

مقایسه رفتار کلیدهای خلاء و گازی (SF_6)
در شبکه‌های فشار متوسط

COMPARISON BETWEEN VACUUM AND SF_6 CIRCUIT
BREAKER FOR MEDIUM VOLTAGE APPLICATION

سرسخن:

بر اساس گزارش کنفرانس تغییرات آب و هوا و گرمایش زمین در پاریس، ایران یکی از ده کشور نخست تولید کننده گازهای گلخانه ای است.

گرمایش زمین بر تمام جنبه‌های زندگی از جمله طبیعت، اقتصاد، فن آوری و سلامت ما تأثیر گذار است. در حال حاضر ۵۰ درصد جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کنند و تخمین زده می‌شود این میزان در ۲۵ سال آینده به ۶۰ درصد افزایش یابد. از آنجا که ۷۵ درصد مصرف انرژی مستقیماً به شهرها مربوط می‌شود، بنابراین شهرها به میزان زیادی در معرض اثرات تغییرات آب و هوا قرار دارند.

مجلس شورای اسلامی و شورای نگهبان قانون اساسی ایران، قانون الحاق ایران به پروتکل کیوتو را مورد تصویب قرار داده‌اند و الحاق ایران به این پروتکل را به دبیر کل سازمان ملل اعلام نموده اند.

ایران متعهد شده است تا سال ۲۰۲۰ تمهیداتی برای کاهش گازهای گلخانه ای انجام دهد. در صورت ناتوانی در اجرای آن بایستی بیش از ۱۴ میلیارد دلار جریمه به سازمان ملل متحد پرداخت نماید.

یکی از مواردی که طبق پیمان کیوتو در صنعت برق و برای تجهیزات تا ولتاژهای فشار متوسط استفاده آن منع شده است گاز SF6 می‌باشد. گاز SF6 از نظر شیمیایی گازی است به شدت پایدار، غیر قابل اشتعال، بی رنگ و بو با خاصیت دی الکتریک بسیار خوب و با توانایی انتقال حرارت بسیار عالی. در کنار خواص مناسب گاز SF6 در صنعت برق باید توجه شود که این گاز یکی از مخرب ترین ماده برای محیط زیست و گرمایش زمین می‌باشد.

درجه تخریب GWP (Global Warming Potential) این گاز ۲۳۹۰۰ برابر CO2 و طول عمر آن درجو بیش از ۸۰۰ سال برآورد شده است. زنجیره گاز SF6 در مجاورت جرقه و کرونا شکسته شده و بخشی از آن تبدیل به S2F10 میشود که به شدت سمی است. درجه مسمومیت آن معادل فوسگن (Phosgene) است که در جنگ جهانی بعنوان بمب شیمیایی استفاده می شد.

انجمن های مدافع محیط زیست کنترل های شدیدی را برای اندازه گیری نشتی گاز SF6 انجام می دهند. کشور استرالیا از اولین کشور هایی است که مالیات بر ورود گاز SF6 را اعمال می نماید. جهت اطلاع مالیات فوق برابر ۲۳ دلار استرالیا برای هر تن CO2 میباشد. برای گاز SF6 بدلیل درجه تخریب بالا معادل ۲۳۹۰۰ برابر CO2 رقم مالیات برابر است با $۲۳۹۰۰ \times ۲۳ = ۵۹۷۰۰$ دلار استرالیا برای هر تن واردات گاز SF6.

از آغاز سال ۲۰۱۳ دولت کانادا جریمه سالیانه ای برابر ۲۵۰ دلار کانادا بازای هر کیلو گرم گاز SF6 را دریافت می نماید. پارلمان اروپا قوانینی را به تصویب رسانده است که تولید کنندگان، وارد کنندگان و صادر کنندگان اروپایی باید تمامی جابجایی و عملیات روی این گاز در داخل و خارج اروپا را هر سال قبل از ۲۱ مارس به کمیسیون (EC1493/200) گزارش دهند. تمامی کلید ها و تابلوها و تجهیزات محتوی گاز SF6 باید با بر چسب مخصوص علامت گذاری شوند (EC1493/2007).

پارلمان اروپا استفاده از گاز SF6 را فقط برای استفاده در کلید های فشارقوی- نه فشار متوسط- و براساس دستورالعمل خاصی صادر نموده است. تعمیرات تجهیزات فشار قوی محتوی گاز SF6 بایستی توسط کارشناسان متخصص و با مجوز مخصوص انجام پذیرد تا کمترین نشتی و انتشار گاز رخ دهد. امروزه کلیدهای خلاء بعنوان مدرن ترین و پیشرفته ترین جایگزین کلیدهای گازی (SF6) در محدوده ولتاژ متوسط تا سطح ۳۶ کیلو ولت مطرح هستند.

پاسخ اولیه ای که در برابر چرایی استفاده از کلید خلاء داده میشود مشکل گرمایش زمین و تخریب محیط زیست میباشد. درصد استفاده از کلیدهای خلاء به کل تولید کلیدهای فشار متوسط در اروپا ۸۰٪، امریکای شمالی ۱۰۰٪، ژاپن ۷۰٪، چین ۹۸٪، هندوستان و آسیای جنوب شرقی ۸۵٪ و در روسیه به بیش از ۸۰٪ رسیده است.

مهم ترین ویژگی ها (در مقایسه با کلیدهای روغنی و گازی) که موجب استقبال و گسترش استفاده از کلیدهای خلاء شده است موارد زیر است:

- ◆ قابلیت اعتماد و اطمینان بالا (Higher Reliability)
 - ◆ عدم نیاز به تعمیر و نگهداری (Maintenance Free)
 - ◆ تعداد دفعات قطع و وصل بالا (Higher Mechanical & Electrical Endurance)
 - ◆ غیر قابل انفجار و اشتعال (Explosion & Flame Safety)
 - ◆ بهترین گزینه جهت استفاده در شرایط خاص و سخت (Heavy Duty)
- و مهم ترین ویژگی آن، عدم آلودگی و سازگاری با محیط زیست (Ecological Purity) است. امروزه تکنولوژی خلاء به اندازه کافی پیشرفت کرده است، بطوریکه کلید خلاء با امکان قطع اتصال کوتاه تا سطح ۱۰۰ کیلو آمپر و تا یکصد بار قطع جریان اتصال کوتاه نامی و ۵۰/۰۰۰ بار قطع در بار نامی تولید می شوند.

طول عمر و قابلیت اطمینان بیشتر و عدم نیاز به تعمیر و نگهداری و عدم آلودگی محیط زیست مهمترین فاکتورهای مورد نظر در انتخاب کلید می باشند.

مقدمه

وظیفه کلید قطع‌کننده قدرت (Circuit Breaker) قطع و وصل مدار الکتریکی در شرایط مختلف عبور جریان می‌باشد. کلید مذکور باید توانایی جدا کردن دو سر کنتاکت و خاموش کردن قوس بوجود آمده را بدون تأثیر بر محیط اطراف و بی‌درنگ داشته باشد، بدین منظور کلید باید شرایط و محیط عایقی لازم برای خاموش کردن جرقه الکتریکی را دارا بوده و ضمناً تحمل ولتاژهای گذرای بوجود آمده در دو سر کنتاکت را در هنگام قطع جرقه داشته باشد. بنابراین مسئله اصلی، خاموش کردن جرقه و جایگزینی آن با ماده یا محیط عایقی است که توانایی جلوگیری از ادامه و برقراری مجدد عبور جریان بر اثر ولتاژ و یا جهش ولتاژ دو سر کنتاکت جدا شده را دارا باشد. مقدار جریانی که کلید بایستی قطع نماید از جریان نامی تا جریان اتصال کوتاه تعریف شده برای کلید خواهد بود.

در طول ۵۰ سال گذشته ولتاژ در شبکه‌های انتقال نیروی برق تا ۷۵۰ کیلوولت و شبکه‌های آزمایشی تا ۱۵۰۰ کیلو ولت افزایش یافته‌اند. در ضمن اینکه مقادیر اتصال کوتاه شبکه‌ها نیز از ۵۰۰ MVA تا ۵۰۰۰۰ MVA افزایش داشته‌اند.

زمان قطع نیز براساس نیاز شبکه به شدت کاهش یافته است. کلیدهای روغنی نیاز به زمان طولانی خاموش کردن قوس (حدود ۱۰ تا ۲۰ سیکل) دارد در صورتیکه با کلیدهای پیشرفته‌تر این زمان حدود ۶ تا ۸ سیکل و در کلیدهای مدرن‌تر حتی تا دو سیکل نیز کاهش یافته است.

در ۲۵ سال گذشته نیروگاه‌های با ظرفیت زیاد و بهم پیوسته، قدرت قطع را در شبکه‌های ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلو ولت به بیش از ۲۰۰۰۰۰ MVA افزایش داده‌اند. هر چند که با روش‌های محدود کردن سطح اتصال کوتاه از بالا رفتن آن جلوگیری می‌کنند ولی به هر حال مشکلات طراحی کلیدهای با ظرفیت بالا و توانایی قطع در یک سیکل با در نظر گرفتن پایداری سیستم هنوز باقی است.

ماهیت فیزیکی جرقه الکتریکی

زمانی که یک جفت کنتاکت حامل جریان برق در یک کلید بسته است، عملاً تعداد نقاط زیادی از نقاط دو سطح کنتاکت در دوسو با هم ارتباط الکتریکی برقرار نموده اند. تعداد نقاط مرتبط به فشار اعمال شده بر سطوح ارتباط جریان بستگی دارد.

در هنگام شروع به جدا شدن جفت کنتاکت‌ها از یکدیگر نقاط برقراری تماس و در نتیجه سطح تماس الکتریکی کاهش می‌یابد، به زبان دیگر به معنای افزایش مقاومت بین دو کنتاکت خواهد بود که بر اثر جریان قطع، باعث افزایش درجه حرارت سطوح کنتاکت‌ها در هنگام قطع کلید خواهد شد. افزایش درجه حرارت زیاد دو سر کنتاکت باعث انتشار ذرات کنتاکت شده که در نتیجه با وجود جدا شدن کامل کنتاکت‌ها هنوز تمایل به برقراری جریان از طریق جرقه وجود خواهد داشت. افزایش ولتاژ بین فاصله دو کنتاکت و مقاومت زیاد بین آنها باعث یونیزاسیون بیشتر شده و الکترون‌های جدا شده سبب ادامه برقراری جریان بین جفت کنتاکت از طریق ابرالکترونی (پلاسما) خواهد شد. جرقه الکتریکی در حقیقت پدیده مذکور در بالا است.

در تمامی قطع کننده‌ها جرقه به مانند یک مقاومت متغیر عمل می‌کند. هنر و علم طراحی کلیدها در اصل کنترل جرقه ایجاد شده می‌باشد، بطوریکه تغییرات مقاومت جرقه بسته به نوع و مقدار جریان به شکلی باشد که عمل قطع بصورت موفقیت‌آمیزی انجام پذیرد.

در هنگام قطع جریان مستقیم (DC) مقاومت جرقه باید به سرعت افزایش یافته بطوری که عبور جریان را اجباراً در زمان کوتاهی به صفر نزدیک نماید ولی نه به سرعتی که باعث ایجاد افزایش ناگهانی ولتاژ در اندوکتانس مدار الکتریکی مربوطه شود.

در قطع جریان متناوب (AC) بر عکس جریان مستقیم طراحان قطع کننده‌های جریان متناوب هدف را کاهش هر چه بیشتر مقاومت جرقه قرار می‌دهند. دلیل آن نیز کاهش درجه حرارت و انرژی تولید شده در هنگام قطع کلید در زمان برقراری جرقه و در ضمن کاهش هر چه سریعتر هدایت الکتریکی جرقه در چند میکرو ثانیه مانده به نقطه صفر عبور جریان می‌باشد.

مشکل اساسی طراحان کلید، کنترل جرقه و افزایش سریع مقاومت در نقطه عبور از صفر می‌باشد تا باعث برقراری مجدد جرقه نشود.

محیط عایقی

گسترش صنعت برق و نیاز به شبکه‌های انتقال با ولتاژ زیاد عدم کارایی خاموش کردن جرقه با عایق هوا در فشار طبیعی را آشکار نمود. استفاده از روغن بعنوان ماده عایقی یک موفقیت درخشان بود.

تا زمانی که سطح اتصال کوتاه و اندازه جریانی که می‌بایستی قطع شوند کوچک بود استفاده از روغن روش مناسبی محسوب می‌شد. با افزایش توان سیستم و نیاز به قطع و وصل جریان‌های بیشتر در سطوح ولتاژی بالاتر و اشتعال و کربونیزه شدن روغن و هزینه سرویس و نگهداری کلیدهای روغنی، مهندسين و طراحان کلید را به پیدا کردن روش‌های مناسب‌تر و ماده عایقی با استقامت دی‌الکتریک بیشتر وعدم اشتعال هدایت نمود.

استفاده از هوای فشرده (Air-Blast) یکی از روش‌های مناسب و منطقی و مورد تأیید طراحان و مهندسين قرار گرفت. این کلیدها بدلیل نیاز به کمپرسور و خطوط هوای فشار بالا و همچنین صدای زیاد خیلی سریع با کشف خاصیت عایقی گاز SF6 با عدم استقبال مواجه شدند، هر چند هنوز هم این نوع کلید در پست‌های فشار قوی قدیمی در حال بهره‌برداری هستند.

