

محقق: حسین باقری

استاد: آقای دکتر رضانی گل

عنوان پروژه: شکست الکتریکی عایق های گازی

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۴	فصل اول: مقدمه ای بر مسائل عایق های الکتریکی و فشار قوی.....
۴	۱-۱- مقدمه.....
۵	۱-۲- ویژگی الکتریکی و خواص فیزیکی و شیمیایی مواد عایقی.....
6	۱-۲-۱- رفتار مکانیکی ماده عایقی.....
۶	۱-۲-۲- رفتار گرمایی ماده عایقی.....
7	۱-۲-۳- رفتار شیمیایی.....
۷	۱-۲-۴- خصوصیات الکتریکی.....
۷	۱-۲-۵- عوامل اقتصادی.....
9	فصل دوم: شکست الکتریکی در عایقهای گازی.....
9	۲-۱- مقدمه.....
14	۲-۲- حرکت ذرات باردار.....
14	۲-۲-۱- حرکت ذرات باردار در خلاء.....
16	۲-۲-۲- یونیزاسیون و تحریک.....
21	۳-۲-۲- راه های مختلف یونیزه شدن گاز.....
21	۲-۲-۳-۱- یونیزاسیون حرارتی.....
24	۲-۲-۳-۲- یونیزاسیون در اثر نور.....

- 26.....۳-۳-۲-۲ یونیزاسیون در اثر برخورد یا ضربه.....
- 29.....۲-۲-۳-۴ خروج الکترون از هادی.....
- 31.....۳-۵-۲-۲ خروج الکترون از هادی به کمک میدان الکتریکی.....
- 32.....۳-۶-۲-۲ خروج الکترون از هادی در اثر برخورد یون های سریع به هادی.....
- 33.....۳-۷-۲-۲ یونیزاسیون ملکول گاز در اثر برخورد با یون.....
- 34.....۲-۳-۲-۳ شکل های مختلف تخلیه الکتریکی در گازها.....
- 34.....۲-۳-۱-۲ تخلیه روشن.....
- 41.....۲-۳-۲-۲ تخلیه نسلی.....
- 43.....۳-۲-۳-۳ میدانهای غیر یکنواخت-تخلیه جزئی.....
- 46.....۲-۳-۴-۲ اثر بارهای فضایی.....
- 46.....۵-۲-۳-۳ تخلیه جزئی در ولتاژ متناوب.....
- 47.....۶-۲-۳-۳ تخلیه جزئی در ولتاژ ضربه و ولتاژ کلید زنی.....
- 49.....۲-۳-۷-۲ تخلیه لیدر.....
- 55.....۲-۳-۸-۲ تخلیه قوسی.....
- 59.....۲-۳-۹-۲ تخلیه سطحی.....
- 66.....۲-۳-۱۰-۲ تخلیه خزنده.....
- 69.....۲-۳-۱۱-۲ برق آسمان(صاعقه).....
- 70.....۲-۳-۱۱-۱-۲ شکل گرفتن صاعقه.....
- 73.....۲-۴-۲-۲ تاخیر در شکست الکتریکی.....
- 76.....۱-۲-۴-۱ احتمال شکست در ولتاژهای ضربه.....
- 77.....۲-۲-۴-۲ اثر ناهمواری سطح الکترودها در ولتاژ شکست.....
- 79.....۲-۵-۲-۲ ولتاژ شکست در مخلوط گازها.....

فصل سوم:مقاله.....81

- 81.....۳-۱-۳ استقامت الکتریکی گازهای مختلف در GIS.....
- 87... ۳-۲-۳ تأثیر سطوح ناهموار و پوشش روی ولتاژ شکست الکتریکی ضربه در SF₆.....

فصل اول

مقدمه ای بر مسائل عایق های الکتریکی

۱-۱- مقدمه

در شرایطی که از ولتاژ فشار قوی استفاده می شود طراحی دقیق سیستم عایقی از اهمیت زیادی برخوردار است . به همین منظور از عایق های مختلفی از قبیل گازها ، جامدات و مایعات و ایجاد خلاء و یا ترکیبی از آنها استفاده می شود . برای صرفه جویی و اطمینان از انجام موفق کار، باید دانش مربوط به عوامل ضد عایق و نیز عواملی که باعث کاهش ولتاژ شکست و از بین رفتن عایق می شوند ، در طراحی مورد توجه قرارداد . وظیفه عایق ها ، ایزولاسیون (جداسازی الکتریکی) ولتاژهای فشار قوی نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به زمین می باشد تا هم ولتاژ و جریان فشارقوی در مسیر مربوط به خود قرارگیرند و هم از بروز خسارت و ضرر و زیان به افراد و تجهیزات جلوگیری شود . عایق ایده آل (طبق تعریف) ، یک نارسانای جریان الکتریسیته است که هیچ جریان الکتریکی را از خود عبور نمی دهد ولی عملاً هیچ ماده ای را در طبیعت نمی توان یافت که ویژگی های یک عایق ایده آل را داشته باشد . اما برای استفاده های کاربردی ، یک عایق ، ماده ای است که عبور جریان از خود را در حد بسیار کم و مطلوب محدود نماید به حدی که بتوان از آن

صرف نظر کرد . به عبارت دیگر ، در ولتاژهای عادی ، مقاومت الکتریکی عایق خیلی زیاد است . اگر در ولتاژهای بسیار بالا از عایق ، جریان قابل ملاحظه ای عبور کند در حقیقت ، عایق دیگر خاصیت عایقی خود را از دست داده است و دچار شکست الکتریکی می شود ؛ به عبارت دیگر ، عایق تبدیل به هادی می شود . قبل از بروز شکست در عایق ها ، عایق شبیه به خازن است که دو الکتروود آن در دو طرف ، صفحات خازن هستند و با اعمال ولتاژ به این خازن ، شارژ می شود . پس از شکست الکتریکی عایق ، این خازن در واقع دشارژ و تخلیه می گردد. به همین دلیل پدیده شکست الکتریکی عایق ها را، تخلیه الکتریکی نیز می گویند. استقامت الکتریکی عایق ها را برحسب بالاترین شدت میدان الکتریکی قابل تحمل ، قبل از تخلیه الکتریکی می سنجند و معمولاً آن را بر حسب KV/cm یا KV/mm بیان می شود . بررسی عملکرد عایق ها نیاز به بررسی های علمی (با استفاده از نظریه های فیزیکی و روابط ریاضی) و همچنین بررسی های تجربی (از طریق آزمایش ها و اندازه گیری های لازم) ، روی عایق ها دارد و پیشرفت های حاصل در زمینه مکانیزم تخلیه الکتریکی عایق ها همواره با این دو مورد همگام بوده است.

۲-۱- ویژگی های الکتریکی و خواص فیزیکی و شیمیایی مواد عایقی :

کاربرد عایق ها در ساخت ژنراتورها ، موتورها ، ترانسفورماتورها ، برقگیرها ، خازنها ، کابل ها ، کلیدهای فشار قوی ، و سایر تجهیزات فشار قوی بسیار گسترده است. با توجه به نوع کاربرد و شرایط محیطی که عایق در آن قرار می گیرد ، علاوه بر خاصیت الکتریکی ، سایر

خواص فیزیکی و شیمیایی آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است . ویژگیهای یک ماده عایقی را برای استفاده های بخصوص می توان به صورت زیر اولویت بندی نمود :

۱. رفتار مکانیکی

۲. رفتار گرمایی

۳. پارامترهای شیمیایی

۴. خصوصیت های الکتریکی

۵. عوامل اقتصادی

۱-۲-۱- رفتار مکانیکی ماده عایقی

استحکام ماده عایقی ، نیاز اصلی و اساسی می باشد . ضریب کشسانی برای یک ساختمان سخت ، باید بالا و برای یک سیستم عایقی باید پایین باشد . به عنوان مثال، جنس صفحه آستر شیار ماشین های الکتریکی باید به اندازه کافی سفت باشد تا بتواند در مقابل صفحه داخلی شکاف منبسط شده ، بدون شکستن تا بخورد و نیز باید لبه شکاف در مقابل ورقه ورقه شدن ، ارتعاش ، تأثیر شیمیایی روغن جلای به کار رفته ، اثر افزایش دما ، جذب رطوبت و غیره مقاومت کند برآمدگی سیم پیچ باید در قبال فرسودگی ، مقاومت زیادی کند و یا ضریب اصطکاک کمی داشته باشد . جلای عایقی باید کاملاً به سیم ها چسبیده باشد و الاستیته لازم برای انبساط را داشته باشد تا بر اثر تغییر دما ، مس ها بتواند به هم برسند . بنابراین ، ملزومات مکانیکی بسته به نوع کاربرد برای یک عایق ، متفاوت اند .

۱-۲-۲- رفتارهای گرمایی ماده عایقی

در به کارگیری بسیاری از عایق ها به نوعی از مواد عایقی نیاز است که در دوره کوتاه اضافه با و در دماهای بسیار بالا منبسط نگردند . معمولاً ویژگی های فیزیکی مواد با افزایش دما، تغییر می کنند . نیروی کششی در عایق ها نباید به نقطه ای برسد که باعث تغییر شکل و فرسودگی بیش از اندازه آن شود . همچنین یک ماده عایقی از نوع ترمو پلاستیک نباید دمای عملکرد آن (حتی برای یک زمان کوتاه) به دمای نقطه ذوب برسد . وقتی مواد عایقی برای مدت طولانی تری در معرض حرارت قرار می گیرند ، ترکیب شیمیایی آنها تغییر می کند . این تغییر شیمیایی باعث تغییر ویژگیهای فیزیکی از حالت مجاز به حالت غیر مجاز می شود و در نتیجه کهنگی و فرسودگی ماده را به همراه خواهد داشت . بنابراین ، می توان گفت که مدت زمان عملکرد عایق با دمای مطلق آن عایق ، نسبت عکس دارد که نمودار آن برای اغلب عایق های یک نمودار تقریباً خطی خواهد بود .

۳-۲-۱- رفتار شیمیایی

رفتار شیمیایی به تأثیر محیط روی ماده عایقی بستگی دارد . معمولاً این محیط همان هوای حامل رطوبت است . اکسیژن موجود در هوا قادر است عایق را به گونه ای اکسید کند که به شکل زیان آوری ، ویژگی های فیزیکی آن از بین رود . همچنین می تواند باعث تخریب بعضی عایق ها شود . به علاوه اثرات تخریبی روی سطح عایق باعث می شود که مقاومت عایقی پایین بیاید .

۴-۲-۱- خصوصیات الکتریکی

از مهمترین خصوصیت های هر عایقی ، استقامت الکتریکی آن است . استقامت الکتریکی عایق ها بر حسب حداکثر شدت میدان الکتریکی قابل تحمل آنها سنجیده می شود و

معمولاً برحسب KV/cm بیان می گردد. ولتاژ شکست یک قطعه عایق ، به ضخامت آن بستگی دارد ؛ لیکن میدان شکست عایق تقریباً مستقل از ضخامت آن است و به جنس عایق بستگی دارد .

۵-۲-۱-عوامل اقتصادی

یکی از عوامل مؤثر در طراحی عایق ها ، طرح یک سیستم عایقی است ، به گونه ای که بهترین عملکرد را به ازای قیمت مناسب داشته باشد . البته این موضوع به معنای تلاش برای کم کردن قیمت ها در واحد وزن ، برای سیستم های عایق کاری و تجهیزات آن نمی باشد . اگر با صرف هزینه بیشتری برای یک یا چند قطعه در سیستم ، بتوان ابعاد سیستم را کاهش داد ، در نتیجه عاقلانه تر است که از عایق های گران تر ، بیشتر استفاده شود . جملگی این مسائل باید پیرامون قیمت واحد وزن ، تولید ، مصرف و تغییر طراحی برای انطباق در دماهای بالاتر مورد بررسی قرار گیرد .

فصل دوم

شکست الکتریکی در عایق‌های گازی

۱-۲- مقدمه

در مبحث عایق‌های فشار قوی ، گازها دارای اهمیت بالا و کاربردهای فراوانی در صنعت برق می باشند از جمله این کاربردها می توان استفاده از آنها در کلیدهای فشار قوی نام برد . از مهمترین عایق‌های گازی می توان به هوا ، ازت (N_2) ، دی اکسید کربن (CO_2) ، هیدروژن (H_2) و هگزا فلئور سولفور (SF_6) نام برد . از گاز دی اکسید کربن برای جلوگیری از اکسیداسیون استفاده می شود. همچنین هیدروژن دارای گرمای ویژه ۱۵ برابر هوا و گاز SF_6 دارای استقامت عایقی ۲ تا ۳ برابرهاست . گاز SF_6 از لحاظ حرارتی بسیار پایدار و بدون اثر سوء روی فلزات است . از هیدروژن به دلیل خاصیت خوب انتقال گرمایی آن ، معمولاً در خنک کردن ژنراتورها استفاده می کنند .

ایجاد جریان الکتریکی در داخل گازها نیاز به وجود ذرات باردار (یعنی الکترون و یون) دارد . تحت تأثیر یک میدان الکتریکی ، ذرات باردار در راستای میدان الکتریکی حرکت

کرده یک جریان را به وجود می آورند . در صورتی که یک گاز از کلیه عواملی که منجر به ایجاد ذرات باردار در آن می شود دور نگاه داشته شود ، در آن صورت هیچ گونه جریان الکتریکی در آن به وجود نمی آید . این موضوع را می توان در خلاء مطلق (که یک عایق مطلق است) ، مشاهده نمود . البته ایجاد خلاء مطلق امکان پذیر نیست ؛ به عبارت دیگر ، عایق مطلق وجود نخواهد داشت . از طرفی تعداد ذرات باردار داخل یک گاز در شرایط عادی خیلی کم است ؛ بنابراین ، گازها ، عایق های خوبی هستند و جریان های الکتریکی در آنها بسیار کم و در حد مطلوبی است .

شکست یا فروپاشی عایق به معنی از دست رفتن خاصیت عایقی آن است . یک قطعه عایق را بین دو الکترود قرار می دهیم . در صورتی که این دو الکترود را به یک منبع ولتاژ وصل نماییم و مقدار ولتاژ زیاد نباشد ، بدیهی است که از عایق جریان قابل ملاحظه ای عبور نخواهد کرد . لکن اگر ولتاژ را تدریجاً زیاد نماییم ، لحظه ای فرامی رسد که عایق دیگر تحمل آن ولتاژ زیاد را نمی آورد و از عایق جریان بزرگی عبور می کند . در حقیقت عایق تبدیل به هادی شده است . از دست رفتن خاصیت عایقی و تبدیل شدن عایق به هادی را ، که به دلیل ولتاژ یا شدت میدان الکتریکی بیش از حد رخ می دهد شکست الکتریکی عایق می نامند .

قبل از بروز شکست الکتریکی ، خازنی که از ترکیب دو الکترود و عایق بین آنها به وجود آمده است ، توسط منبع ولتاژ بار می شود و پس از شکست الکتریکی عایق ، در حقیقت این خازن تخلیه می گردد . به همین دلیل است که به پدیده شکست الکتریکی عایق ،

تخلیه الکتریکی نیز می گویند . بدیهی است که پس از شکست الکتریکی ، ولتاژ بین دو الکترود کم خواهد شد .

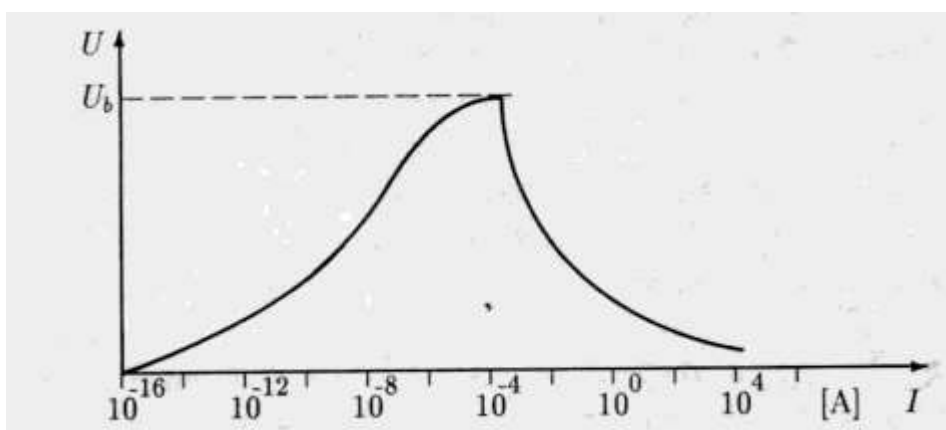
عایق های الکتریکی از قابلیت هدایت الکتریکی بسیار کمی برخوردارند . برای مثال قابلیت هدایت الکتریکی عایق ها 10^{-10} یا 10^{-16} برابر کوچکتر از قابلیت هدایت الکتریکی هادیها می باشد . در شکل زیر جریان عبوری از یک عایق بر حسب ولتاژ و تغییرات جریان پس از شکست عایق به صورت کلی نمایش داده شده است . تغییرات ولتاژ بر حسب جریان پس از شکست در عایقهای مختلف ، متفاوت است . ولی در مجموع قابلیت هدایت الکتریکی عایق پس از شکست افزایش می یابد .

شکست الکتریکی در یک محدوده کوچک از عایق و به صورت ناگهانی یا پهنتر بگوییم، خیلی سریع انجام می شود . در عایقهای جامد شکست الکتریکی باعث سوختن و سوراخ شدن عایق می گردد. به طوری که پس از کاهش ولتاژ و قطع جریان الکتریکی ، این عایق دیگر خاصیت عایقی ندارد و چنانچه بار دیگر ولتاژ کمی بر روی آن قرار داده شود جریان از آن عبور خواهد نمود . یعنی عایق تبدیل به هادی شده است . در عایق های گازی و مایع ، پس از قطع جریان الکتریکی و پس از گذشت مدتی ، عایق بار دیگر خاصیت عایقی خود را باز می یابد . در عایق های مایع ، ماده عایق بر اثر تخلیه الکتریکی تجزیه می شود. بر اثر این تجزیه از جمله گاز به وجود می آید . بر اثر تکرار این عمل عایق کیفیت خود را از دست می دهد .

در شکست عایق ، قسمت زیادی از انرژی الکتریکی در محل شکست به دیگر انواع انرژی تبدیل می گردد و به همین دلیل است که عایقهای جامد در این محل می سوزند و از بین

می روند . در عایقهای مایع نیز عایق سوخته و مقدار زیادی گاز تولید می شود . در عایقهای گازی ممکن است گازهای جدیدی به وجود بیایند.

پس از شروع تخلیه ، دیگر نمی توان از ادامه آن جلوگیری کرد ؛ مگر آنکه انرژی مدار از بین برود و یا مدار توسط یک کلید قطع شود. قطع جریان توسط کلید ، خود با شرایط خاصی انجام می شود و احتیاج به زمان دارد . لذا مانع شدن از شکست ، همزمان با شروع آن ، غیر ممکن می باشد . به همین دلیل است که می گوییم شکست الکتریکی به صورت ناگهانی انجام می شود .



شکل (۱)-ولتاژ شکست و تغییر کلی جریان بر حسب ولتاژ در یک عایق الکتریکی پس از شکست

میزان تحمل عایق را در یک میدان یکنواخت ، می توان با تقسیم کردن ولتاژ بر ضخامت عایق بدست آورد . استقامت الکتریکی یکی از خواص مهم عایق ها به شمار می رود که بر حسب KV/cm یا KV/mm و مانند آن سنجیده می شود و عبارت است از حداکثر شدت میدان الکتریکی که یک عایق می تواند تحمل نماید . استقامت الکتریکی عایق ، گذشته از جنس عایق به بسیاری از عوامل دیگر ، از جمله ضخامت عایق بستگی دارد .

برای تعیین استقامت الکتریکی عایقها از دستورالعمل های معینی پیروی می شود که در آن شکل و ابعاد الکتروود ها و دیگر عواملی که در تعیین استقامت الکتریکی اهمیت دارند ، رعایت شده است . این دستورالعمل ها در استانداردها تعیین و ضبط می گردند . به طوری که ذکر استقامت الکتریکی یک عایق همراه با ذکر استاندارد می باشد که استقامت الکتریکی بر طبق آن اندازه گیری شده است .

از جمله عواملی که در استقامت الکتریکی عایق خصوصاً عایق های جامد و مایع نقش عمده ای دارند وجود ناخالصی در این مواد می باشد عایق هایی که برای مصارف صنعتی تولید میشوند ، علی رغم مراقبت زیادی که به عمل می آید ، باز دارای ناخالصی هستند و استقامت الکتریکی این مواد خیلی زیاد نیست . در آزمایشگاه می توان با دقت زیاد مواد عایقی با ابعاد کوچک (مثلاً با ضخامت چند دهم میلیمتر) تهیه نمود که کاملاً خالص باشند . این نوع مواد عایق ، استقامت الکتریکی بسیار زیادی خواهد داشت که به حدود چند هزار ولتاژ بر میلیمتر می رسد ، ولی اگر ابعاد این مواد بزرگ شود ، اجباراً در آن ناخالصی و غیر یکنواختی به وجود خواهد آمد ، لذا باید بین استقامت الکتریکی مواد عایق در موارد صنعتی و استقامت الکتریکی نمونه های کوچک مواد که در آزمایشگاه تهیه می شوند، تفاوت قائل شد ، استانداردها برای تعیین مشخصات مواد مورد مصرف در صنعت تهیه می شوند .

ناخالصی در مواد عایق معمولاً اتفاقی است و از آن شناخت لازم در دست نمی باشد. در حالی که برای مطالعه علمی یک پدیده می بایست شناخت کافی از عوامل موثر در دست باشد . لذا مطالعه شکست الکتریکی در مواد عایقی گاهی منجر به ذکر عوامل موثر در

شکست و ارائه احتمال شکست که خود نتیجه آمار بدست آمده از آزمایش است ، می گردد . در مورد هر ماده عایق تولید شده لازم است آزمایش های مختلف کنترل کیفیت انجام گیرد و چه بسا کیفیت تولید هر بار تغییر نماید .

تولید کننده مواد عایقی زمانی می تواند کیفیت تولید مناسب داشته باشد که از کیفیت مواد مصرفی مطمئن باشد . همچنین سازنده تجهیزات الکتریکی باید مواد مصرفی خود را کنترل نماید تا بتواند تولید خوبی داشته باشد . کنترل کیفیت تولید ، برای سازنده تجهیزات الکتریکی نیز تنها راه اطمینان از فرآورده او خواهد بود. لذا برای هر فرآورده ، حداقل دو بار کنترل کیفیت انجام می گیرد. اهمیت آزمایشگاه عایق هاو فشار قوی برای تولید کننده و مصرف کننده مواد عایق از این مطلب روشن می گردد .

عایقهای گازی دارای ناخالصی کمتری هستند لذا بر روی آنها مطالعات و آزمایشهای زیادی انجام گرفته و شناخت بهتری از پدیده شکست در آنها وجود دارد. به عبارت دیگر در گازها امکان تکرار آزمایش بدون دخالت اثر ناخالصی های ناشناخته وجود دارد.

