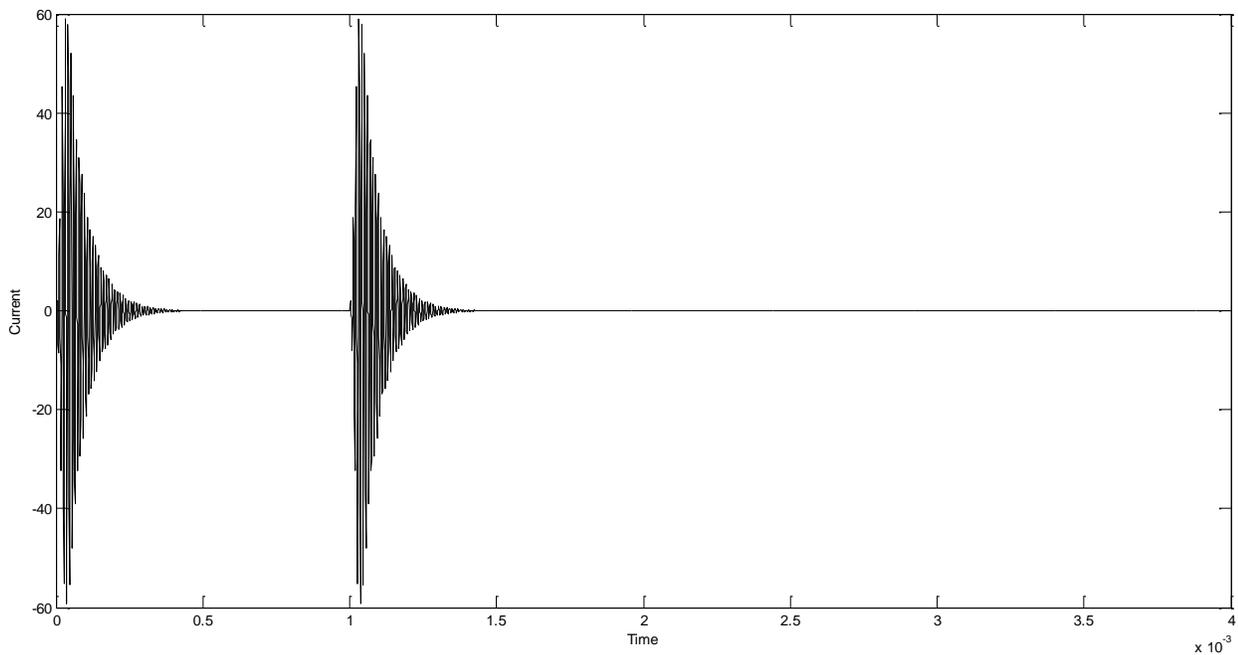
شکل 14-2 مدار مولد پالس لورن را به همراه سویچ مد نظر نشان می دهد. در اینجا قصد داریم تا فقط توانایی سویچ طراحی شده را هنگام قطع انتقال پالس لورن نشان دهیم، در حالت عادی، سویچ پالس های لورن را هدایت می کند و در زمان 1.8 میلی ثانیه سویچ با فرمان گیت خاموش می شود.



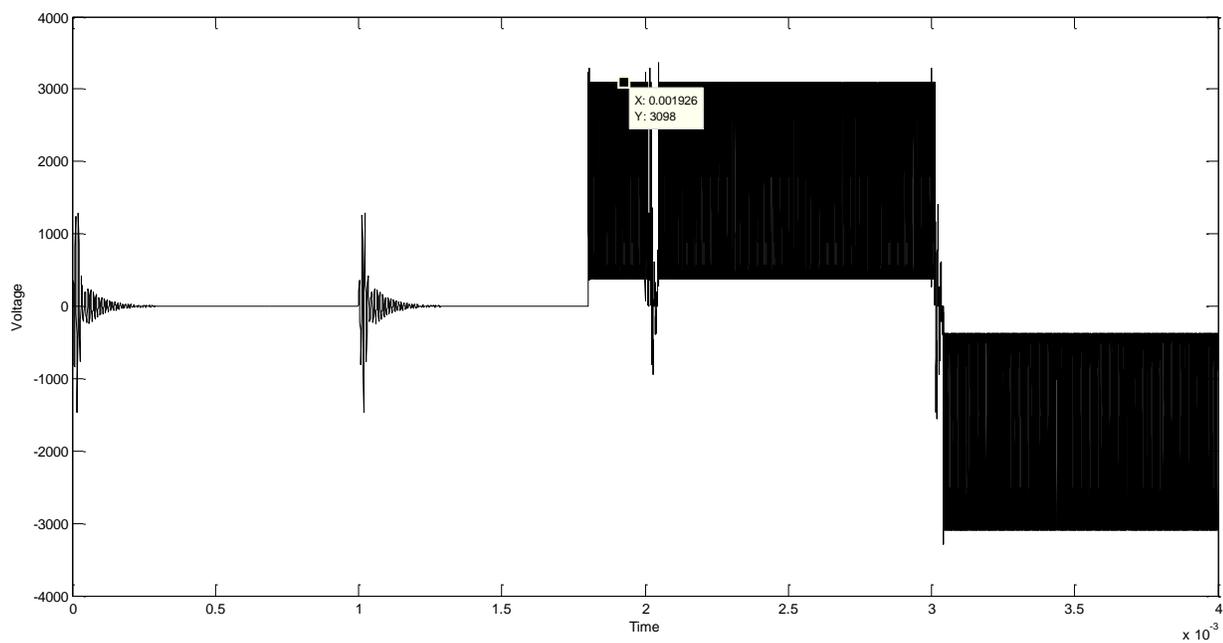
شکل 14-2) مدار مولد سیگنال لورن  
به همراه سویچ

شکل موجهای جریان و ولتاژ بار در شکل های 15-2 و 16-2 نشان داده شده اند. همانطور که در شکل 15-2 نشان داده شده است جریان بار پس از قطع شدن سویچ به خوبی صفر می شود و مشکلی از لحاظ قطع جریان بار نخواهیم داشت. ولی شکل 16-2 که ولتاژ بار را قبل از قطع شدن سویچ و ولتاژ دوسر کلید را پس از قطع شدن سویچ نشان می دهد، این موضوع را بیان می کند که به دلیل خاصیت سلفی بار ولتاژ دو سر کلید و بار پس از قطع شدن به شدت افزایش می یابند (حدود 3000 ولت) و از حد تحمل ولتاژ بلوکه کلیدها بالاتر میروند، جهت جلوگیری از این پدیده بایستی برای سویچها مدار اسنابر<sup>15</sup> و حفاظتی طراحی شود که در فصل بعد به تفصیل به بررسی این موضوع خواهیم پرداخت.

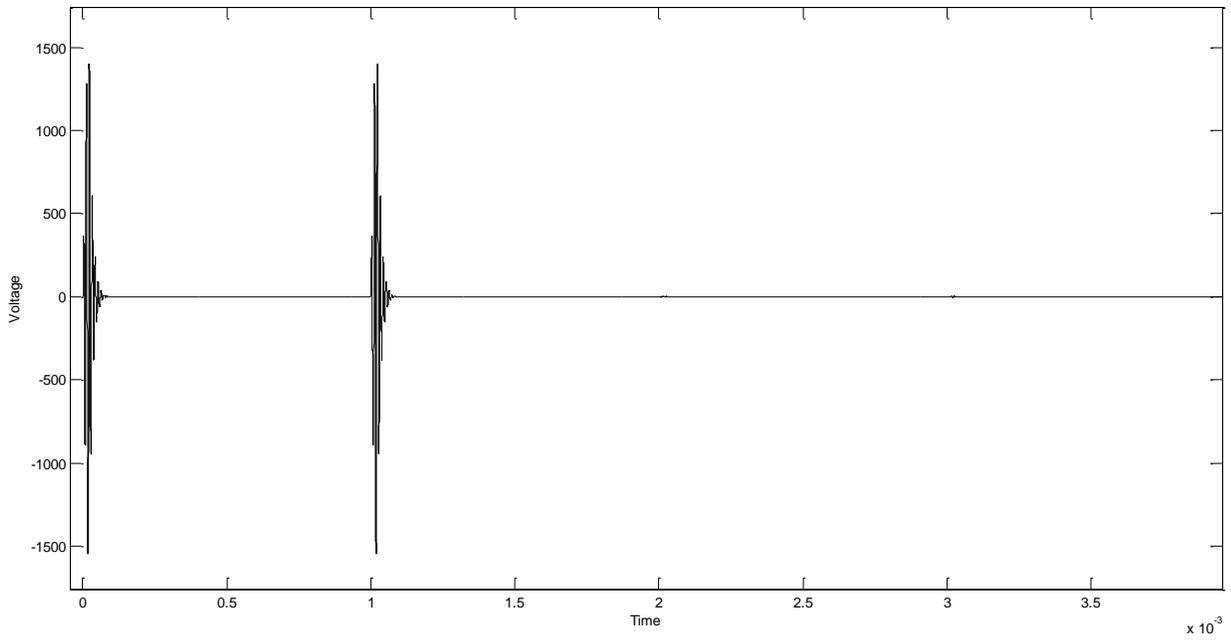
<sup>15</sup>Snubber Circuit



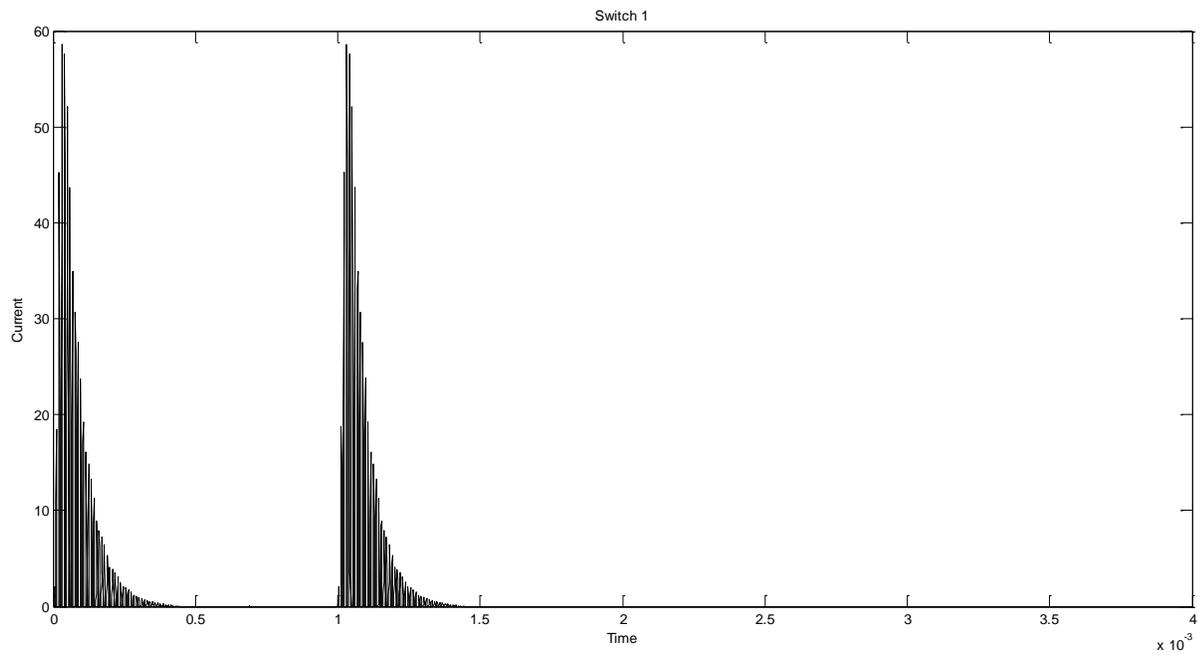
شکل 2-15) موج جریان بار (پالس لورن) که در زمان 1.8 میلی ثانیه قطع شده است