رفتار جرقه در محیط گاز SF6

در اوائل دهه ۱۹۵۰ میلادی پژوهشگران متوجه خاصیت عایقی گاز SF6 شدند ولی اهمیت استفاده از آن بخصوص برای سطوح ولتاژ فشار متوسط از دهه ۱۹۶۰ آشکار شد.

مهمترین خواص گاز SF6 استقامت عایقی بالا و توانایی خاموش کنندگی بهتر آن نسبت به هوا می‌باشد. این گاز از نظر شیمیایی بی‌بو، بی‌رنگ و الکترون‌گاتیو می‌باشد (خاصیت جذب الکترون آزاد)، در ضمن اینکه آتش نمی‌گیرد. بیش از ۵ برابر سنگین‌تر از هوا است و خاصیت دی‌الکتریک آن ۲/۳ برابر هوا می‌باشد.

استقامت بالای دی‌الکتریک گاز SF6 این امکان را به مهندسين می‌دهد تا بتوانند فواصل عایقی را کمتر کرده و فشار گاز را نیز کاهش دهند که حاصل آن سبک‌تر شدن کلید خواهد بود.

گاز SF6 تا درجه حرارت ۱۵۰ درجه سانتیگراد خنثی بوده و به قطعات فلزی و پلیمری و سایر مواد تشکیل دهنده پل‌های کلید صدمه نخواهند زد.

در درجه حرارت بالا و قوس‌های الکتریکی سنگین و کرونا، گاز SF6 تجزیه شده و بویژه در مجاورت رطوبت باعث خوردگی شدید و تخریب مواد و قطعات تشکیل دهنده پل‌ها خواهند شد شکل (۱).



Figure 1
Main moving contact assembly (showing attack of Teflon)

بدین ترتیب بر خلاف تصور عمومی کلیدهای گازی SF6 نه تنها Maintenance Free نیستند بلکه بایستی بصورت دوره‌ای پل‌های کلید و به ویژه کنتاکت‌های آن بازرسی شده و در صورت نیاز تعویض شوند، که این کار مستلزم هزینه زیاد می‌باشد.

ترکیب گاز تجزیه شده در حرارت بالای جرقه و کرونا تجزیه شده و ماده خطرناک و سمی جدیدی با فرمول SF₁₀ را بوجود می‌آورد که در جنگ جهانی بعنوان بمب شیمیایی استفاده می‌شد. این ترکیب در صورت جذب توسط ارگانیسم موجودات زنده کشنده بوده و به هیچ عنوان از آن خارج نمی‌شود. طول عمر گاز SF6 در جو بیش از ۸۰۰ سال برآورد شده است.

مقاومت عایقی گاز SF₆ در میدان الکتریکی یکنواخت خیلی بهتر از محیط غیریکنواخت عمل می‌کند. گرد و خاک و ذرات خارجی بخصوص ذرات فلزی روی پل‌های کلید یکی از عوامل موثر در غیریکنواخت کردن میدان الکتریکی می‌باشد.

تخلیه الکتریکی کرونا و درجه حرارت زیاد، گاز SF₆ را به SF₄ و SF₂ و S₂F₁₀ اتم فلئور و گوگرد تجزیه می‌کند (شکل ۲a) که مواد تجزیه شده (شکل ۲b و جدول A) اثرات مخرب زیادی بر روی مواد و ساختار پل‌ها و به ویژه کنتاکت‌های کلید را دارند و در صورت نشستی مشکلات زیست محیطی شدیدی را بوجود می‌آورند.

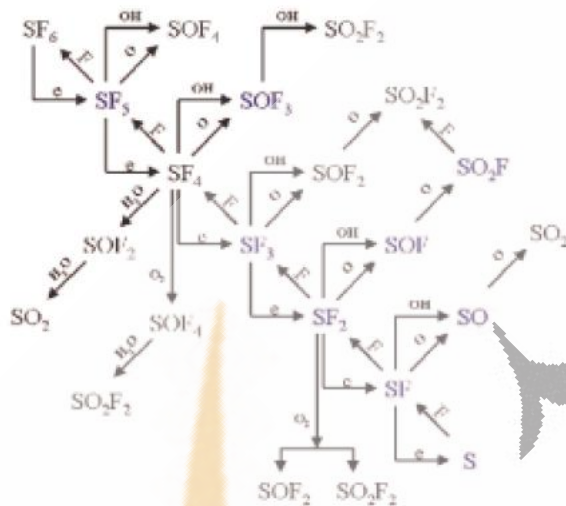


Figure 2a
SF₆ dissociation and reformation with formation of by-products

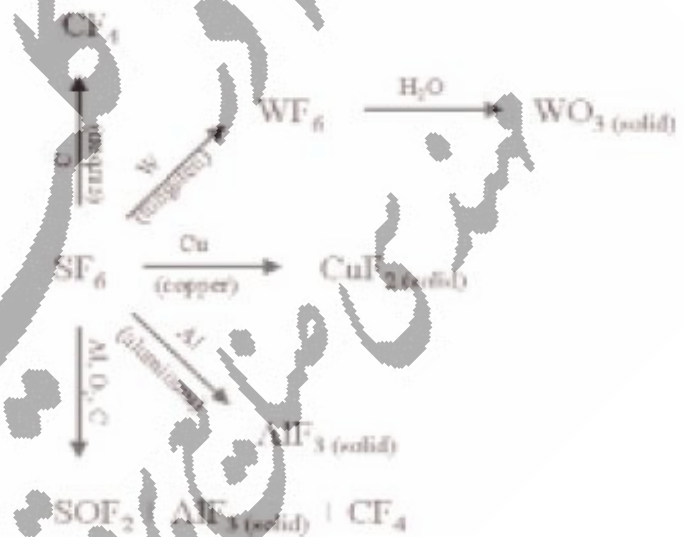
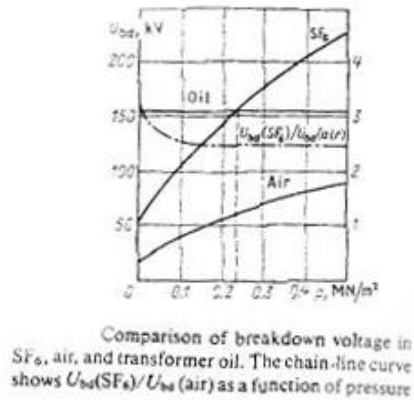


Figure 2b - Reactions of SF₆ with solid material

Table A	Compound	
SF ₆	Sulfur hexafluoride	670011
N ₂	Nitrogen	144898
O ₂	Oxygen	44409
CF ₄	Carbon tetrafluoride	8719
CO ₂	Carbon dioxide	18174
SO ₂ F ₂	Sulfuryl fluoride	3445
SO ₂	Sulfur dioxide	109812
COS	Carbonyl sulfide	533
H ₂ O	Water	180

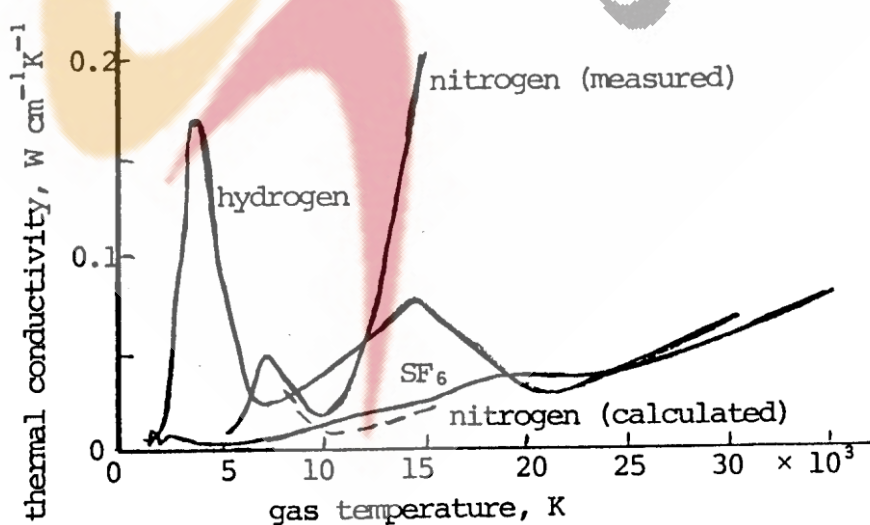
جدول ذیل مقایسه خواص گاز SF₆ با هوا و هیدروژن و ازت را نشان می‌دهد.



	SF ₆	Air	H ₂	N ₂
Density, mg/cm ³	6.7	1.29	0.089	1.25
Specific weight/air	5.19	1.0	0.069	0.96
Molecular weight	146	28.9	2.0	28
Boiling temperature, °C	-63.8	-194.0	-252.8	-195.8
Dielectric strength/air	2.3	—	—	1.0
Specific heat capacity at 70 °C, J/g K	0.73	1.00	1.42	1.03
Heat capacity per unit volume, mJ/cm ³ K	4.89	1.29	0.026	1.28
Velocity of sound at 30°C, m/s	138.5	330	1200	330

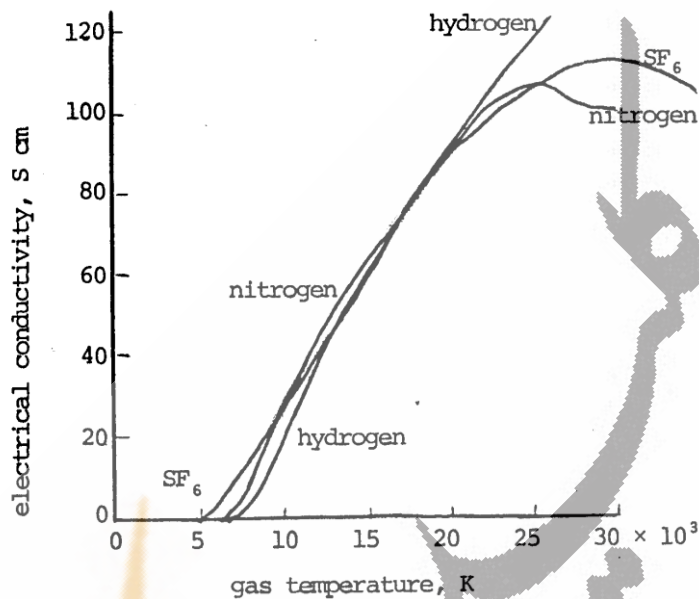
همانطور که در جدول مذکور مشاهده می‌شود ضریب حرارتی برای واحد حجم (انرژی لازم برای بالا بردن یک درجه سانتیگراد در حجم یک سانتیمتر مکعب) گاز SF₆ بیشتر از ۴ برابر هوا می‌باشد. در نتیجه مشخص می‌شود که چرا گاز SF₆ توانایی سرد کردن بهتر جرقه نسبت به هوا را دارد.

تبادل حرارتی طبیعی گاز SF₆ حدود ۱/۹ برابر بهتر از هوا است (شکل ۳)، بنابراین در محیط گاز SF₆ هادی‌های حامل جریان تا ۲۰ درصد بیشتر از هوا توانایی عبور جریان را خواهند داشت. این بدین معناست که می‌توان سطح مقطع هادی‌ها را در محیط گاز SF₆ کمتر نمود.



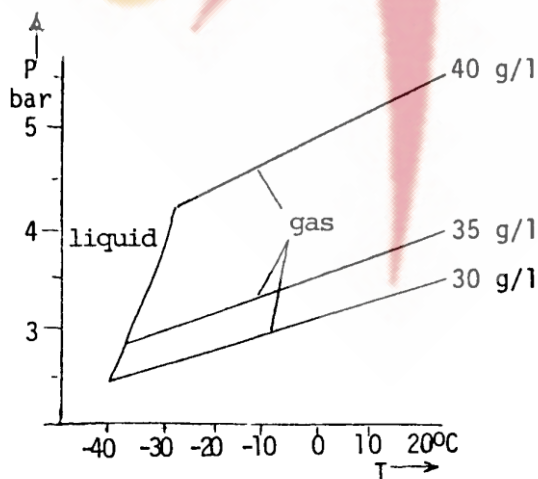
شکل ۳

گاز SF6 از لحاظ شیمیایی تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد خنثی است، بنابراین می‌توان افزایش درجه حرارت مس را از ۷۵ درجه سانتیگراد در هوا به ۹۰ درجه سانتیگراد در محیط گاز افزایش داد. مفهوم این افزایش درجه حرارت امکان افزایش جریان الکتریکی در سطح مقطع یکسان می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴

یکی از اساسی‌ترین مشکلات گاز SF6 تغییر حالت سریع از فاز گازی به مایع در درجه حرارت پایین می‌باشد. بطور مثال گاز SF6 در فشار 25 MN/m^2 و دانسیته 105 g/dm^3 در صفر درجه سانتیگراد به مایع تبدیل می‌شود در صورتیکه در فشار 0.4 MN/m^2 و دانسیته 30 g/dm^3 در ۴۰- درجه سانتیگراد به مایع تبدیل می‌شود. بدین ترتیب واضح است که در فشارهای بالاتر تغییر از حالت گازی به مایع در درجه حرارت‌های بیشتر صورت می‌گیرد (شکل ۵).