۲-۲- حرکت ذرات باردار

ذرات باردار در گازها عبارت از الکترونها و یونها هستند . یون هنگامی به وجود می آید که یک مولکول یا یک اتم یک یا چند الکترون از دست بدهد یا کسب نماید . لذا یونها همیشه تعدادی الکترون کم یا تعدادی الکترون زیاد دارند و بار یک یون ، یک یا چند برابر بار الکتریکی یک الکترون می باشد بارالکتریکی الکترون برابر است با:

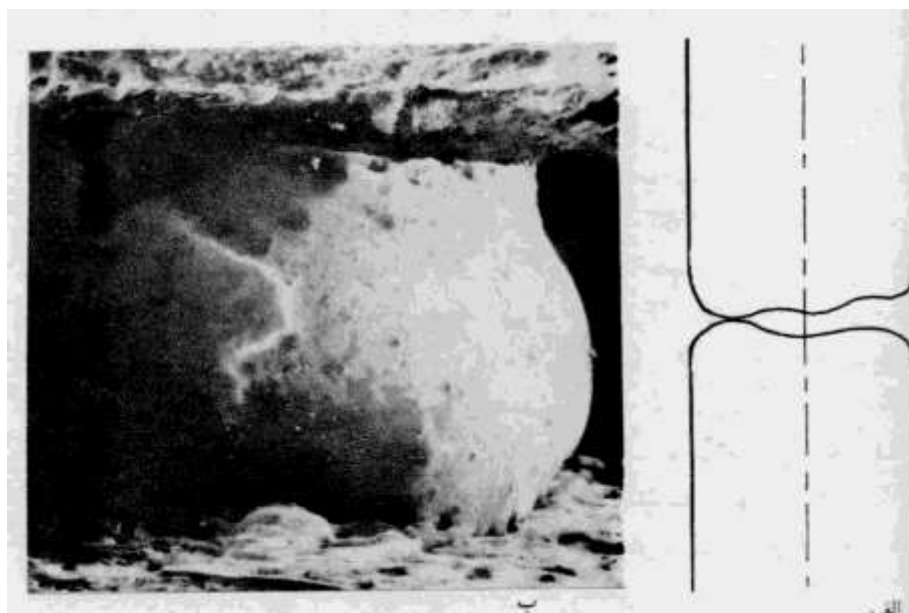
$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ As}$$

واحد بار الکتریکی آمپر بر ثانیه (As) و یا همان کولن می باشد . جرم یون برابر جرم مولکول یا اتمی است که از آن الکترون کم یا بر آن الکترون اضافه شده باشد. جرم الکترون در مقابل جرم مولکول بسیار کوچک است .

۱-۲-۲- حرکت ذرات باردار در خلاء

اگر فشار گاز در نتیجه تعداد مولکولها یا اتم های گاز در یک ظرف بسیار کم باشد به طوری که تعداد بسیار کمی از یونها یا الکترون ها در ابعاد محدود ظرف به مولکولهای ظرف برخورد کنند ، می توان از خلاء صحبت کرد . در چنین محیطی و در میدان الکتریکی ، ذرات باردار با شتابی متناسب با شدت میدان الکتریکی حرکت می نمایند . در این حالت البته ذرات باردار بایستی از الکترونها خارج شوند. سرعت ذرات باردار پس از خروج از الکترونها در میدان الکتریکی حرکتی شتابدار و طبعاً متغیر بوده و معمولاً افزایش می یابد تا هنگامی که به ذره باردار دیگر و یا به جداره ظرف برخورد کنند .

در خلاء یون هنگامی به وجود می آید که الکترونها به صورت بخار درآیند . این مسئله برای کلیدهای فشار قوی که در خلاء کار می کنند ، پیش می آید . لحظه ای که دو کنتاکت کلید از یکدیگر جدا می شوند ، در سطح کوچکی با یکدیگر در تماس می باشند و جریان از این سطح کوچک عبور مینمایند و باعث ذوب و تبخیر الکترونها می شود. این بخار بر روی سطح جداره ها می نشیند . برای نشان دادن یک سطح نازک از فلز بروی یک ورقه مانند شیشه و امثال آن نیز می توان فلز را در خلاء مثلاً با قوس الکتریکی به صورت بخار در آورد . بدیهی است ایجاد یون در خلاء همراه با خورده شدن الکترونها می باشد .



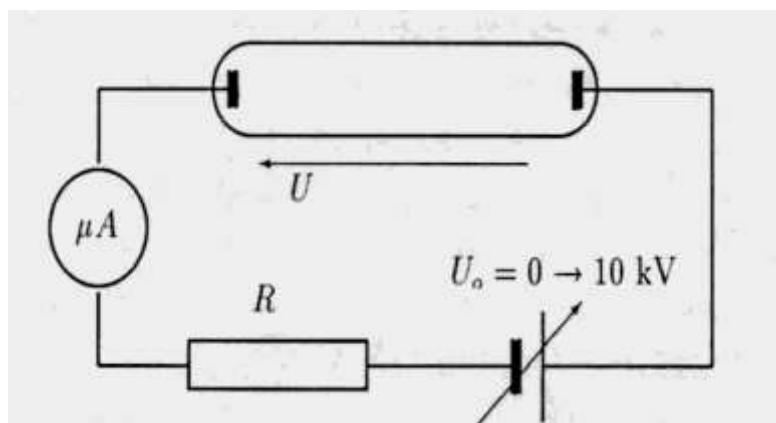
شکل (۲) - (الف) دو کنتاکت کلید در لحظه جد شدن و (ب) ذوب شدن کنتاکت ها

ولی الکترون را می توان از سطح کاتد خارج نمود و وارد خلاء کرد بدون آنکه از جرم کاتد کاسته شود . اگر الکترون بین ۸ هزار تا ۱۲۴ هزار الکترون ولت انرژی کسب نماید ، در برخورد با آن اشعه ایکس X تولید می کند . برای روشن شدن صفحه اسیلوسکوپ یا صفحه تلویزیون ، الکترونها قبل از برخورد به این صفحه با ۲۵ هزار ولت پتانسیل شتاب می گیرند . در آزمایشگاه های تحقیقاتی به الکترون با ولتاژی در حدود ۲۵ میلیون ولت شتاب می دهند . در شتاب دهنده های چند پله ای که به شکل حلقه می باشند ، الکترون ها را به کمک میدان مغناطیسی در یک مدار دایره ای قرارداده و با چندین بار عبور از میدان الکتریکی به الکترون انرژی در حدود چند ده گیگا الکترون ولت می دهند .

۲-۲-۲- یونیزاسیون و تحریک

آزمایش : در یک لوله شیشه ای که در داخل آن هوا با فشار کم (در حدود ۱۰ میلیمتر جیوه) وجود دارد دو الکتروود قرار می دهیم . این دو الکتروود مطابق شکل (۳) به

یک منبع ولتاژ قابل تنظیم وصل کرده ولتاژ منبع را تدریجاً بالا می بریم و تغییرات جریان (I) و ولتاژ بین دو الکترود (V) را ثبت و در یک منحنی رسم می نماییم.



شکل (۳) - مدار آزمایش برای نشان دادن عبور جریان از گاز

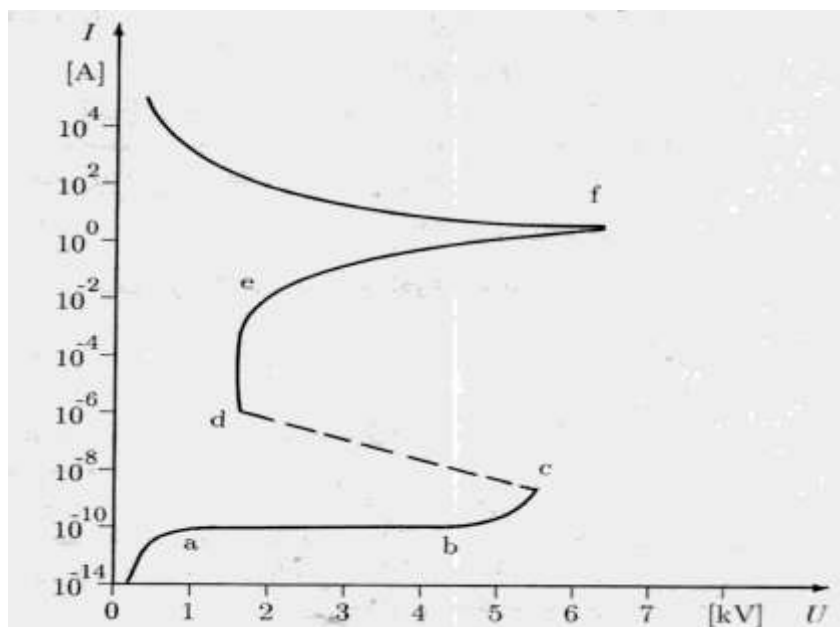
شکل (۴) رابطه بین ولتاژ دو الکترود و جریان عبوری از هوا را نشان می دهد . در ولتاژ کم ، جریان بسیار کمی از گاز عبور می کند که متناسب با ولتاژ (تقریباً خطی) افزایش می یابد ، ولی این جریان در نقطه a به حد اشباع رسیده و دیگر با افزایش ولتاژ تغییر نمی کند .

عبور جریان قبل از نقطه a به دلیل وجود الکترونها و یونهای است که به دلیل عوامل خارجی در گاز داخل محفظه به وجود می آیند .

این عوامل عبارتند از اشعه ای پر انرژی مانند اشعه سماوی یا اشعه α یا اشعه γ یا اشعه ماوراء بنفش و احتمالاً مواد رادیو اکتیو و امثال آن که گاز داخل ظرف را یونیزه می نمایند. به عبارت دیگر مولکولهای گاز را به الکترون و یون تجزیه می کنند .

تعداد الکترونها و یونهای که بدین ترتیب در واحد زمان درون محفظه به وجود می آیند ، بستگی به شدت عوامل فوق داشته و چنانچه این عوامل تشدید شوند ، مقدار الکترونها و یونهای پدید آمده در واحد زمان نیز افزایش می یابد و برعکس.

البته افزایش تعداد الکترونها و یونها در هوا نامحدود نمی باشد ، چرا که تعدادی از الکترونها در پروازهای خود بین مولکولها ، به یونها رسیده و با آنها خنثی می شوند. بنابراین همواره مقداری الکترون و یون بوجود می آیند که پس از برخورد با یکدیگر مجدداً خنثی می شوند . عمل خنثی شدن را ترکیب مجدد گویند .



شکل (۴) - تغییرات جریان عبوری از گاز مطابق مدار شکل (۳) بر حسب ولتاژ بین دو الکترود

با افزایش تعداد یونها و الکترونها موجود در واحد حجم گاز احتمال برخورد آنها با یکدیگر و ترکیب مجدد آنها نیز رو به افزایش می گذارد ، بنابراین تعداد معینی یون و الکترون در واحد حجم باقی خواهد ماند . در این حالت تعداد ترکیبهای مجدد با تعداد جفت یونها و الکترونها به وجود آمده به واسطه عوامل خارجی برابر می گردد . هرگاه این ذرات باردار تحت تأثیر یک میدان الکتریکی خارجی قرار گیرند ، در جهت میدان حرکت می نمایند . البته همانطور که بیان شد این حرکت به حرکت ذرات اضافه می گردد.

ذرات در حرکت خود به مولکولهای گاز برخورد می کنند و مقداری از انرژی خود را که از میدان الکتریکی گرفته بودند به مولکولها انتقال می دهند . این انتقال انرژی باعث سرعت گرفتن هرچه بیشتر مولکولها و یا به عبارت آشناتر ، گرم شدن آنها می گردد . اینجاست که با مفهوم مقاومت اهمی مسیر گاز در محفظه آزمایش مواجه می شویم . یعنی یک افت ولتاژ بین دو الکترود و یک جریان الکتریکی وجود دارد ؛ حاصلضرب ولتاژ و جریان ، توان انرژی الکتریکی است که با شرحی که ارائه شد ، منجر به گرم شدن گاز می گردد . البته فراموش نمی کنیم که این توان تا قبل از نقطه b در شکل (۴)، بسیار کوچک است .

در ابتدای منحنی شکل (۴) یعنی در نزدیکی مبدأ مختصات ، بین ولتاژ و جریان یک رابطه خطی دیده می شود . با افزایش ولتاژ و در نتیجه افزایش جریان ، چگالی حجمی ذرات باردار کاهش می یابد . با کاهش چگالی حجمی الکترونها و یون ها، ارتباط خطی ولتاژ و جریان نیز از بین می رود و این دقیقاً همان چیزی است که از نقطه α به بعد ملاحظه می گردد .

از نقطه a به بعد هر چقدر الکترون و یون در واحد زمان به دلیل عوامل خارجی ، مانند اشعه سماوی تولید شود به آند و کاتد رسیده و در نتیجه جریان برابر خواهد بود با تعداد الکترونها و یونها تولید شده در واحد زمان ضرب در بار الکتریکی آنها .

قبل از نقطه a به دلیل وجود فرصت کافی برای یونها و الکترونها عمل ترکیب مجدد برای تعدادی از آنها میسر بوده و یکدیگر را خنثی می نمایند . لذا مقدار جریان کمتر می باشد . در نقطه a جریان به بالاترین مقدار خود در این مرحله می رسد . لکن مقدار

جریان در حد فاصل نقاط a و b که تمام الکترونها و یونها به دلیل دارا بودن سرعت زیاد فوراً به آند و کاتد می رسند ، ثابت می ماند .

جریان الکتریکی I تا قبل از نقطه b متناسب است با شدت عوامل خارجی که منجر به بوجود آمدن الکترون و یون در فضای محفظه آزمایش می گردند . با افزایش شدت این عوامل ، مثلاً تاباندن نور ماوراء بنفش یا اشعه ایکس و یا قرار دادن مواد رادیو اکتیو در محفظه آزمایش ، جریان الکتریکی نیز افزایش خواهد یافت .

با ثابت نگه داشتن عوامل خارجی ، در حد فاصل نقاط b و c جریان همواره با ولتاژ افزایش می یابد . دلیل این امر آن است که با افزایش ولتاژ و شدت میدان الکتریکی ، میزان انرژی که بعضی از الکترونها از میدان الکتریکی کسب می کنند زیاد می شود . این الکترونها پر انرژی ، در برخورد خود با مولکولهای گاز ، قادرند آنها را یونیزه نمایند . و همین امر تعداد یونها و الکترونها تولید شده در واحد زمان را افزایش می دهد . انرژی کسب شده توسط ذرات باردار متناسب است با مسیر آزاد آنها و شدت میدان الکتریکی. یعنی می توان نوشت :

$$W=eES$$

که در آن e بار الکتریکی ذره و S مسیر ذره در جهت میدان قبل از دو برخورد متوالی است . به این انرژی بایستی انرژی حرارتی ذره را نیز افزود. اما باید توجه داشت که جهت حرکت حرارتی ذره همیشه در جهت حرکت ذره ناشی از میدان الکتریکی نیست تا به صورت جبری با آن جمع شود . بلکه دو سرعت اخیر حتی ممکن است گاهی درخلاف جهت یکدیگر باشند .

ولی در هر صورت مقدار کمی از ذرات باردار که اتفاقاً مسیر آزاد طولانی داشته باشند و یا سرعت حرارتی آنها در جهت سرعت ناشی از میدان الکتریکی باشد، به اندازه کافی انرژی دارند که در برخورد با یک مولکول از گاز آن را یونیزه نمایند. این یونیزاسیون باعث افزایش تعداد الکترون ها و یونهای تولید شده در واحد زمان می گردد. لذا شدت جریان از نقطه b به بعد افزایش می یابد. هر قدر بر تعداد ذرات باردار و همچنین بر شدت میدان الکتریکی افزوده شود، احتمال کسب انرژی توسط تعداد بیشتری ذره باردار به وجود آمده و در نتیجه جریان بیشتر افزایش می یابد.

در نقطه c آنقدر تعداد ذرات باردار در فضای بین دو الکترود زیاد شده است که گاز بین الکترودها به یک هادی تبدیل گردیده است. در نتیجه شدت جریان افزایش زیادی پیدا می کند و گاز عایق تبدیل به گاز هادی می گردد.

بر اثر جریان زیاد، مقداری از ولتاژ منبع بر روی مقاومت R در مدار شکل (۳) افت می نماید و در نتیجه، افت ولتاژ در طول فاصله بین دو الکترود کم می شود.

این افزایش ناگهانی جریان در نقطه c شکست عایق است، چنانچه مشاهده می شود جریان الکتریکی به طور ناگهانی افزایش یافته و از نقطه c به نقطه d جهش می کند. خط نقطه چین بین دو نقطه c و d نشان دهنده این نکته است که هیچ نقطه کار بین این دو نقطه وجود ندارد (منطقه ناپایدار). چنانچه بعداً ملاحظه خواهیم نمود که مسیر این خط نقطه چین بستگی به مقاومت R در شکل (۳) دارد.

با افزایش ولتاژ منبع U_0 در مدار شکل (۳) ابتدا جریان افزایش می یابد؛ لکن ولتاژ بین دو الکترود افزایش پیدا نمی کند. پس از نقطه e بار دیگر با زیاد شدن ولتاژ منبع جریان

و ولتاژ بین دو الکترودها افزایش می یابند تا بار دیگر در نقطه f یک پرش دیگر رخ دهد .
از این پس با افزایش ولتاژ منبع جریان همچنان افزایش می یابد ولی ولتاژ بین الکترودها کاهش پیدا می کند .

۳-۲-۲- راههای مختلف یونیزه شدن گازها

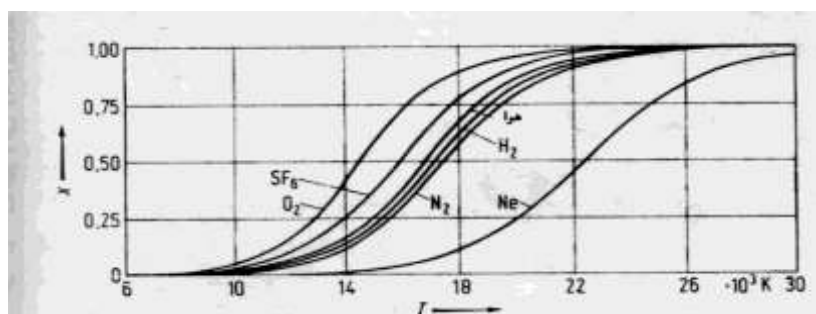
۳-۲-۳-۱- یونیزاسیون حرارتی

اگر درجه حرارت گاز خیلی زیاد باشد ، سرعت مولکولها نیز افزایش یافته و لذا یونها و مولکولها با انرژی حرکتی زیاد در برخورد با دیگر مولکولها قادرند آنها و یا خود را یونیزه کنند . باید به یاد داشت که این یونیزاسیون زمانی ممکن است که درجه حرارت گاز به چند هزار درجه سانتیگراد برسد .

با توجه به این نکته که انرژی مولکولهای گاز در درجه حرارت محیط مطابق تقسیم ماکسول – بولتزمن می باشد می توان ملاحظه نمود که احتمال بروز این نوع یونیزاسیون بسیار کم است . این نوع یونیزاسیون نیز می تواند طی چند مرحله انجام شود . یعنی در طول برخورد مولکولها با یکدیگر ، مقداری از انرژی یکی از آنها به دیگری منتقل می شود و در چند برخورد متوالی ، مولکول می تواند ابتدا به حالت تحریک و نهایتاً به شکل یونیزه درآید . در این مورد نیز فوتونها نقش دارند.

در درجه حرارت زیاد تعداد الکترونها و یونهای گاز بسیار زیاد می شوند . در واقع اعظم مولکولها به شکل یون در می آیند . بدین جهت خیلی زود الکترونها و یونها به یکدیگر برخورد نموده و دوباره تشکیل مولکول خنثی می دهند . لکن به جهت آنکه در هر لحظه

مقدار قابل ملاحظه ای از مولکولهای گاز به صورت یونیزه وجود دارند ، یک حالت تعادلی بین تولید الکترون و یون و ترکیب مجدد آنها به وجود خواهد آمد . بدیهی است هر چه درجه حرارت گاز بیشتر باشد بخش بیشتری از مولکولهای گاز به صورت یون خواهند بود. در نتیجه وجود تعداد بسیار زیاد ذرات باردار که می توانند آزادانه حرکت کنند ، گاز دارای قابلیت هدایت الکتریکی بالایی می باشد . چنین حالتی از گاز به پلاسما معروف است . که حالتی از گاز می باشد که قسمت اعظم مولکولهای آن به صورت یون باشند .



شکل (۵)-رابطه بین میزان یونیزه شدن گاز و درجه حرارت آن برای چند گاز مختلف

یونیزاسیون حرارتی وقتی پیش می آید که جریان الکتریکی عبوری از گاز خیلی زیاد باشد . در این صورت مقدار قابل توجهی از انرژی الکتریکی تبدیل به حرارت می شود و در نتیجه گاز را در محل عبور جریان شدت گرم می نماید . در چنین حالتی مقاومت اهمی گاز شدت پایین می آید . زیرا بسیاری از مولکولهای گاز تبدیل به یون می شوند و امر عبور جریان را تسهیل می کنند . این نوع شکست الکتریکی گاز را قوس الکتریکی می نامند . قوس الکتریکی همراه با نور شدید است و قبل از اختراع لامپ به عنوان منبع نور مورد استفاده قرار می گرفت . امروزه نیز از این پدیده برای ایجاد نور قوی استفاده می کنند . قابل ذکر است که در قوس الکتریکی ، بر اثر عبور جریان گاز به شدت گرم شده و

در نتیجه یونیزه می شود . در منحنی شکل (۴) از نقطه f به بعد در منطقه قوس الکتریکی قرار داریم .

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می شود ، با زیاد شدن جریان ، ولتاژ بین دو الکترود افت می نماید . دلیل این امر آن است که با زیاد شدن جریان ، گاز گرمتر شده و تعداد یونها در واحد حجم افزایش می یابند و در نتیجه مقاومت الکتریکی گاز کم می شود .

نکته قابل ذکر اینکه با زیاد تر شدن جریان ، سطح مقطع قوس کوچکتر می گردد . یعنی جریان از کانال باریکتری عبور می نماید و در نتیجه چگالی سطحی جریان افزایش می یابد . دلیل این پدیده را می توان چنین بیان نمود که جریانهای الکتریکی هم جهت بکدیگر را جذب می کنند . این قوه جاذبه ناشی از پدید آمدن میدان مغناطیسی حاصل از عبور جریان قوس بوده و همین میدان است که نیرویی به سمت مرکز را بر پلاسمای جریان اعمال کرده و در نتیجه کانال جریان را نازکتر و فشرده تر می نماید . در مورد قوس الکتریکی بعداً بیشتر بحث خواهد شد .