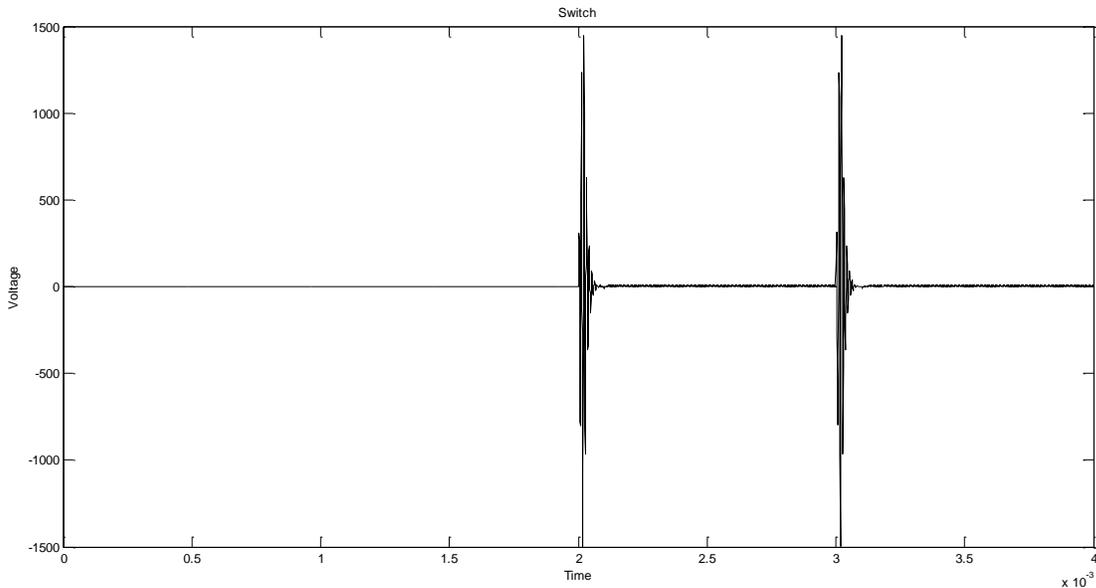
شکل 2-16) موج ولتاژ بار (آنتن) با در نظر گرفتن بار القایی



شکل 2-17) ولتاژ بار بدون در نظر گرفتن بار القایی



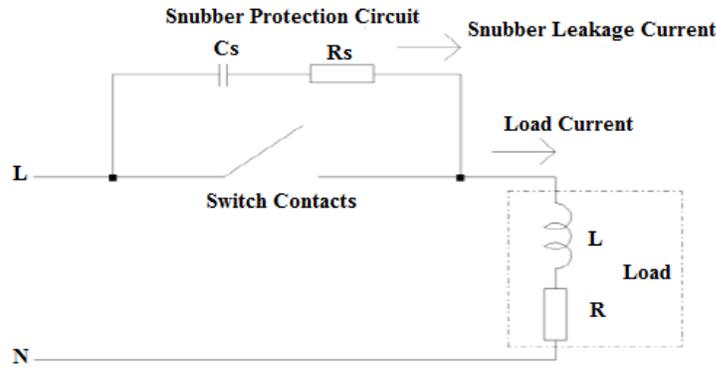
شکل 3). جریان عبوری از هر سویچ



شکل (۰). ولتاژ دو سر کلید پس از قطع جریان

از شکل های 2-16 و 2-17 به این نتیجه میرسیم که علت اصلی افزایش ولتاژ کلید پس از قطع شدن کلید بار سلفی و تغییر شدید جریان در واحد زمان می باشد. و بایستی جهت جلوگیری از این پدیده مدار اسنابر طراحی شود، به طور خلاصه می توان گفت که اسنابر ؛ مداری محافظ برای سویچ های قدرت است. اسنابر بین دستگاه الکترونیکی و بار قرار می گیرد و باعث افزایش طول عمر سویچ می شود. اسنابر انرژی ذخیره در بار را تخلیه کرده و مانع از آسیب رسیدن به قطعه می شود. در صورتی که بار قرار گرفته بر روی سویچ از نوع القایی باشد میتواند مشکل آفرین باشد. زیرا جریان القایی ایجاد شده می تواند موجب ایجاد ولتاژ گذرای بسیار زیاد روی پورت های قطعه شده و سبب آسیب رسیدن و سوختن قطعه شود. برای بارهای القایی، اسنابر می بایست بصورت موازی با سویچ و یا موازی با بار قرار بگیرد. یک اسنابر ساده تنها شامل یک مقاومت و خازن است. در صورتی که اسنابر موازی با سویچ قرار گیرد در هنگام اتصال سویچ جریان القایی ایجاد شده از طریق مدار محافظ روی سویچ عبور کرده و تضعیف می شود. به دلیل اینکه اسنابر موازی با قطعه سویچ قرار دارد در هنگام باز بودن سویچ هم یک جریان ثابت از طریق اسنابر جریان خواهد داشت. برای حفظ این جریان در یک سطح منطقی و قابل قبول نیاز به اسنابری با طراحی اصولی و دقیق خواهیم داریم.

شکل های ( ) و ( ) ولتاژ دو سر کلید را پس از قطع شدن جریان نشان می دهند، همانطور که مشخص است هر سویچ بایستی یک نیم سیکل را هدایت کند، سویچ مستقیم جریان مثبت را و سویچ معکوس جریان منفی را هدایت می کند. همانطور که گفته شد ، سویچ بایستی توانایی تحمل ولتاژ دو سر بار را در هنگام قطع شدن بار داشته باشد، زیرا همانطور که از شکل ( ) برمی آید ، ولتاژی که پس از قطع شدن بر روی کلید می افتد همان ولتاژ بار خواهد بود.



شکل 2-18) یک مدار ساده اسنابر (Snubber)

مزایای استفاده از اسنابر:

1- کاهش و یا حذف ولتاژها و جریان های گذرا (Spike)

2- کاهش  $\frac{di}{dt}$  و یا  $\frac{dv}{dt}$

3- انتقال توان تلفاتی از سویچ به مقاومت و یا یک بار مفید دیگر

4- کاهش توان تلفاتی سویچینگ

5- کاهش EMI با میراسازی ولتاژ و جریان حلقوی

6- افزایش سرعت سویچینگ

انواع مختلفی از اسنابر وجود موجود است اما یک نوع متداول آن برای بارهای سلفی به کار می رود؛ نوع RC می باشد. در عمل می توان یک بار سویچ را به عنوان یک امپدانس تلقی کرد. بنابراین در لحظه سویچ این بار؛ ولتاژها و جریان های گذرای ایجاد می شود که اثر منفی روی قطعه سویچگیر دارد. این اثر منفی می تواند در اثر گذشت زمان موجب آسیب رسیدن و یا حتی تخریب قطعه سویچ کننده و مدار کنترلر آن شود.

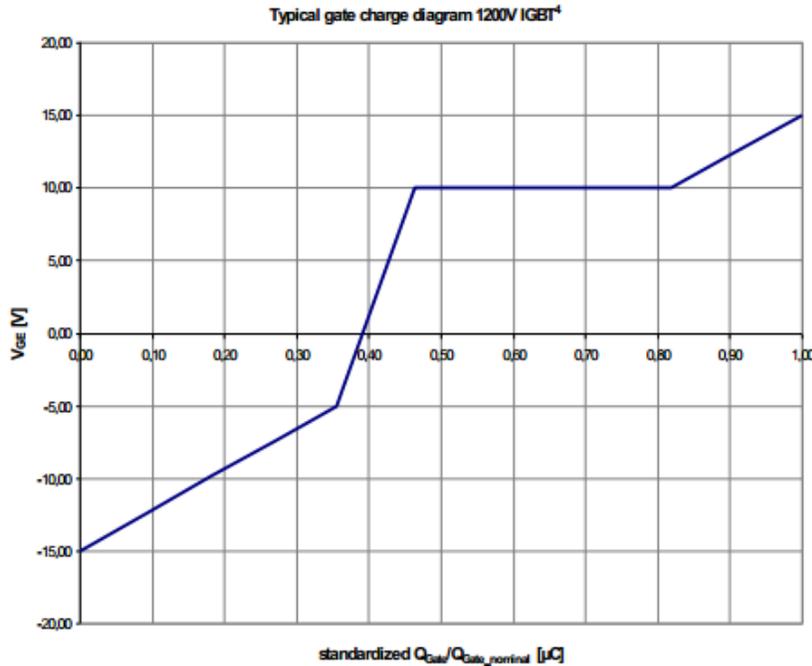
در صورت استفاده از اسنابری که به طور اصولی ساخته شده است؛ می توان این اثر را به حداقل رسانده و یا حتی حذف نمود. به همین دلیل استفاده از مدار اسنابر بر روی قطعه سویچ کننده سبب افزایش طول عمر آن می شود. در فصل بعد به تفصیل به طراحی مدار اسنابر با توجه به مدار پروژه پرداخته خواهد شد.