شکل ۵

کلیدهای گازی SF6 مانند کلیدهای Air – Blast با عبور سریع گاز بین کنتاکت‌ها باعث سرد کردن و خاموش شدن جرقه خواهند شد. در شرایط مشابه توانایی خاموش کردن جرقه با گاز SF6 حدود ۴ تا ۵ برابر هوا خواهد بود. مقاومت جرقه در محیط SF6 کمتر از مقاومت جرقه در مجاورت هوا در نیم سیکل منتهی به خاموش شدن جرقه است. جهت اطلاع، خاصیت عایقی گاز SF6 در فشار ۳ اتمسفر با روغن ترانسفورماتور قابل قیاس است.

کلید گازی (SF6)

کلیدهای گازی به دو گروه کلی تقسیم‌بندی می‌شوند. کلیدهای با فشار یگانه با افشانک (Puffer) و یا با انرژی جرقه فشار لازم جهت هدایت گاز به محیط جرقه را خود کلید هنگام جدا شدن کنتاکت‌ها توسط پیستون متحرک کلید تولید می‌کند و یا اینکه جابجایی گاز SF6 توسط انرژی ایجاد شده در جرقه بوجود آمده بر اثر قطع جریان الکتریکی ایجاد می‌شود.

در کلیدهای با فشار دابل یا مضاعف انرژی لازم جهت جابجایی گاز بوسیله کمپرسور گاز جداگانه تأمین می‌شود که به مانند کلیدهای هوای فشرده (Air- Blast) عمل می‌نماید. واضح است که برای هر کلید با فشار دابل نیاز به کمپرسور و تجهیزات جدا همراه کلید می‌باشد.

تا اوایل دهه ۱۹۷۰ فقط کلیدهای با فشار دابل برای ولتاژهای بالا استفاده می‌شد، لکن با پیشرفت تکنولوژی کلیدهای تک فشار، استفاده از این تکنیک برای ولتاژهای بالاتر نیز امکان‌پذیر شد. کلیدهای تک فشار ابتدا تا سطح ولتاژ ۱۴۵ کیلو ولت و جریان قطع ۶۳ کیلو آمپر و متعاقباً تا سطح ولتاژ ۲۴۵ کیلو ولت و قدرت قطع ۸۰ و ۱۲۰ کیلو آمپر طراحی و ساخته شدند. انتظار می‌رود در آینده نزدیک کلیدهای تولیدی با تکنیک تک فشار بیشترین بازار در ولتاژهای بالا در اختیار داشته باشند.

از ابتدای دهه ۱۹۷۰ کلیدهای تک فشار برای ولتاژهای ۱۲ و ۲۴ و ۳۶ کیلو ولت نیز برای شبکه‌های فشار متوسط طراحی و تولید شدند. امروزه مدل‌های متفاوتی از کلید تک فشار با روش افشانک (Puffer) و همچنین استفاده از انرژی جرقه تولید می‌شوند.

کلید گازی فشار دابل (Double Pressure Type)

بدلیل بهای زیاد گاز SF6 بر خلاف کلیدهای هوای فشرده (Air – Blast) گاز SF6 به مانند هوا در فضای آزاد تخلیه نمی‌شود بلکه گاز فوت شده در جرقه مجدداً به مخزن اصلی برگشت داده می‌شود. روش عمل کلید بدین‌صورت است که گاز فشرده شده در مخزن (حدود ۱۶ اتمسفر) در هنگام قطع کلید به ناگهان و با سرعت زیاد با باز شدن یک شیر پنوماتیک از طریق یک قیف از جنس تفلون در محفظه قطع کن و در فاصله بین کنتاکت‌ها و محل جرقه تخلیه می‌شود این عمل تا هنگامی که کنتاکت‌ها کاملاً از یکدیگر جدا شوند ادامه دارد. در نقطه مرگ کنتاکت‌های اصلی، فرمان بسته شدن شیر صادر و گاز تخلیه شده کم فشار مجدداً به مخزن کمپرسور پمپ خواهند شد. بدلیل اینکه گاز SF6 در فشار ۱۶ اتمسفر و درجه حرارت ۱۰ درجه سانتیگراد مایع می‌شود بدین منظور همیشه بایستی مخزن محتوی گاز فشرده شده با گرم کن در درجه حرارت بالاتر نگهداری شود.



شکل ۶a

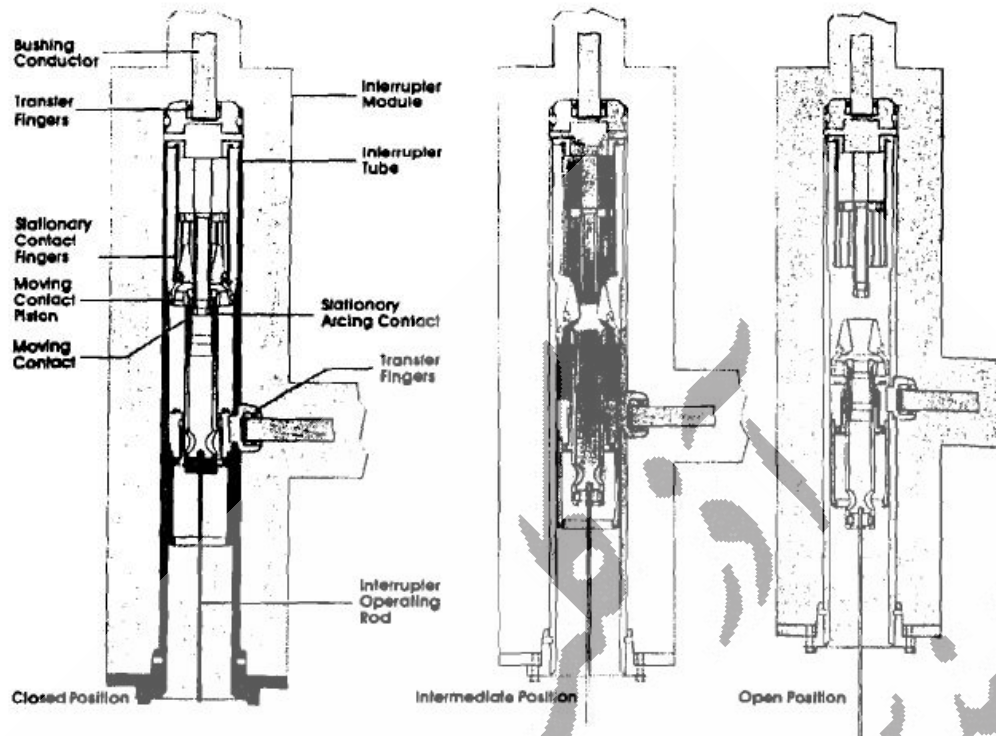


Figure 6b

Sequence of an opening operation with a double-flow interrupter.

کلید گازی تک فشار (Single Pressure Type)

دلیل نام‌گذاری کلید بنام کلید گازی تک فشار این است که گاز داخل محفظه قطع‌کننده کلید در اکثر مواقع در یک فشار ثابت بین ۳ تا ۶ اتمسفر قرار دارند.

الف: کلید گازی با افشانک (Puffer Breaker)

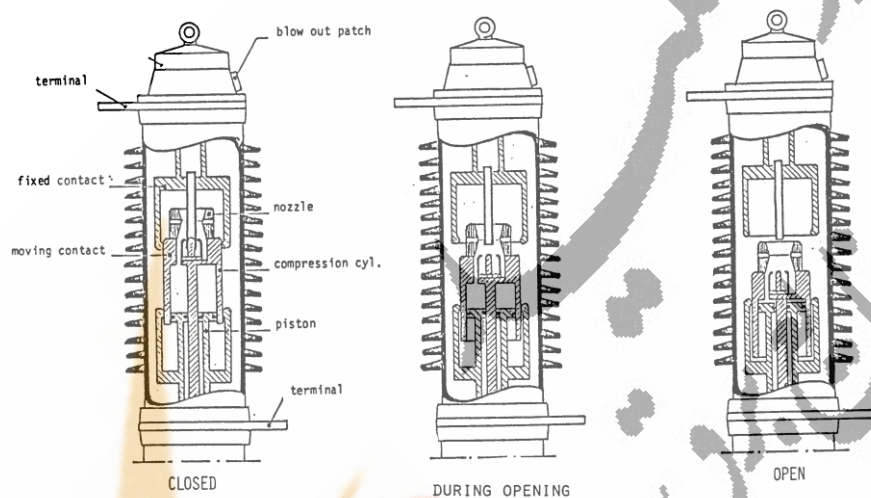
در این کلیدها گاز داخل محفظه هر یک از پل‌ها در هنگام باز شدن کنتاکت کلید با حرکت سیلندر راهنمای کنتاکت و یا بوسیله کنتاکت متحرک پیستونی شکل، گاز SF6 با فشار از افشانک به سمت جرقه فوت می‌شود. در شکل (۷) مقطع یک پل کلید 145KV-40KA و در شکل (۸) یک پل کلید 24KV-16KA نشان داده شده است.

زمانی که جفت کنتاکت از یکدیگر جدا می‌شوند جرقه ایجاد شده باعث برقراری و ادامه جریان می‌شود. اگر مقدار جریان زیاد نباشد جرقه در نقطه عبور صفر جریان خاموش می‌شود. در صورتی که جریان قطع اتصال کوتاه زیاد باشد، خاموش شدن جرقه در اولین عبور از صفر جریان اتفاق نخواهد افتاد و جرقه باعث مسدود کردن افشانک و جلوگیری از عبور گاز SF6

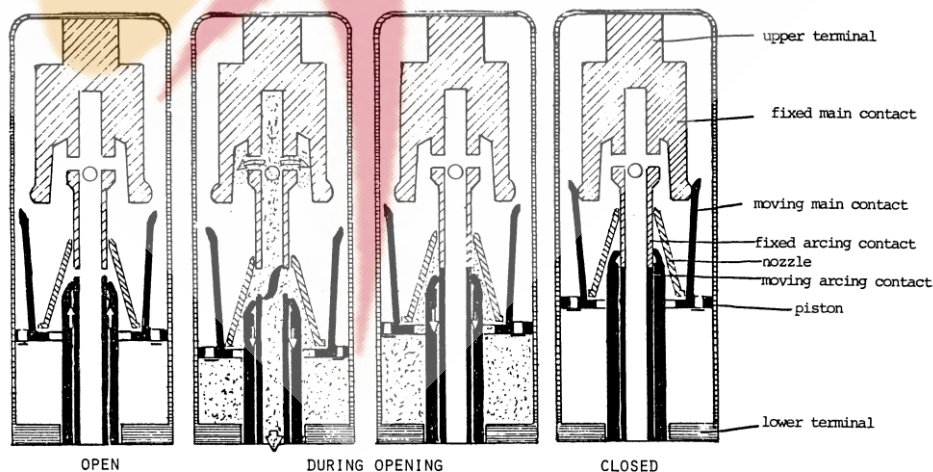
می‌نماید که در نتیجه فشار داخل پل افزایش یافته و در دومین و یا سومین عبور از صفر جریان، بسته به مقدار جریان اتصالی فشار افزایش یافته بصورت انفجاری گاز را از افشانک تخلیه نموده و جرقه را خاموش می‌کند.

کلیدهای فشار قوی (145KV) با تکنیک افشانک نیاز به مکانیسم سنگین برای باز کردن کنتاکت‌ها و سرعت بالای ۷ تا ۹ متر بر ثانیه برای فشردن گاز و فوران آن از طریق افشانک دارند.

واضح است که مکانیسم قطع و وصل در کلیدهای فشار متوسط با روش فوق به مراتب کم قدرت‌تر خواهند بود. دلیل آن نیاز به سرعت کمتر حدود ۳ تا ۵ متر بر ثانیه برای کلیدهای ۲۴ کیلو ولت می‌باشد.



شکل ۷



شکل ۸

ب: کلیدهای گازی با تکنیک انرژی جرقه

بجای تولید فشار زیاد و عبور گاز از افشانک، این امکان وجود دارد که جرقه را در میدان مغناطیسی منحرف نموده و به دوران درآورد. تبادل حرارت بین جرقه و گاز ممکن است به حدی نباشد که جرقه خاموش شود بدلیل اینکه فقط سطح بیرونی جرقه تبادل حرارت می‌نماید. خنک شدن کافی زمانی رخ می‌دهد که انرژی جرقه، گاز SF₆ داخل پل را به اندازه کافی گرم نموده و افزایش حجم گاز و اضافه فشار تولید شده بر اثر حرارت باعث فوران آن از افشانک شود. اضافه فشار ایجاد شده نسبت مستقیم با مقدار جریانی که باید قطع شود دارد. برای خاموش کردن جریانهای کم یک افشانک به مجموعه اضافه می‌شود (شکل ۹).