به وجود آمدن پدیده شکست الکتریکی در گازها ، نیاز به زمان دارد و اگر چنانچه ولتاژ با دامنه لازم به مدت کافی باقی بماند ، تخلیه الکتریکی پس از طی مراحل اولیه نهایتاً به قوس الکتریکی منجر خواهد شد . چنانچه ملاحظه نمودیم در این مرحله شدت جریان بسیار زیاد و ولتاژ اندک خواهد بود . بقاء قوس منوط به توانایی منبع در تأمین جریان قوس الکتریکی می باشد . البته گاهی اوقات این جریان به واسطه وجود بار الکتریکی بر روی الکترودهای آزاد به وجود می آید که به شکل جوشن های یک خازن عمل می نمایند . اما پس از تخلیه این خازن فرضی ، چنانچه منبع قادر به تأمین جریان قوس

الکتریکی نباشد ، قوس خاموش می گردد و در چنین حالتی است که تنها یک جرقه به وجود می آید .

۲-۲-۳-۲- یونیزاسیون در اثر نور

بر اثر تابش نور به گاز امکان یونیزه شدن مولکول گاز وجود دارد . چنانچه یک فوتون به یک مولکول گاز برخورد کند و انرژی کافی به منظور یونیزاسیون مولکول را داشته باشد ، مولکول گاز یونیزه می شود . اگر انرژی لازم برای یونیزه شدن مولکول گاز برابر W باشد فرکانس نور بایستی در رابطه زیر صدق نماید :

$$hf \geq W$$

در نتیجه فرکانس f مقادیر بسیار بزرگی را بدست می دهد . این نتیجه ای است که با ملاحظه انرژی لازم به منظور یونیزه شدن گازها حاصل می شود . به عبارت دیگر طول موج نور بایستی خیلی کوتاه باشد تا توانایی یونیزه کردن مولکولهای گاز را داشته باشد. برای مثال اگر انرژی لازم برای یونیزه کردن مولکولهای گاز ازت معادل $15/6$ الکترون ولت باشد ، فرکانس نوری که بتواند چنین مولکولی را یونیزه نماید باید در شرط زیر صادق باشد :

$$f \geq \frac{W}{h} = \frac{15 / 6}{4 / 35 \times 10^{-15}} = 3 / 8 \times 10^{+15} \text{ HZ}$$

و طول موج چنین نوری بایستی کوچکتر یا مساوی 80 nm باشد . چنین نوری در محدوده ماوراء بنفش قرار دارد . نورهای مرئی با طول موج تا 200 نانومتر قادر به یونیزه کردن مولکولهای گاز نیستند . مگر آنکه به مولکولی برخورد کنند که قبلاً تحریک شده باشد و لذا به انرژی کمتری جهت یونیزاسیون کامل نیاز داشته باشد به همین دلیل است

که نورهای مرئی تنها در یونیزاسیون های چند مرحله ای ظاهر می گردند و در مجموع می توان گفت که نورهای شدید با طول موجهای کوتاه ، از جمله نورهای حوالی نور بنفش از مؤثرترین نورها در امر یونیزاسیون گازها می باشند .

البته اشعه های پر انرژی به وجود آمده بر روی زمین با کوانتوم انرژی تا حدود چند میلیون الکترون ولت و مزونهای اشعه سماوی با کوانتوم انرژی تا ۶۰ میلیون الکترون ولت در یونیزه کردن گازها مؤثر هستند .

مزون ها ذرات اولیه هستند که باعث چسبیدن نوترون و پروتون در هسته اتم به یکدیگر می گردند و قادر هستند از دیواره های معمولی نیز عبور کنند . به طوری که حتی در فضاهای سربسته نیز باعث یونیزه شدن گاز می گردند .

نوع اشعه	طول موج nm	کوانتوم انرژی eV
مادون قرمز	۷۵۰-۱۰۰۰	۱,۶۵-۰,۱۲
نور مرئی	۷۵۰-۴۵۰	۲,۷۵-۱,۶۵
قرمز	۷۰۰	۱,۷۷
زرد	۴۸۰	۲,۵۸
سبز	۵۲۰	۲,۳۸
آبی	۴۵۰	۲,۷۶
ماوراء بنفش	۱۵-۳۸۰	۸۲,۷-۳,۲۶
اشعه x	۰,۱۵-۰,۰۱	$< 2,5 \times 10^6$
اشعه γ	۰,۰۱-۰,۰۰۰۵	$> 2,5 \times 10^6$
اشعه سماوی	$< 0,0005$	

جدول (۱)-طول موج و کوانتوم انرژی بعضی از انواع اشعه

با وجود آنکه کوانتوم انرژی فوتون فاقد توان کافی جهت تحریک یا یونیزاسیون مولکول گاز است ، بعضاً دیده می شود که باز هم فوتون قدرت یونیزاسیون مولکول گاز را دارد . به این ترتیب که برخورد فوتون به یک مولکول تحریک شده می تواند آن را یونیزه کند . در حقیقت انرژی لازم جهت یونیزاسیون را می توان طی دو یا چند مرحله به مولکول اعمال

نمود . از آنجاکه طول عمر مولکول تحریک شده بسیار کوتاه است ، (حالت ناپایدار)
 بایستی تشعشع نور خیلی زیاد باشد تا بتواند این مولکول را یونیزه کند . البته در مورد اتم
 های با دو حالت پایدار این امر با تشعشع کمتر نیز میسر می گردد .

۳-۲-۲- یونیزاسیون در اثر برخورد یا ضربه

مهمترین عامل در ازدیاد تعداد یونها و الکترونها ، برخورد ذرات باردار با مولکولهای گاز
 است . ذرات باردار پس از کسب انرژی در میدان الکتریکی ، طی برخورد با مولکولهای گاز
 قادرند آنها را یونیزه کنند و همانطور که قبلاً نیز تأکید گردید در این نوع خاص از
 یونیزاسیون الکترونها نقش عمده را ایفا می کنند. چرا که الکترونها ضمن برخورداری از
 مسیر آزاد طولانی تر ، از تحرک بیشتری نیز برخوردار می باشند و لذا در میدان الکتریکی
 انرژی بیشتری کسب می نمایند .

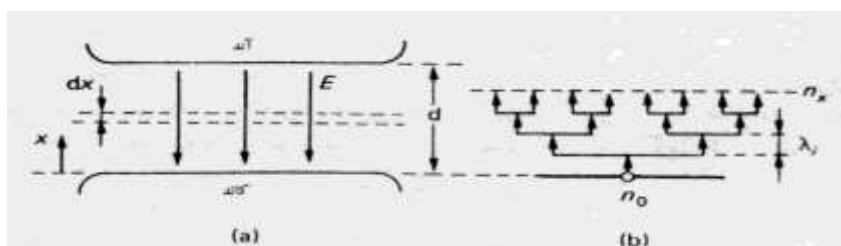
برای بررسی کمی نحوه اضافه شدن تعداد الکترونها و یونها دانشمند انگلیسی تاونزند
 تلاشهای بسیاری نموده است . از جمله به عنوان یک معیار جهت تجزیه و تحلیل کمی ،
 ضریبی را تعریف کرده است . این ضریب با علامت α نشان داده می شود و بیان کننده
 تعداد الکترون های تولید شده توسط یک الکترون در واحد طول و در جهت میدان
 الکتریکی می باشد . α را به نام ضریب اول تاونزند نیز می خوانند . مطابق تعریف اخیر
 چنانچه تعداد n الکترون مسیر x را در جهت میدان الکتریکی طی نمایند تعداد $n\Delta$
 الکترون به آنها اضافه می شود و $n\Delta$ برابر است با :

$$\Delta n = n\alpha \Delta$$

و چنانچه فاصله بین آند و کاتد برابر d باشد و تعداد n_0 الکترون از کاتد خارج شود ، تعداد الکترونهايي که به آند می رسند برابر است با :

$$n = n_0 e^{\alpha d}$$

شکل (۶) نشان می دهد که چنانچه الکترونی از کاتد خارج شود و مسیر آزاد λ را طی کند و در طول این حرکت به اندازه کافی انرژی کسب نماید . در برخورد با مولکول گاز آن را یونیزه کرده و در نتیجه یک الکترون و یون جدید تولید می گردد . از این لحظه به بعد دو الکترون به سمت آند و یک یون به سمت کاتد در حرکت هستند . دو الکترون مذکور نیز می توانند با کسب انرژی کافی در برخورد با مولکولهای دیگر گاز دو مولکول دیگر را یونیزه کنند و در نتیجه یک رشد تصاعدي را موجب می شوند . در واقع این نحوه ازدیاد یک نوع رشد نمایی می باشد .



شکل(۶)-مدل تصویری افزایش الکترون ها و یون ها بر اثر برخورد

اضافه شدن جریان در شکل(۴) بعد از نقطه b به دلیل این نوع یونیزاسیون است. زیرا اگر تعداد n_0 الکترون به دلیل عوامل خارجی در جلوی کاتد به وجود بیایند، طی حرکت خود به سمت آند و در طول مسیر d مطابق رابطه بالا رشد می کنند . اگر جریانی را که به دلیل n_0 الکترون به وجود می آید I_0 بخوانیم ، باتوجه به یونیزاسیون ، جریان به مقدار

$$I = I_0 e^{\alpha d}$$

افزایش می یابد .

اگر دقت کنیم ملاحظه می شود که تمام الکترون ها همیشه قادر به یونیزه کردن مولکولهای گاز نیستند. چرا که طول مسیر آزاد همه الکترونها به اندازه کافی نیست. ضریب α نیز مبین همین واقعیت است که تعداد کمی از الکترونها قادر به یونیزه کردن مولکولهای گاز هستند . ضمن آنکه باید به خاطر داشته باشیم که ضریب α تابعی از شدت میدان الکتریکی نیز می باشد . زیرا هر قدر شدت میدان الکتریکی E بزرگتر باشد ، انرژی کسب شده توسط الکترون نیز بزرگتر بوده و کسب انرژی کافی جهت یونیزاسیون مولکولها ، حتی با طی مسیر های کوتاه نیز متصور است . از طرف دیگر هر اندازه فشار گاز کمتر باشد ، طول مسیر آزاد برای الکترونها بزرگ می شود . لکن در مقابل ، به علت کاهش تعداد مولکول در واحد حجم احتمال برخورد الکترون به آنها کم می شود . یعنی این احتمال وجود دارد که الکترون به اندازه کافی انرژی کسب نماید ولی به مولکول گاز برخورد نکند . لذا می توان نوشت :

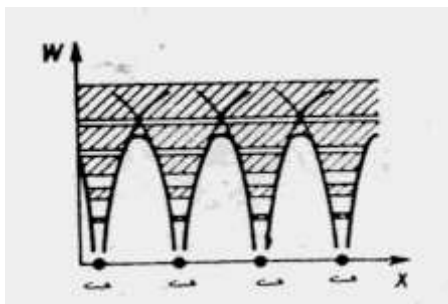
$$\alpha = pf\left(\frac{E}{P}\right)$$

یونیزاسیون چند مرحله ای یعنی اینکه ابتدا یک مولکول تحریک شده و در برخورد بعدی ممکن است مولکول یونیزه گردد . برای یونیزاسیون یا تحریک مولکول سطوح مختلف انرژی وجود دارد . برای گاز جیوه سطوح مختلف انرژی لازم برای یونیزه کردن وجود دارد. اتم گاز جیوه با چند سطح انرژی مختلف قادر به تحریک شدن می باشد از طرف دیگر باید توجه داشت که تنها کسب انرژی به میزان w_x برای یونیزاسیون یک مولکول گاز

کافی نیست بلکه نحوه برخورد الکترون با مولکول گاز نیز از جمله شرایط تعیین کننده است .

۴-۳-۲- خروج الکترون از هادی

حال به بحث مختصری در مورد خروج الکترون از هادی می پردازیم . چرا که کاتد نیز به عنوان یک هادی ، منبع تولید الکترون به شمار می رود . خروج الکترون از هادی میتواند به عنوان یکی از مهمترین عوامل شروع تخلیه الکتریکی در گازها و یا برای ادامه تخلیه و یا تکمیل آن مطرح باشد . الکترونها در داخل فلزات به سهولت و آزادانه حرکت می کنند. در حقیقت الکترونها در سطوح معینی از انرژی و در اطراف هسته اتم قرار گرفته اند و بدون صرف انرژی قابل جدا کردن از اتم نمی باشند . البته باید توجه کرد که اتم های فلز طوری در کنار یکدیگر قرار گرفته اند که مدار خارجی الکترونهای مربوط به اتم های مجاور یکدیگر را قطع می کنند . در چنین وضعیتی الکترون تنها تحت تأثیر هسته اتم خود نیست ، بلکه هسته های اتم های مجاور نیز به این الکترون نیرو وارد می نمایند. اثر هسته اتم های دیگر بر روی الکترون های مدار خارجی باعث می شود که سطوح انرژی اتم ها شکافته شود و الکترونهای مدار خارجی اتم فلزات از هسته جدا شده و برای خود آزادانه به حرکت درآیند . شکل (۷) چند اتم را که در یک ردیف و نزدیک به یکدیگر قرار دارند نشان می دهد. چنین حالتی در کریستالها پیش می آید و اتم ها در یک ردیف قرار می گیرند.



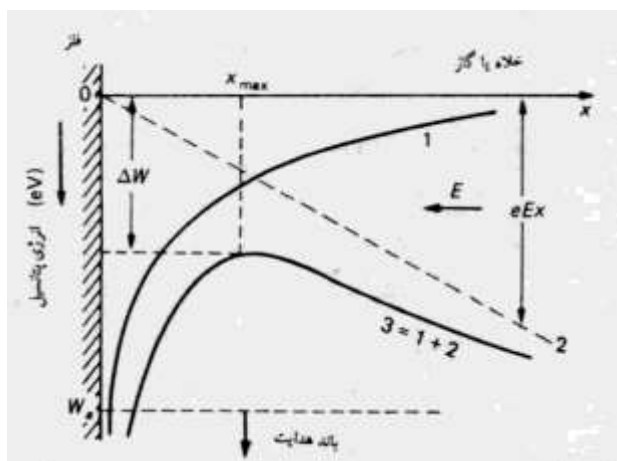
شکل (۷) - اتم های کریستال و سطوح انرژی آنها

چنانچه مشاهده می شود الکترونهاى مدار خارجى قادر هستند آزادانه حرکت کنند و تقریباً در یک مدل دریای الکترونى غوطه ور باشند . يعنى حرکت آنها کارى انجام نمى دهد . اين الکترونها به یک هسته مشخص تعلق ندارند بلکه متعلق به کل کریستال مى باشند . بعضى از الکترونها که در عمق کمى از چاله هاى انرژی قرارگرفته اند نیز مى توانند خود را آزاد کرده و جای خود را با الکترون ديگرى عوض نمایند . اما اين نکته برای الکترونهاى نزدیک هسته که در عمق چاله هاى انرژی قراردارند میسر نیست .

همانطور که میدانیم الکترونها در ابتدا سعی مى کنند سطوح انرژی پایین تر را پر کنند . لذا در درجه حرارت صفر مطلق که انرژی حرارتى صفر است کلیه سطوح انرژی از پایین تا سطح معینى پر هستند و در نتیجه کلیه سطوح بالاتر خالى از الکترون مى باشند . به عبارت دیگر هیچ یک از الکترونها انرژی بالاتر از این میزان ندارند . ولى در درجه حرارت بیشتر انرژی حرارتى باعث مى گردد که بعضى از الکترونها در سطوح بالاتر انرژی قرارگیرند . در نتیجه قسمتى از سطوح پایین تر خالى مى مانند . هرچه درجه حرارت بیشتر شود تعداد بیشتری الکترون از سطوح پایین به سطوح بالاتر انرژی خواهند رفت .

۵-۳-۲- خروج الکترون از هادی به کمک میدان الکتریکی

چنانچه ذکر شد تعداد کمی از الکترونها انرژی کافی برای خروج از هادی را دارند. الکترون به واسطه دارا بودن سطح انرژی مذکور بایستی بتواند از لبه کاسه به بیرون بپرد. به کمک میدان الکتریکی می توان لبه کاسه یا به عبارت دیگر انرژی لازم برای خارج شدن الکترون از هادی را پایین آورد. شکل (۸) این مطلب را نشان می دهد.



شکل (۸)-پایین آوردن انرژی لازم برای خروج الکترون از هادی به کمک میدان الکتریکی

همانطور که بیان شد ، شدت میدان الکتریکی لازم برای خارج کردن الکترونها از هادی بسیار زیاد است و در حقیقت با وجود میدان الکتریکی عوامل دیگری نیز در آن تأثیر می گذارند که عبارتند از :

(الف) گرم کردن هادی تا درجه حرارت های چند هزار درجه کلوین (خروج حرارتی)

(ب) برخورد یک ذره پر انرژی مانند یون با سرعت زیاد به هادی (خروج ثانوی)

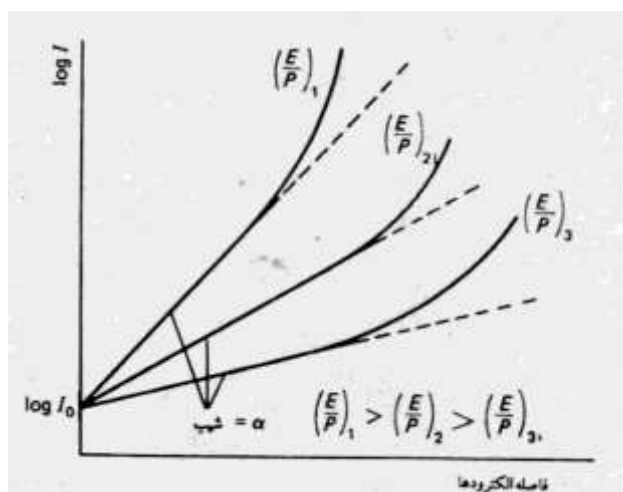
(ج) برخورد اشعه پر انرژی به هادی (خروج فوتونی)

۶-۳-۲- خروج الکترون از هادی در اثر برخورد یونهای سریع به هادی

یکی از عوامل مهم در تخلیه الکتریکی از کاتد به واسطه برخورد یونهای سریع با آن است. در حقیقت در میدان الکتریکی یونهای مثبت تحت تأثیر میدان به طرف کاتد رانده می

شوند و در صورت وجود مسیر آزاد کافی بعضی از یونها قبل از اصابت با کاتد انرژی قابل ملاحظه ای کسب می نمایند . این یونها در برخورد خود با کاتد می توانند باعث خروج الکترون از کاتد شوند .

خروج الکترون از کاتد باعث بوجود آمدن تعداد بیشتری الکترون در فاصله بین کاتد و آند می گردد . در نتیجه گاز بیشتر یونیزه می شود و سرانجام باعث خروج بیشتر الکترون از کاتد و افزایش جریان می گردد . جالب توجه است که عبور جریان قبل از نقطه C در شکل (۴) به دلیل وجود الکترونیایی است که در گاز به واسطه عوامل خارجی مانند اشعه سماوی و غیره بین کاتد و آند به وجود می آیند . چنین تخلیه یا عبور جریان را غیر مستقل (نابخود) می نامند . با از بین رفتن عوامل خارجی این جریان نیز از بین می رود . نوع دیگر تخلیه ، تخلیه مستقل است . در این نوع تخلیه با وجود از بین رفتن عوامل خارجی ، جریان همچنان باقی می ماند . این نوع تخلیه زمانی ممکن است که n الکترون خارج شده از کاتد تعدادی یون تولید کنند و این یونها در اثر برخورد با کاتد به نوبه خود حداقل n الکترون از کاتد خارج نمایند . از این لحظه به بعد دیگر پدیده تخلیه الکتریکی به عوامل خارجی بستگی ندارد .



شکل (۹) - رابطه بین جریان و فاصله الکترودها در میدان الکتریکی یکنواخت برای مقادیر ثابت $\frac{E}{P}$

در تخلیه الکتریکی در گازها ، نور و گرما نیز تولید می شود که خود می تواند باعث خروج الکترون از کاتد گردند البته بدون میدان الکتریکی تخلیه الکتریکی نیز وجود نخواهد داشت .

۷-۳-۲- یونیزاسیون مولکول گاز در اثر برخورد با یون

یونها نیز همانند الکترونها در میدان الکتریکی به حرکت در می آیند و از میدان الکتریکی انرژی کسب می نمایند . نیروی وارده از میدان الکتریکی به یونها باعث شتاب آنها در جهت میدان گردیده و انرژی که یون از میدان الکتریکی بین دو برخورد متوالی کسب می کند همانند الکترون با شدت میدان الکتریکی و طول مسیر آزاد و بار الکتریکی یون متناسب است . این انرژی تبدیل به انرژی حرکتی می گردد .

در صورتی که یک یون با انرژی حرکتی کافی به یک مولکول گاز برخورد نماید ، می تواند این مولکول را یونیزه نماید . با توجه به مسیر آزاد کوتاهتر ، یونها کمتر از الکترونها در یونیزاسیون برخوردی مؤثر می باشند ولی به هر حال در این رابطه بدون اثر نیستند .

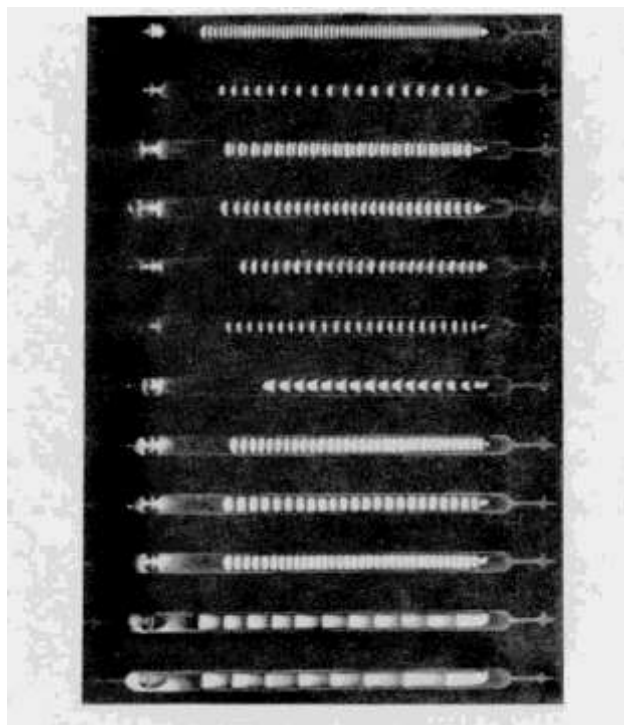
مشابه ضریب α می توان یک ضریب یونیزاسیون برای برخورد یونها به مولکول گاز تعریف نمود . این ضریب را با β نمایش می دهند و آن تعداد الکترون (و یون) است که یک یون در طول واحد ، در سر راه خود بین آند و کاتد به واسطه ضربه تولید می کند. در اینجا مقصود ، تعداد یونها و الکترونهای جدیدی است که همان یک یون در طول واحد و در جهت میدان تولید می نماید و آنچه یونهای تولید شده بعدی به وجود می آورند ، به حساب نمی آید .