## 5-2 بررسی تلفات گیت IGBT

مقدار بار الکتریکی مورد نیاز گیت جهت فعال شدن در واقع مشخص کننده مقدار توانی است که بایستی به گیت داده شود، در فرکانس های بالا خازن های پارازیتی خودشان را نشان می دهند و تلفاتی را ایجاد می کنند که با فرمول ( ) محاسبه می شود.

$$P_{Gate} = Q_{Gate} \cdot (V_{CE(on)} - V_{CE(off)}) \cdot f_{sw}$$

در این فرمول  $Q_{Gate}$  به مقداری از بار گیت دلالت می کند که در ناحیه فعال IGBT قرار دارند. تخمین دقیق تر توان لازم برای گیت توسط منحنی بار گیت مشخص می شود. مقدار واقعی بار گیت  $Q'_G$  که در طراحی بایستی در نظر گرفته شود از منحنی 16 بدست می آید، با در نظر گرفتن ولتاژ خروجی ای که درایو گیت تولید می کند این ظریب مشخص می شود.



شکل (16). منحنی ظریب بار گیت در مقابل ولتاژ گیت امیتر

مقادیر عمومی ای که برای کاربردهای صنعتی در مورد ولتاژ حالت خاموش استفاده می شوند، شامل ولتاژ گیت امیتر صفر و -8 ولت می باشد.

$$Q'_{Gate} = 0.62Q_{Gate} \quad \text{for } 0V/15V$$

$$Q'_{Gate} = 0.75Q_{Gate} \quad \text{for } -8V/15V$$

در یک فرکانس سوئیچینگ مشخص و خروجی درایو 8V/15V- ، توان مورد نیاز برای راه اندازی IGBT به وسیله شکل 16 و مقدار بار گیت که در دیتاشیت همانند شکل 17 موجود می باشد ، بدست می آید.

$$P_{Gdr} = 2.15\mu C \cdot 0.75 \cdot (15V + 8V) \cdot 10kHz = 0.37W$$

Gateladung gate charge	$V_{GE} = -15 V \dots +15 V$	$Q_G$	2,15	$\mu C$
Interner Gatewiderstand internal gate resistor	$T_{vj} = 25^\circ C$	$R_{Gint}$	2,0	$\Omega$

شکل(17) بار گیت و مقاومت داخلی گیت

مقاومت گیت جمع مقاومت خارجی و داخلی می باشد. شکل 17 مقداری که بایستی برای مقاومت داخلی در نظر بگیریم را نشان می دهد. طراح می تواند با کمک مقاومت خارجی عملکرد سوئیچینگ را بهبود ببخشد. حداقل  $R_{G(on)}$  گیت توسط  $di/dt$  در هنگام روشن شدن و حداقل  $R_{G(off)}$  توسط  $dv/dt$  در زمان خاموشی تعیین می شود. مقاومت های بسیار کوچک گیت ، می تواند سبب بروز نوسانات و آسیب رسیدن به IGBT یا دیود بشود. حداقل مقدار پیشنهادی برای مقاومت خارجی گیت با توجه به تلفات قطعه در شرایط تست همانطور که در شکل 19 نشان داده شده است انتخاب می شود. مقدار مجاز برای مقاومت گیت با توجه به دیاگرام تلفاتی شکل(24) نشان داده شده است.

Einschaltverlustenergie pro Puls turn-on energy loss per pulse	$I_C = 200 A, V_{CE} = 300 V, L_S = 30 nH$ $V_{GE} = \pm 15 V, di/dt = 5700 A/\mu s (T_{vj}=150^\circ C)$ $R_{Gon} = 2,0 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ C$	$E_{on}$	1,10	mJ
		$T_{vj} = 125^\circ C$		1,70	
		$T_{vj} = 150^\circ C$		2,00	
Abschaltverlustenergie pro Puls turn-off energy loss per pulse	$I_C = 200 A, V_{CE} = 300 V, L_S = 30 nH$ $V_{GE} = \pm 15 V, du/dt = 4000 V/\mu s (T_{vj}=150^\circ C)$ $R_{Goff} = 2,0 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ C$	$E_{off}$	7,90	mJ
		$T_{vj} = 125^\circ C$		9,40	
		$T_{vj} = 150^\circ C$		9,65	

Figure 19: External gate resistors

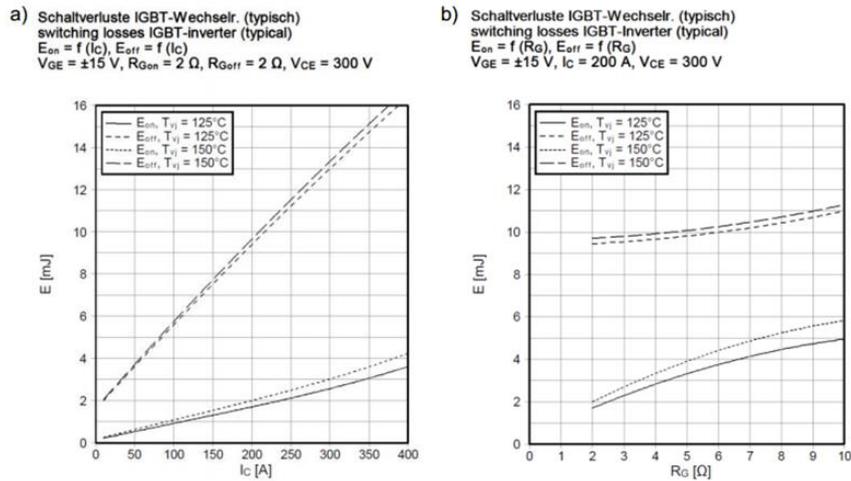
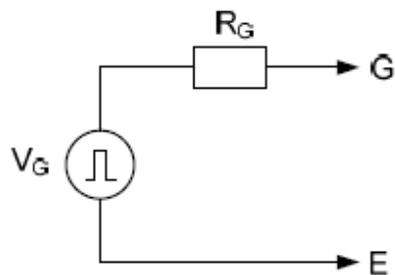


Figure 24: Switching losses per pulse as a function of the collector current and the gate resistance

## 1-5-2 تلفات توان در مقاومت گیت

رفتار سوئیچینگ یک عنصر نیمه های توسط تخلیه خازن گیت کنترل می شود. کنترل شارژ و دشارژ شدن خازن گیت توسط مقاومت گیت کنترل می شود. با استفاده از یک ولتاژ  $+15\text{ V}$  برای  $V_{G(on)}$  قطعه IGBT روشن می شود و در ولتاژ منفی  $V_{G(off)}$  که  $-5$  و یا  $-8$  و یا  $-15$  می تواند باشد، خاموش می شود. عملکرد دینامیکی IGBT می تواند توسط مقاومت گیت تنظیم شود. مقاومت گیت بر روی زمان های سوئیچینگ IGBT، تلفات سوئیچینگ، ناحیه عملکرد امن معکوس قطعه<sup>۱۶</sup>، ناحیه عملکرد امن در حالت اتصال کوتاه<sup>۱۷</sup>، EMI و  $dv/dt$  و  $di/dt$  جریان بازیابی معکوس دیود فری ویل تاثیر دارد. بنابراین این مقاومت بایستی بسیار دقیق انتخاب شود و بهینه گردد.

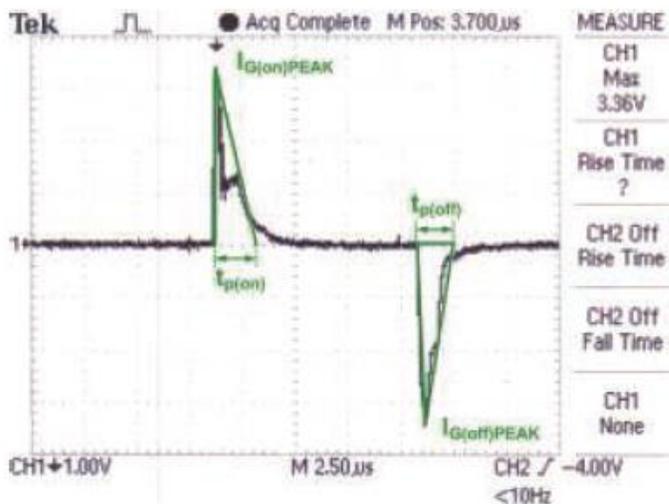


شکل (۱). کنترل گیت با مقاومت

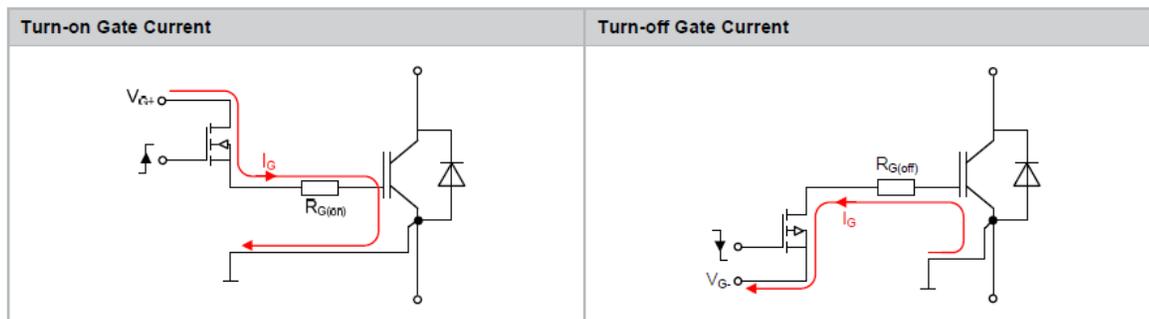
<sup>16</sup> RBSOA

<sup>17</sup> SCSOA

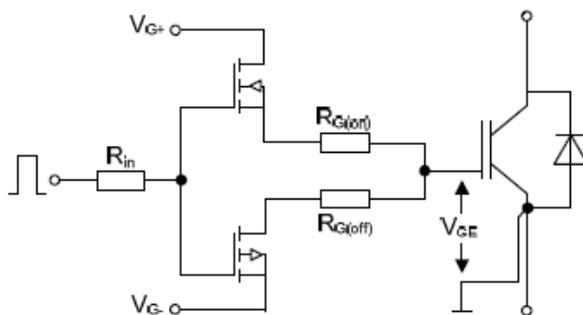
اگر یک ماژول IGBT در یک فرکانس بالا استفاده شود تلفات زیادی در مقاومت گیت به وقوع خواهد پیوست. این تلفات توان به وسیله معادلات زیر قابل تخمین هستند.