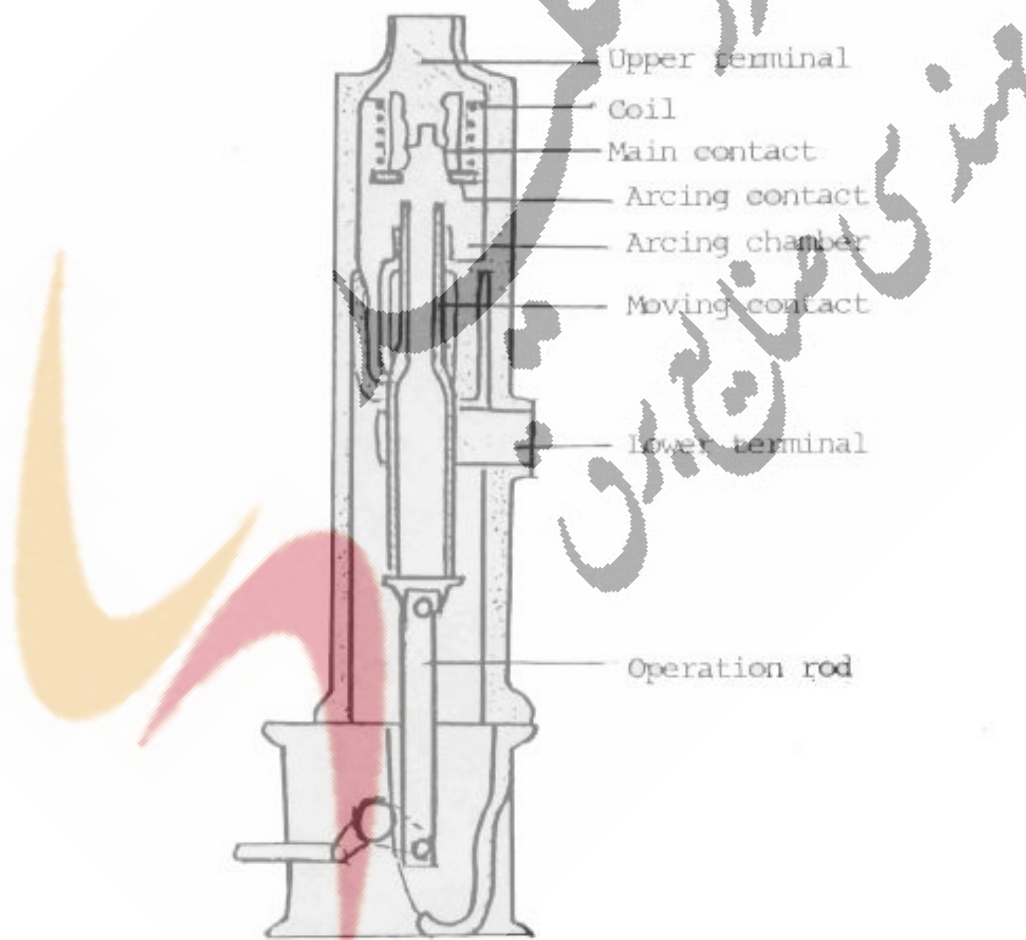


Figure 9 24 kV, 16 kA SF₆ -single pressure breaker using the arc energy

کلید قابل قطع زیر بار گازی (SF6)

براساس استاندارد IEC کلیدهای قابل قطع زیر بار (سکسیونر) برای تعداد ۱۰۰ بار قطع و وصل در بار نامی (بطور معمول ۶۳۰ آمپر در ولتاژ 20KV (Class -E1) و ۱۰۰۰ بار قطع و وصل مکانیکی (Class -M1) طراحی و آزمایش می‌شوند.

تعداد دفعات قطع و وصل در جریان کمتر با فرمول تجربی $N_1 I_1^2 = K N_2 I_2^2$ محاسبه می‌شوند.

I_1 : جریان نامی

N_1 : تعداد دفعات قطع و وصل (CO)

I_2 : جریان کار

N_2 : تعداد دفعات قطع و وصل در جریان I_2

K ضریبی معادل ۱/۴-۱/۲ می باشد که بستگی به درجه خلوص و فشار و حجم گاز SF6 داخل کلید دارد.

بطور مثال اگر جریان خط را معادل ۲۵۰ آمپر و کیفیت گاز را عالی فرض کنیم در نتیجه خواهیم داشت:

$$100 \times 630^2 = 1.25 \times N_2 \times 250^2$$

$$N_2 = 500$$

اگر کلید فوق در پستی نصب شود که حداکثر یک بار در هفته قطع و وصل شود، عمر آن در بهترین شرایط ۱۰ سال خواهد بود. نتیجه اینکه اصولاً سکسیونر برای نقاطی که تعداد دفعات مانور زیاد باشد مناسب نیست و بهتر است که در نقاط مانوری به جای سکسیونر از دژنگتور استفاده شود.

روشن است که استفاده از دژنگتور خلاء بدلیل عدم آلودگی و تعمیر و نگهداری به مراتب کمتر و توانایی تعداد قطع و وصل بیشتر (حداقل ۱۰,۰۰۰ بار قطع و وصل) در مقایسه با دژنگتور گازی (۳۰۰۰ بار قطع و وصل) به مراتب بهتر است.

قابل به ذکر است که کلیدهای گازی SF6 در سه مرحله باعث آلودگی و تخریب محیط زیست می‌شوند.

۱. در هنگام تولید و تزریق گاز به محفظه قطع کننده کلید.

۲. در هنگام بهره‌برداری و احتمال نشت گاز SF6 به محیط اطراف

۳. نگران کننده ترین بخش مربوط به پایان عمر کلید است که بایستی گاز SF6 و مواد سمی تولید شده در کلید خارج و نابود شوند. این مرحله نیاز به تجهیزات خاص و گران قیمت و متخصصین آموزش دیده دارد، که باعث تحمیل هزینه های سنگین و مشکلات و نگرانی‌های متعدد خواهد شد.

کلید روغنی

کلیدهای روغنی از اولین سری کلیدها برای قطع و وصل جریان در ولتاژهای بالا می‌باشد. تاریخ استفاده از آن به اواخر قرن ۱۹ برمی‌گردد.

از معایب عمده این نوع کلید امکان انفجار و اشتعال و هزینه تعمیرات زیاد آن می‌باشد، در ضمن اینکه هر قطره روغن باعث آلودگی یک مترمربع خاک می‌شوند.

کشف خاموش شدن بهتر جرقه در روغن نسبت به هوا شاید یکی از اتفاقات مهم برای صنعت برق بوده است. در ظاهر تصور اینکه روغن قابل اشتعال ماده کم نظیری برای خاموش کردن جرقه باشد دور از انتظار بود. به هر حال، روغن بدلیل هدایت حرارتی بالای گاز هیدروژن تولید شده با واسطه جرقه درون روغن تا زمانی که درجه حرارت و فشار گازهای تجزیه شده درون کلید به حد انفجار نرسیده است عایق قابل قبولی است. با افزایش توان جرقه نیاز به حجم بیشتر روغن خواهد بود. طراحی محفظه‌های قطع کلیدهای روغنی بیشتر با روش‌های تجربی در آزمایشگاه‌ها انجام شده است.

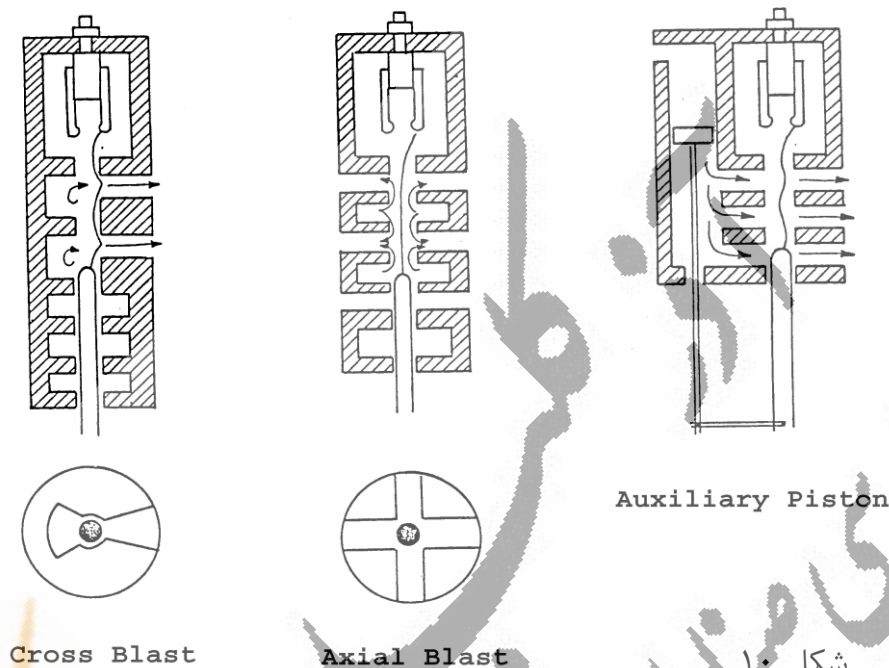
برای قطع کردن جرقه در جریان متناوب، از عبور طبیعی جریان از صفر استفاده می‌شود. وظیفه اصلی محفظه قطع کننده جرقه این است که هنگامی که جریان به صفر رسید و جرقه خود به خود قطع شد، گازهای گرم و ذرات باردار به وجود آمده در محفظه‌ای که کنتاکت‌ها در آن قرار دارند پاک و دیونیزه شوند. این عمل باعث می‌شود استقامت دی‌الکتریک بین جفت کنتاکت‌های کلید مجدداً بالا رود و در موقع برگشت ولتاژ بخصوص در قطع جریان کاپاسیتیو مانع برگشت مجدد جرقه شود.

بهتر است عوامل خاموش کننده، خنک کردن و دیونیزه کردن خیلی شدید نباشد، زیرا در قطع جریان اندوکتیو در اثر بریده شدن جریان قبل از رسیدن به صفر طبیعی، ولتاژ زیادی در دو سر کنتاکت‌های کلید پدیدار می‌شود که موجب برگشت مجدد جرقه می‌شود.

محفظه‌های قطع در این کلیدها به سه دسته عرضی و طولی و ترکیب آنها تقسیم‌بندی می‌شوند.

در روش عرضی جرقه در هنگام قطع جفت کنتاکت از مقابل سوراخ‌هایی عبور می‌کند که گرمای حاصل از جرقه باعث تبخیر روغن و تشکیل گاز به‌ویژه هیدروژن می‌شود که در نتیجه باعث افزایش فشار و آشوب روغن شده و جرقه را به سمت سوراخ‌ها هدایت نموده که در نتیجه طول جرقه زیاد شده و در نقطه صفر عبور جریان جرقه خاموش می‌شود.

در محفظه‌های قطع طولی نیز روش عملکرد مشابه روش عرضی است. شکل (۱۰) اصول عملکرد آنها را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰

مشکل این دو روش خاموش کردن جرقه زمانی است که در هنگام قطع جریانهای سنگین فشار داخل محفظه قطع به حد انفجار برسد که برای جلوگیری از انفجار نیاز به سوپاپ تخلیه فشار می‌باشد و همچنین برای قطع جریانهای کوچک انرژی پایین جرقه امکان گرم کردن روغن تا حد تولید گاز را ندارد که در این حالت یک پیستون کمکی به همراه حرکت کنتاکت متحرک عمل جابجایی روغن را انجام می‌دهد.

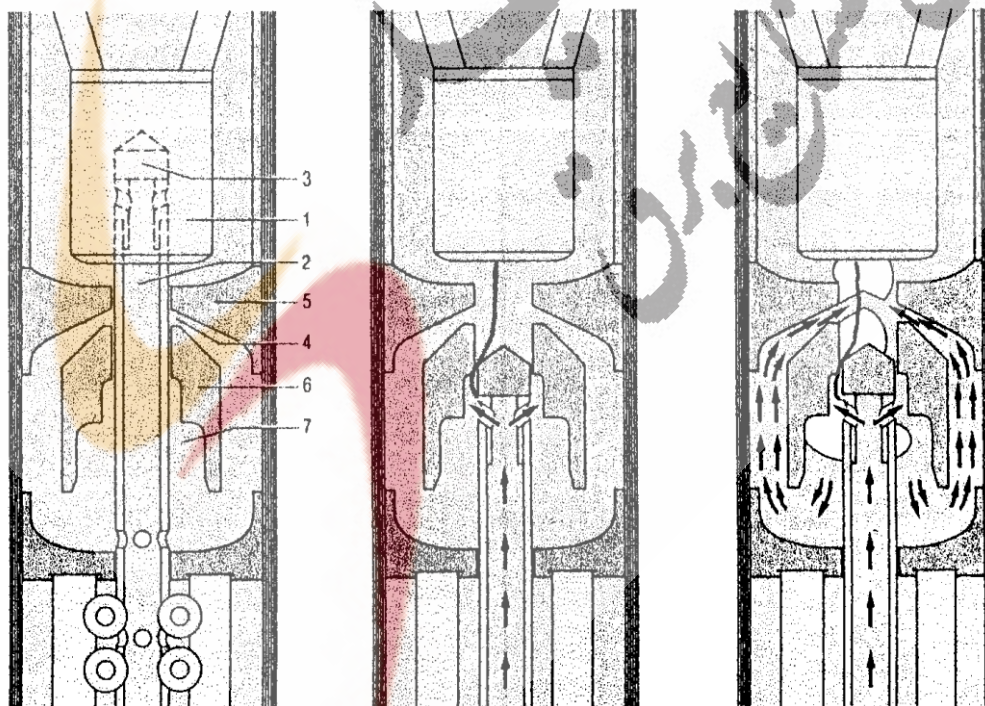
قطع موفقیت‌آمیز جریان و خاموش کردن جرقه به طراحی محفظه قطع و اساساً به ولتاژ و جریان قطع وابسته است. زمان قطع جرقه بایستی در حداقل زمان ممکن بوده بطوریکه انرژی جرقه باعث سوختن کنتاکت‌ها نشود.