۳-۲- شکل های مختلف تخلیه الکتریکی در گازها

تخلیه الکتریکی در گازها بسته به فشار و نوع گاز و تغییرات میدان الکتریکی در فاصله بین الکترودها و تغییرات ولتاژ یا جریان منبع برحسب زمان ، دارای اشکال متفاوتی است که در زیر بحث مختصری راجع به آنها خواهیم داشت :

۱-۳-۲- تخلیه روشن

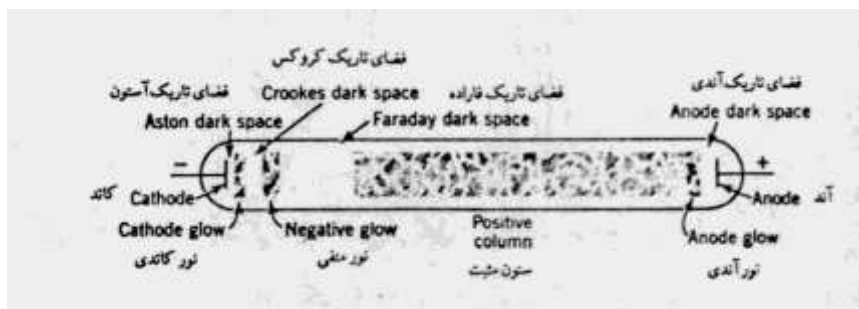
در مدار شکل (۳) به کمک یک منبع ولتاژ دائم با ولتاژ چند هزار ولت و با تغییرات فشار گاز و نوع گاز و مقاومت R شکلهای زیبایی از تخلیه الکتریکی به وجود می آید. شکل (۱۰) چنین تخلیه ای را با جریان های مختلف و فشارهای مختلف گاز نشان می دهد.



شکل (۱۰)- حالت های مختلف تخلیه روشن

در مقادیر کم فشار (در حدود ۱۰ میلی بار) با ولتاژهایی در حدود چند صد ولت تا چند هزار ولت و جریان در حدود چند میلی آمپر نوعی از تخلیه به وجود می آید که به نام

تخلیه روشن خوانده می شود . در شکل (۱۱) تقسیم بندی تخلیه روشن و نام هر قسمت را به زبان انگلیسی می توان مشاهده کرد .



شکل (۱۱)-اسامی قسمت های مختلف تخلیه روشن

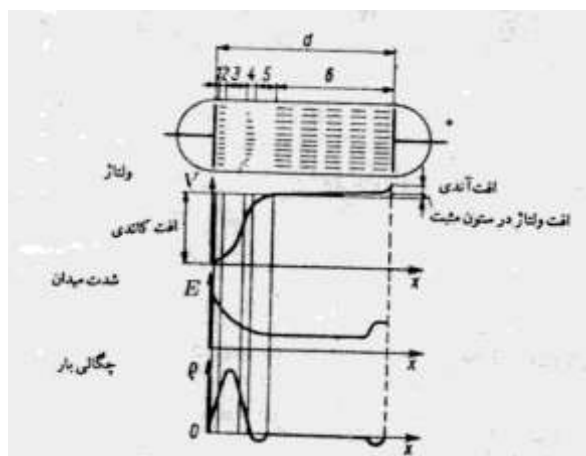
قسمت های مختلف تخلیه روشن دارای اسامی مختلفی هستند . برای نامگذاری ابتدا از الکتروود منفی شروع می کنیم . این الکتروود را کاتد خوانند و بعد از کاتد قسمت های زیر را می توان تشخیص داد :

الف) لایه تاریک نازکی که مستقیماً بر روی کاتد قرار دارد به فضای تاریک آستون معروف است . در این فضا الکترونها انرژی کافی برای تحریک مولکول یا اتم گاز را پیدا نکرده اند ، لذا در این فضا نور ایجاد نمی شود .

ب) پس از آنکه الکترونها انرژی کافی برای تحریک شدن کسب کرده اند ناحیه روشنی به وجود می آید که فضای روشن کاتد یا نور کاتدی یا لایه کاتدی نامیده می شود .

هرگاه فشار گاز نسبتاً زیاد باشد البته ولتاژ نیز بیشتر می گردد . با افزایش فشار گاز ، این لایه به صورت یک لکه مخملی بر روی کاتد ظاهر می گردد . سطح لایه مذکور هماهنگ با رشد شدت جریان الکتریکی بزرگ شده و در نهایت تمام سطح کاتد را می پوشاند . این لکه ، لکه کاتدی نامیده می شود .

ج) با زیاد شدن انرژی الکترونها، احتمال تحریک کم می گردد و در عوض احتمال یونیزاسیون افزایش می یابد. لذا یک لایه تاریک دیگر وجود دارد که به نام فضای تاریک کاتدی یا فضای تاریک کروکس یا فضای تاریک هیتورف خوانده می شود. از آنجا که احتمال تحریک مولکولها در این فضا کاملاً از بین نرفته است، این فضا کاملاً تاریک نیست. نکته قابل ذکر دیگر آنکه الکترونهای سریع در این قسمت گاز را یونیزه می نمایند و الکترون های بوجود آمده بارهای الکتریکی مثبت یونها را خنثی می کند و بالنتیجه شدت میدان الکتریکی در این قسمت رو به کاهش می گذارد.



شکل ۱۲- تقسیم کمیات مختلف فیزیکی در طول مسیر تخلیه روشن

د) درنتیجه کاهش شدت میدان الکتریکی و کم شدن انرژی الکترونها، بار دیگر احتمال تحریک مولکولها یا اتم های گاز افزایش می یابد و یک قسمت روشن دیگر به وجود می آید که به آن نور منفی یا ستون منفی گویند.

در این قسمت شدت میدان الکتریکی به حداقل مقدار خود می رسد. در این نواحی ترکیب مجدد الکترونها و یونها بیشتر می شود که این ترکیب مجدد باعث ایجاد نور خواهد شد. به عبارت دیگر انرژی ترکیب مجدد باعث تحریک مولکولها و در نتیجه به وجود آمدن نور می شود.

ه) در قسمت بعدی بار دیگر شدت میدان الکتریکی افزایش می یابد و احتمال ترکیب مجدد کم می شود و از شدت نور نیز کاسته می شود. این قسمت را فضای تاریک فاراده گویند. این قسمت می تواند خیلی بلند و یا خیلی کوتاه باشد، طوری که تشخیص داده نشود.

و) ستون مثبت نام یک قسمت روشن و نسبتاً طولانی است که گاهی به صورت بریده بریده روشن خاموش ظاهر می شود. در این قسمت شدت میدان الکتریکی نسبتاً کم است، ولی نسبت به ستون منفی، شدت میدان الکتریکی بیشتر است. مقدار بارهای منفی و مثبت یا به عبارت دیگر همان الکترونها و یونها که در این قسمت وجود دارند برابر بوده به طوری که مجموع بارهای الکتریکی در واحد حجم تقریباً صفر است. البته باید بخاطر داشت که سرعت رانش الکترونها نسبت به یونها بیشتر بوده و لذا الکترونها نقش عمده ای در جریان الکتریکی دارند. تقریباً کلیه الکترونها و یونهایی که بر اثر ترکیب مجدد از بین می روند به دلیل یونیزاسیون، مجدداً به وجود می آیند.

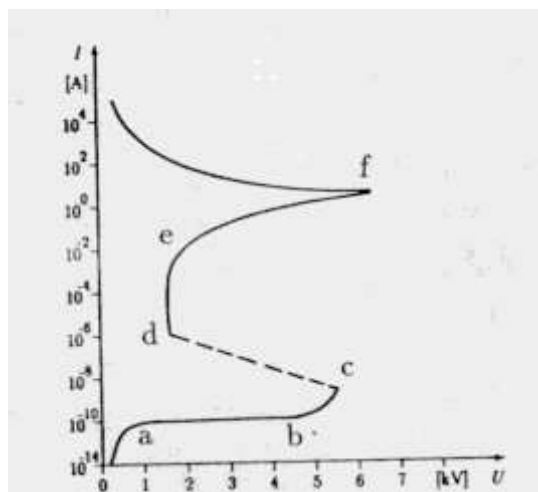
ز) قبل از آمدن بار دیگر یک فضای تاریک به نام فضای تاریک آندی وجود دارد. در این فضا شدت میدان الکتریکی از ناحیه ستون مثبت قوی تر است.

در این قسمت تقریباً یون وجود ندارد و تعداد الکترونها نیز به علت سرعت زیادی که در این ناحیه پیدا می کنند کم است. در اینجا لازم به یاد آوری است که یونهای مثبت در نزدیکی کاتد تجمع کرده و در نتیجه بین آنها و کاتد یک میدان الکتریکی قوی پدید می آید. شدت میدان مذکور در نزدیکی کاتد از هر جای دیگر بزرگتر است. یونهای فوق الذکر در اثر برخورد به کاتد سبب خروج الکترون از کاتد می گردند. شدت میدان

الکتریکی زیاد و تعداد زیاد یونها در این قسمت ، باعث می شود که تمامی جریان الکتریکی در نتیجه حرکت یونها باشد و الکترونها به جهت تعداد اندکشان سهم قابل توجهی در به وجود آوردن این جریان نداشته باشند . بدیهی است حرکت یونهای گاز در این قسمت به معنی حرکت گاز می باشد .

چگالی جریان الکتریکی بر روی سطح کاتد مقداری ثابت و معین بوده و این میزان برای هوا و الکترودهای مسی معادل $1/4 \text{ A/mm}^2$ می باشد . عبور جریان مذکور سبب افت ولتاژی معادل ۳۷۰ ولت (برای هوا و الکترودهای مسی) در نزدیکی کاتد می شود . افت ولتاژ اخیر را افت ولتاژ کاتدی می نامند و وجود آن به منظور شتاب دادن به یونها جهت خارج کردن الکترونها از کاتد الزامی است . همانطور که ذکر شد چگالی سطحی جریان الکتریکی بر روی سطح کاتد ، یعنی در محل لکه کاتدی ثابت می ماند و لذا با افزایش جریان لکه کاتدی نیز بزرگ می شود . در این روند چنانچه تمام سطح کاتد با لکه کاتدی پوشانده شود چگالی سطحی جریان الکتریکی و به همراه آن افت ولتاژ کاتدی و در نتیجه افت ولتاژ بین آند و کاتد افزایش خواهد یافت .

طبق شکل (۱۳)، بعد از نقطه d ابتدا با افزایش جریان ، ولتاژ ثابت می ماند . در این قسمت همانطور که دیدیم سطح کاتد هنوز تماماً با لکه کاتدی پوشانده نشده است. از نقطه e به بعد که لکه کاتدی کاملاً سطح کاتد را فراگرفته است ، ولتاژ بین آند و کاتد نیز افزایش می یابد .



شکل (۱۳) - رابطه بین ولتاژ و جریان در تخلیه الکتریکی

تخلیه روشن که نقاط بین c و f از منحنی شکل (۱۳) را در بر می گیرد ، دارای سه قسمت اصلی می باشد . قسمت اول آنکه بین نقاط d و e قرار گرفته است به نام تخلیه روشن نرمال و فاصله بین c و d را تخلیه روشن زیر نرمال و بالاخره ناحیه مابین e و f را ناحیه روشن بالای نرمال خوانند .

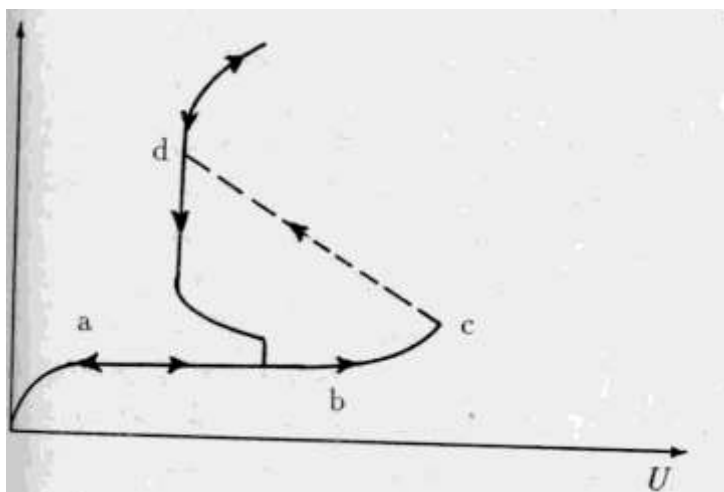
همچنین برای تغییر جریان نقطه کار می توان مقاومت را ثابت نگه داشته و ولتاژ منبع یعنی U_0 را تغییر داد . در منحنی (۱۳) ناحیه بین نقاط c و d به صورت نقطه چین رسم شده است . در این قسمت از منحنی (با توجه به ولتاژ منبع U_0) نقطه کار ماندگار وجود ندارد . در حقیقت پس از آنکه ولتاژ و جریان به نقطه c رسید با سرعتی محدود لکن خیلی بزرگ ، نقطه کار از نقطه c به نقطه d جهش خواهد نمود . این جهش به دنبال مستقل شدن تخلیه الکتریکی روی می دهد .

طی این جهش جریان افزایش یافته و در نتیجه افت ولتاژ بر روی مقاومت R نیز زیاد شده و ولتاژ بین دو الکترود کاهش خواهد یافت . البته ذکر این نکته نیز ضروری است که با

مستقل شدن تخلیه الکتریکی تعداد بسیار زیادی الکترون و یون در مسیر تخلیه به وجود می آیند که سبب کاهش مقاومت الکتریکی بین دو الکتروود خواهد شد .

افزایش سریع قابلیت هدایت الکتریکی بین دو الکتروود یعنی کاهش ولتاژ بین آنها همراه با افزایش جریان را شکست الکتریکی می نامند . این عمل همان مستقل شدن تخلیه الکتریکی می باشد .

این نکته که هرگاه پس از پرش از نقطه c به نقطه d مقدار ولتاژ را کاهش دهیم یا مقاومت R بزرگ نماییم ، دیگر از مسیر قبلی یعنی خط cd به نقطه c بر نمی گردیم ، بسیار جالب است . شکل (۱۴) این مطلب را نشان می دهد. در حقیقت پس از آنکه شرایط تخلیه مستقل در نقطه c به وجود آمد و به نقطه کار d جهش یافت، فضای بین آند و کاتد طوری از ذرات باردار منفی و مثبت پر شده که شرایط تخلیه مستقل بر جای می ماند و جریان الکتریکی در گاز همچنان وجود خواهد داشت . مقدار جریان را می توان با تغییر مشخصات مدار تنظیم نمود . ولی پس از شروع تخلیه ، منبع باید بتواند یک مقدار حداقل جریان را تأمین نماید تا تخلیه الکتریکی برقرار بماند . در غیر این صورت تخلیه الکتریکی خاموش می شود . در شروع تخلیه احتیاج به ولتاژ بیشتری است . گاهی این ولتاژ را با کمک قطع جریان در یک پیچک ایجاد می کنند . چنین عملی در لامپ فلورسنت معمول است.



شکل (۱۴) - حلقه شروع و پایان تخلیه روشن

جهش از نقطه c به نقطه d را جرقه زدن گویند . جرقه می تواند باعث شروع تخلیه روشن یا انواع دیگر تخلیه گردد و یا شرایط تخلیه از بین برود و جریان ادامه پیدا نکند .
تخلیه روشن یکنواخت و بی صدا می باشد . رنگ تخلیه روشن بستگی به نوع گاز دارد ،
تخلیه روشن در هوا به رنگ بنفش است .

۲-۳-۲- تخلیه نسلی

در یک میدان الکتریکی یکنواخت n_0 الکترون از جلوی کاتد یعنی از محل $x=0$ شروع به حرکت کرده و یک بهمن الکترونی به وجود می آورند . این بهمن الکترونی در طول مسیر
تعداد :

$$n_e = n_0 e^{\alpha' d}$$

الکترون به وجود می آورد که در جلوی بهمن الکترونی در حرکت هستند . تعداد یونهای
باقی مانده در عقب بهمن الکترونی برابر است با :

$$n_I = n_0 (e^{\alpha' d} - 1)$$

این تعداد یون پس از مدتی به کاتد برخورد کرده و تعداد $\mathcal{N}n_I$ الکترون از کاتد خارج می نمایند .

اگر تعداد این الکترونها بیش از n_0 تعداد باشد یک بهمن الکترونی قوی تر به وجود می آید و بدین ترتیب چند بهمن الکترونی به دنبال یکدیگر به وجود می آیند و جریان الکتریکی متعاقب آن رو به افزایش می گذارد تا شکست الکتریکی حادث گردد . در این بین توجه به برخی نکات الزامی است . از جمله آنکه تعدادی الکترون نیز بر اثر برخورد فوتونهای ناشی از نور بهمن الکترونی از کاتد خارج می شوند و تعدادی از الکترونها بر اثر ترکیب مجدد از بین می روند و ما فرض می کنیم همه γ عوامل فوق را در بر می گیرد .

ولی اگر تعداد الکترونهای خارج شده از کاتد کمتر از n_0 باشد بهمن الکترونی دوم ضعیف تر از بهمن الکترونی اول خواهد بود و چند بهمن الکترونی که هر یک ضعیف تر از قبلی می باشد به وجود خواهد آمد .

در حالت اول ولتاژ بین الکترودها $0/32$ درصد کمتر از ولتاژ شکست است و در شکل میانی ولتاژ مذکور معادل ولتاژ شکست و در حالت آخر ولتاژ بین الکترودها $1/1$ درصد بیشتر از ولتاژ شکست خواهد بود . تعداد n_0 الکترون اول به یک دلیل خارجی و برای یک بار به وجود آمده اند . این نوع تخلیه را تخلیه نسلی می نامند و زمان لازم برای به وجود آمدن آن نسبتاً طولانی است . اثر فوتونها بر روی سطح کاتد اغلب بسیار مهم است؛ زیرا در ولتاژ ضربه ، یونهای آهسته فرصتی برای خارج کردن الکترون از کاتد نمی یابند .

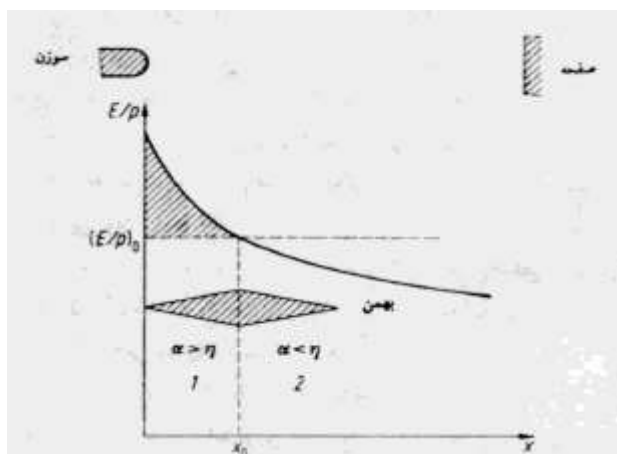
۳-۲-۳- میدانهای غیر یکنواخت - تخلیه جزئی

در میدانهای غیر یکنواخت ضریب یونیزاسیون α در طول مسیر بین کاتد و آند ثابت نمی ماند . لذا رابطه زیر برقرار می باشد .

$$\gamma(e^{\int_0^d \alpha' dx} - 1) \geq 1$$

در این رابطه d فاصله بین کاتد و آند و α' ضریب مؤثر یونیزاسیون و γ ضریب دوم تاونزند می باشد . از آنجا که مقدار α' با شدت میدان الکتریکی بزرگ می شود، انتگرال $\int \alpha' dx$ را باید در طول آن مسیر محاسبه نمود که بیشترین مقدار برای انتگرال حاصل شود . رابطه بالا برای میدانهایی که غیر یکنواختی آنها شدید نباشد صادق است . در میدانهایی که غیر یکنواختی در آنها شدید است ، مقدار انتگرال فوق صفر می شود . برای توجیه این مسئله باید به شکل زیر توجه کرد .

در این شکل ، شدت میدان الکتریکی از الکتروود تیز (سمت چپ) به طرف الکتروود پخ ، ابتدا خیلی سریع و سپس با آهستگی کم می شود . در طول فاصله الکتروود تیز تا نقطه x_0 مقدار α از مقدار η بزرگتر است و در نتیجه $\alpha' = \alpha - \eta$ (ضریب مؤثر یونیزاسیون) مثبت می باشد و انتگرال $\int \alpha' dx$ رو به افزایش می گذارد.



شکل (۱۵) - بهمن الکترونی در میدان الکتریکی غیر یکنواخت. در قسمت ۱ بهمن الکترونی رشد می کند. در قسمت ۲ از بین می رود.

ولی بعد از فاصله x_0 با کم شدن شدت میدان الکتریکی، عمل یونیزاسیون بر اثر برخورد الکترونها به مولکولهای گاز بندرت انجام می شود، ولی الکترونها فرصت نموده و با یون ها مجدداً ترکیب می شوند و از بین می روند یعنی مقدار α' کمتر از صفر می شود و در نهایت وقتی انتگرال فوق را تا فاصله ای ادامه دهیم، هیچ یونی باقی نمی ماند که به کاتد برخورد نماید. در مسیر بین $x = 0$ و $x = x_0$ که α' بزرگتر از صفر است، بهمن الکترونی می تواند به وجود آید. در این طول می باید طبق رابطه بالا و با توجه به ثابت نبودن α' رابطه زیر صادق باشد:

$$e^{\int_0^{x_0} \alpha' dx} = n_c$$

در این رابطه x_0 طولی است که در آن α' مثبت بوده و n_c تعداد الکترونهای بحرانی است که بر طبق آزمایشها حدوداً 10^8 الکترون می باشد. بهمن الکترونی پس از گذشتن از نقطه x_0 به دلیل آنکه در این قسمت α' منفی می باشد، با کاهش الکترونها و یونها روبه رو خواهد شد. در شکل (۱۵) بزرگ شدن و از بین رفتن بهمن الکترونی، به طور سمبلیک نشان داده شده است. در قسمتی از میدان که در آن شدت میدان الکتریکی کم است الکترونها و یونها، به دلیل ترکیب مجدد از بین نمی روند. بلکه حرکت آهسته الکترونها و یونها، بدون آنکه باعث بروز یونیزاسیون یا تحریک گردند حرکتی مشابه از بین رفتن آنها می باشد. این مفهوم که در فاصله معینی از الکتروود نوک تیز دیگر یونیزاسیونی روی نمی دهد و الکترون ها و یونها از این مرحله به بعد به دلیل میدان الکتریکی و یا به صورت تصادفی و یا حرکت حرارتی خود پراکنده می شوند.

پراکنده شدن الکترونها و یونها به معنی بزرگ شدن 17 نیز می باشد در حالی که به دلیل عدم بروز یونیزاسیون α کوچک شده و به صفر نزدیک می شود. به این ترتیب در قسمت ۱ از شکل (۱۵) بهمن الکترونی به وجود می آید و در قسمت ۲ از بین می رود. این بهمن های الکترونی به صورت جرقه ای در نوک الکتروود تیز ظاهر می شود ولی به الکتروود دیگر نمی رسد.

همانطور که بیان شد الکترونهای اولیه برای شروع بهمن از الکتروود نوک تیز خارج شده و یا به دلیل عوامل خارجی در آن حوالی بوجود می آیند. بهر حال شدت میدان الکتریکی در اطراف الکتروود نوک تیز باید به حد معینی برسد تا در اطراف این الکتروود جرقه هایی به وجود آیند. به این جرقه ها که از یک الکتروود شروع شده ولی به الکتروود دیگر نمی رسند تخلیه جزئی می گویند. اضافه بر جرقه های اخیر گاهی اوقات در اطراف الکتروود نوک تیز و یا در فضای بین الکتروودها نور یکنواختی که شبیه به هاله است نیز مشاهده میشود. لذا به این نوع تخلیه الکتریکی کرونا نیز می گویند که همان معنی هاله را دارد. شایان ذکر است که گاهی اوقات تنها هاله وجود دارد و جرقه ای دیده نمی شود.