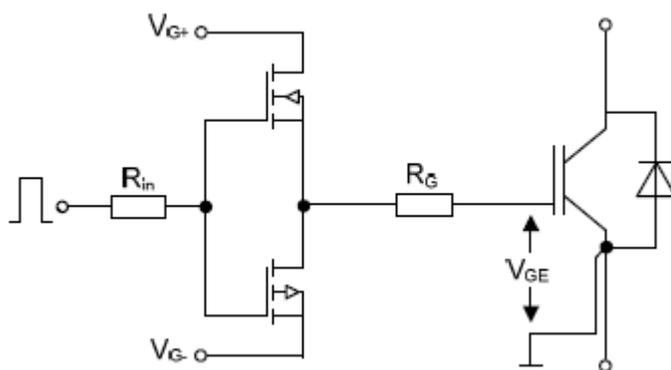
شکل (۰). موج جریان گیت



شکل (۰). مدار خاموش و روشن شدن IGBT با در نظر گرفتن مقاومت های گیت



شکل (۰). مدار (الف) جهت روشن و خاموش سازی IGBT



شکل (ب). مدار (ب) جهت روشن و خاموش سازی IGBT

زمانی که دو ماسفت همزمان روشن نشوند

معمولا مقدار مقاومت خاموشی و روشن شدن گیت در شکل ( ) با هم یکسانند و در صورتی که دو ماسفت در شکل ( ) با هم روشن نشوند و احتمال بروز اتصال کوتاه نباشد می توان از ساختار ( ) هم استفاده کرد. تخمین تلفات مقاومت گیت توسط روابط زیر صورت می پذیرد، با توجه به شکل پالس مثلثی که در شکل ( ) نشان داده شده است، جریان موثر توسط معادله زیر حساب می شود:

$$I_{G(on)RMS} = I_{G(on)PEAK} \sqrt{\frac{k}{3}} \quad k = \frac{t_p}{T} = t_p \cdot f_{sw}$$

محاسبه تلفات توان در مقاومت گیت با روابط زیر صورت می پذیرد.

$$P_{G(on)} = I_{G(on)RMS}^2 \times R_{G(on)}$$

جریان موثر گیت در حالت خاموشی از رابطه زیر بدست می آید.

$$I_{G(off)RMS} = I_{G(off)PEAK} \sqrt{\frac{k}{3}}$$

محاسبه تلفات توان در مقاومت حالت خاموش توسط رابطه زیر حساب می شود.

$$I_{G(off)RMS} = I_{G(off)PEAK} \sqrt{\frac{k}{3}}$$

جدول(). تاثیر مقاومت گیت بر پارامترهای مدار

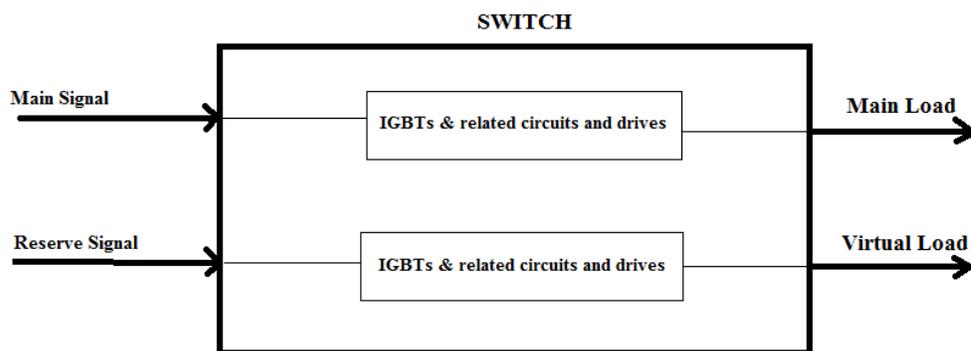
Rating / Characteristics	$R_G \nearrow$	$R_G \searrow$
$t_{on}$	$\nearrow$	$\searrow$
$t_{off}$	$\nearrow$	$\searrow$
$E_{on}$	$\nearrow$	$\searrow$
$E_{off}$	$\nearrow$	$\searrow$
Turn-on peak current	$\searrow$	$\nearrow$
Turn-off peak current diode	$\searrow$	$\nearrow$
dv/dt	$\searrow$	$\nearrow$
di/dt	$\searrow$	$\nearrow$
Voltage spike	$\searrow$	$\nearrow$
EMI noise	$\searrow$	$\nearrow$

جدول() تاثیر مقاومت گیت را بر پارامترهای مدار نشان می‌دهد. همانطور که مشخص شده است با کنترل و تغییر این مقاومت می‌توان نرخ تلفات سویچینگ و زمان‌های روشن شدن و خاموش شدن قطعه را تعیین کرد. از مطالب بالا می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه در پروژه مد نظر ما کلید دائما روشن است و فرکانس سویچینگ بسیار کم می‌باشد، بنابراین تلفات چه در مقاومت گیت و چه در خازن گیت بسیار کم خواهد بود و این مسئله محدودیتی را برای طراحی ایجاد نخواهد کرد.

## 6-2 انتخاب توپولوژی مناسب جهت سویچ زنی بین بار اصلی و رزرو توسط مولد

### سیگنال اصلی و رزرو

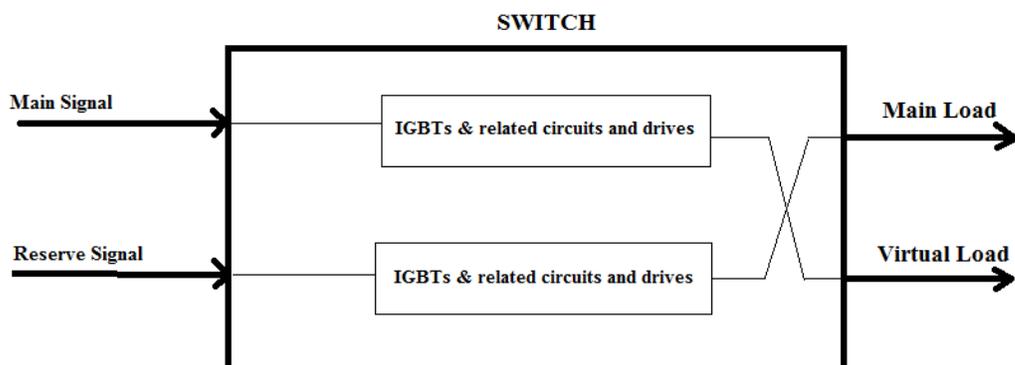
با توجه به این موضوع که سامانه مکان نمایی مبتنی بر پالس های لورن ( $LPS^{18}$ ) بایستی دائما در حال فعالیت باشد و مکان نمایی اجسام بایستی دائما در حال انجام باشد، بنابراین یک مولد پالس رزرو دائما باید آماده جایگزینی مولد پالس اصلی باشد تا آنتن دائما در حال ارسال سیگنال های لورن جهت مکان نمایی باشد و لحظه ای از سیستم از کار نیفتد، زمانی که مولد سیگنال اصلی دچار نقص گردد مولد سیگنال رزرو بایستی توسط سویچ طراحی شده به آنتن وصل شود و مولد سیگنال اصلی نیز از سیستم جدا شده و تعمیر شود و یا جایگزین شود. در حالت عادی که مولد سیگنال اصلی سالم است، جهت سویچینگ سریعتر، مولد سیگنال رزرو در حال فعالیت است ولی در حال تغذیه یک بار مجازی معادل بار آنتن است و زمانی که نیاز باشد به سرعت و در عرض زمان کمتر از 100 میلی ثانیه بایستی به بار اصلی یا همان آنتن متصل گردد و مولد سیگنال اصلی از مدار خارج گردد. عملکرد سویچ در شرایط کار عادی در شکل 2-19 نشان داده شده است.



شکل 2-19) عملکرد سویچ در شرایط کار عادی

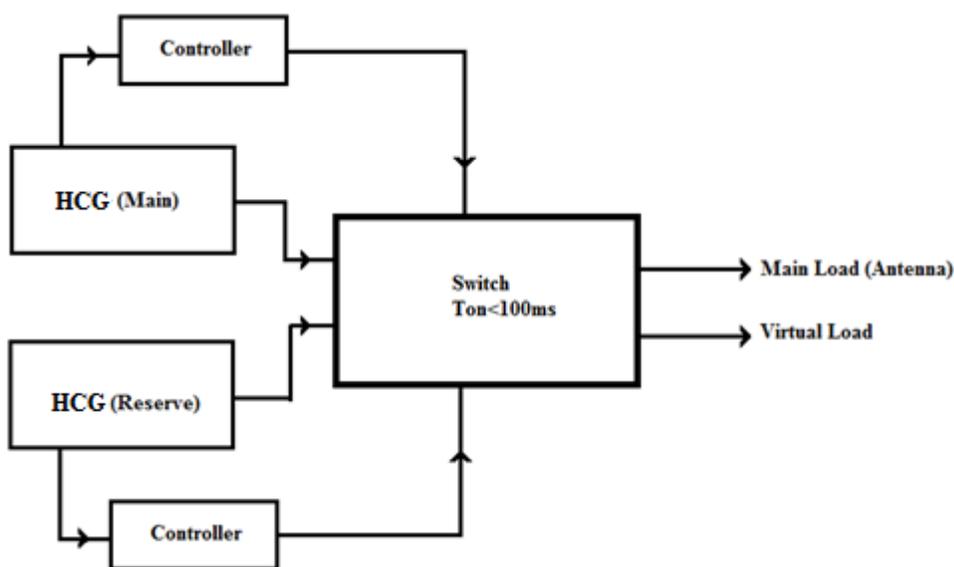
در شکل 2-19 نشان داده شده است که در حالت عادی که مولد سیگنال اصلی سالم است، بار اصلی توسط مولد سیگنال اصلی تغذیه می شود و مولد سیگنال رزرو به بار مجازی متصل میشود.

<sup>18</sup>Local Positioning System



شکل 20-2) عملکرد سویچ در شرایط خطا

همانطور که در شکل 20-2 نشان داده شده است پس از بروز خطا مولد سیگنال اصلی به بار مجازی متصل می شود و مولد سیگنال رزرو به بار اصلی وصل می شود و نقش مولد سیگنال اصلی را ایفا می کند .



شکل 20-2) عملکرد کلی سویچ

در شکل 20-2 عملکرد کلی سویچ را در مواجهه با خطا نشان می دهد. کنترلر ها سیگنال خطای HCG ها را تشخیص می دهند و سیگنال های کنترلی را به IGBT ها می فرستند و عمل سویچینگ بین مولد های سیگنال و بارها بطوری انجام می شود که پالس های لورن دائما توسط آنتن ارسال گردد.