در عمل مشاهده شده است که تقریباً امکان کم کردن زمان جرقه اتصال کوتاه در هنگام قطع کلید روغنی به کمتر از ۲۰ میلی ثانیه ناممکن است.

قطع جریان‌های کم:

در قطع جریان‌های کم، جرقه نیز قدرت کمی خواهد داشت و ممکن است مقدار گازی که در این زمان بسیار کوتاه (نیم پریود) ایجاد می‌شود آنقدر کم باشد که نتواند فشار لازم را برای بالا بردن استقامت الکتریکی بین دو کنتاکت را پیدا کند، بنابراین در اثر برگشت ولتاژ جرقه مجدداً شروع می‌شود و تا چند پریود نیز ادامه خواهد داشت. چنانچه مشاهده می‌شود قطع جریان در کلید کم روغن تابع شدت جریان است، از این جهت برای کوتاه کردن زمان جرقه در جریان کم باید قسمت فوقانی محفظه را خیلی کوچک درست کرد، در نتیجه تراکم گاز زیاد شده و برای خنک کردن گازهای گرم باید روغن را در اطراف جرقه خیلی سریع به جریان انداخت.

در شکل (۱۱) به جریان انداختن روغن مستقل از شدت جریان توسط حرکت کنتاکت لوله‌ای شکل (۲) به طرف پایین صورت می‌گیرد. در هنگام حرکت کنتاکت مذکور، روغن از قسمت پایین پل دژنگتور و از طریق کنتاکت لوله‌ای شکل به سمت بالا پمپ شده و مستقیماً به جرقه پاشیده خواهد شد.



شکل ۱۱

الف - کلید در حالت وصل
۳- کلامک هابقی

ب - قطع جریان کم
۲- مهله متحرک کنتاکت
۵- جدا کننده دو محفظه بالا و پایین
۷- محفظه پایین

ج - قطع جریان زیاد
۱- مهله کنتاکت ثابت
۲- کانال باریک روغن
۶- هدایت کننده کنتاکت متحرک

قطع جریان‌های زیاد:

در هنگام جدا شدن جفت کنتاکت کلید در جریان‌های زیاد در محیط روغن، جریانی که از آخرین نقطه تماس کنتاکت می‌گذرد باعث گداخته شدن و تبخیر فلز کنتاکت شده و بدین واسطه جرقه الکتریکی یا قوس الکتریکی بین دو کنتاکت پایه‌گذاری می‌شود.

جریان زیاد جرقه روغن اطراف قوس را تبخیر و تولید حباب‌های گاز با فشار زیاد می‌کند. به محض اینکه پایه جرقه در قسمت پایین کلاهی عایقی (۳) به محل فشرده شده منبع روغن (۶) می‌رسد، گازهای یونیزه داغ تحت فشار ایجاد شده در اثر قوس، روی سطح روغن فشار وارد کرده و موجب می‌شود روغن در محفظه (۷) به طرف پایین جریان پیدا کند و از مجرای که در شکل (۱۱) نشان داده شده (۴) به اطراف ستون جرقه فشار وارد کرده و باعث شود گازهایی که در اطراف کنتاکت ثابت (۱) جمع شده‌اند به داخل حفره توخالی کنتاکت ثابت کشیده شوند. در آنجا تبادل فشار صورت می‌گیرد و قسمت زیادی از گازها و بخار روغن دوباره جذب روغن می‌شود. درست موقعی که فاصله دو کنتاکت به حداقل می‌رسد عمل خنک کردن و تخلیه گاز و دیونیزه شدن انجام می‌گیرد.

طراحی ساختار پل‌ها مسیر هدایت عبور روغن از کانال‌ها و سوراخ‌ها به نحوی است که به صورت شعاعی و در تمام طول جرقه به اطراف قوس فشار وارد کنند؛ بدون آنکه طول آن را زیاد کند تا باعث برگشت مجدد جرقه شوند.

سرعت قطع کلیدهای روغنی برای ولتاژهای متوسط ۱۲ تا ۳۶ کیلو ولت حدود ۳ تا ۵ متر بر ثانیه می‌باشند.

تعمیر و نگهداری کلیدهای روغنی

بدلیل تجزیه روغن در هنگام جرقه‌زنی، روغن داخل محفظه قطع به سرعت کربونیزه شده که در نتیجه قدرت عایقی آنرا کاهش می‌دهد. بنابراین محفظه قطع و روغن آن بایستی بصورت دوره‌ای فیلتر و یا تعویض شوند. توصیه سازندگان بطور معمول بین ۳ تا ۵ سال و بسته به تعداد عملکرد کلید دارد و در ضمن اینکه پس از چند بار اتصال کوتاه حتماً بایستی روغن کلید تعویض شوند.

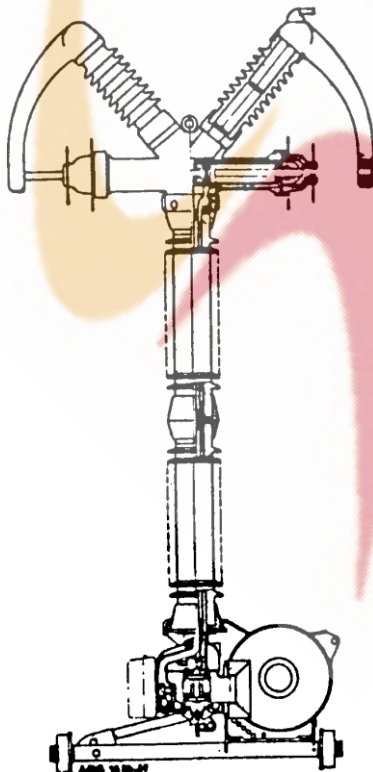
قابل به ذکر است که تعداد دفعات قطع جریان اتصال کوتاه نامی در کلیدهای روغنی خیلی پایین بوده و به بیش از ۵ بار نمی‌رسد.

کلید Air-Blast

کلیدهای Air-Blast مدرن در فشار حدود ۱۰ تا ۲۰ اتمسفر کار می‌کنند. در این فشار تحمل دی‌الکتریک هوای فشرده با روغن قابل قیاس است. در بیشتر کلیدهای Air-Blast از هوای فشرده بعنوان ماده عایقی در محفظه‌های قطع استفاده می‌شود. عملاً برای انواع کلیدهای مذکور هوای مورد استفاده بایستی رطوبت‌زدایی شود. رطوبت پایین در ضمن باعث جلوگیری از خوردگی قطعات داخل کلید خواهد شد.

در کلیدهای Air-Blast هنگام قطع، هوای فشرده سرعت از محفظه قطع به خارج تخلیه می‌شود و حرکت جفت کنتاکت‌ها نیز طولانی بوده و قطع آن قابل رؤیت است (که این یکی از مزایای استفاده از این کلید است) ولی صدای زیاد تخلیه هوا از مشکلات عمده آن به حساب می‌آید.

تخلیه هوا و نیاز به تجهیزات جانبی مانند کمپرسور و منابع ذخیره هوا و لوله‌کشی و هزینه نگهداری و سرویس در این نوع کلید از مشکلات عمده آن به حساب می‌آید. شکل (۱۲) نمایی از یک کلید هوای فشرده فشار قوی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲

Air Blast Breaker with arc in open air

کلید خلاء (Vacuum Circuit Breaker)

از تاریخ ثبت اختراع تکنولوژی خلاء (Patent) در سال ۱۸۹۰ و ساخت نمونه عملی قطع کننده با تکنولوژی خلاء در سال ۱۹۲۰، فن آوری خلاء بعنوان روش موثر و کارا در خاموش کردن جرقه برای قطع جریان برق مورد پذیرش قرار گرفته است.

تولید صنعتی و انبوه کلیدهای خلاء از میانه دهه ۱۹۶۰ متداول شده و به سرعت در شبکه های فشار متوسط تا سطح ولتاژ ۴۰ کیلو ولت مورد استفاده قرار گرفته اند. گزارش های مثبت دریافتی در ارتباط با کیفیت عملکرد و اطمینان از تکنولوژی خلاء در حوزه فشار متوسط موید برتری این فن آوری در مقایسه با سایر تکنولوژی ها میباشد.

تلاش برای گسترش محدوده ولتاژی این فن آوری برای استفاده در سطوح ولتاژی بالاتر شروع شده است. برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ ژاپن پیشگام در تولید و استفاده از کلید خلاء برای ولتاژ بالاتر از ۵۲ کیلو ولت بیش از ۱۰/۰۰۰ عدد کلید خلاء ۷۲/۵ کیلو ولت تا سال ۲۰۱۰ در صنایع و شرکت های برق نصب و راه اندازی کرده اند. از سال ۲۰۰۸ تحقیق و توسعه برای تولید کلید های فشار قوی در چین و اروپا نیز شدت گرفت. موتور محرک تحقیقات فوق تلاش برای کاهش و نهایتاً حذف گاز SF6 از چرخه تولید کلید میباشد. دلیل آن نیز شدت تخریب محیط زیست و افزایش گرمایش زمین توسط گاز SF6 و تایید آن بعنوان گاز به شدت مخرب و گلخانه ای (Green House Gas) میباشد.

فن آوری قطع جریان در خلاء

درک و تحلیل پدیده فیزیکی جرقه در محیط خلاء عامل اصلی پیشرفت و توسعه تکنولوژی قطع کننده های خلاء بوده و هست.

ماهیت جرقه در محیط خلاء کاملاً متفاوت با جرقه در سایر محیط های قطع جرقه مانند هوا و یا روغن و گاز می باشد. تعریف جرقه در محیط خلاء در حقیقت فوران بخار فلز آزاد شده ابر مانند در هنگام قطع جریان در هنگام جدا شدن کنتاکت های حامل جریان کلید از یکدیگر می باشد. پلاسمای بخار فلز دارای هدایت الکتریکی بسیار خوبی است که با وجود دور شدن کنتاکت ها از یکدیگر ادامه عبور جریان و ایجاد جرقه الکتریکی را باعث می شود. این قوس تا هنگامی می تواند وجود داشته باشد که جریان از حوالی نزدیک به صفر نگذشته است. به محض عبور جریان از نقطه صفر (قطع خود به خود جریان) سطح کنتاکت های هادی جریان خنک شده و تبخیر متوقف میشود و بخار فلز پلاسمای مجدداً روی کنتاکت ها می نشیند، در نتیجه فضای خالی بین دو کنتاکت که اکنون فاقد حامل های باردار است برگشت ولتاژ را بخوبی تحمل می -

کند و جرقه خاموش می‌ماند. دی‌الکتریک محیط خلاء در زمانی کمتر از ۱۰ میکروثانیه پس از عبور از صفر جریان احیا می‌شود (شکل ۱۳).

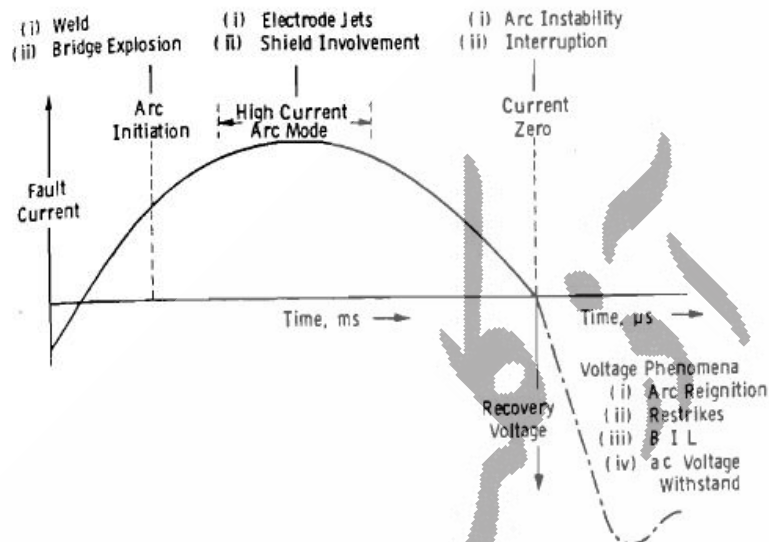


Figure 13 Ac arcing and interruption phenomena in vacuum.

در میدان الکتریکی یکنواخت استقامت محیط خلاء به 10^5 V/mm می‌رسد. در قطع جریان‌های کوچک (کمتر از ۱۰ کیلو آمپر) شکل جرقه در محیط خلاء بصورت پراکنده و پخش می‌باشد، در صورتی که در هنگام قطع جریان‌های زیاد (چندین ده کیلو آمپر) جرقه بصورت ستونی فشرده بین دو طرف کنتاکت در حال سوختن است. نحوه قطع شدن جریان در محیط خلاء به شکل و سایز و جنس کنتاکت‌ها و همچنین مقدار جریان قطع بستگی کامل دارد.