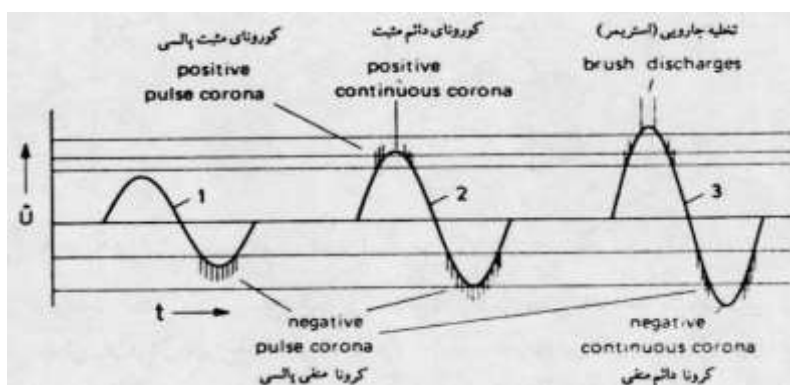
۴-۳-۲- اثر بارهای فضایی

یک الکتروود تیز و یک الکتروود پخ مانند الکتروودهای سوزن و صفحه را در نظر می گیریم. بدیهی است که اولین بهمن الکترونی در اطراف سوزن شروع می شود و ممکن است منجر به شکست گردیده و یا تنها تخلیه جزئی به وجود آورد. به هر حال ابتدا در اطراف الکتروود تیز تر که دارای شدت میدان الکتریکی بیشتری است گاز یونیزه می شود. یونیزه شدن گاز سبب به وجود آمدن یون و الکترون می گردد. ولی الکترونها به جهت

دارا بودن تحرک بیشتر سریعتر خود را به آند می رسانند ، در حالی که یونها که از تحرک کمتری برخوردار هستند تقریباً در محل خود باقی می مانند و آهسته در اطراف کاتد جمع شده و به آن نزدیک می شوند . نتیجه آنکه یونها تقریباً در همان جایی که به وجود آمده بودند باقی مانده و بدین ترتیب شکل میدان الکتریکی را نسبت به شکل ابتدایی آن تغییر می دهند .

۵-۳-۲- تخلیه جزئی در ولتاژ متناوب

تا کنون تخلیه جزیی را در ولتاژ فشار قوی دائم ملاحظه نمودیم . در ولتاژ فشار قوی متناوب نیز تخلیه جزئی ، در میدانهای غیر یکنواخت انجام می شود . در فرکانس های صنعتی که مورد نظر ماست ، طی نیم پریود تخلیه الکتریکی جزئی در اطراف الکترودهای نوک تیز ، مانند خطوط انتقال فشار قوی انجام می گیرد و همان مشخصاتی را داراست که برای ولتاژ دائم بیان گردید . چراکه فرکانس صنعتی به اندازه کافی آهسته است و ولتاژ متناوب در طول چند میلی ثانیه ای که مقدار آن به اندازه کافی بزرگ شده باشد ، مانند ولتاژ دائم عمل می نماید . این مسئله در هر دو نیم پریود پیش می آید . لذا در ولتاژ متناوب و برای الکترودهای سوزن و صفحه در هر دو نیم پریود تخلیه جزئی داریم.



شکل (۱۶) - تخلیه جزئی یا کرونا در ولتاژ متناوب

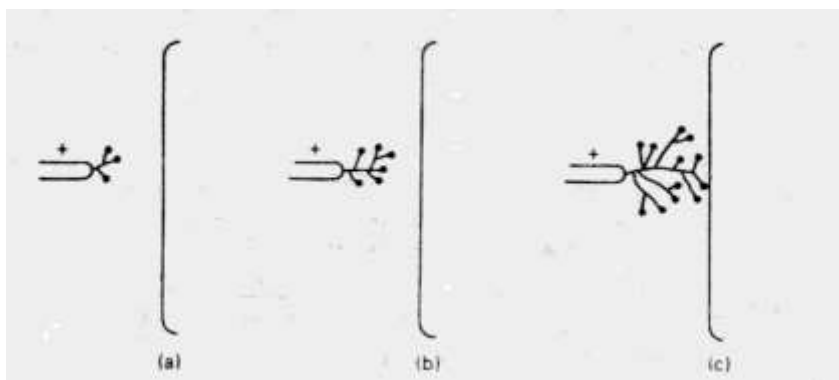
در شکل (۱۶) صورتهای مختلف تخلیه جزئی در نوک الکتروود سوزنی شکل را در ولتاژ متناوب برای مقادیر مختلف ولتاژ نشان می دهد . در ولتاژ کم البته کرونا نداریم ؛ با افزایش ولتاژ ابتدا در ولتاژ منفی در نوک سوزن تخلیه جزئی شروع می شود . با افزایش ولتاژ کرونای مثبت نیز در نوک سوزن پیش می آید . در ولتاژ کمتر کرونای پالسی و در ولتاژ بیشتر کرونای بدون پالس داریم .

۶-۳-۲- تخلیه جزئی در ولتاژ ضربه و ولتاژ کلید زنی

ولتاژ ضربه یک ولتاژ کوتاه مدت است که در مورد موج صاعقه بعد از حدود پنجاه میکرو ثانیه به نصف مقدار ماکزیمم خود می رسد و در مورد موج کلید زنی نیم زمان پشت آن می تواند به چند هزار میکرو ثانیه بالغ گردد . شکل (۱۷) تخلیه در الکترودهای سوزن - صفحه را به صورت شما تیک برای ولتاژ ضربه مثبت نشان می دهد . هرچه مدت زمان ولتاژ ضربه بیشتر باشد ، تخلیه بیشتر پیشروی کرده و به الکتروود صفحه ای نزدیکتر می شود و به شاخکهای آن نیز افزوده می گردد . جالب توجه آنکه شاخه های این تخلیه هرگز یکدیگر را قطع نمی کنند .

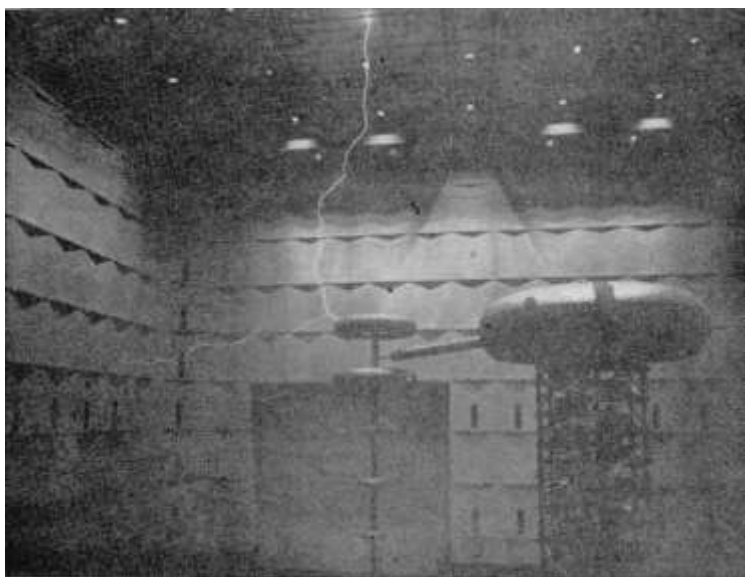
این نوع تخلیه همان استریمر است ولی در ولتاژ ضربه بارهای فضایی نقشی ندارند. زیرا ولتاژ ضربه به مدت کمی وجود دارد و پس از پنجاه میکرو ثانیه دامنه آن نصف می شود . در نتیجه فرصتی برای به وجود آمدن بارهای فضایی باقی نمی ماند. سرعت پیشرفت استریمر در اطراف سوزن که از شدت میدان الکتریکی بالایی برخوردار است بسیار زیاد بوده و به ۱۰ متر در هر میکروثانیه می رسد. ولی با دور شدن از سوزن و کاهش شدت میدان الکتریکی ، از سرعت پیشرفت استریمر نیز کاسته می شود و سرانجام متوقف می

شود . در این بین از دامنه ولتاژ کاسته شده است . لذا می توان تخلیه جزئی را در ولتاژ ضربه نیز مشاهده نمود . ضمن اینکه اگر دامنه ولتاژ زیاد باشد یا مدت بیشتری وجود داشته باشد شکست کامل بوقوع می پیوندد .



شکل (۱۷)- پیشرفت استریمر در نوک سوزن در ولتاژ ضربه در طول زمان

پس از به وجود آمدن یک بهمن ، امکان به وجود آمدن بهمن های جدید ، به دلیل نوساطع شده از بهمن اول در سایر نقاط میدان وجود دارد . در مورد الکترودهای سوزن – صفحه ، می بایست دامنه ولتاژ ضربه خیلی زیاد باشد تا بهمن های الکترونی در نقاط دیگر میدان پیدا شوند .



شکل (۱۸)- شکست ولتاژ کلید زنی با دامنه ۳/۳ میلیون ولت، طول تخلیه ۲۲ متر است

ولتاژهای کلید زنی در یک شبکه برق رسانی معمولاً چند برابر ولتاژمتناوب نامی آن شبکه می باشند و از آنجاکه مدت وجود این نوع ولتاژ طولانی است این نوع ولتاژ می تواند بسیار خطرناک باشد .

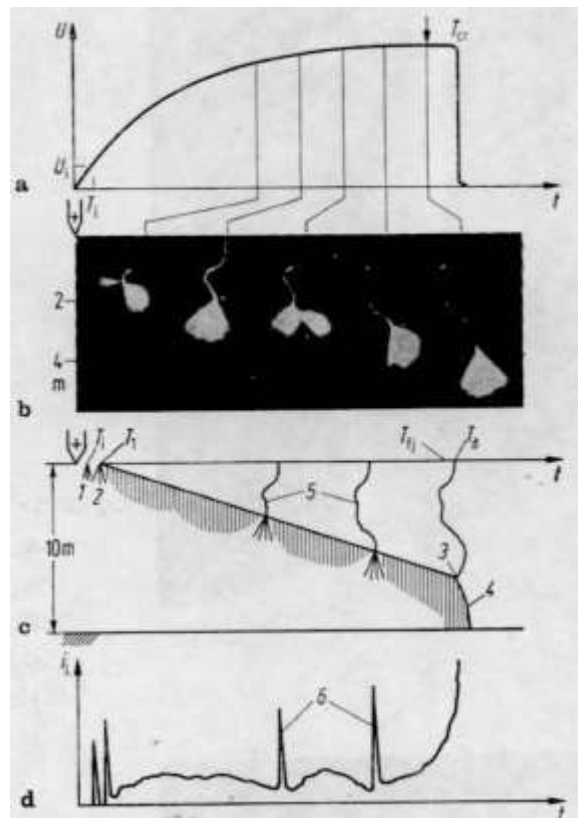
به دلیل خطرناک بودن ولتاژهای کلید زنی طراحی تجهیزات فشار قوی و فواصل عایقی در پست های فشار قوی برای ولتاژهای نامی بیش از ۳۰۰ کیلو ولت بر مبنای ولتاژ کلیدزنی انجام می گیرد . ولتاژ کلید زنی ممکن است مثبت یا منفی باشد و چون ولتاژ کلید زنی مثبت خطرناکتر است ، در طراحی ولتاژ کلید زنی مثبت در نظر گرفته میشود .

۷-۳-۲- تخلیه لیدر

استقامت الکتریکی نسبتاً کم برای ولتاژ کلید زنی را نمی توان تنها با تخلیه استریمر توجیه کرد. در مورد فواصل زیاد و ولتاژهای کلید زنی ، نوع دیگری از تخلیه پیش می آید که به آن تخلیه لیدر می گویند . در این نوع تخلیه با بالا رفتن ولتاژ در چند مرحله پالس های جریان نسبتاً قوی به وجود آمده و یک مسیر هادی و روشن از نوک سوزن شروع به رشد می نماید. هر بار که پالس جدیدی به وجود می آید ، این مسیر قدری طولانی تر می گردد و سرانجام به الکتروود دیگر می رسد . مسیر روشن در این مورد دارای قابلیت هدایت الکتریکی خوبی است . به طوری که شدت میدان الکتریکی در طول این مسیر حدود $1/5$ کیلو ولت در هر سانتیمتر ($1/5 \text{KV/cm}$) است . در حالی که شدت میدان الکتریکی در کانال استریمر مثبت بزرگتر و برابر $4/5 \text{KV/cm}$ می باشد و در کانال استریمر منفی به میزان 8KV/cm بالغ می گردد . قابلیت هدایت الکتریکی نسبتاً خوب این مسیر باعث

می شود که ولتاژ انتهای مسیر تقریباً برابر ولتاژ سوزن گردد و از نوک این مسیر ، تخلیه های استریمر جدید به وجود می آیند . این مسیر را کانال لیدر می گویند .

جریان لازم برای به وجود آوردن و روشن نگاه داشتن این استریمرها در نوک کانال لیدر بین $0/6$ تا $1/4$ آمپر می باشد و وجود همین جریان است که باعث می گردد کانال به صورت هادی باقی بماند قطر کانال لیدر حدود ۳ میلیمتر و درجه حرارت آن ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. همین درجه حرارت زیاد ، باعث یونیزه شدن و در نتیجه هادی شدن این مسیر می گردد . شکل (۱۹) مراحل مختلف تخلیه لیدر را نشان می دهد. در ابتدا ، زمانی که شدت میدان الکتریکی در نوک سوزن به مقدار کافی رسید ، یک تخلیه استریمر در نوک سوزن به وجود می آید . این استریمر یک بار الکتریکی فضایی مثبت به جا می گذارد و باعث کم شدن شدت میدان الکتریکی در نوک سوزن و از بین رفتن استریمر می شود . پس از مدتی به دلیل بالا رفتن ولتاژ ، یک استریمر قوی تر به وجود آمده و باعث عبور یک پالس جریان می گردد. تکرار این تخلیه های استریمر جریان الکتریکی قابل توجهی از نوک سوزن به وجود می آورد و در نتیجه گاز در این قسمت تا درجه حرارت ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد گرم می شود . به این ترتیب کانال لیدر به وجود می آید .



شکل (۱۹)-مراحل مختلف تخلیه لیدر a-شکل ولتاژ. b -تصویرهای متوالی از تخلیه لیدر. c-نمایش تغییرات شکل تخلیه در طول زمان. d -تغییرات جریان بر حسب زمان.

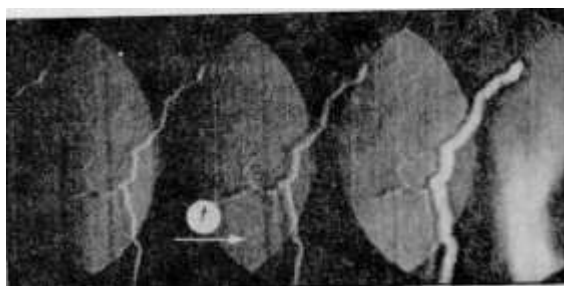
در انتهای کانال لیدر شدت میدان الکتریکی بسیار زیاد است و باعث می شود که در آنجا استریمرهای قوی به وجود بیایند و کانال لیدر دائماً رشد نماید . در این زمان پالس های قوی جریان نیز در فواصل چند ده میکرو ثانیه از یکدیگر به وجود می آیند . پس از آنکه کانال لیدر به الکتروود صفحه رسید ، شکست به وقوع می پیوندد و ولتاژ بین سوزن و صفحه به چند ولت کاهش می یابد .



شکل ۲۰- لیدر در هوا برای فاصله ۱۶/۷ متر عکس بالا با دوربین ساکن و عکس زیر با دوربین گردان برداشته شده است.

به منظور تثبیت درجه حرارت کانال لیدر در حدود ۵۰۰۰ درجه سانتیگراد بایستی به طور دائم به این کانال انرژی وارد نمود تا آنکه هوا در آن به صورت یونیزه باقی بماند. این انرژی بواسطه عبور جریان از این کانال مهیا می گردد. در صورتی که افت ولتاژ در کانال 1 KV/cm و جریان آن ۱ آمپر باشد، (این مقادیر به حقیقت نزدیک است) توان ورودی به کانال یک کیلو وات بر هر سانتیمتر خواهد بود و لذا برای یک کانال ۱۰ متری توان

وارده معادل ۱ مگاوات است . انتهای کانال لیدر به رأس لیدر مشهور است که آن نیز در حال پیشروی می باشد و از آن استریمر های زیادی خارج می شوند . استریمرها تا آنجا پیش می روند که شدت میدان الکتریکی باعث گردد ضریب یونیزاسیون برابر ضریب ترکیب مجدد شود . این حد را حد یونیزاسیون می نامند .



شکل ۲۱- چند عکس متوالی از یک کانال لیدر

در کانال لیدر مولکولهای گاز و الکترونها در حالت تعادل حرارتی نمی باشند . الکترونیایی که در اطراف رأس لیدر به وجود می آیند دارای انرژی زیادی هستند و این انرژی را در برخورد ضربه ای به مولکولهای گاز پس می دهند . در این روند ابتدا مولکولها به نوسان در می آیند و انرژی نوسانی خود را رفته رفته به انرژی حرارتی تبدیل می کنند . به همین دلیل است که گاز در درون کانال لیدر در مدت ۲۰ تا ۳۰ میکروثانیه بشدت گرم می شود . در ضمن گرم شدن بسیاری از مولکولهای گاز نیز یونیزه خواهد شد و در نتیجه شدت میدان الکتریکی در درون کانال لیدر کم می گردد زیرا کانال لیدر در ضمن یونیزه شدن هادی می شود .

همانطور که بیان شد شدت میدان الکتریکی در کانال لیدر به حدود ۱ تا ۱/۵ کیلوولت در هر سانتیمتر می رسد . شدت میدان الکتریکی در رأس کانال بسیار زیاد است و در آنجا

کرونا و در نتیجه استریمر به وجود می آید که این دو موجب عبور جریان الکتریکی از کانال و لذا گرم نگاه داشته شدن آن می شود .

زمان پیشانی ولتاژ کلید زنی در ولتاژ شکست اثر دارد . برای هر مقدار فاصله d بین سوزن و صفحه ، یک زمان پیشانی وجود دارد که به ازاء آن ولتاژ شکست یک مقدار حداقل است که به آن زمان پیشانی بحرانی گویند . برای این زمان پیشانی سرعت متوسط پیشرفت کانال ثابت می باشد . در این حالت پتانسیل در رأس کانال مقداری ثابت است ؛ یعنی همراه باافزایش طول کانال و در نتیجه افزایش افت ولتاژدرطول آن ، ولتاژ منبع نیز بالا می رود .

در صورتی که زمان پیشانی ولتاژ کلید زنی کمتر از زمان پیشانی بحرانی باشد ، پتانسیل رأس لیدر ، در ابتدا به دلیل سرعت افزایش ولتاژ و سپس به دلیل کاهش ولتاژ در پشت موج ، ثابت نمانده و کوچک می گردد . در مواردی که زمان پیشانی ولتاژمنبع بیش از زمان پیشانی بحرانی باشد ، کانال لیدر به صورت یکنواخت پیشرفت نمی کند . بلکه با توجه به اینکه ولتاژ منبع آهسته بزرگ می شود ، پس از یک مرحله پیشرفت ، طول کانال لیدر برای لحظه ای ثابت می ماند.

با افزایش ولتاژبار دیگر کانال لیدر یک جهش می نماید . در این حالت افت ولتاژ در طول کانال با افزایش ولتاژ منبع جبران نشده وپتانسیل رأس کانال لیدر کم می گردد. در نتیجه شرایط تخلیه ایده آل فراهم نخواهد بود .

تخلیه لیدر در ولتاژ دائم مشاهده نمی شود ، ولی در الکترودهای سوزن – صفحه با فاصله بیش از ۱ متر و در ولتاژهای کلید زنی و متناوب تخلیه لیدر پیش می آید . در مورد

ولتاژهای ضربه و کلید زنی ، ۵۰ درصد شکست مد نظر می باشد و آن ولتاژی است که با تکرار آن در ۵۰ درصد موارد شکست واقع می گردد .

۸-۳-۲- تخلیه قوسی

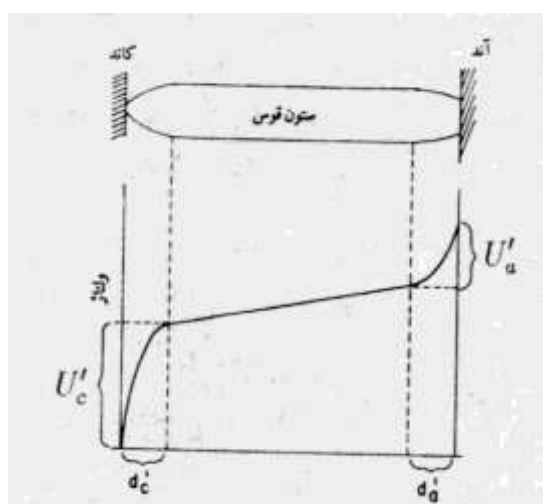
نوع دیگری از تخلیه الکتریکی در گازها قوس الکتریکی و یا تخلیه قوسی است . تخلیه قوسی در صنعت برق دارای اهمیت فوق العاده است و موارد مصرف مختلف دارد که از این جمله می توان از کاربردهای روشنایی ، ذوب فلزات وجوشکاری نام برد . ضمناً قوس الکتریکی در کلیدهای قدرت و فیوز پیش می آید و شناخت مشخصات قوس به این دلایل لازم و ضروری به نظر می رسد .

البته نظر ما در اینجا شناخت مشخصات عایق گازی و آشنا شدن با شرایطی است که تحت آنها شکست الکتریکی به صورت قوس الکتریکی ، در عایق گازی ظاهر می شود . مشخصه عمده قوس الکتریکی جریان نسبتاً زیاد (تاچندین کیلو آمپر) و افت ولتاژ بسیار کم (بسته به میزان جریان تا چند ولت) و درجه حرارت بسیار زیاد گاز (تا چندین هزار درجه سانتیگراد) می باشد .

قوس الکتریکی از قابلیت هدایت الکتریکی بسیار خوبی برخوردار است و هرچه جریان آن بیشتر شود ، افت ولتاژ در طول آن کمتر می شود . لذا قوس الکتریکی ذاتاً یک پدیده ناپایدار است و تنها در شرایط خاص به سوختن ادامه می دهد ، بنابراین که در بسیاری از موارد قوس الکتریکی خود به خود خاموش می شود .