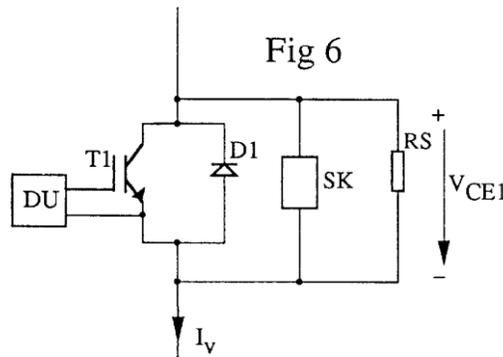
فصل سه : انتخاب و شبیه سازی روشهای

حفاظتی مناسب و طراحی مدارها به

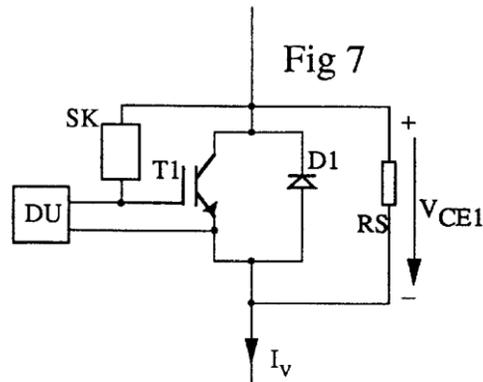
همراه تعیین المانهای مورد نیاز

### 1-3 مقدمه

طراحی مدار های مبتنی بر ادوات نیمه هادی نیاز مند طراحی مدار هایی جهت حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ می باشد. یک مدار شامل ادوات نیمه هادی از حداقل دو عنصر سری تشکیل می شود، هر کدام از این عناصر حداقل به وسیله یک مدار محافظت کننده محافظت می شود. مدار محافظت کننده بصورتی است که در یک ولتاژ از قبل تعیین شده فعال می گردد. مدار محافظت کننده ممکن است بصورت موازی با کلکتور و امیتر متصل گردد و یا بین کلکتور و گیت ادوات نیمه هادی قدرت متصل گردد. ادوات محافظت کننده در مقابل اضافه ولتاژ شامل یک خازن و یک دیود بصورت سری می باشد. دیود از خازن زمانی که عنصر نیمه هادی در حال هدایت است محافظت می کند. طراحی مدار محافظ شامل ترکیب مدار محافظ اکتیو و پسیو جهت محافظت از یک عنصر یا ماژول می باشد. در مدار محافظ پسیو، عناصر محافظ بصورت موازی با عنصر نیمه هادی قرار میگیرد همانند شکل (1-3). عناصر نیمه هادی ای که می توانند دارای مدار محافظ باشند رنج وسیعی دارند که شامل انواع IGBT و GTO و MCT و Diode یا ترکیبی از آنها باشد. در مدار محافظ اکتیو ، عناصر محافظ بین کلکتور و گیت/ بیس قرار میگیرند همانند شکل (2-3).



شکل (1-3): مدار محافظ پسیو



شکل (3-2): مدار محافظ اکتیو

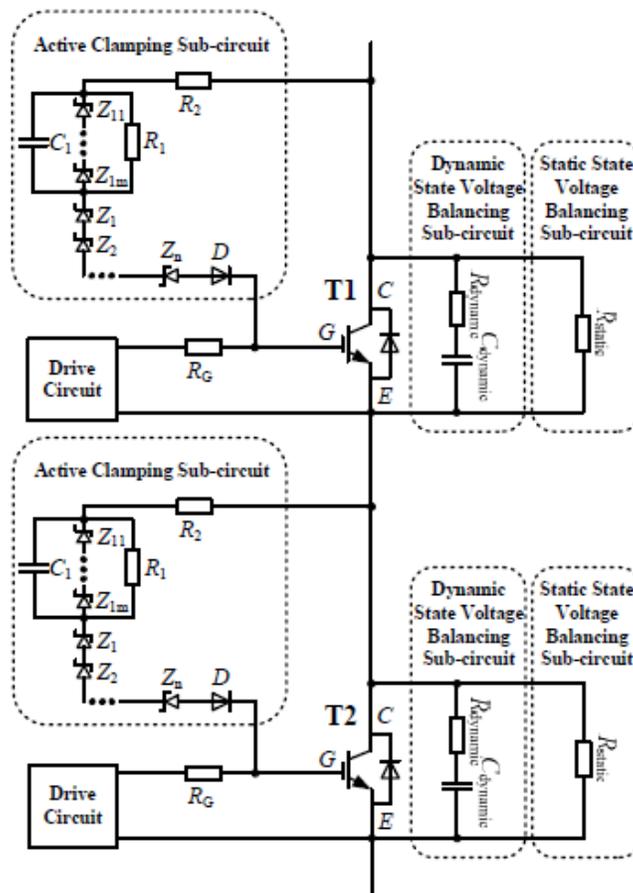
### 2-3 مدار متعادل کننده ولتاژ برای IGBT های سری

در مقایسه با یک IGBT معمولی که در آن  $V_{CES}$  معادل یا کمتر از 700 ولت است. تلفات سوئیچینگ در IGBT های فشار قوی بسیار زیادتر است، بنابراین انرژی نامتعادل به خاطر ولتاژ نامتعادل روی IGBT های سری بیشتر و متمرکز تر است. زمانی که از اتصال IGBT های سری به منظور افزایش حد تحمل کلید و متعادل کردن ولتاژ استفاده می کنیم. قسمت کلکتور امیتر نیاز دارد تا ولتاژ نامتعادل زیادی را متحمل شود و بنابراین تلفات آن بطور غیر قابل تحملی زیاد می شود. علاوه بر آن به دلیل آنکه قسمتی از مدار متعادل کننده ولتاژ با کلکتور امیتر IGBT فشار قوی موازی است، اجزای این نوع از متعادل کننده های ولتاژ همچون خازن بدون خاصیت سلفی<sup>19</sup> و دیود با باز آرایی سریع<sup>20</sup>، بایستی قابلیت تحمل ولتاژی که در رنج ولتاژ قابل IGBT باشد را داشته باشند، بنابراین انتخاب قطعات موازی با قسمت کلکتور امیتر کار آسانی نیست. اگر IGBT های سری شده فشار قوی به منظور متعادل کردن ولتاژ فقط از گیت استفاده کنند، به دلیل تلفات بالای سوئیچینگ و زمان سوئیچینگ بالا که در حالت عملکرد گذرا در ناحیه اکتیو ایجاد می شود و همچنین راندمان و فرکانس سوئیچینگ کانورتر که محدود می باشد، عملکرد سیستم بدتر می شود. بر اساس مباحثی که مطرح شد. مدار متعادل کننده ولتاژ بر روی IGBT های سری بصورتی که در شکل (3-3) نشان داده شده، می تواند در اتصال IGBT های سری مورد استفاده قرار بگیرد. همانطور که در شکل نشان داده شده است مدار متعادل کننده ولتاژ ترکیبی از مدار روی کلکتور-امیتر و مدار روی گیت است. در طراحی مداری که بر روی کلکتور امیتر قرار میگیرد انتخاب

<sup>19</sup> None inductive capacitor

<sup>20</sup> Fast recovery diode

مقادیر بسیار دشوار است. یک مقاومت جهت کاربرد متعادل کنندگی در حالت استاتیکی و یک مدار اسنابر RC جهت متعادل کنندگی ولتاژ در حالت دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در قسمت مدار متعادل کننده روی گیت برای اجتناب از کاربرد قطعات با ایزولاسیون ولتاژی بالا و مدار درایو پیچیده که برای مدار کنترل و مدار درایو لازم است. جهت سوئیچینگ همزمان، مدار کلمپ کننده اکتیو به کار گرفته شده است. بر اساس پارامترهای مناسب مدار، مدار متعادل کننده ولتاژ می‌تواند بطور مناسبی انرژی نامتعادلی را که ناشی از توزیع نامتعادل ولتاژ بر روی IGBT ها می‌باشد را بطور متعادل پخش کند و سپس می‌تواند تلفات IGBT فشارقوی و مدار خارجی آن را در ناحیه متعادلی نگه دارد. بعلاوه به وسیله مداری که روی کلکتور امیتر نصب می‌شود تاثیر منفی مدار قسمت گیت بر روی زمان سوئیچینگ IGBT فشار قوی ضعیف می‌شود و از این طریق فرکانس سوئیچینگ بهبود می‌یابد.



شکل (3-3) مدار متعادل کننده ولتاژ در اتصال سری IGBT ها

همانطور که در شکل نشان داده شده است  $R_{Static}$  بخش استاتیکی مدار متعادل کننده ولتاژ است و مدار RC سری بصورت  $R_{Dynamic}C_{Dynamic}$  بخش دینامیکی مدار متعادل کننده ولتاژ است و در واقع همان مدار اسنابر است.

### 1-2-3 مدار متعادل کننده استاتیکی ولتاژ

در زمان خاموشی IGBT های فشارقوی سری، ولتاژ نامتعادل IGBT ها با تغییر جریان کلکتور  $I_{CES}$  تغییر می کند. به عبارت دیگر، تفاوت در مقاومت های معادل حالت خاموشی IGBT ها که با عبارت  $R_{Off} = \frac{V_{CES}}{I_{CES}}$  توصیف می شود، سبب نامتعادل شدن ولتاژ حالت خاموشی IGBT ها می شود. بنابراین یک روش عمومی جهت متعادل کردن استاتیکی ولتاژ روی IGBT ها اتصال مقاومت موازی با IGBT است که مقاومت آن بسیار بیشتر از  $R_{Off}$  است. این مقاومت متعادل کننده ولتاژ استاتیکی ( $R_{Static}$ ) است. IGBT های قدرت با  $I_{CES}$  بالاتر  $R_{Off}$  کمتری دارند. به منظور رسیدن به ولتاژ متعادل تر در حالت استاتیکی، بالاترین  $I_{CES}$  برای محاسبه مقاومت استاتیکی ( $R_{Static}$ ) بایستی در نظر گرفته شود. در شرایطی که دو IGBT قدرت (T1, T2) با هم سری هستند فرض کنید.

$$I_{CES1} < I_{CES2} \quad (1-3)$$

$$R_{off1} > R_{off2} \quad (2-3)$$

بنابراین T1 بایستی ولتاژ حالت خاموشی بیشتری را در مقایسه با T2 تحمل کند. برای اینکه مطمئن شویم که نرخ نامتعادلی ولتاژ در حالت خاموشی کمتر از 10 درصد است لازم است تا معادله زیر را بررسی کنیم.

$$\frac{R_{Static} \cdot \frac{V_{CES}}{I_{CES1}}}{R_{Static} + \frac{V_{CES}}{I_{CES1}}} < \frac{R_{Static} \cdot \frac{V_{CES}}{I_{CES2}}}{R_{Static} + \frac{V_{CES}}{I_{CES2}}} \cdot 110\% \quad (3-3)$$

علاوه بر این ولتاژ روی T1 نبایستی از  $V_{CES}$  فراتر برود.