جرقه پراکنده و پخش شده جریان‌های کوچک بصورت رشته‌های مجزا از یکدیگر در تمام سطح کنتاکت توزیع شده که هر یک حاصل چند ده تا چند صد آمپر خواهند بود. اما در قطع جریان‌های بالا ستون فشرده جرقه بوجود آمده باعث افزایش درجه حرارت بسیار زیاد کنتاکت‌ها بصورت موضعی و افزایش دانسیته بخار فلزی در محیط خلاء خواهد شد، بطوری که حتی بعد از عبور صفر جریان نیز فلز کنتاکت‌ها به تبخیر خود ادامه خواهند داد. بنابراین بایستی کنتاکت‌ها را طوری طراحی نمود که شکل جرقه قبل از نزدیک شدن جریان به صفر طبیعی از حالت ستون فشرده جرقه به حالت پخش تبدیل شود (شکل ۱۴a و ۱۴b).

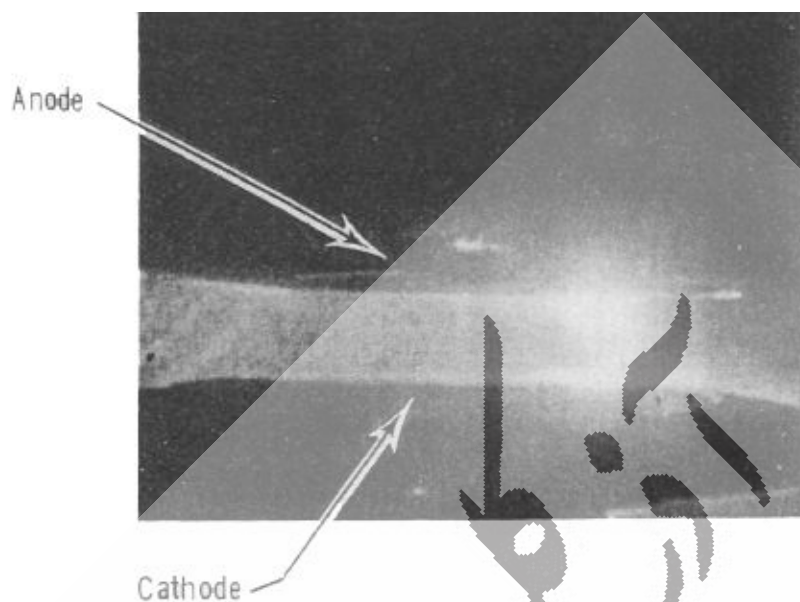


Figure 14a - Photograph of a high-current vacuum arc with the anode spots visible

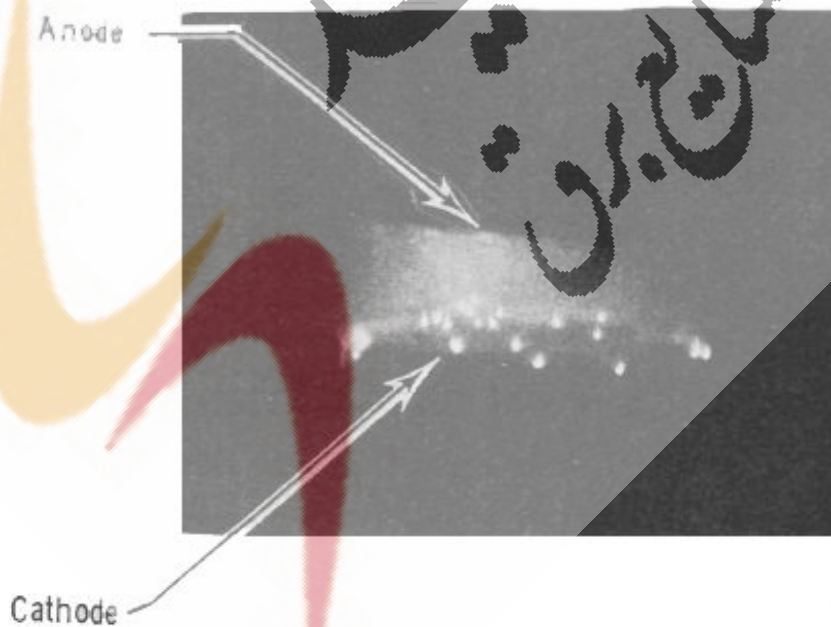
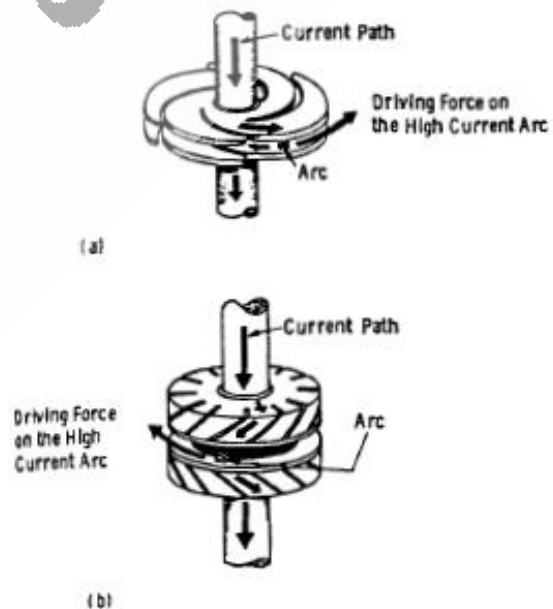


Figure 14b - Photograph of a low-current arc

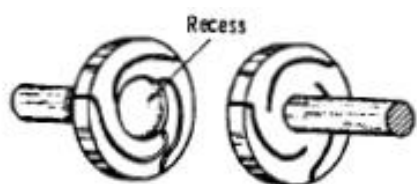
خصوصیات محیط خلاء همانطور که بیان شد به جنس و شکل کنتاکت‌ها بستگی زیادی دارند. در طی زمان تحقیق و توسعه، آلیاژهای متفاوتی آزمایش شده است که در نهایت مشخص شده است که آلیاژ کروم - مس بدون اکسیژن (Oxygen Free Copper Chromium) بهترین ماده برای تولید کنتاکت در محیط خلاء می‌باشد. آلیاژ مذکور، کروم پخش شده بصورت دانه‌های ریز در مس می‌باشد. این ماده ویژگیهای خوبی برای خاموش کردن جرقه را داشته، در ضمن اینکه تمایل کمی به جوش خوردن را دارد. با به کار بردن این آلیاژ جریان برش قبل از عبور از صفر (Chopping Current) به حدود ۴ تا ۵ آمپر کاهش می‌یابد و بدین ترتیب حتی در هنگام قطع ترانسفورماتورهای بدون بار توسط کلید خلاء نیز نمی‌تواند اختلاف پتانسیل‌های مزاحم زیاد ایجاد شود.

در زمان قطع جریان‌های زیاد ستون بهم فشرده جرقه باعث ایجاد درجه حرارت زیادی بصورت موضعی خواهد شد. برای اینکه بتوانیم از یونیزاسیون کنتاکت‌ها جلوگیری کنیم بایستی ریشه جرقه را از یک نقطه به تمام سطح کنتاکت جابجا نماییم تا جرقه در یک نقطه برای مدت طولانی باقی نماند. به منظور رسیدن به این هدف با ایجاد شیارهای مورب در سطح کنتاکت‌ها مسیر عبور جریان را هدایت نموده بطوریکه یک میدان مغناطیسی مماس بر سطح کنتاکت و عمود بر محور جرقه ایجاد شود. این میدان شعاعی باعث چرخش سریع ریشه جرقه بر روی تمام نقاط کنتاکت شده و موجب پخش یکنواخت گرما به تمامی سطح کنتاکت و خوردگی یکنواخت آن می‌شود. کنتاکت‌ها در این روش به نام الکترودهای میدان مغناطیسی شعاعی یا RMF (Radial Magnetic Field Electrodes) مشهور هستند. این نوع کنتاکت‌ها برای جریان‌های قطع تا ۲۵ کیلوآمپر مناسب هستند (شکل ۱۵).

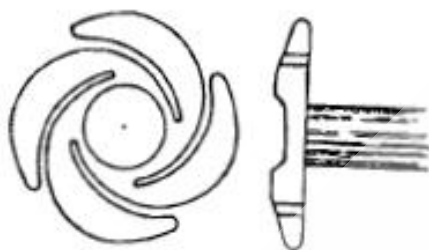


شکل ۱۵

برای قطع جریان‌های زیاد (2000 – 4000 A)
(با افزایش تعداد نقاط تماس در سطوح کنتاکتها
باعث تحمل حرارتی بیشتر کنتاکت خواهد شد)
(شکل ۱۶).



(a)



(b)

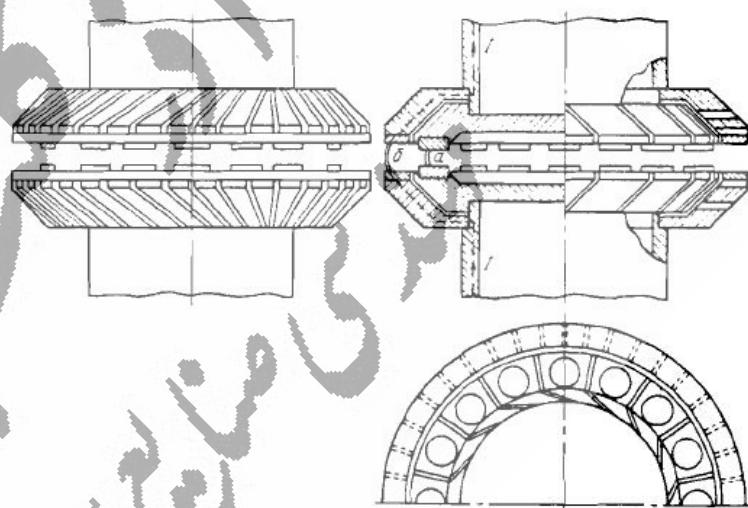
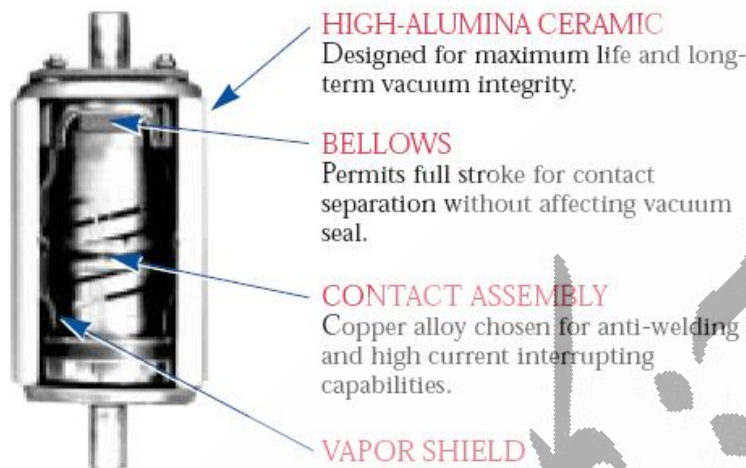


Fig.16 Multipoint butt contact of a vacuum interrupter

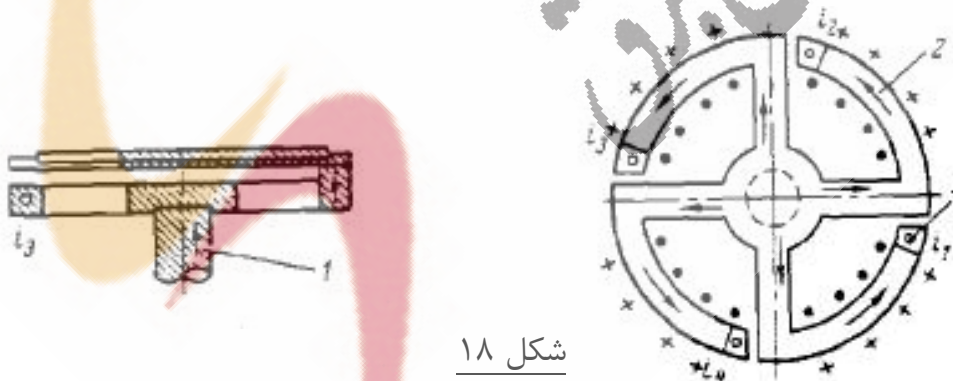
مطالعه و تحقیق برای قطع جریان‌های بالاتر (تا ۱۰۰ کیلوآمپر و بیشتر) منجر به کشف روش جدیدی شد که به روش میدان مغناطیسی محوری و یا AMF (Axial Magnetic Field) نامیده می‌شود. در این روش میدان مغناطیسی هم محور و موازی با محور جرقه ایجاد می‌شود. این میدان باعث چرخش محوری الکترون‌های جرقه شده و قوس ایجاد شده در تمام سطح کنتاکت بصورت یکنواخت پراکنده می‌شوند (شکل ۱۷).



axial-magnetic field vacuum interrupter.

شکل ۱۷

در این روش ولتاژ دو سر جرقه تا ۲۰ ولت کاهش یافته و در نتیجه این امکان را بوجود می‌آورد که جریانهای ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوآمپر را بتوان قطع نمود. مسیر ۱ تا ۴ در شکل (۱۸) هادی‌های عبور جریان بوده و محل تماس کنتاکت‌ها در انتهای هر مسیر می‌باشد. نقطه‌های سیاه و علامت + حول مسیر جریان مشخص کننده محور میدان مغناطیسی (هم محور با مسیر جرقه) می‌باشند.