در منحنی شکل (۴) از نقطه f به بعد یعنی به طرف جریانهای بزرگ با پدیده قوس الکتریکی مواجه هستیم . قوس الکتریکی از جمله پدیده های الکتریکی است که

دانشمندان خیلی زود با آن آشنا شده اند . در سال ۱۸۰۸ همفری دیوی قوس الکتریکی را به وسیله پیل های ولتا به وجود آورد و برای این پدیده لغت arc (قوس) را انتخاب نمود . با وجود این ، قوس الکتریکی هنوز به خوبی شناخته نشده است . دلیل این مطلب حالت های کاملاً متفاوتی است که قوس الکتریکی می تواند داشته باشد؛ ضمن آنکه بسیاری از عوامل که تشخیص آنها مشکل می باشد در خواص قوس الکتریکی اثر می گذارد . شکل (۲۲) قسمت های مختلف یک قوس الکتریکی را نشان می دهد .



شکل (۲۲) - قسمت های مختلف یک قوس الکتریکی و تقسیم ولتاژ در طول آن

در قسمت پایین این شکل توزیع ولتاژ در فاصله بین آند و کاتد مشاهده می شود. قوس الکتریکی شامل ستونی قوس در وسط و منطقه کاتدی و منطقه آندی است. البته منطقه های کاتدی و آندی (یعنی طولها ی d_c و d_a) بسیار کوتاه هستند .

افت ولتاژ در طول ستون قوس بسیار اندک می باشد ، چرا که ستون قوس یک ستون هادی است . در داخل این ستون به دلیل درجه حرارت زیاد گاز به صورت یونیزه در می آید و تعداد قابل توجهی الکترون آزاد و یون در این ستون موجود می باشند که در انتقال بار الکتریکی و به وجود آوردن جریان نقش اساسی دارند . منطقه کاتدی بسیار باریک می

باشد ، به طوری که چگالی سطح جریان در این منطقه بسیار زیاد است و بر روی سطح کاتد چگالی سطحی جریان به 10^6 آمپر بر سانتیمتر مربع بالغ می شود . حرارت تولید شده در این منطقه بسیار زیاد بوده و درجه حرارت بسیار بالا می باشد ، به طوری که به حدود چند ده هزار درجه سانتیگراد می رسد . توان تولید شده در این منطقه با توجه به سطح خارجی که باید حرارت را به محیط خارج انتقال دهد بسیار زیاد بوده و به ۱۰ مگاوات درهرسانتیمتر مربع می رسد . افت ولتاژدر منطقه کاتدی قوس کم بوده و به حدود ۱۰ولت می رسد. شدت میدان الکتریکی در منطقه آندی بیش از شدت میدان در ستون قوس بوده ولی کمتر از شدت میدان الکتریکی در منطقه کاتدی است . افت ولتاژ در مناطق کاتدی و آندی را به ترتیب افت ولتاژ کاتدی و افت ولتاژ آندی می نامند .

قوس الکتریکی یک نوع تخلیه مستقل به شمار می رود . ضمن آنکه خروج الکترون از کاتد به دلیل درجه حرارت زیاد کاتد می باشد ، از اثر برخورد یونها به کاتد نباید غافل بود . ولی چون افت ولتاژ کاتدی نسبتاً کم و فشار گاز در قوس الکتریکی اغلب زیاد می باشد انرژی حرکتی یونها در برخورد با کاتد چندان زیاد نیست . در عین حال تعداد زیاد یونها باعث گرم شدن کاتد وخروج الکترون از آن می گردد . از طرف دیگر با وجود کوچک بودن افت ولتاژ کاتدی ، از آنجا که طول منطقه کاتدی نیز خیلی کوچک است ، شدت میدان الکتریکی در جلو کاتد زیاد می باشد و خروج الکترون از کاتد به دلیل میدان الکتریکی عامل مهمی است .

توان وارد شده به یک قوس الکتریکی با توجه به افت ولتاژ و جریان شدید ، نسبتاً زیاد است . یک قوس الکتریکی با طول ۱ سانتیمتر و جریان ۲۰۰ آمپر دارای افت ولتاژی در

حدود ۲۰ ولت می باشد و توان الکتریکی که در فضای کوچک قوس به حرارت تبدیل می شود برابر ۴ کیلو وات می باشد . مثال بالا برای یک دستگاه جوشکاری عنوان گردیده است که در آن از پدیده قوس الکتریکی استفاده می شود.

در اتصال کوتاه شبکه های قدرت گاهی به طول قوس چند متری و ولتاژهای در حدود چند کیلو ولت و جریانهای چند کیلو آمپری برخورد می کنیم . توان چنین قوسی در حدود چندین مگاوات است که در محل برخورد به خط فشار قوی یا دکل و غیره باعث ذوب شدن هادی و یا حداقل چند رشته از آن می شود . البته قطع سریع جریان اتصال کوتاه به وسیله رله ها باعث محدود شدن خسارت می گردد ولی بعضاً حتی زمان کوتاه قطع جریان مانع از قطع چند رشته از هادی نمی شود .

شروع قوس الکتریکی می تواند به دلیل برخورد دو الکترود و سپس جدا شدن آنها از یکدیگر باشد . مثلاً در خطوط فشار قوی ممکن است هادیها به دلایل مختلف به یکدیگر یا به دکل برخورد نمایند و قوس الکتریکی شروع شود . با دور شدن هادیها از یکدیگر قوس خاموش نمی شود و همچنان به سوختن ادامه می دهد مگر آنکه منبع ولتاژ از مدار قطع شود تا قوس خاموش گردیده و سپس مجدداً خط برقرار گردد . در واقع همان عملی است که کلید های قطع و وصل سریع (recloser) انجام می دهند .

در خطوط هوایی فشار قوی این امکان نیز وجود دارد که هادیها به قدری به یکدیگر نزدیک شده باشند که بین آنها شکست الکتریکی به دلیل کاهش فاصله ایزولاسیون بروز نماید . این شکست که به صورت جرقه (استریمِر) شروع می شود ، قوس الکتریکی را بدنبال خواهد داشت . ضمن آنکه این احتمال نیز وجود دارد که یک اضافه ولتاژ ضربه (

ناشی از برق آسمان و یا کلید زنی (ولتاژ بین دو الکتروود را به حدی بالا ببرد که بین آنها جرقه ای پدید آید . در این حالت نیز قوس الکتریکی پس از کاهش ولتاژ همچنان به سوختن ادامه می دهد .

اتصال دو الکتروود یا نزدیک شدن آنها به یکدیگر ممکن است به کمک یک جرم خارجی رخ دهد ؛ مثلاً یک پرنده یا یک شاخه یا بوته و گاهی یک نخ مرطوب می توانند باعث شروع قوس الکتریکی گردند .

به این ترتیب مشخص می شود که چگونه بار برف و یا بار یخ ، باد شدید، اجسام خارجی و غیره می توانند باعث بروز قوس الکتریکی و اتصال کوتاه در خطوط انتقال فشار قوی گردند .

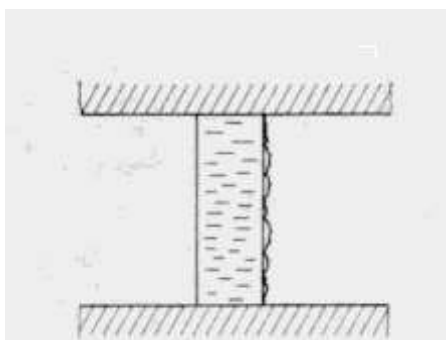
شایان ذکر است که قوس الکتریکی در یک مسیر نازک به وجود می آید . دلیل این امر وجود نیروهای ناشی از میدان مغناطیسی بر قوس است . این میدان که خود از جریان قوس الکتریکی ناشی می شود ، بر شکل قوس تأثیر می گذارد . نازک شدن قوس را می توان مشابه جذب چند رشته سیم که دارای جریانهای هم جهت باشند ، دانست .

۹-۳-۲- تخلیه سطحی

مقصود از تخلیه سطحی ، تخلیه ای است که بر روی سطح خارجی عایق جامد یا مایع صورت پذیرد . در حقیقت تخلیه سطحی تخلیه ای است که بر روی فصل مشترک دو عایق جامد و گاز یا جامد و مایع و یا مایع و گاز رخ می دهد .

نکته ای که در ابتدای بحث ذکر آن لازم می باشد این است که ولتاژ شکست عایق های جامد و مایع معمولاً از ولتاژ شکست گازها بیشتر بوده و عدد دی الکتریک آنها نیز معمولاً بزرگتر از یک می باشد .

آزمایش : دو صفحه را به فاصله معین d از یکدیگر قرار می دهیم و ولتاژ بین دو صفحه را به آهستگی بالا می بریم . سرانجام شکست در ولتاژی مانند U_1 روی می دهد . در مرحله بعدی مطابق شکل (۲۳) یک قطعه عایق مانند چینی یا فیبر استخوانی را بین دو صفحه قرار می دهیم . البته طول عایق همچنان برابر d می باشد .



شکل (۲۳)- شکست بر روی فصل مشترک دو عایق جامد و گاز

با آزمایش ملاحظه می گردد که ولتاژ U_2 می باشد و U_2 کمتر از U_1 است . یعنی استقامت الکتریکی بر روی فصل مشترک دو عایق از استقامت الکتریکی هر یک از عایق ها به تنهایی کمتر است . در اینجا تخلیه الکتریکی در فصل مشترک دو عایق و در گاز انجام می گیرد . در مواردی که انرژی تخلیه الکتریکی زیاد باشد ، امکان سوختن و صدمه دیدن سطح عایق جامد وجود دارد .

موارد زیر باعث پایین آمدن استقامت الکتریکی می گردند :

الف (سطح عایق جامد دارای برآمدگی و فرورفتگی هایی است و شدت میدان الکتریکی در داخل فرو رفتگی ها زیاده از شدت میدان الکتریکی یکنواخت در گاز می باشد . در نتیجه در این فرورفتگی ها گاز یونیزه می شود و شرایط تخلیه را فراهم می آورد .

ب (سطح خارجی عایق ها اغلب کاملاً تمیز نمی باشد و یا حداقل میزان تمیزی بر روی سطح یکنواخت نیست . بر اثر قرار گرفتن مواد مختلف بر روی سطح خارجی عایق و یا مرطوب شدن غیر یکنواخت این سطح ، تقسیم ولتاژ بر روی آن یکنواخت نخواهد بود . بلکه قسمتهای مرطوب و یا کثیف دارای قابلیت هدایت الکتریکی بیشتری بوده و قسمتهای خشک و تمیز قابلیت هدایت الکتریکی کمتری را دارا هستند. این اختلاف در قابلیت هدایت الکتریکی بر روی سطح عایق سبب تقسیم غیر یکنواخت ولتاژ در طول عایق می شود . قسمتهایی که مرطوب و یا زیاد کثیف هستند دارای قابلیت هدایت خوبی بوده و ولتاژ بر روی آنها افت نمی کند . قسمتهایی که خشک و تمیز هستند و در نتیجه مقاومت الکتریکی بیشتری دارند بایستی شدت میدان الکتریکی قویتری را تحمل کنند و همین زیاد شدن شدت میدان الکتریکی در بعضی قسمتها باعث یونیزاسیون گاز و شکست عایق گازی می شود.

نکته قابل توجه آنکه سطح خارجی عایق های جامد به دلیل نفوذ رطوبت هوا و قرار گرفتن مواد خارجی بر روی آن دارای قابلیت هدایت الکتریکی بیشتری نسبت به قسمتی از عایق که در مجاورت هوا نیست ، می باشد . اختلاف در رطوبت و مواد خارجی در نقاط مختلف باعث بروز شکست الکتریکی می گردد . تقسیم یکنواخت رطوبت و مواد خارجی از نظر شکست الکتریکی مشکل کمتری را ایجاد می نماید. لذا در مواردی که آلودگی غیر

قابل اجتناب می باشد می توان با ایجاد یک لایه با قابلیت هدایت بهتر ولی یکنواخت از اثر آلودگی غیر یکنواخت جلوگیری نمود.

در ولتاژ دائم تنها مقاومت عایقی است که تعیین کننده نحوه تقسیم ولتاژ در طول عایق می باشد. لکن در ولتاژ متناوب مقاومت مخصوص عایق ρ و ضریب دی الکتریک ϵ هر دو در تقسیم ولتاژ نقش دارند و این تأثیر به گونه ای است که هر چه فرکانس ولتاژ بالاتر باشد اثر ضریب دی الکتریک بیشتر می شود .

ج (معمولاً بر روی سطح خارجی بارهای الکتریکی قرار می گیرند . این بارهای الکتریکی ممکن است در اثر تخلیه های الکتریکی جزئی که قبل از شروع تخلیه کامل به وجود می آیند بر روی سطح عایق قرار می گیرند . وجود بارهای الکتریکی بر روی سطح خارجی عایق باعث تقسیم غیر یکنواخت ولتاژ می گردد.

به همین دلیل است که ولتاژ شکست در چند آزمایش متوالی یکسان نخواهد بود . در آزمایش مقرر با ولتاژ دائم وجود بارهای الکتریکی ناشی از تخلیه قبلی یا تخلیه جزئی اثر عمده ای دارد . البته بارهای الکتریکی به میزان محدودی بر روی سطح عایق جامد قرار می گیرند و وجود آنها میدان الکتریکی را به گونه ای تغییر می دهد که بارهای الکتریکی هم علامت از این قسمت دفع شوند .

د (ذرات معلق هادی یا عایق بر روی سطح خارجی عایق و خصوصاً در نزدیکی الکترودها جمع شده و باعث پایین آمدن استقامت الکتریکی می گردند .

ه (یکی دیگر از دلایل پایین آمدن استقامت الکتریکی بر روی فصل مشترک دو عایق جامد و گاز ، وجود رطوبت هوا و پولاریزه شدن و نهایتاً یونیزه شدن آب می باشد. در

صورتی که رطوبت گاز تاحد نقطه اشباع بالا رود، استقامت الکتریکی بر روی فصل مشترک دوعایق جامد و گاز کاهش می یابد. این اثر را تاحدی مرتبط با پولاریزاسیون و سپس یونیزاسیون آب میدانند . پولاریزاسیون و یونیزاسیون آب نیز باعث جمع شدن بارهای الکتریکی در نزدیکی الکترودها و تغییر شکل میدان الکتریکی می گردد . بدیهی است که در مورد ولتاژ ضربه فرصت کافی برای یونیزاسیون و احتمالاً پولاریزاسیون وجود ندارد . در نتیجه رطوبت در ولتاژ ضربه و در مورد تخلیه سطحی اثر کمی دارد .

در تجهیزات فشار قوی وجود پایه های عایقی لازم و ضروری است . در پست های SF_6 هادی در وسط یک لوله قرارداد و بین هادی و لوله پایه هایی قرار می گیرند که نگهدارنده هادی هستند . خطوط فشار قوی توسط مقره های پایه ای یا مقره های آویزی در هوا نگاه داشته می شوند و در بسیاری موارد دیگر نیز پایه های عایقی به چشم می خورند . این پایه ها باید به گونه ای ساخته شوند که تخلیه الکتریکی بر روی سطح آنها صورت نگیرد . یعنی بایستی استقامت پایه در حدود استقامت الکتریکی فاصله هوایی یا فاصله گاز بدون عایق جامد باشد . به همین منظور به پایه و مقره شکل مخصوصی می دهند که در شرایط مختلف متفاوت است.

منظور از طول خزندگی کوتاهترین طول منحنی بین دو الکتروود است که بر روی سطح خارجی پایه قرارداداشته باشد . برای افزایش طول خزندگی در صفحه عایق در پست های گازی می توان عایق را به صورت مورب قرارداد . این صفحه عایق تمامی سطح بین هادی و لوله را در پست گازی می پوشاند و در نتیجه لوله حاوی گاز SF_6 در جهت طولی به دو

قسمت تقسیم می شود و می توان گاز یک قسمت را خالی یا پر کرد بدون آنکه گاز در قسمت دیگر تخلیه شود .

در صورتی که طول خزندگی بیشتری لازم باشد ، بر روی سطح عایق بر آمدگی و فرورفتگی هایی تعبیه می شود . برای مقره هایی که در هوای آزاد به کار می روند آلودگی خیلی بیشتر بوده و در مواقع بارانی یا رطوبت زیاد هوا ، سطح مقره نیز مرطوب می گردد . لذا شکل چترها برای جلوگیری از تخلیه سطحی بسیار مهم است . اغلب سطح بالای چتر از آلودگی پوشیده می شود . اگر آلودگی را هادی فرض کنیم ، فاصله هوایی بین الکترودها بر اثر آلودگی کوتاه می گردد .

افت ولتاژ در طول مقره به مقاومت سطح عایق بستگی دارد . در آن قسمت که مرطوب و کثیف است ، شدت میدان الکتریکی کم و در قسمت تمیز و خشک شدت میدان الکتریکی زیاد است . در نتیجه در قسمت های تمیز و خشک شکست الکتریکی واقع می گردد . پس از بروز شکست ولتاژ در این قسمتها ، تقسیم ولتاژ یکنواخت می شود و یک جریان نشتی از سطح مقره عبور می نماید . و باعث گرم شدن آلودگی مقره می گردد . مقاومت الکتریکی این آلودگی بر اثر گرم شدن کم می شود ، زیرا رطوبت و آلودگی تشکیل الکترولیت می دهند و مقاومت الکترولیت با ازدیاد درجه حرارت کم خواهد شد . جریان نشتی بدو افزایش می یابد ولی بر اثر گرم شدن بیشتر و خشک شدن سطح خارجی مقره جریان نشتی کم می شود . خشک شدن سطح مقره در همه جا یکنواخت نیست . چرا که بعضی قسمتها زودتر از سایر قسمتها خشک می شود . در این قسمتها

شدت میدان الکتریکی افزایش یافته و جرقه های شدیدتری تولید می گردد و ممکن است منجر به شکست کامل شود . گاهی نیز مقره کماکان استقامت می نماید .

استقامت الکتریکی مقره در مقابل ولتاژ با لایه آلودگی روی سطح مقره رابطه دارد . قسمت مرطوب و آلوده همانند یک مقاومت سری در برابر قوس الکتریکی که در قسمت خشک پدید می آید ، عمل می نماید . بدیهی است اگر این مقاومت بزرگ باشد قوس روشن نمی ماند و خاموش خواهد شد ولی چنانچه مقاومت مذکور کوچک باشد قوس الکتریکی به سوختن ادامه می دهد . به همین جهت در مواردی که میزان آلودگی و یا رطوبت بر روی سطح مقره زیاد باشد شکست الکتریکی رخ خواهد داد چرا که مقاومت سری شده با قوس الکتریکی به اندازه کافی کوچک است .

جریان در مدت پنج ثانیه اول افزایش یافته است . پس از آن بر اثر خشک شدن بعضی قسمتها و افزایش مقاومت ، جریان کم و قوس الکتریکی خاموش شده است . در زمان بین ۵ و ۶ ثانیه جریان کاهش یافته و تخلیه روشن داریم . در این نوع تخلیه جریان در حین عبور از صفر کاملاً قطع و سپس مجدداً شروع می گردد . از ثانیه پانزدهم به بعد جریان کاملاً کوچک و سپس منقطع گردیده است . از دقیقه پنجم به بعد تخلیه های ضعیفی هر از چند گاه مشاهده می گردد که سرانجام با گرم شدن و خشک شدن مقره پایان می پذیرد . در مواردی نیز مقره تحمل نمی آورد.

در کناره های خلیج فارس به دلیل وجود املاح و به جهت آنکه در تابستان باران نمی بارد ، سطح مقره رایک لایه خاک همراه با نمک می پوشاند . در صورتی که به دلیلی رطوبت هوا بالا برود ، این لایه مرطوب و تبدیل به هادی می گردد . معمولاً این لایه هادی

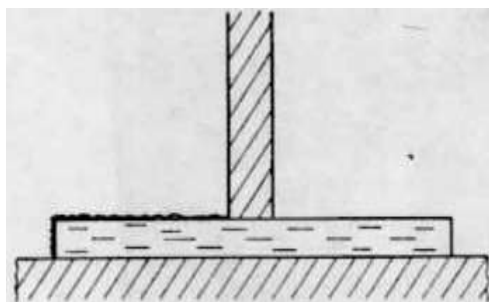
مرطوب بر اثر جریان گرم و خشک می شود . به همین دلیل اگر خط مدتی خاموش شود و مقره ها سرد شوند و شبنم بر روی آنها بنشینند ، اتصال مجدد خط مشکل می گردد . در کناره های بحر خزر به جهت آنکه اغلب باران می بارد مشکل چندانى نخواهیم داشت . چرا که رطوبت به تنهایی قابلیت هدایت الکتریکی کمی دارد . اساساً زمانی مشکل پیش می آید که رطوبت با آلودگی و خصوصاً املاح معدنی همراه باشد . مثلاً در کویر ایران اگر چه خاک دارای نمک است ، لکن رطوبت اغلب خیلی کم است و به همین دلیل مشکل کمتر پیش می آید .

ذکر این نکته که نیز حائز اهمیت است که انواع آلودگی ناشی از صنایع و مواد شیمیایی نیز ممکن است مشکلاتی به همراه بیاورند . به همین جهت آلودگی محیط درجه بندی شده و بسته به میزان آلودگی محیط ، طول خزندگی مقره به طور مناسب انتخاب می شوند . البته طول خزندگی به تنهایی تعیین کننده نمی باشد و شکل چتر و زاویه آن نیز حائز اهمیت است .

در بعضی موارد سطح خارجی مقره را با گریس سیلیکون می پوشانند . گریس مذکور اطراف ذرات آلودگی را گرفته و مانع رسیدن رطوبت به آنها می شود .

۱۰-۳-۲- تخلیه خزنده

تخلیه خزنده همان تخلیه سطحی است. ولی الکترودها و عایق جامد طوری قرار گرفته اند که شدت میدان الکتریکی بر روی سطح عایق جامد بشدت افزایش می یابد . شکل (۲۴) دو الکتروود و عایق مربوطه را همراه با مسیر تخلیه خزنده نشان می دهد . چنین حالتی اغلب در عمل پیش می آید .



شکل (۲۴) - عایق و دو الکتروود و تخلیه خزنده

اختلاف این حالت با تخلیه سطحی در آن است که در تخلیه سطحی خطوط هم پتانسیل عمود بر فصل مشترک دو عایق جامد و گاز بودند ، ولی در تخلیه خزنده خطوط هم پتانسیل در داخل عایق جامد که معمولاً دارای ضریب دی الکتریک بزرگتری است ، تقریباً به صورت موازی با فصل مشترک دو عایق جامد و گاز هستند و در موقع خروج از عایق جامد ، تقریباً عمود بر فصل مشترک دو عایق می باشند. ضمناً گرادیان ولتاژ یا شدت میدان الکتریکی، در اطراف الکتروود و بر روی سطح فصل مشترک دو عایق بسیار بزرگ است . ولی در قسمتهای دیگر شدت میدان الکتریکی کم می باشد .