بنابراین:

$$V_{dc} \cdot \frac{\frac{R_{Static} \cdot V_{CES} / I_{CES1}}{R_{Static} + V_{CES} / I_{CES1}}}{\frac{R_{Static} \cdot V_{CES} / I_{CES1} + R_{Static} \cdot V_{CES} / I_{CES2}}{R_{Static} + V_{CES} / I_{CES1} + R_{Static} + V_{CES} / I_{CES2}}} < V_{CES} \quad (4-3)$$

که در آن  $V_{dc}$  ولتاژ لینک DC در مدار شکل (3-3) است. با در نظر گرفتن بدترین شرایط  $I_{CES1} = 0$  و  $I_{CES2} = I_{CESmax}$ ، جایی که  $I_{CESmax}$  بیشترین مقدار  $I_{CES}$  است، به منظور برآورده کردن معادلات (3-3) و (4-3) لازم است تا:

$$R_{Static} < \frac{0.1 \times V_{CES}}{I_{CESMax}} \quad (5-3)$$

$$R_{Static} < \frac{V_{CES} (2V_{CES} - V_{dc})}{I_{CESMax} (V_{CES} - V_{dc})} \quad (6-3)$$

مقدار مقاومت استاتیکی  $R_{Static}$  می تواند توسط معادلات (5-3) و (6-3) در حالی که توان نامی آن در معادله زیر صدق می کند.

$$P_{Static} < \frac{V_{dc}^2}{4R_{Static}} \quad (7-3)$$

### 2-2-3 مدار متعادل کننده ولتاژ در حالت دینامیکی (مدار اسنابر)

اسنابره‌های Turn-off مدارهای پسیوی هستند که از دیودها، مقاومتها، خازن ها ساخته شده اند و برای ذخیره انرژی در زمان کوتاه اختصاص یافته اند تا اهداف زیر برآورده شوند:

1- کاهش تلفات سوئیچ در هنگام خاموش شدن.

2- بهبود منحنی I-V جهت قرار گیری در ناحیه Safe Operating Area (SOA)

در اتصال سری IGBT های فشار قوی، فاکتورهای زیادی ممکن است در متعادل کردن ولتاژ روی IGBT ها تاثیر گذار باشد. همچنین داشتن ولتاژ متعادل در شرایط گذرا کار آسانی نیست. ساده ترین راه متعادل کردن ولتاژ بصورت دینامیکی اتصال  $C_{dynamic}$  موازی با IGBT فشارقوی است.  $C_{dynamic}$  نرخ تغییر

ولتاژ کلکتور امیتر را محدود می کند و بنابراین می تواند بر ولتاژ نا متعادل در حالت دینامیکی غلبه کند. با این حال  $C_{dynamic}$  مقدار پیک جریان و متعاقبا تلفات را در سوئیچینگ افزایش می دهد، به منظور حل این مسئله مقاومت  $R_{dynamic}$  بصورت سری با  $C_{dynamic}$  قرار می گیرد.  $R_{dynamic}$  تاثیر خازن را در هنگام متعادل کردن ولتاژ کم می کند و در واقع جریان را میرا می کند. اتصال دیود بازیابی سریع بصورت موازی با  $R_{dynamic}$  می تواند این نقص مدار اسنابر RC را کم کند. با این حال دیود بازیابی سریع باید ریتینگ یکسانی با IGBT فشارقوی داشته باشد. انتخاب نوع دیود بکار رفته بسیار مشکل است. بنابراین مدار اسنابر RC سری که از  $C_{dynamic}$  و  $R_{dynamic}$  تشکیل شده است بعنوان مدار متعادل کننده ولتاژ، روی IGBT های سری همانطور که در شکل نشان داده شده است می باشد. دو روش جهت طراحی پارامترهای  $C_{dynamic}$  وجود دارد، روش اول تکیه بر روی مشخصات IGBT های فشار قوی است و بقیه روش ها بر عملکرد غیر سنکرون مدارهای درایو تمرکز دارد. از دید مشخصه IGBT های فشار قوی، ولتاژ نا متعادل دینامیکی در اثر عدم مطابقت بار الکتریکی بازیابی معکوس ( $Q_{rr}$ ) در دیود موازی با IGBT می باشد. اگر فرض کنیم:

$$Q_{rr1} < Q_{rr2} \quad (8-3)$$

در طول مدت زمان سوئیچینگ، جریان بار، خازن محل اتصال IGBT ها و  $C_{dynamic}$  را شارژ می کند، ولتاژ نامتعادل بصورت زیر می تواند بیان شود:

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C_{dynamic}} = \frac{Q_{rr2} - Q_{rr1}}{C_{dynamic}} \quad (9-3)$$

در شرایط دینامیکی بایستی تضمین شود که ولتاژی که روی  $T_1$  قرار دارد کمتر از  $V_{CES}$  است. بطوریکه:

$$\frac{V_{dc} + \Delta V}{2} < V_{CES} \quad (10-3)$$

بدترین شرایط ممکن زمانی است که  $Q_{rr1} = 0$  و  $Q_{rr2} = Q_{max}$ . با ترکیب معادلات (9-3) و (10-3)، معادله زیر بدست خواهد آمد.

$$C_{dynamic} > \frac{Q_{max}}{2V_{CES} - V_{dc}} \quad (11-3)$$

در تعیین  $C_{dynamic}$  با استفاده از دیدگاه بررسی عملکرد آسنکرون درایو، بایستی در نظر داشت که ولتاژ نامتعادل دینامیکی بوسیله تاخیر زمان سوئیچینگ IGBT های سری می باشد. فرض کنید بیشترین زمان

تاخیر  $\Delta t_{max}$  است و جریان IGBT فشارقوی برابر با  $I_C$  است، بیشترین میزان ولتاژ نامتعادل در این حالت برابر است با:

$$\Delta V = \frac{\Delta t_{max} \cdot I_C}{C_{dynamic}} \quad (12-3)$$

به منظور تضمین کردن این موضوع که ولتاژ روی IGBT های فشارقوی کمتر از  $V_{CES}$  است، لازم است تا:

$$C_{dynamic} > \frac{\Delta t_{max} \cdot I_C}{2V_{CES} - V_{dc}} \quad (13-3)$$

در طول مدت زمان روشن بودن IGBT قدرت  $C_{dynamic}$  بایستی بطور کامل در  $R_{dynamic}$  تخلیه شود. بنابراین فرمول زیر بایستی برآورده شود.

$$R_{dynamic} < \frac{T_{On(min)}}{3C_{dynamic}} \quad (14-3)$$

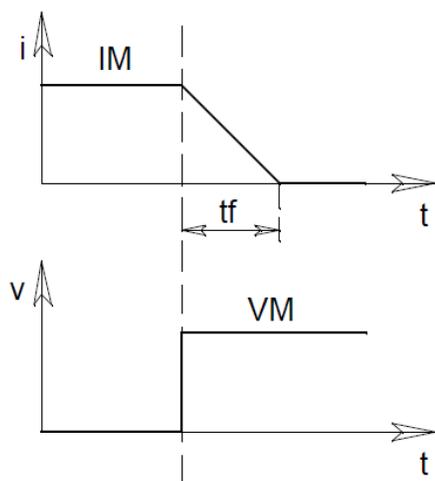
$$P_{R_{dynamic}} > \frac{C_{dynamic} \cdot V_{CES}^2}{2} \cdot f_s \quad (15-3)$$

که در آن  $f_s$  فرکانس سوئیچینگ IGBT فشار قوی است. در IGBT های فشار قوی که بصورت سری بهم متصل شده اند به دلیل چگالی توان بالا،  $P_{R_{dynamic}}$  معمولاً چندین کیلو وات است که مطمئناً ضریب عملکرد سیستم را کاهش می دهد و از این رو غیرقابل قبول است. در این حالت روند طراحی پارامترهای بایستی معکوس شود یعنی در ابتدا  $P_{R_{dynamic}}$  بایستی تعیین شود، سپس  $C_{dynamic}$  و  $R_{dynamic}$  بایستی تعیین شوند. تاثیر کمبود متعادل کنندگی ولتاژ می تواند توسط مدار کلمپ اکتیو موجود در گیت IGBT فشار قوی جبران شود.

### 3-2-3 روشی دیگر جهت طراحی مدار اسنابر

#### 1-3-2-3 سوئیچ زنی بار القایی در هنگام خاموش شدن

فرض کنید ثابت زمانی بارالقایی ( $\frac{L}{R}$ ) بسیار بزرگتر از زمان سوئیچینگ باشد، جریان بار در زمان خاموشی ثابت است. مجموع جریان ها در دیود و در ترانزیستور ثابت باقی می ماند. ولتاژ حالت وصل دیود فریویل قابل چشم پوشی است. در هنگام خاموش بودن تمام ولتاژ منبع به ترانزیستور اعمال می شود (طبق شکل 1).



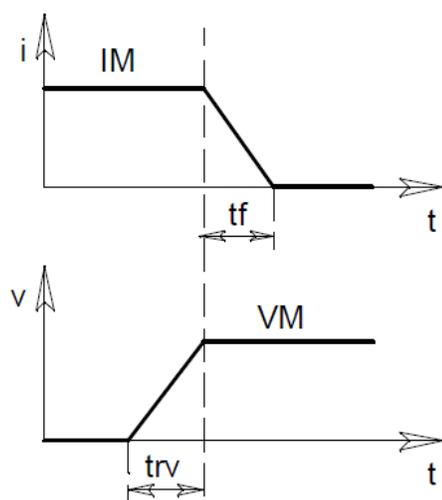
شکل (3-4) رفتار کلید در هنگام خاموش شدن با بار سلفی

انرژی تلف شده در IGBT با فرمول زیر محاسبه می شود:

$$E_{off} = \int_0^{t_f} v \cdot i \, dt = \frac{V_m \cdot I_m \cdot t_f}{2} \quad (16-3)$$

در واقعیت، ولتاژ پس از مدت زمان  $trv$  صعود می کند. انرژی لازم برای خاموش شدن کلید برابر است با حاصلضرب ولتاژ و جریان برابر است، به دلیل آنکه همپوشانی ولتاژ و جریان در زمان  $trv+t_f$  مثلثی شکل است.