شکل ۱۸

فشار داخل کپسول های خلاء حدود 10^{-7} - 10^{-4} Torr و طول مسیر جابجایی کنتاکت‌ها در کپسول خلاء حدود ۶ تا ۲۵ میلیمتر (بسته به ولتاژ و نوع طراحی) و سرعت قطع و وصل کنتاکت حدود یک متر بر ثانیه می‌باشد. شکل (۱۹) برش یک کپسول خلاء و شکل (۲۰) یک کلید کلاسیک مجهز به قطع کننده خلاء را نمایش می‌دهند.

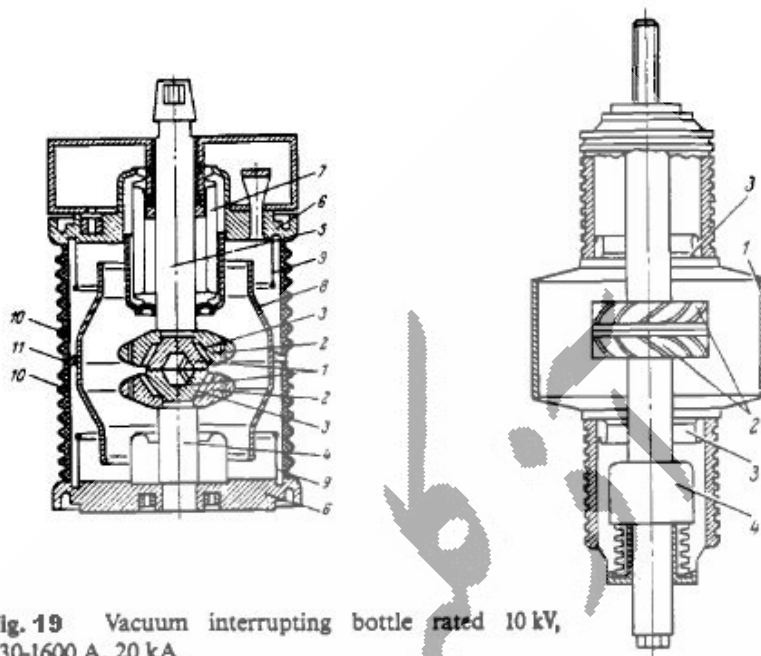


Fig. 19 Vacuum interrupting bottle rated 10 kV, 630-1600 A, 20 kA

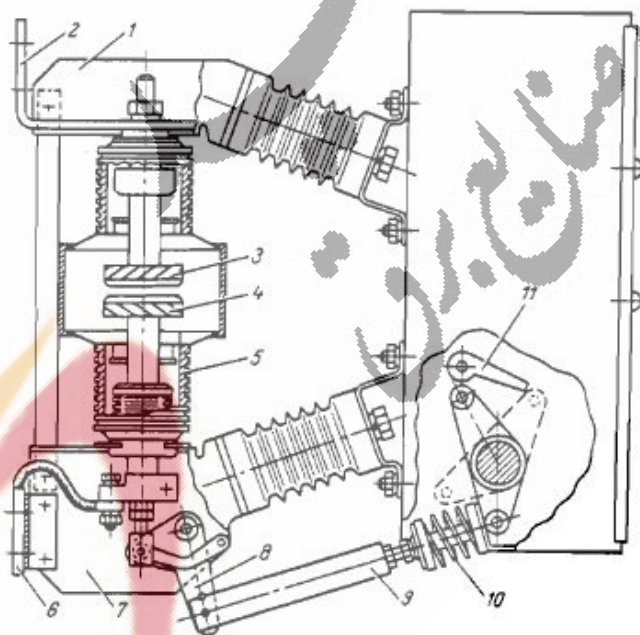


Fig. 20 vacuum circuit breaker incorporating the interrupter

مکانیسم قطع و وصل کلید

مکانیسم تمام کلیدها دارای یک وظیفه هستند و آن هم قطع و وصل مطمئن کلید پس از دریافت فرمان مربوطه. چنانچه در حین وصل کلید، فرمان قطع دریافت شود مکانیسم باید بتواند فرمان وصل را متوقف و بطور کامل کلید را قطع کند. بعضی از کلیدها توانایی وصل و قطع مجدد کلید بدون نیاز به شارژ دوباره کلید را دارند. دو سیکل تعریف شده براساس استاندارد IEC بشرح ذیل می‌باشند.

C0- 15sec-C0
and
O-0.3sec-Co-3 min-C0
C=Closing
O=Opening

زمان وصل مجدد ۰/۳ ثانیه فاصله زمانی جدا شدن کنتاکت در هنگام قطع تا هنگام تماس مجدد جفت کنتاکت در هنگام وصل می‌باشد.

مکانیسم قطع و وصل کلید به چهار گروه اصلی ذیل تقسیم می‌شوند:

♦ مکانیسم قطع و وصل با فنر (Spring operated Mechanism)

♦ مکانیسم قطع و وصل با سلونوئید- مغناطیس (Magentic Actuator)

یکی از عوامل محدودکننده تعداد قطع و وصل در کلید، مکانیسم عمل کننده آن می‌باشد، در ضمن اینکه بیش از ۵۰٪ بهای کلید را نیز تشکیل می‌دهد.

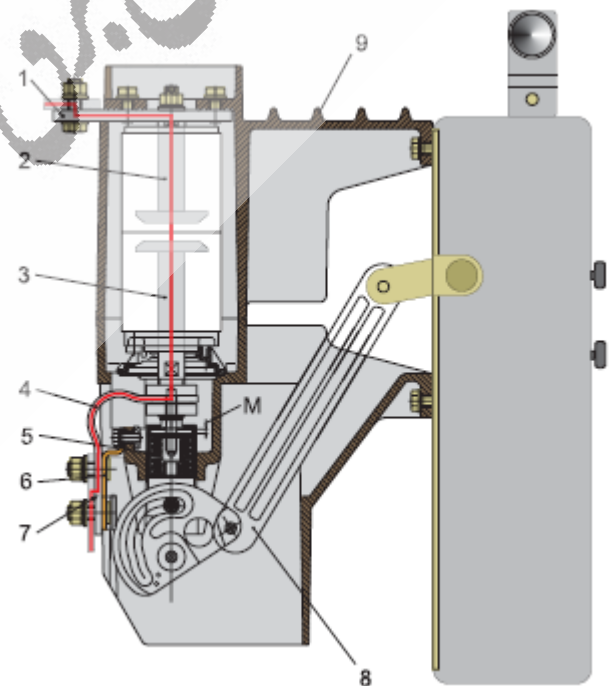
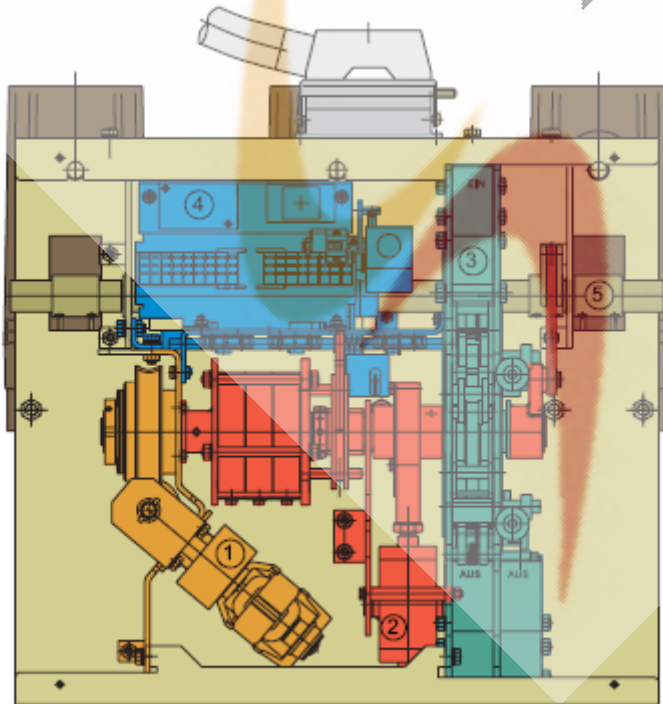
متداول‌ترین مکانیسم قطع و وصل برای کلیدهای فشار متوسط مکانیسم با شارژ فنر می‌باشد که برای قطع و وصل حداقل از یک فنر استفاده می‌شود. فنر مذکور بصورت دستی و یا با الکتروموتور شارژ می‌شوند. برای تغییر حالت کلید، انرژی ذخیره شده در فنر به یکباره تخلیه شده و مکانیسم عمل کننده را بحرکت در می‌آورد.

مکانیسم‌های کلاسیک بین ۵۰۰۰ و حداکثر تا ۲۰,۰۰۰ بار امکان قطع و وصل را دارند.

مکانیسم قطع و وصل در کلیدهای خلاء بدلیل جابجایی کمتر کنتاکت نیاز به انرژی به مراتب کمتر از کلیدهای روغنی و گازی دارد، در نتیجه حجم و وزن آن نیز کمتر خواهد بود (شکل ۲۱).

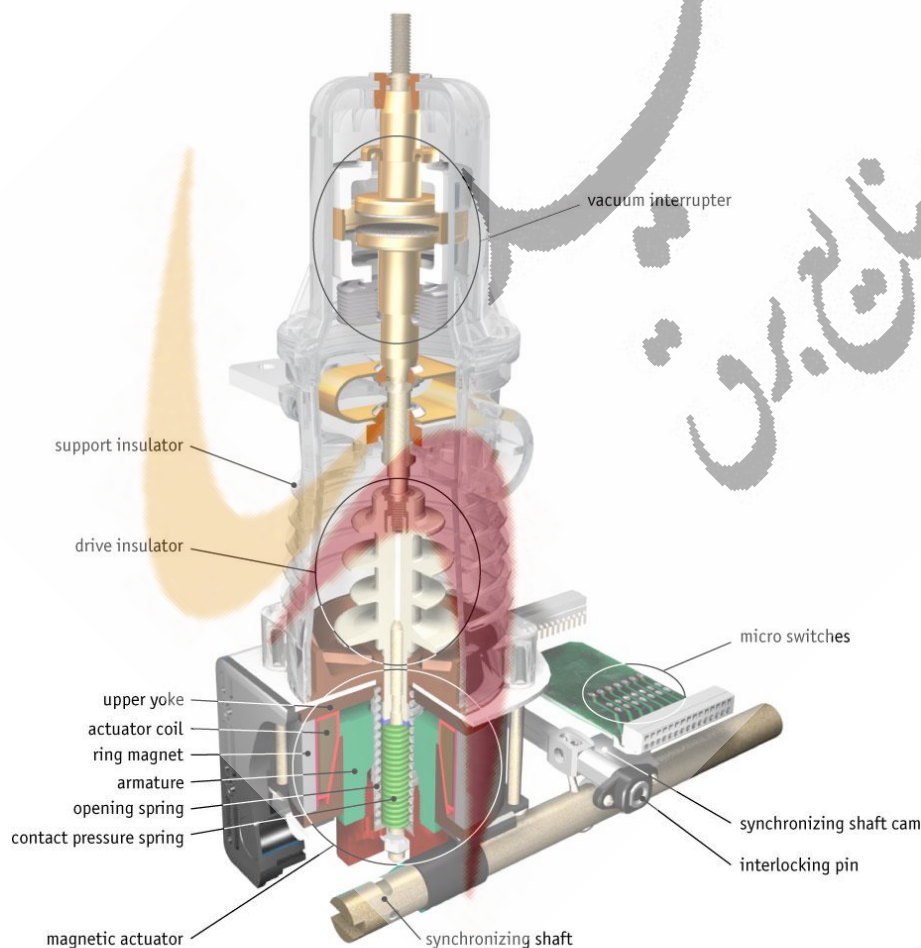


شکل ۲۱



مکانیسم قطع و وصل مغناطیسی (Electro Magnetic Actuator)

مدرن ترین روش برای قطع و وصل کلید های خلاء که نیاز به انرژی کم دارند می باشند. مکانیسم قطع و وصل با سلونوئید برای کلیدهای خلاء مدرن که نیاز به جابجایی خیلی کوچک کنتاکت و در ضمن نیروی کمی دارند استفاده می‌شوند. در روش فوق هر یک از پل‌های کلید دارای یک سلونوئید مستقل می‌باشند که هنگام تزریق جریان (بسته به جهت جریان) کنتاکت‌های کلید باز و بسته می‌شوند. برای همزمان قطع و وصل شدن سه پل کلید یک محور همزمان کننده بصورت مکانیکی وظیفه سنکرون کردن سه پل را بعهده خواهد داشت. در این روش بدلیل عدم نیاز به فنر و چرخ‌دنده و سایر قطعات مکانیکی، مکانیسم خیلی ساده و سبک و دارای طول عمر زیاد و بدون نیاز به تعمیر و نگهداری می‌باشند. این نوع مکانیسم حداقل ۳۰,۰۰۰ بار و حتی تا ۵۰,۰۰۰ بار امکان قطع و وصل کلید را دارند.