بزرگ شدن شدت میدان الکتریکی بر روی فصل مشترک دو عایق از یک طرف و ضعف استقامت الکتریکی در فصل مشترک دو عایق از طرف دیگر ، باعث به وجود آمدن تخلیه جزئی بر روی فصل مشترک دو عایق می گردد . در تخلیه جزئی، مقداری بار الکتریکی هم علامت با ولتاژ الکتروود ، بر روی سطح عایق جمع می شود . در نتیجه بدواً از شدت میدان الکتریکی کاسته شده و دیگر تخلیه جزئی انجام نمی شود . در ولتاژ متناوب ، با تغییر علامت ولتاژ ، شدت میدان الکتریکی به دلیل این بارها افزایش می یابد که در نتیجه تخلیه جزئی نیز بیشتر می گردد . در حقیقت از یک طرف به دلیل شکل خاص الکتروودها گرادیان ولتاژ در سطح عایق بزرگ است و از طرف دیگر بارهای الکتریکی که از

نیم پریود قبل بر روی سطح عایق قرار گرفته اند، باعث افزایش بیشتر شدت میدان الکتریکی می شوند .

در ولتاژ دائم مقداری بار الکتریکی از سطح عایق که دارای قابلیت هدایت الکتریکی بهتری است به اطراف منتشر شده و بر روی سطح عایق جامد قرار می گیرد . به همین جهت تخلیه جزئی در ولتاژ دائم به چشم نمی خورد مگر آنکه ولتاژ خیلی زیاد یا در حال افزایش باشد . در ولتاژ دائم قابلیت هدایت الکتریکی سطح عایق و زمان کافی برای حرکت بار الکتریکی در بهبود تقسیم ولتاژ مؤثر هستند و از شدت میدان می کاهند .

تخلیه خزنده بر روی فصل مشترک دو عایق شکلهای بسیار زیبایی را به وجود می آورد که به نام کاشف آن شکلهای لیشتنبرگ خوانده میشوند .



شکل (۲۵)- شکلهای لیشتنبرگ در هوا (ولتاژ ضربه مثبت)

باید توجه داشت که شکلهای لیشتنبرگ به ازای ولتاژ ها ضربه مثبت و منفی متفاوت هستند و ابعاد آنها در ولتاژ ضربه بستگی به دامنه ولتاژ دارد . در بدست آوردن این شکلهای ، الکتروود صفحه به زمین و الکتروود سوزن به منبع ولتاژ با علامت مورد نظر وصل است . این شکلهای ، در فصل مشترک دو عایق جامد و مایع (روغن) نیز به وجود می آیند . در

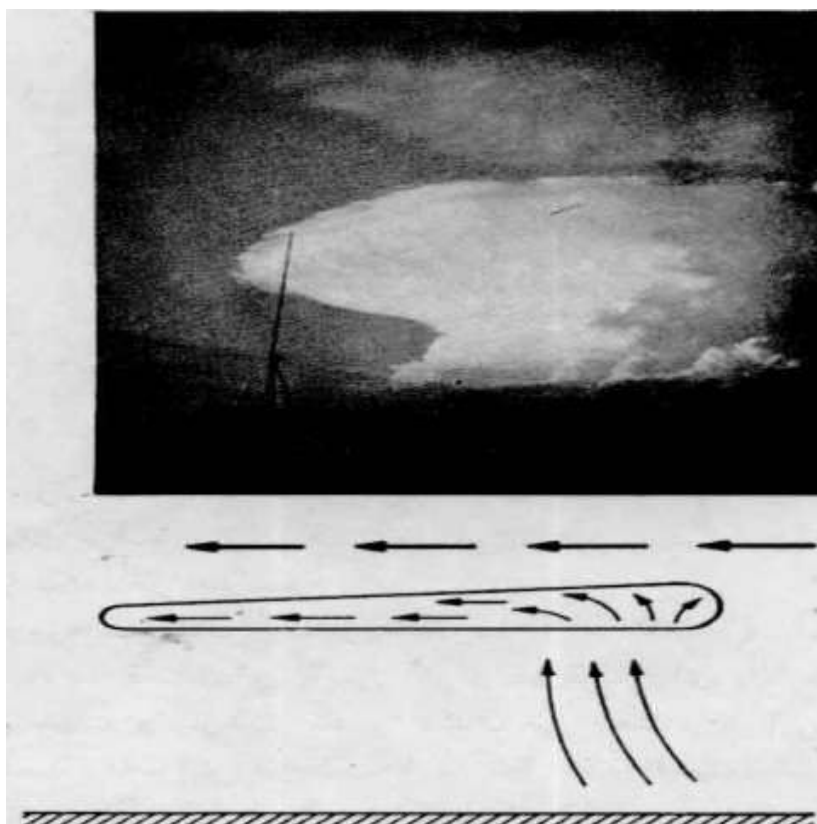
صورتی که بر روی فصل مشترک دو عایق مانعی مانند یک دیواره وجود داشته باشد ، شکل های لیشتنبرگ از آنها عبور نمی نماید .

نکته جالب در تخلیه خزنده این است که در بسیاری از موارد این پدیده موجب سوختن مواد عایق جامد می گردد.مثلا اگر عایق جامد از جنس فیبراستخوانی، کاغذ، چوب و پلی مرها و مانند آن باشد، تخلیه خزنده سطح عایق را سوزانده و به اصطلاح زغال می نماید.این قسمت زغال شده هم دارای شکلهای لیشتنبرگ می باشد.قسمت زغال شده دارای قابلیت هدایت الکتریکی بیشتری است و پتانسیل الکتروود متصل به آن را به اطراف منتقل می نماید.نوک چنین مسیری به صورت یک الکتروود سوزنی عمل نموده ولذا از این نقطه شکلهای جدید لیشتنبرگ به وجود می آیند و به این ترتیب تخلیه بر روی سطح عایق جامد می خزد و چنانچه زمان کافی وجود داشته باشد نهایتا تخلیه کامل به وجود آمده و باعث سوختن عایق دستگاه می گردد.

۱۱-۳-۲- برق آسمان (صاعقه)

برق آسمان به دلیل صدماتی که می تواند به انسان ، ساختمانها ،تجهیزات و حیوانات وارد نماید ، حائزاهمیت است . از طرف دیگر این پدیده به خودی خود نیز جذاب و زیباست. برای پیدایش این پدیده طبیعی دو عامل نقش اساسی دارند . یک عامل حرکت هوا خصوصاً از سطح زمین به طرف بالامی باشد و عامل دیگر وجود رطوبت است . حرکت هوا یا باد به طرف بالا ممکن است ناشی از گرم شدن سطح زمین بر اثر تابش آفتاب بوده و یا بدلیل حرکت لایه های هوا در جهت افقی و صعود آنها در دامنه کوه باشد .رطوبت هوا ممکن است در اثر تبخیر آب در سطح زمین و یا نفوذ هوای مرطوب جانبی باشد . هوای

گرم و مرطوب در حین صعود با هوای سردی که از طرف بالا به سمت پایین می آید در تماس بوده و سرد می شود . ضمن آنکه به جهت کاهش فشار در ارتفاعات نیز درجه حرارت هوا پایین می آید .



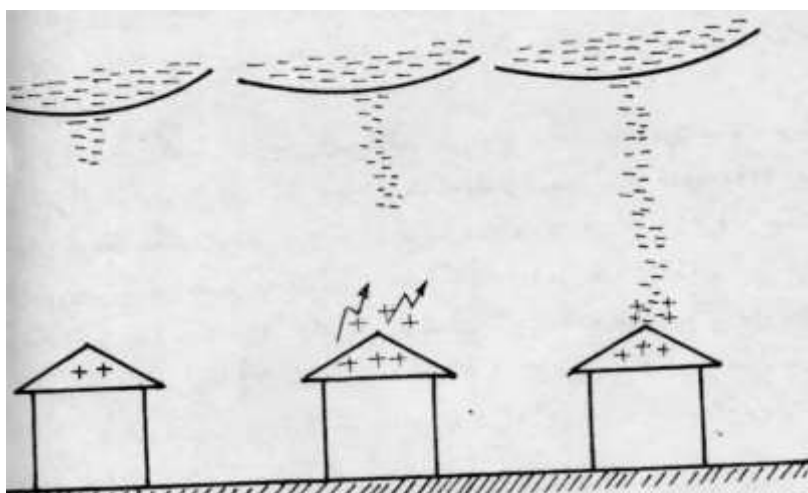
شکل (۲۶)-ابر کومولوس و چتر آن بر اثر صعود هوای مرطوب و سرد شدن آن به وجود می آید.

۱-۱۱-۳-۲- شکل گرفتن صاعقه

برای شروع و شکل گرفتن صاعقه لازم است شدت میدان الکتریکی در یک نقطه به چندین کیلو ولت بر سانتیمتر برسد . در این صورت هوا در میدان الکتریکی قوی مذکور یونیزه می شود و یک مسیر هادی نسبتاً کوتاه در اطراف این نقطه به وجود می آید . از آنجا که بارهای الکتریکی هم علامت یکدیگر را دفع می کنند، قسمتی از بار الکتریکی از این مسیر هادی عبور کره و در قسمت جلو آن جمع می شود . در این حالت می توان چنین تصور کرد که یک سر میله هادی وارد ابر شده و سر دیگر آن خارج از ابر آزاد می

باشد . وجود بارهای الکتریکی جمع شده در انتهای این مسیر هادی باعث بوجود آمدن شدت میدان الکتریکی قوی در انتهای آن می گردد . لذا هوای اطراف این نقطه یونیزه شده و مسیر هادی قدری طولانی تر می شود . پیشرفت مسیر هادی یا کانال هادی با سرعت متوسط ۳۰۰ کیلومتر در ثانیه می باشد. ولی این پیشرفت یکنواخت نیست. بلکه صاعقه مقداری از مسیر را با سرعت طی کرده و بعد برای مدتی متوقف می گردد . و این عمل چندین بار تکرار می شود.

پس از آنکه این کانال هادی به حد کافی به زمین نزدیک شده ، میدان الکتریکی در قسمتهای اجسام نوک تیز بر روی زمین ، نظیر درختان یا ساختمانها و دکل های بلند، افزایش یافته و لذا هوا در این نواحی یونیزه می گردد . در نتیجه یک کانال هادی نیز از طرف زمین به سوی کانال هادی که از ابر تا زمین امتداد یافته است، پیشرفت می نماید . سرانجام این دو کانال به هم رسیده و از این مسیر بار الکتریکی ابر به زمین تخلیه می شود . نور و صدای شدید رعد و برق در این مرحله به وجود می آید . کانال هادی قبل از رسیدن به زمین و عبور از جریان اصلی نور کمتری را دارا می باشد .



شکل (۲۷)-پیشرفت کانال هادی به طرف زمین و یونیزه شدن هوا در نقاط نوک تیز و مرتفع بر روی سطح

زمین

کانال هادی، قبل از رسیدن به زمین، مانند یک میله نوک تیز عمل می نمایند و در انتهای آن شدت میدان الکتریکی قوی به وجود می آید. جهت پیشرفت کانال به صورت یک خط مستقیم نمی باشد، بلکه به دلیل اختلاف در درجه حرارت، وجود بارهای الکتریکی در فضا و غیره کانال مذکور چندین بار شکسته شده و ممکن است به چند شاخه تقسیم شود. البته شاخه ای که در نهایت با کانال بالا رونده از زمین برخورد کرده و مسیر تخلیه را پدید می آورد کانال اصلی خواهد بود و قسمت اعظم بار الکتریکی از این کانال تخلیه می شود.

در حدود ۹۰ درصد از موارد بار الکتریکی صاعقه منفی است. قطر کانال اصلی صاعقه به چند سانتیمتر و قطر کرونا ی اطراف کانال به ده متر می رسد البته تعداد دفعاتی که صاعقه بین ابر و ابر به وجود می آید خیلی بیشتر از تعداد دفعاتی است که صاعقه بین ابر و زمین پدید می آید.



شکل (۲۸)-صاعقه با دو کانال اصلی

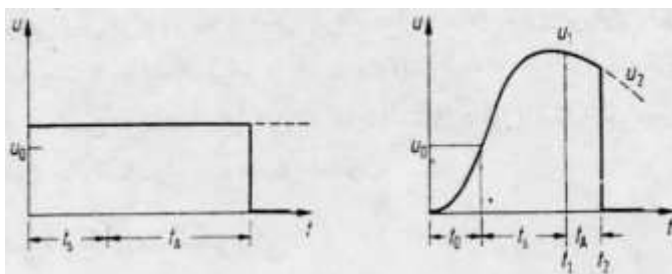
۴-۲- تأخیر در شکست الکتریکی

تخلیه الکتریکی احتیاج به زمان دارد . چرا که از یک طرف باید الکترونهايي ، به دليل عوامل خارجي ، در فاصله بين دو الكتروء به وجود بيابند و از طرف ديگر مدت زماني لازم است تا بعضي از اين الكترونها شرايط لازم را يافته و بهمن الكتروني را ايجاد نمايند . ادامه مسير بهمن الكتروني تا برقراري قوس الكتريكي بين دو الكتروء نيز با سرعتي محدود انجام مي گيرد . در مورد ولتاژ دائم يا متناوب كه ولتاژ بتدريج بالا برده مي شود فرصت كافي براي به وجود آمدن الكترونهاي اوليه ناشي از عوامل خارجي وجود دارد. همچنين سرعت پيشرفت بهمن الكتروني و تبديل آن به تخليه كامل نسبت به سرعت بالا رفتن ولتاژ بسيار سريع است . به طوري كه اصولاً متوجه تأخير در شكست الكتريكي نمي شويم . ولي در مورد ولتاژ ضربه يعني ولتاژي كه فقط مدت كوتاهي وجود دارد ، اين تأخير بخوبي قابل ملاحظه است . فاصله زماني بين اعمال ولتاژ پله تا شكست كامل ولتاژ را تأخير زماني شكست مي نامند .

اين زمان از دو قسمت تشكيل مي گردد. و نخستين قسمت زمان بين اعمال ولتاژ پله و به وجود آمدن اولين الكترون است كه باعث شروع تخليه مي گردد . اين زمان را زمان تأخير آماري مي نامند . اين زمان كاملاً اتفاقي است . ضمناً هريك از الكترونها نمي تواند باعث به وجود آمدن بهمن الكتروني گردند. شرط ديگر ، وجود مسير آزاد كافي است و الكترونهاي بعدي نيز ممكن نتوانند بهمن الكتروني را آغاز نمايند . مقصود از تأخير آماري ، زمان لازم براي به وجود آمدن اولين الكتروني است كه نهايتاً باعث شكست الكتريكي خواهد شد .

زمان دیگر، زمان بین بوجود آمدن اولین الکترون است که نهایتاً قادر به ایجاد شکست باشد، تا لحظه ای که شکست انجام گرفته و ولتاژ افت می نماید. این زمان را زمان شکل گیری تخلیه می نامند.

در شکل (۲۹ الف) یک ولتاژ پله ای نشان داده شده است. در این شکل U_D ولتاژی است که در صورت وجود زمان کافی سرانجام به شکست منتهی خواهد شد. ولتاژ اعمال شده قدری بیشتر از U_D است. زمان تأخیر آماری و زمان ساخت را به ترتیب با t_A و t_S نشان می دهند. این دو زمان بستگی به دامنه ولتاژ دارند و هرچه ولتاژ بیشتر باشد این زمانها و در نتیجه زمان تأخیر شکست کوتاهتر هستند.



شکل (۲۹) - (الف) زمان تأخیر شکست در ولتاژ پله ای و (ب) در ولتاژ ضربه

در شکل (۲۹ ب) یک ولتاژ ضربه را می توان مشاهده نمود. زمان تأخیر آماری از لحظه ای شروع می شود که دامنه ولتاژ به مقدار U_D رسیده باشد. زمان ساخت در مورد انواع مختلف تخلیه متفاوت است. در مورد صاعقه زمان ساخت به چند میلی ثانیه می رسد. در مورد تخلیه لیدر نیز زمان ساخت طولانی است و به عوامل مختلف که در پیشرفت کانال تخلیه لیدر مؤثر هستند، بستگی دارد. در مورد تخلیه استریم این زمان تقریباً ثابت می باشد. زمان ساخت با فاصله بین الکترودها و غیر یکنواختی میدان الکتریکی افزایش می یابد.

زمان تأخیر آماری در مورد گازهای الکترونگاتیو ، نظیر گاز SF_6 نسبتاً طولانی است و لذا پراش ولتاژ شکست برای ولتاژ ضربه در این گازها بزرگ است . هوا نیز به دلیل وجود گاز اکسیژن ، مختصری الکترونگاتیو می باشد . در گازهای الکترونگاتیو الکترونیهای بوجود آمده که بر اثر عوامل خارجی پدید آمده اند ، بر روی مولکول های گاز قرار گرفته تشکیل یون منفی می دهند . در نتیجه الکترون برای شروع تخلیه در این گازها کم است .

با روشن کردن فضای بین الکترودها به کمک نور ماوراء بنفش و یا به کمک مواد رادیو اکتیو می توان الکترونیهای بیشتری را در فضای بین دو الکترودها به وجود آورد . البته هرچه حجم بین دو الکترودها بیشتر باشد احتمال وجود الکترونیهای بیشتری در این فضا می رود . لذا در مورد اندازه گیری ولتاژ شکست به کمک جفت کره ، در صورتی که قطر و فاصله جفت کره و در نتیجه فضای بین آنها کوچک باشد، لازم است کره ها توسط نور ماوراء بنفش روشن شوند . در مورد جفت کره با قطر بزرگ در حدود ۵۰ سانتیمتر و بیشتر احتیاج به تابش نور نیست. در کشور هایی که مقررات پیچیده ای در مورد مواد رادیو اکتیو ندارد، در داخل کره ها مقداری مواد رادیو اکتیو قرار می دهند.

در مورد الکترودهای سوزن - صفحه یا سوزن - سوزن زمان تأخیر آماری بزرگتر است . چرا که الکترونیهای اولیه باید در نوک سوزن که دارای شدت میدان الکتریکی کافی است به وجود آیند و وجود الکترون در قسمتهایی که میدان الکتریکی ضعیف است نتیجه ای ندارد . همچنین در میدانهای غیر یکنواخت زمان ساخت طولانی تر است . زیرا ابتدا شرط تخلیه خود به خود در همه نقاط وجود ندارد . پس از به وجود آمدن اولین بهمن های

الکترونی و تجمع بارهای فضایی و تغییر شکل میدان ، ممکن است شرایط تخلیه خود به خود در دیگر نقاط نیز به وجود بیاید و شکست کامل صورت پذیرد .

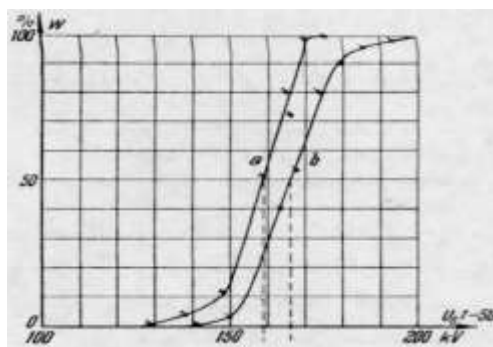
۱-۴-۲- احتمال شکست در ولتاژهای ضربه

آزمایش : دو الکتروود در فاصله معینی از یکدیگر قراردارند . بین این دو الکتروود به دفعات ولتاژ ضربه با شکل موج معین اعمال می کنیم . بدین ترتیب که دامنه ولتاژ را تغییر می دهیم و مواردی را که در آنها شکست انجام گرفته است ، با ذکر دامنه ولتاژ ، ثبت می نماییم . برای ولتاژهای بسیار کم شکست هیچگاه انجام نمی پذیرد و برای ولتاژهای بسیار بالا هر بار که ولتاژ اعمال شود ، شکست صورت می گیرد. در این بین ولتاژهایی وجود دارند که بروز شکست در آنها قطعی نیست و با احتمال خاصی صورت می پذیرد .

U	130	140	150	162	166	174	180	185	194
n	0	1	3	32	42	60	72	76	78
%	0	1,25	3,75	40	52,5	75	90	95	97,5

جدول (۲) - نتیجه آمارشکست برای الکتروودهای سوزن-سوزن در هوا با ولتاژ ضربه استاندارد مثبت. تعداد کل دفعات برای

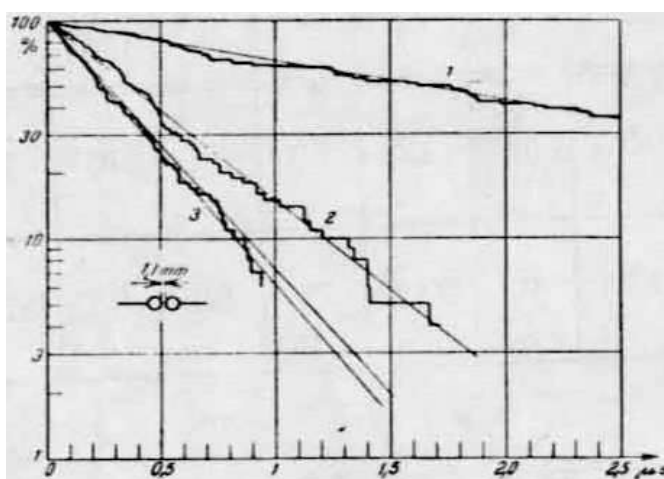
هر ولتاژ ۸۰ مرتبه بوده است. ولتاژ U به کیلوولت، تعداد دفعات شکست n و درصد دفعات شکست در سطر ۳



شکل (۳۰) - احتمال شکست در هوا برای الکتروودهای سوزن-سوزن با فاصله ۱۷۰ میلیمتر و ولتاژ ضربه استاندارد با سوزن

مثبت (a) و سوزن منفی (b)

برای چنین ولتاژهایی آزمایش را بکرات تکرار می کنیم و تعداد دفعاتی را که به ازاء یک دامنه ولتاژ شکست واقع گردیده است و تعداد دفعاتی که برای همین دامنه ولتاژ شکست واقع نشده است را یادداشت می کنیم . در این آزمایش دو سوزن به فاصله ۱۷۰ میلیمتر در هوا با فشار و درجه حرارت عادی (نرمال) قرار داشته اند . ولتاژ اعمال شده موج ضربه استاندارد با علامت مثبت بوده است . از این آزمایش نتیجه میشود که احتمال شکست در این الکترودها ، با توجه به فشار و درجه حرارت ، برای ولتاژ ضربه استاندارد با دامنه ۱۵۰ کیلو ولت ۳/۷۵ درصد و برای ولتاژ ۱۶۲ کیلو ولت ۴۰ درصد است در حالی که برای ولتاژ ۱۳۰ کیلو ولت و کمتر احتمال شکست نزدیک به صفر درصد و برای ولتاژ ۲۰۰ کیلو ولت و بیشتر احتمال شکست نزدیک به ۱۰۰ درصد می باشد .