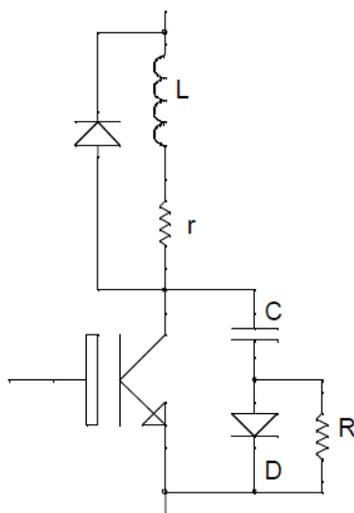
$$E_{off} = \int_0^{trv+t_f} v_m \cdot i_m \, dt = \frac{V_m \cdot I_m \cdot (trv+t_f)}{2} \quad (17-3)$$



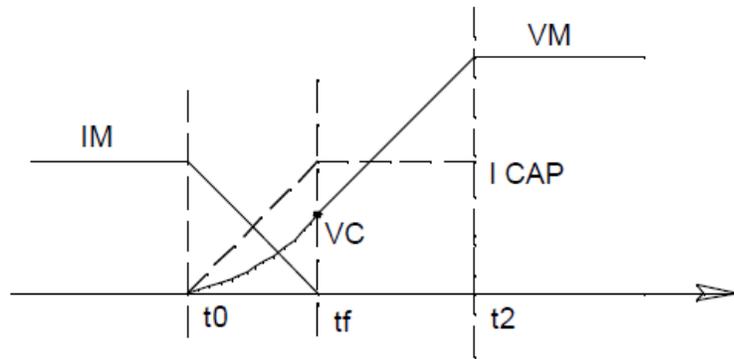
شکل (5-3) جریان و ولتاژ سوئیچ در هنگام قطع بار سلفی

### 2-3-2-3 مدار اسنابر حالت خاموشی (Turn-off snubber)

شکل (5-3) مدار الکتریکی اسنابر حالت خاموشی را نشان می دهد. خازن C عنصر کلیدی مدار است و دیود و مقاومت به دلیل جلوگیری از تخلیه انرژی خازن در زمان روشن شدن IGBT می باشد. بعنوان گام اول در تحلیل مدار اسنابر، ما با جریان بار در دوره زمانی خاموش شدن بعنوان جریان ثابت رفتار می کنیم که در شکل (6-3) آمده است.



شکل (5-3) سوئیچ به همراه مدار اسنابر حالت خاموشی



شکل (3-6) رفتار ولتاژ و جریان سوئیچ در هنگام وصل بودن مدار اسنابر

در مدت زمان  $t_0$  تا  $t_f$  جریان در سوئیچ کاهش می یابد حال آنکه، جریان در خازن در حال افزایش یافتن است، صورتیکه مجموع جریان ها ثابت است. برای سادگی فرض می کنیم  $t_0 = 0$  است. در انتهای زمان خاموش شدن ترانزیستور  $t_f$  ولتاژ روی خازن مساحت مثلث است که با فرمول زیر نشان داده می شود.

$$V_{ctf} = \frac{1}{c} \int_0^{t_f} i_c dt \rightarrow V_{ctf} = \frac{I_m t_f}{2.c} \quad (18-3)$$

در انتهای بازه زمانی  $t_f$  به  $t_2$ ، خازن  $c$  تا ولتاژ  $V_m$  شارژ می شود. این فقط در انتهای فاز آخر است  $t > t_2$  که جریان از خازن  $c$  به دیود فریویل منتقل می شود. در مدت خاموشی، دیود اسنابر  $D$  هدایت می کند و ولتاژ بر روی خازن برابر ولتاژ روی کلید است (از ولتاژ کوچکی که بر روی دیود اسنابر می افتد صرفنظر کنید) در طول زمان  $t_0$  تا  $t_f$  جریان خازن برابر است با:

$$i_c = \frac{I_m t}{t_f - t_0} = \frac{I_m t}{t_f} \quad (19-3)$$

و ولتاژ خازن و کلید برابر است با:

$$V_c = \frac{1}{c} \int_0^{t_f} \frac{I_m t}{t_f} dt + V_{c0} = \frac{I_m t^2}{2.c t_f} \Big|_{t=0}^{t=t_f} = \frac{I_m t_f}{2.c} \quad (20-3)$$

$$= \frac{I_m t_f}{2.c} \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 = V_{ctf} \left(\frac{t}{t_f}\right)^2$$

$$i_{sw} = I_m \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \quad \text{و جریان سوئیچ برابر با:}$$

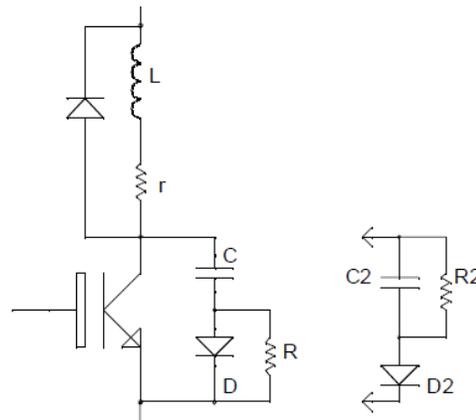
و جریانی که در ترانزیستور در هنگام خاموش شدن ایجاد می شود برابر است با:

$$E_{off} = \int_0^{t_f} i_{sw} v_c dt = v_{cf} I_m \int_0^{t_f} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \cdot \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 dt \quad (21-3)$$

$$= \int_0^{t_f} \left(\frac{I_m^2 t_f}{2c}\right) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \cdot \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 dt = \frac{1}{12} \cdot \frac{I_m^2 t_f^2}{2c}$$

هرچه خازن اسنایر بزرگتر باشد  $E_{off}$  کوچکتر است. و همینطور دقت کنید که  $E_{off}$  به ولتاژ باس بستگی ندارد و فقط به جریان ترانزیستور و نزول جریان ترانزیستور و زمان نزول جریان با یا بدون مدار اسنایر حالت خاموشی بستگی دارد. نقش اسنایر حالت خاموشی به منظور محدود کردن افزایش ولتاژ روی کلید زمانی که جریان در حال صفر شدن می باشد است. کاهش ولتاژ Switching نقش موثری در افزایش قابلیت اطمینان دستگاه و کاهش تلفات خاموش شدن دارد.

محاسبه  $E_{off}$  با فرض کاهش خطی جریان ترانزیستور در زمان خاموش شدنش است. در خاموش شدن ممکن است یک جریان دنباله ای در برخی از انواع IGBT ظاهر شود. به همین دلیل محاسبه  $E_{off}$  در این شرایط کمی بدبینانه است اما ایده خوبی برای افزایش کارایی می باشد. مدار اسنایر حالت خاموشی جهت محدودسازی جهت محدودسازی اضافه ولتاژهای گذرا موثر نیست اگر جهت محدود کردن اضافه ولتاژهای گذرا بخواهیم استفاده کنیم مدار زیر موثر خواهد بود.



شکل (7-3) سوئیچ با مدار اسنایر حالت خاموشی و مدار محافظتی اضافه ولتاژ

نقش  $R_2, D_2, C_2$  بسیار متفاوت تر از نقش اسنابر حالت خاموشی باشد. در این مورد خازن  $C_2$  تا بیشترین مقدار  $V_m$  شارژ می شود و دیود  $D_2$  فقط در دوره اضافه ولتاژهای اسپایک هدایت می کند.

### 3-3-2-3 تعیین مقادیر عناصر مدار اسنابر و ریتینگ آنها

#### 1-3-3-2-3 تعیین مقدار خازن مدار اسنابر C

همانطور که در بالا نشان داده شد، خازن C تاثیر مستقیمی بر انرژی خاموش شدن و تلفات دارد.

$$E_{off} = \frac{1}{12} \cdot \frac{I_m^2 t_f^2}{2c} \quad (22-3)$$

$$P_{off} = \frac{1}{12} \cdot \frac{I_m^2 t_f^2}{2c} \cdot f \quad (23-3)$$

معمولا خازن های film همانند پلی پروپیلن و یا نمونه های مشابه استفاده می شوند. موارد زیر در هنگام انتخاب خازن بایستی در نظر گرفته شود.

- تاثیر بیشترین مقدار  $\frac{dv}{dt}$

در عمل خازن طوری انتخاب می شود که بیشینه  $\frac{dv}{dt}$  آن برابر است با:

$$\frac{dv}{dt} > \frac{I_{peak}}{c} \quad (24-3)$$

که در آن  $I_{peak}$  بیشترین مقدار جریان در خازن است.

- نرخ ولتاژ

نرخ ولتاژی خازن بایستی از مقدار DC ولتاژ  $V_{mDC}$  بیشتر باشد.

برای فرکانس کاری بیشتر که توان راکتیو در خازن مهم می شود و بایستی مراقبت شود تا از مقدار

بیشینه تحمل موثر خازن بیشتر نشود. بعنوان یک قانون عمومی داریم:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_{sw}} (I_{1pk}^2 \times t_1 + I_{2pk}^2 \times t_2)} = \sqrt{f_{sw} (I_{1pk}^2 \times t_1 + I_{2pk}^2 \times t_2)} \quad (25-3)$$

که در آن فرکانس سوئیچینگ و  $I_{1pk}$  جریان بیشینه در هنگام خاموش شدن است و  $t_1$  مدت زمان پالس در هنگام خاموش شدن است.  $I_{2pk}$  جریان بیشینه در هنگام روشن شدن است و  $t_2$  مدت زمان پالس در هنگام روشن شدن است.