شکل ۲۲

Design concept of VCB with three monostable magnetic actuators

مقایسه دژنگتور خلاء با دژنگتور SF6

VCB (Vacuum Circuit Breaker) – GCB (Gas Insulated Circuit Breaker)

- در کلید های SF6 وضعیت گاز باید بازدید شوند ولی در کلید های خلاء نیازی به این کار نمی باشد.
- انرژی لازم برای قطع و وصل کلید در خلاء حدود ۲۰٪ کلید معادل SF6 میباشد در نتیجه وزن کلید خلاء بمراتب کمتر از کلید با فن آوری SF6 است.
- تفاوت ما هوی بزرگی در فیزیک دو فن آوری وجود دارد. بطور مثال ولتاژ جرقه در کلیدهای خلاء ده ها ولت میباشد در صورتیکه در کلید های SF6 صدها ولت است، در ضمن اینکه طول زمان جرقه هنگام قطع جریان اتصال کوتاه در کلید های خلاء بمراتب کوتاه تر (5-7ms) از کلید های SF6 (10-15ms) میباشد، و همچنین تعداد عملکرد کلید های خلاء به مراتب بیشتر از کلید های SF6 است.
- در حال حاضر GCB تا ولتاژ ۱۱۰۰ کیلو ولت با دی الکتریک SF6 در حال کار میباشد. گاز SF6 بعنوان گاز گلخانه ای دولت ها، سرمایه گذاران، مصرف کنندگان، تولید کنندگان و مردم را به تامل واداشته است تا برای حفظ محیط زیست شرکت های توزیع نیروی برق را وادار به مدیریت در جهت عدم استفاده از این گاز نمایند.
- موفقیت های بزرگ در تولید و عملکرد کلیدهای خلاء در شبکه های توزیع نیروی برق کارشناسان و طراحان را به تلاش واداشته است تا برای تولید کلید فشار قوی با ولتاژ بالاتر با تکنولوژی خلاء تحقیق و توسعه را گسترش دهند. امروزه کلید خلاء با ولتاژهای 72.5 کیلو ولت و 145 کیلو ولت بصورت تجاری تولید میشود.
- در آغاز سده ۲۱ تحقیقات برای تولید قطع کننده های خلاء فشار قوی برای جلوگیری استفاده از گاز SF6 انگیزه و محرک شدیدی برای تولید کلید خلاء فشار قوی شده است.
- کشورهای ژاپن و چین بیشترین تلاش را در تحقیقات فوق بکار بسته و گام های موثری در این راه بر داشته اند. تاکنون بیش از ۱۰/۰۰۰ دستگاه کلید فشار قوی 72.5 کیلو ولت در شبکه های ژاپن در حال کار می باشند.

نتیجه گیری

جدول خلاصه مقایسه فنی کلیدهای روغنی (OCB) و گازی (GCB) و خلاء (VCB)

ردیف	شرح	کلید روغنی	کلید گازی	کلید خلاء
۱	انرژی مورد نیاز قطع و وصل کلید	خیلی زیاد	زیاد	خیلی کم
۲	انرژی جرقه	خیلی زیاد	زیاد	خیلی کم
۳	خوردگی کنتاکت ها	خیلی زیاد	زیاد	خیلی کم
۴	ماده خاموش کننده جرقه	روغن	گاز SF6	ندارد
۵	رفتار در برابر قطع بارهای سلفی	جریان برشی زیاد	جریان برشی کم	جریان برشی خیلی کم
۶	تعداد دفعات قطع و وصل مکانیکی	حداکثر ۱۰۰۰ بار	۱۰,۰۰۰-۲۰۰۰ بار	۵۰,۰۰۰-۱۰,۰۰۰ بار
۷	تعداد دفعات قطع بار نامی	۱۰۰۰-۵۰۰ بار	۵۰۰۰-۲۰۰۰ بار	۵۰,۰۰۰-۱۰,۰۰۰ بار
۸	تعداد دفعات قطع جریان اتصال کوتاه نامی	۵-۴ بار	۲۵-۱۰ بار	۱۰۰-۵۰ بار
۹	قابلیت اطمینان	پایین	متوسط	خیلی زیاد
۱۰	هزینه و زمان تعمیرات	خیلی زیاد	خیلی زیاد	ناچیز
۱۱	آلودگی محیط زیست	دارد	دارد	ندارد

از جدول خلاصه مقایسه کلیدها و توضیحات متن موارد ذیل قابل استخراج است:

۱. بدلیل انرژی زیاد مورد نیاز برای قطع و وصل کلید روغنی و کلید گازی، حجم و وزن کلید به مراتب بیشتر و بزرگتر از کلید خلاء هستند بطوریکه وزن کلیدهای روغنی و گازی حدود ۴۰ درصد بیشتر از کلیدهای خلاء با مکانیسم قطع و وصل موتور - فنر (کلاسیک) می‌باشد؛ در نتیجه موارد خرابی و هزینه تعمیر و نگهداری آنها نیز به مراتب بیشتر از کلیدهای خلاء می‌باشند.
۲. انرژی جرقه در کلیدهای روغنی و گازی بیشتر از کلیدهای خلاء است. ولتاژ جرقه در کلیدهای گازی 150-200 ولت و در کلیدهای خلاء حدود 50-100 ولت هستند.
۳. براساس توضیح ردیف ۲ خوردگی کنتاکتها در کلیدهای خلاء بدلیل پایین بودن انرژی جرقه به مراتب کمتر از کلیدهای گازی و روغنی است.
- احتمال انفجار و آتش سوزی در کلیدهای روغنی در صورت ادامه یافتن جرقه بسیار زیاد بوده و همچنین خوردگی زیاد کنتاکتها باعث هزینه تعمیر و تعویض مکرر کنتاکتها در کلیدهای روغنی خواهند بود. در کلیدهای گازی نیز این خوردگی وجود دارد ولی به مراتب کمتر از کلیدهای روغنی است ولی به هر حال انرژی زیاد جرقه باعث خوردگی کنتاکت و تجزیه و ترکیب با گاز SF6 درون محفظه پل‌ها می‌شود که از حجم گاز مفید کاسته و در ضمن باعث ایجاد ترکیب ناخواسته شمش و مضر برای محیط زیست می‌شود.
۴. ماده خاموش کننده کلیدهای روغنی در صورت نشستی بازاء هر قطره روغنی نشستی باعث آلودگی حداقل یک متر مربع خاک می‌شود ولی به هر صورت در پایان عمر کلید روغنی امکان خارج کردن آن از مدار بهره‌برداری و نابود کردن آن به مراتب آسان‌تر و کم هزینه تر از کلیدهای عایق SF6 است.
- کلیدهای گازی SF6 بجز ایجاد آلودگی در هنگام نشستی گاز مشکل کاهش فشار گاز در محفظه قطع کننده را در هنگام کاهش شدید درجه حرارت نیز دارد
۵. کلید روغنی در هنگام قطع بارهای سلفی باعث ایجاد جریان برشی (Chopping current) خیلی زیاد شده که در نتیجه افزایش ولتاژ زیاد در دو سر کنتاکتها و خوردگی کنتاکتها و احتمال انفجار و آتش سوزی از مشکلاتی است که در ذات کلیدهای روغنی است. به این دلیل کلیدهای روغنی به هیچ عنوان برای این منظور مناسب نیستند. در کلیدهای گازی این جریان شدت کمتر بوده و برای قطع بارهای سلفی مشکلی ندارند ولی در صورتیکه از این کلید برای قطع و وصل مکرر و متناوب مصرف کننده‌هایی مانند کوره‌های الکتریکی استفاده شود به هیچ عنوان قابل اعتماد و اطمینان نمی‌باشد. مهمترین دلیل آن نیاز به زمان لازم برای احیای مجدد گاز

SF6 می‌باشد. این مشکل در کلیدهای خلاء به هیچ وجه وجود ندارد، دلیل آن نیز جریان برشی بسیار کم (۴ تا ۵ آمپر) و اضافه ولتاژ ناچیز در هنگام قطع کلید و همچنین احیای سریع دی الکتریک محیط خلاء می باشد.

۶. مکانیسم‌های سنگین کلاسیک موتور - فنر کلیدهای روغنی و گازی توانایی تعداد زیاد عملکرد قطع و وصل را ندارد، علاوه بر آن بایستی به طور دائم بازدید و سرویس و نگهداری شوند در غیر این صورت اطمینان برای عملکرد صحیح آن در موقع مقتضی کاهش می‌یابد. ولی در کلیدهای خلاء به دلیل نیاز به انرژی کم در هنگام قطع و وصل، مکانیزم ساده تر و سبک تر می باشد بطوریکه کلیدهای خلاء مجهز به مکانیزم کلاسیک تا تعداد ۲۰,۰۰۰ قطع و وصل فقط به روغن کاری و سرویس و ساده‌ای نیاز دارند.

در کلیدهای خلاء با مکانیزم Magnetic Actuator بدلیل تعداد انگشت شمار قطعات متحرک و سادگی سیستم مشکل تعمیر و نگهداری منتفی است، بطوریکه در بعضی از انواع آن تا ۵۰,۰۰۰ بار قطع و وصل نیاز به هیچ‌گونه سرویس و نگهداری و بازدیدی نمی‌باشد.
(Maintanace Free)

۷. کلیدهای روغنی به دلیل تجزیه روغن و کربونیزه شدن آن توانایی زیادی در قطع و وصل بار نامی را ندارند. در کلیدهای با گاز SF6 نیز بدلیل تجزیه و ترکیب‌های متفاوت و کاهش گاز درون پل‌ها و ترکیب آن با اجزاء و قطعات پل‌ها تعداد دفعات قطع در بار نامی آن به مراتب کمتر از کلیدهای خلاء می‌باشد.

۸. تعداد دفعات جریان اتصال کوتاه نیز به مانند ردیف بالا در کلید روغنی بسیار ناچیز بوده و در کلیدهای گازی نیز به مراتب کمتر از کلید خلاء می‌باشد.

۹. در عمل یکی از مسائل مهم در انتخاب کلید قابلیت اطمینان آن است. قابلیت اطمینان با فاکتورهای به نام میانگین زمان خرابی یا متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی تعریف می‌شود. در کلیدهای روغنی بدلیل وجود روغن و تعداد قطعات زیاد در مکانیزم قطع و وصل و در کلیدهای گازی نیز وجود گاز SF6، و احتمال نشتی و همچنین تعداد قطعات به مراتب بیشتر از کلید خلاء، فاکتور تعریف شده در بالا برای هر دو تیپ کلید روغنی و گازی بسیار بیشتر از کلید خلاء می‌باشد. میانگین عمر یک کپسول خلاء تولید شده توسط یک سازنده خوب بیش از ۲۰۰۰ سال برآورد شده است. در ضمن اینکه استفاده از ماده عایقی واسطه ای نیز مانند روغن و گاز SF6 در کلیدهای خلاء منتفی است بدلائل فوق کلید خلاء، عنوان کلیدی با قاطعیت اعتماد و اطمینان بالا برای شرایط متفاوت تعریف شده است.

۱۰. به دلایل مذکور هزینه تعمیر و نگهداری در کلیدهای روغنی و گازی به مراتب و با فاصله زیاد، از کلیدهای خلاء بیشتر می‌باشند. کلید خلاء با مکانیزم قطع و وصل Magnetic Actuator بعنوان کلیدهای بدون تعمیر و نگهداری در صنعت مطرح هستند.

۱۱. همانطور که در ردیف ۴ نیز عنوان شد هر قطره روغن در صورت نشستی باعث آلودگی یک متر مربع خاک می‌شود در ضمن اینکه کلیدهای روغنی امکان انفجار و آتش‌سوزی را نیز دارند. کلیدهای گازی SF6 در سه مرحله باعث آلودگی و ایجاد مشکل برای محیط زیست می‌شوند.

۱. در هنگام تولید و تزریق گاز به محفظه قطع کننده کلید

۲. در هنگام بهره‌برداری احتمال نشت گاز SF6 به محیط اطراف.

۳. نگران کننده ترین بخش مربوط به پایان عمر کلید می باشد که بایستی گاز SF6 و مواد سمی تولید شده در پل‌های کلید خارج و نابود شود. در این مرحله نیاز به تجهیزات خاص و گران قیمت و متخصصین آموزش دیده دارد که در نتیجه باعث تحمیل هزینه های سنگین و مشکلات و نگرانی‌های متعدد خواهد شد.

هر کلید گازی SF6 فشار متوسط محتوی حدود ۲/۵ کیلوگرم گاز SF6 است که با برآورد تقریبی مصرف حدود ۵۰۰۰ دستگاه کلید گازی فشار متوسط در ایران، گاز مصرفی (با احتساب نشت و تعمیرات) برای این مورد حدود ۱۵ تن در سال می‌باشد.

آلودگی و صدمات ناشی از استفاده هر کیلوگرم گاز SF6 معادل تولید ۲۰ تن CO2 می‌باشد. با در نظر گرفتن ارقام فوق و در صورت حذف گاز SF6 از چرخه استفاده برای کلیدهای فشار متوسط کمک شایانی در جلوگیری از افزایش گرمای کره زمین و آلودگی محیط زیست خواهیم نمود.

نتیجه منطقی اینکه کلید خلاء بهترین و مناسب‌ترین جایگزین کلیدهای روغنی و گازی در سطوح فشار متوسط می‌باشد.