### 2-3-3-2-3 تعیین مقادیر مقاومت R

انرژی ذخیره شده در خازن با استفاده از فرمول زیر داده می شود.

$$E_c = \frac{C V_m^2}{2} \quad (26-3)$$

زمانی که سوئیچ روشن می شود، انرژی ذخیره شده در خازن در مقاومت تلف می شود.

$$P_R = \frac{C V_m^2}{2} f \quad (27-3)$$

پارامترهای مهم دیگر علاوه بر تلفات توان در انتخاب مقاومت موثر است. جریان

تخلیه شده در هنگام روشن شدن نبایستی از حداکثر پالس جریان کلید ( $I_{CM}$ ) بیشتر شود. در عمل مقاومت R بایستی طبق فرمول زیر انتخاب شود:

$$R > \frac{V_m}{I_{CM} - I_M - I_{RM}} \quad (28-3)$$

که در آن  $I_{RM}$  جریان ریکاوری دیود است. خازن C بایستی در انتهای زمان روشن بودن دیود ( $t_r$ ) تخلیه شود. در غیراینصورت ممکن است ریسک افزایش ناحیه عملکردی امن IGBT افزایش یابد.

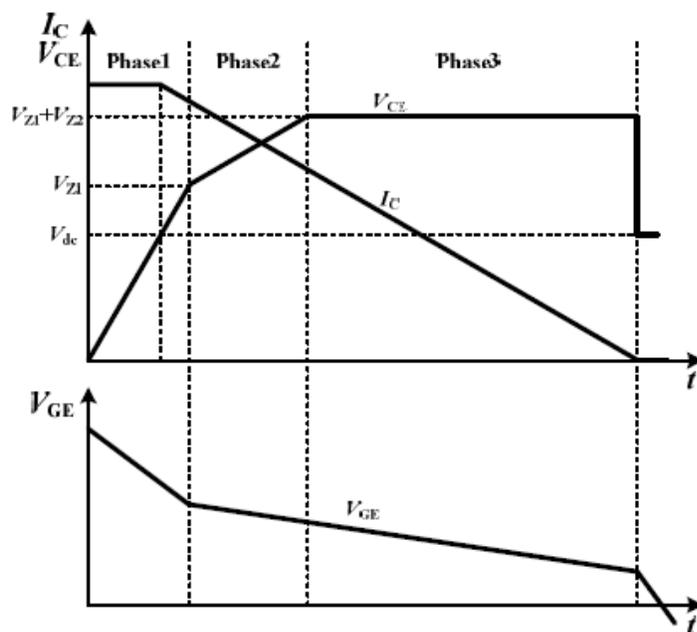
### 3-3-3-2-3 تعیین مقدار دیود

ریتینگ دیود به کار رفته در مدار اسنابر بایستی بیشتر از مقدار ولتاژ منبع باشد و معمولاً ریتینگ ولتاژی آن در حد و اندازه های ترانزیستور است. در زمان شارژ شدن خازن فقط هدایت می کند بنابراین توانایی جریانی آن بایستی بسیار کمتر از جریان بار باشد ولی بایستی توانایی تحمل پیک های جریان در

حد جریان بار را داشته باشد. بایستی خاصیت بازآرایی سریعی داشته باشد و در فرکانس های سریع بایستی بتواند به خوبی خنک شود.

### 3-3 مدار کلمپ اکتیو

همانطور که در بالا ذکر شد، به دلیل محدودیت تلفات، قسمت مدار متعادل کننده روی کلکتور امیتر نمی تواند اثر کافی را در متعادل کنندگی ولتاژ روی IGBT های فشار قوی سری شده ایفا کند. بنابراین تحت برخی شرایط خاص مانند اضافه جریان و اضافه ولتاژ لینک DC مداری که روی کلکتور امیتر وصل می شود جهت متعادل کردن ولتاژ روی IGBT های سری کافی نیست. بنابراین نیاز به متعادل کننده ولتاژی داریم که بین گیت و کلکتور IGBT متصل شود که در شکل (3-3) نشان داده شده است. از دیود زنر و خازن و مقاومت همانند شکل (3-3) برای طراحی مدار کلمپ اکتیو استفاده می کنیم. مجموع ولتاژ شکست دیود های زنر  $Z_1$  تا  $Z_n$  با  $V_{Z1}$  نشان داده می شود. مجموع ولتاژهای شکست  $Z_{11}$  تا  $Z_{1m}$  با  $V_{Z2}$  نشان داده می شود. فرض کنید که ولتاژ کلکتور-امیتر با ولتاژ کلکتور-گیت IGBT فشارقوی تقریباً مساوی است. خاموش شدن سوییچ فشار قوی همراه با مدار کلمپ اکتیو به 3 فاز تقسیم می شود.



شکل (3-8) پروسه خاموش شدن با مدار کلمپ اکتیو

طبق شکل (3-8) در فاز 1 ولتاژ کلکتورامیتر کمتر از  $V_{Z1}$  است. در این حالت مدار کلمپ تاثیری بر IGBT فشارقوی ندارد، ولتاژ کلکتورامیتر به سرعت افزایش می یابد. در فاز 2 ولتاژ کلکتورامیتر بیشتر از  $V_{Z1}$  است، دیودهای زبر  $Z_1$  تا  $Z_n$  می شکنند و کلکتور IGBT فشار قوی، خازن  $C_1$  از طریق مقاومت  $R_2$  و دیودهای زبر  $Z_1$  تا  $Z_n$  و دیود D شارژ می شود و از این طریق میزان نرخ صعود  $V_{CE}$  کم میشود و نامتعادلی ولتاژ بصورت دینامیکی مهار می شود. در فاز 2 خازنی که بین گیت و کلکتور قرار دارد تاثیردر کلمپ کنندگی ولتاژ دارد و اثر میلر IGBT فشار قوی افزایش می دهد.

در فاز 3 ، ولتاژ کلکتورامیتر ( $V_{CE}$ ) به  $V_{Z1}+V_{Z2}$  می رسد، دیودهای زبر  $Z_1$  تا  $Z_n$  و  $Z_{11}$  تا  $Z_{1n}$  می شکنند، فرض کنید ولتاژی بر روی  $R_2$  افت می کند،  $V_{CE}$  بر روی ولتاژی که مقدار کمی بیشتر از  $V_{Z1}+V_{Z2}$  باشد کلمپ می شود تا انرژی ذخیره شده در اندوکتانس پراکندگی مدار کموتاسیون کاملا مصرف شود و پس از این فاز دیگر سویچ خاموش شده است. در طول مدت زمان فاز 2 و فاز 3 ، مدار کلمپ کننده جریانی را به گیت IGBT های فشارقوی تزریق می کند و باعث می شود در ناحیه فعال عمل کند، بنابراین اسپایک های ولتاژ کلکتورامیتر کمتر می شود. همچنین، تلفات IGBT های فشارقوی به سرعت افزایش می یابد و سرعت سوئیچینگ در این دوفاز کمتر می شود.

نتیجتا دو مورد لازم است به منظور طراحی پارامترهای مدار کلمپ بطور همزمان رعایت گردد. اول آنکه مدار کلمپ ، بایستی ولتاژ کلکتورامیتر را در محدوده کمتر از  $V_{CES}$  نگه دارد و از اضافه ولتاژهای روی قطعه جلوگیری کند، دوم جلوگیری از عملکرد دائم مدار کلمپ اکتیو، به منظور کاهش تلفات و زمان سوئیچینگ IGBT های فشارقوی. در شرایطی که دو IGBT سری شده اند. طبق آنالیز صورت گرفته دربالا، ولتاژهای آستانه مدار کلمپ اکتیو ( $V_{Z1}$  و  $V_{Z1}+V_{Z2}$ ) طبق فرمول های زیر تعیین می شوند.

$$0.6V_{dc} < V_{Z1} < 0.65V_{dc} \quad (29-3)$$

$$0.65V_{dc} < V_{Z1}+V_{Z2} < 0.75V_{dc} \quad (30-3)$$

در ضمن جهت جلوگیری از اضافه ولتاژ IGBT فشارقوی،

$$V_{Z1}+V_{Z2} < V_{CES} \quad (31-3)$$

همچنین جهت جلوگیری از عملکرد دائم مدار کلمپ کننده اکتیو ، لازم است تا  $V_{Zn}$  از مقدار پیک ولتاژ در پروسه سوئیچینگ معمولی بیشتر باشد بنابراین:

$$V_{Z1} > (V_{dc} + 0.8L_s I_c / t_f) \quad (32-3)$$

که در آن  $L_s$  اندوکتانس پراکندگی مدار کموتاسیون است و  $t_f$  زمان خاموش شدن IGBT های فشار قوی است.

وظیفه مقاومت  $R_2$  محدود کردن جریان در مدار کلمپ کننده اکتیو است. بنابراین لازم است تا:

$$R_2 > \frac{V_{dc} - V_{Z1}}{I_Z} \quad (33-3)$$

که در آن  $I_Z$  بیشترین جریان دیود زنر است. بعد از تعیین  $R_2$  و سایر پارامترهای دینامیکی مدار متعادل کننده ولتاژ، نرخ افزایش  $V_{CE}$  در فاز 2 عمدتاً به مقدار خازن  $C_1$  بستگی دارد، خازن  $C_1$  بزرگتر باعث افزایش آهسته تر  $V_{CE}$  می شود و متقابلاً سبب طولانی شدن دوره فاز 2 می شود. پارامتر  $C_1$  بهتر است در حین شبیه سازی و با در نظر گرفتن مشخصه IGBT فشار قوی طراحی شود.

پس از خاتمه پروسه سوئیچینگ، خازن  $C_1$  درون مقاومت  $R_1$  تخلیه می شود و این پروسه بایستی تا زمانی که سوئیچینگ بعدی تمام نشده است انجام گیرد. بنابراین پارامتر  $R_1$  بایستی معادله زیر را ارضا کند.

$$R_1 < \frac{T_s}{3C_1} = \frac{1}{3C_1 f_s} \quad (34-3)$$

از روند طراحی استنباط می شود که تحت شرایط نرمال، متعادل کردن ولتاژ IGBT های فشار قوی که بصورت سری متصل شده اند عمدتاً توسط مداری که با کلکتور امیتر موازی می شود صورت می گیرد. بنابراین در حالت عادی مدار کلمپ کننده اکتیو تاثیری از لحاظ سرعت سوئیچینگ و یا کاهش تلفات IGBT ندارد. تحت شرایط خاص زمانی که مدار متعادل کننده ولتاژ روی قسمت کلکتور امیتر نتواند از ازدیاد  $V_{CE}$  یا  $\frac{dV_{CE}}{dt}$  جلوگیری کند مدار کلمپ کننده فعال به فاز دو و سه می رود و از ازدیاد ولتاژ روی کلکتور امیتر IGBT جلوگیری می کند.