شکل (۳۱) - تقسیم زمان تاخیر شکست برای الکترودهای کره ای از جنس مس در هوا با فاصله ۱/۱ میلیمتر

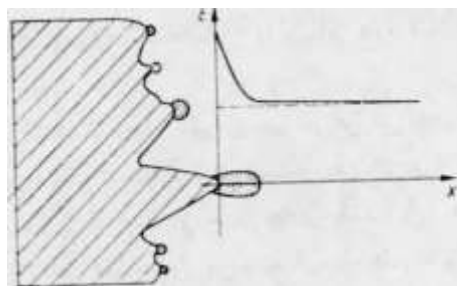
منحنی ۱- دامنه ولتاژ ۱۴۰ درصد ولتاژ شکست بلند مدت

منحنی ۲- دامنه ولتاژ ۱۶۰ درصد ولتاژ شکست بلند مدت

منحنی ۳- دامنه ولتاژ ۲۰۰ درصد ولتاژ شکست بلند مدت

۲-۴-۲- اثر نا همواری سطح الکترودها در ولتاژ شکست

سطح الکترودها معمولا کاملاً صاف و یکنواخت نمی باشند و با توجه به روش هایی که در تولید الکترودها وجود دارد، سطح خارجی آنها دارای پستی و بلندی است که مقدار آن نمیتواند کمتر از ۳ میکرومتر باشد. از طرف دیگر بر روی سطح خارجی الکترودها ذرات غبار می نشینند و این ذرات غبار نیز میتواند باعث عدم یکنواختی میدان الکتریکی بر روی سطح الکترودها می گردند.



شکل (۳۲)-افزایش شدت میدان الکتریکی بر روی سطح خارجی الکترودها به دلیل ناهمواری آن. میدان بدون

در نظر گرفتن ناهمواری بر روی سطح الکترودها به صورت خط چین و میدان با در نظر گرفتن ناهمواری بر روی

سطح الکترودها با خط ممتد رسم شده است.

شدت میدان الکتریکی در نزدیکی سطح کاتد به دلیل ناهمواری آن افزایش می یابد. این افزایش میدان سبب می گردد که در محدوده کوچکی شدت میدان الکتریکی از حد معینی که باعث یونیزاسیون در گاز میگردد بیشتر شود، لذا در این قسمت تخلیه جزئی انجام می گیرد. در نتیجه تخلیه جزئی، شدت میدان الکتریکی در آن قسمت کاهش می یابد، ولی به دلیل به وجود آمدن ذرات باردار، در مجموع، ولتاژ شکست کاهش می یابد. چنانچه انرژی منبع کم باشد در نتیجه شکست الکتریکی سطح خارجی الکترودها تا حدودی هموار می گردد. یعنی نوکهای تیز سطح الکترودها که تخلیه الکتریکی نیز به آنها منتهی می شود، بر اثر تخلیه از بین می روند، لذا گاهی ملاحظه می شود که پس از چند تخلیه، ولتاژ شکست قدری افزایش می یابد. به همین دلیل در مورد اندازه گیری ولتاژ با

کمک جفت کره ، مناسب است ابتدا چند تخلیه انجام گیرد تا سطح الکتروود تمیز و همواره گردد و به اصطلاح شکل یا حالت بگیرد (formation). هرگاه انرژی تخلیه زیاد باشد ، سطح الکتروود در محل تخلیه ، ذوب می گردد و قدری فرو می رود . اطراف این فرورفتگی بر آمدگی هایی به وجود می آید ، در نتیجه سطح الکتروود کاملاً ناهموار شده و باعث کاهش ولتاژ شکست می گردد.

۵-۲- ولتاژ شکست در مخلوط گازها

هوا مخلوطی از ازت ، اکسیژن و گاز کربنیک و مختصری گازهای دیگر است . ولی بواسطه اهمیت هوا به عنوان عایق ، و از آنجا که گازهای تشکیل دهنده هوا تقریباً ثابت می مانند ، هوا به عنوان یک گاز مستقل مورد مطالعه دقیق قرار گرفته است .

جالب توجه این است که وجود مختصری گاز SF_6 ، مثلاً ۲۵ درصد حجم ، استقامت الکتریکی گاز ازت را بسیار بالا می برد ولی وجود مختصری گاز ازت ، مثلاً ۲۵ درصد حجمی ، استقامت الکتریکی گاز SF_6 را چندان پایین نمی آورد.

مخلوط گازهای ازت و SF_6 می تواند برای پایین آوردن نقطه تقطیر گاز SF_6 به کار رود . گاز SF_6 در فشار 5bar و دمای $-30^{\circ}C$ تقطیر می شود. در نتیجه استقامت الکتریکی خوب خود را از دست می دهد . درجه حرارت تقطیر ازت خیلی کمتر از این مقدار است . بنابراین میتوان با اضافه کردن مقداری ازت به گاز SF_6 درجه حرارت تقطیر آن را پایین آورد . درجه حرارت تقطیر به فشار جزئی گاز مربوط می شود . در نقاطی که درجه حرارت محیط بتواند از $-30^{\circ}C$ کمتر شود ممکن است این مسئله اهمیت پیدا کند .

نکته جالب دیگر اینکه در مخلوط بعضی از گازها ، پایین آمدن ولتاژ شکست مدنظر قرار می گیرد . مثلاً اگر مختصری گاز آرگن به گاز نئون اضافه شود ، ولتاژ شکست مخلوط ، از ولتاژ شکست هر یک از گازها به تنهایی کمتر خواهد بود. کم شدن ولتاژ شکست در مخلوط گازهای آرگن و نئون به دلیل امکان یونیزاسیون مرحله ای است . در یونیزاسیون مرحله ای که قبلاً مورد بحث گرفت مولکول های گاز ابتدا در یک برخورد به صورت تحریک شده درآمده و سپس طی برخوردی دیگر انرژی بیشتری کسب کرده و یونیزه می شود .

در این نوع یونیزاسیون تحریک های نیمه پایدار نقش مهمی را ایفا می کنند . مولکول های تحریک شده به حالت نیمه پایدار ، میتوانند مدت طولانی به صورت تحریک شده باقی بمانند . در مخلوط دو نوع گاز ، ممکن است انرژی لازم برای یونیزاسیون مولکول یا اتم گاز اول از انرژی لازم برای تحریک نیمه پایدار مولکول یا اتم گاز دوم کمتر باشد . در این صورت یونیزاسیون میتواند بر اثر برخورد مولکول یا اتم تحریک شده گاز دوم با مولکول یا اتم گاز اول نیز انجام شود .

برای گاز نئون همراه با^۲- ۱۰ درصد گاز آرگن ، ولتاژ شکست با اضافه شدن فشار تغییر قابل ملاحظه ای نمی نماید . از این خاصیت در ساختن لامپ های نئونی و فاز متر و امثال آن استفاده می شود . در چنین لامپی تغییر فشار داخلی لامپ در خط تولید و یا تغییر درجه حرارت در زمان استفاده باعث تغییر شدید در ولتاژ شکست نخواهد شد .

فصل سوم

استقامت الکتریکی گازهای مختلف در GIS

چکیده :

SF_6 یک گاز با خواص عایقی عالی است و معمولاً در تجهیزات عایق - گاز استفاده می شود . هر چیز آن پتانسیل گرم شدن جهانی را دارد . بنابراین توسعه گازهای جدید یا مخلوط گازها برای GIS و GIL شدیداً مطلوب است . آلودگی روی سطح عایق می تواند باعث تغییر شکل میدان و امکان دارد یک کاهش مهمی از استقامت شکست را سبب شود . کاهش دادن مقدار SF_6 استفاده شده ، گازهای CO_2 و N_2 و هوای خشک تست شده اند زیرا که امکان دارد جایگزین SF_6 در رنج فشار از ۰/۱ تا ۱ Mpa شوند رفتارشان تحت تنش های AC و LI تحقیق شده است .

مقدمه :

SF_6 خالص خواص عایقی خوب و خاموش کردن جرقه را دارد . بنابراین در بیشتر تجهیزات اصلی از آن استفاده می شود . به هر حال تعدادی نگرانی های جدی در باره آینده به کارگیری از نقطه نظر زیست محیطی وجود دارد . پتانسیل گرم شدن جهانی SF_6 در آینده مطرح شده که حداقل معادل CO_2 ۲۳/۹۰۰ است. بنابراین SF_6 در کنفرانس کیوتو روی تغییرات آب و هوایی در میان گازهای گلخانه ای طبقه بندی شده است . و آن در اتمسفر گسیل می یابد که باید در آینده کاهش داد . بنابراین شدیداً حالا جایگزین محیط دوستانه را جستجو می کنند .

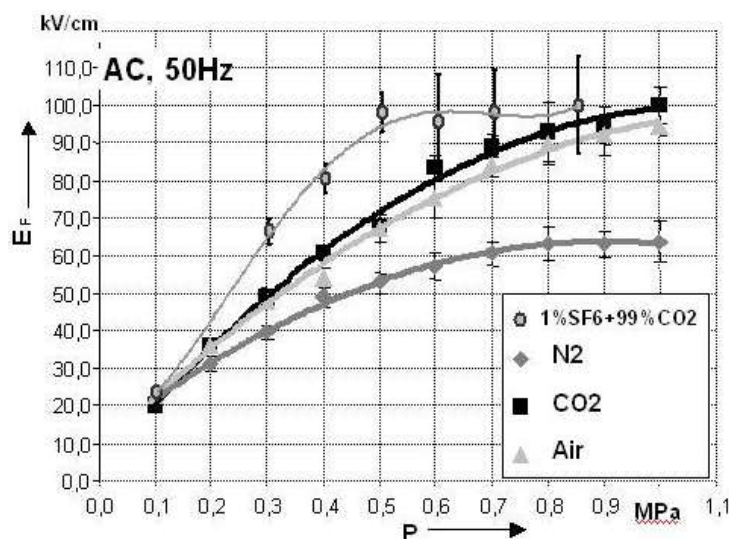
بسیاری تلاشها در مورد خواص عایقی نیتروژن و هوا تحت فشار زیاد صورت گرفته است. آن معلوم شد که نیتروژن خالص پایان خواهد یافت که در طراحی های GIS/GIL که مداوم در سطح عایق نیاز است غیر اقتصادی است. استفاده از مخلوط SF_6/N_2 با مقدار کمی از SF_6 ، استقامت عایقی N_2 را می توانید خیلی افزایش دهد. حتی حالا، مخلوط SF_6/N_2 در GIL با حدوداً ۹۵٪ نیتروژن استفاده می شوند. به هر حال، مخلوط SF_6/N_2 موضوعی هستند به تأثیر شدید بر روی رسانای ذره با افزایش فشار گاز، بعلاوه کاهش مقدار SF_6 است. بنابراین مطالعه حاضر مقایسه مشخصه های شکست این گازها و مخلوط آنها در مورد سطوح مرزی تمیز همچون آلودگی ذره ایی می باشد.

نتایج :

تعیین کردن ولتاژ تخلیه سطحی متوسط و استقامت میدان یک مجموعه از ۱۲ مدل‌های جدا کننده در هر مورد تست تنش داده شده بودند. همه مقادیر استقامت میدان تخلیه سطحی به محاسبه مقادیر پیک از ولتاژ اعمالی با اطمینان ذاتی از فاصله ۹۵٪ مطابق توزیع نرمال فشار گاز معین روی نمودارهای زیر مطابق با فشار مطلق در Mpa برمی گردند.

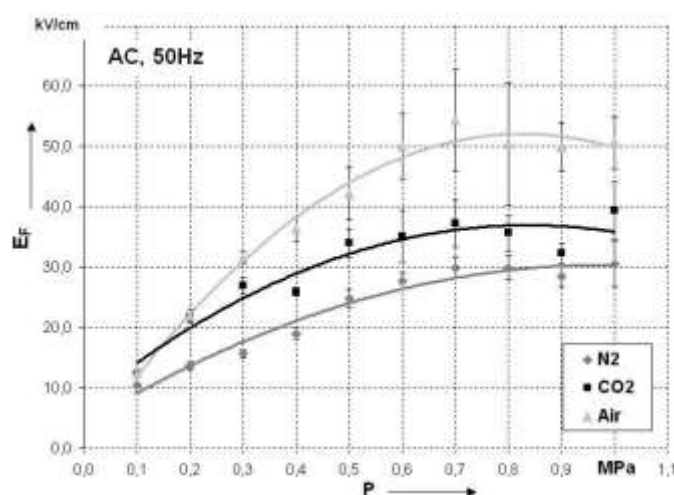
استقامت میدان تخلیه سطحی تخت تنش AC:

استقامت های میدان تخلیه سطحی (با هیچ آلودگی) د ر گازهای عایق زیر : N_2 و Co_2 و هوای فشرده، فشار گاز در شکل ۱ نشان داده شده اند.



شکل ۱- استقامت میدان تخلیه سطحی فشاربرای هوای فشرده N_2 و CO_2

استقامت الکتریکی آرایش دائماً با افزایش فشار صعود می کند. دی اکسید کربن و هوای فشرده نشان داده شده تقریباً هیچ تفاوتی در استقامت الکتریکی آنها نیست. نیتروژن د ر همان رنج فشار از نظر استقامت الکتریکی کمتر از آنها می باشد. در مورد آلودگی ذره فلز یک کاهش زیاد از ولتاژ شکست الکتریکی (حدوداً ۵۰٪) می توان در شکل ۲ مشاهده کرد.



شکل ۲- استقامت میدان تخلیه سطحی فشاربرای هوای فشرده N_2 و CO_2 (با آلودگی ذره ای)

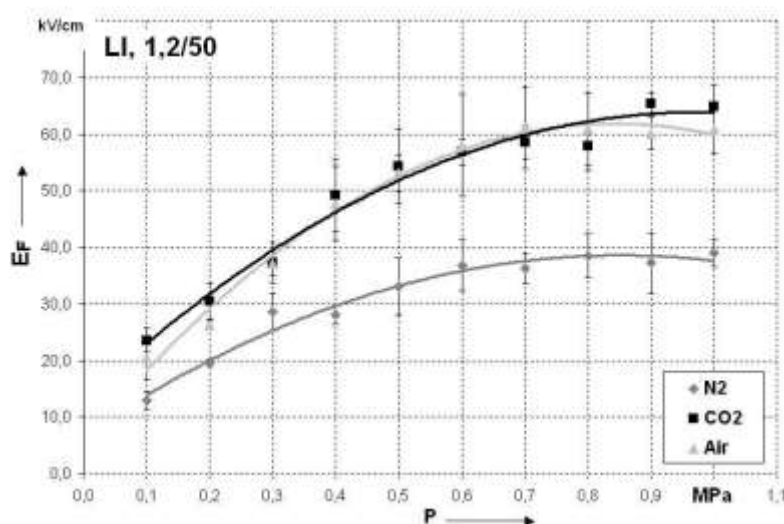
اندازه کاهش در کل به نوع ولتاژ و توزیع میدان در شکاف وابسته است.

از مقایسه مستقیم از شکل ۱ و ۲ نشان می دهند که CO_2 بیشترین کاهش استقامت الکتریکی را در میادین غیر یکنواخت جزئی دارد. علاوه بر این منحنی ها برای CO_2 و هوای فشرده در میادین تغییر شکل داده دیگر بعد از ۰/۶ Mpa صعود نمی کند که آن نتیجه پایداری کرونا است.

استقامت میدان تخلیه سطحی تحت تنش LI:

در طول تنش LI با پلارایته مثبت یک بار سطحی جمع شده روی سطح Spacer آلوده شده به ذره، یک دفعه ولتاژ شروع تخلیه PD- خیلی زیاد می شود و هیچ شکستی رخ نمی دهد.

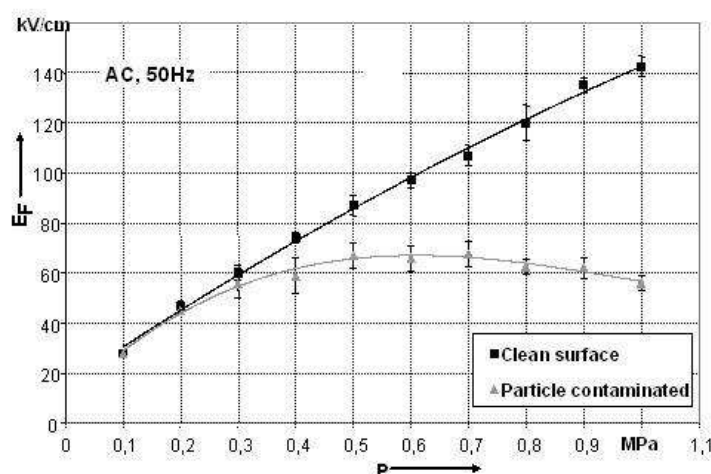
نتایج برای این مورد در شکل ۳ نشان داده شده است که دوباره هماننده تخلیه سطحی هوا و CO_2 را ثابت می کند. به هر حال مقداری افزایش در استقامت تخلیه سطحی در نتیجه بار سطحی موجود وجود دارد.



شکل ۳- استقامت میدان تخلیه سطحی فشار برای هوای فشرده و N_2 و CO_2 (با آلودگی ذره ای)

استقامت الکتریکی در مخلوط SF_6/N_2

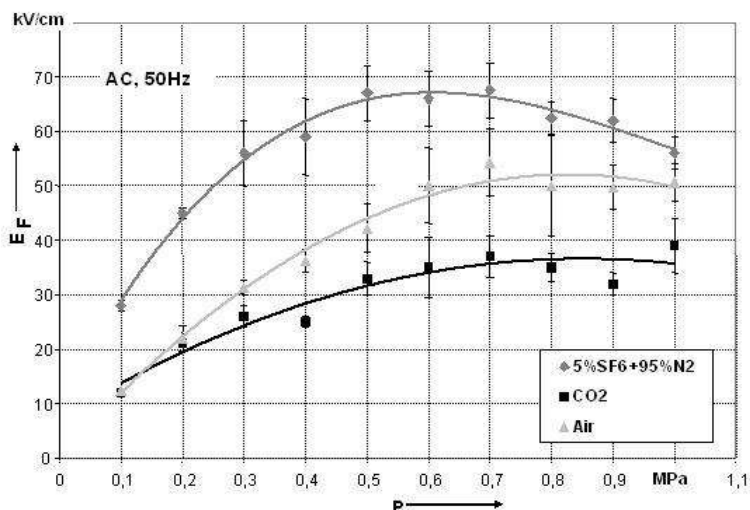
استقامت الکتریکی مخلوط SF_6/N_2 وقتی که ۵٪ حجم را گاز SF_6 گرفته باشد در شکل ۴ نشان داده شده است. آن می تواند به نظر بیاید که SF_6 شامل مخلوط گاز اصلی آزمایش استقامت الکتریکی آنها را در حضور آلودگی ذره کاهش می دهد. مخلوط SF_6/N_2 نشان داده که بیشتر از ۵۰٪ خواص عایقی آن تحت تنش ولتاژ AC در فشارهای بالاتر افت می کند.



شکل ۴- استقامت میدان تخلیه سطحی مخلوط گازهای N_2 ۹۵٪ + SF_6 ۵٪ فشار مطلق

نتایج:

تست ها نشان داد در عایق های گازی مختلف معین کرد استقامت میدان سطحی منظم داده شده است. به طوریکه انتظار داشتیم ولتاژ تخلیه سطحی سرتاسر تمیز Spacer عموماً با صعود فشار گاز افزایش می یافت.



شکل ۵- استقامت میدان تخلیه سطحی مخلوط گازهای $5\% \text{SF}_6 + 95\% \text{N}_2$ فشار مطلق

از میان همه تست گازها مشخص شد که CO_2 بیشترین حساسیت را به آلودگی ذره دارد. در مورد تنش ولتاژ ضربه صاعقه مثبت CO_2 و هوا نشان داده شده تفاوت کمی در رفتار عایقی روی سرتاسر رنج فشار دارند.

نیترژن خالص کمترین استقامت الکتریکی را از میان گازهای ملاحظه شده دارد. کاهش شدید خواص عایقی آن در مقایسه با هوا، که شامل حدوداً ۸۰٪ نیترژن است، در آینده بیشتر تست می گردد. اضافه کردن یک مقدار کمی از SF_6 به نتایج این گازها، استقامت میدان شکست را قابل توجه افزایش می یابد.

عایق SF_6 خالص و مخلوط آن قانوناً در آینده ممنوع خواهد بود، هوای فشرده و یا عایق دی اکسید کربن نشان دادند خودشان را که ممکن است جایگزین شوند. به هر حال بیشترین فشارها به اضافه افزایش یافتن برخورد آلودگی روی عملکرد عایق به پیروز شدن در طراحی دستگاههای آینده دارد.

تأثیر سطوح ناهموار و پوشش روی ولتاژ شکست الکتریکی ضربه در SF_6

چکیده :

سطوح ناهموار سیستم های عایق دار SF_6 یک تأثیر مهم روی ولتاژ شکست مخصوصاً در فشار گاز زیاد دارند . سطوح کوچک نامنظم می تواند ولتاژ شکست را کاهش دهند . ممکن است یک پوشش عایقی در تابع توزیع ولتاژ شکست الکتریکی مطلوب می باشد . مقدار احتمال کم و تأثیر اولین شکست الکتریکی برای طراحی سیستم های GIS مناسب می باشند .

مقاله هایی درباره تابع احتمال ولتاژ شکست الکتریکی الکترودهای آلومینیوم با سطح ناهموار متفاوت و باو بدون پوشش عایقی در SF_6 وجود دارد . یک طرح صفحه - نیم کره در یک SF_6 با فشار 0.5 Mpa تحقیق شده است . نیم کره با پوشش رزین اپوکسی نازک پوشیده شده است . الکتروده صفحه جلا داده شده و بدون پوشش است . سطح ناهموار و ضخامت پوشش متفاوت بودند و توابع فرکانس تجمعی ولتاژ شکست برای ضربه صاعقه مثبت و منفی اندازه گیری شده اند .

مقدمه :

یک گرایش در حال پیشرفت به ساختن سیستم های عایق گاز فشرده وجود دارد از اینرو هدف از این مطالعه بهبود استقامت عایقی گاز با SF_6 می باشد . این مقاله فقط روی عایق گاز تمرکز دارد .

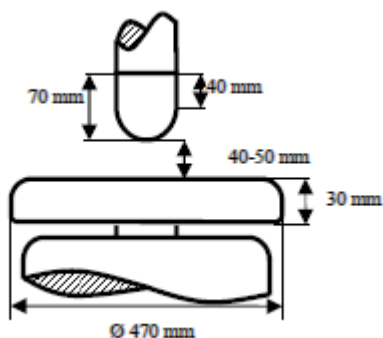
در عمل می توان ولتاژ شکست و قابلیت اطمینان سیستم های عایقی گاز را به وسیله سطح نامنظم کاهش داد .

دانستن آن خوب است که استقامت عایق را می توان بوسیله پوشش الکتروود ها با یک ماده عایقی بهبود داد . مقادیر بهبودی در یک رنج خیلی وسیعی اندازه گیری شده است . یک مقایسه مناسب می توان به وسیله یک ارزیابی آماری از ولتاژ شکست که لازم است برای تعیین تابع توزیع شامل منطقه اطمینان انجام داد . آسیب پوشش که بوسیله نقاط ریشه ایجاد شده اند و تأثیر آن روی شکست های پی در پی به دقت خاص نیاز دارند . از این رو آمارهای اولین معدود شکست ها مطلوب می باشد .

تنظیمات آزمایش :

آرایش الکتروودهای استفاده شده در آزمایش ها در شکل ۱ نشان داده شده است . الکتروودهای صفحه - نیکره از آلومینیوم EN AW ۶۰۶۰ ساخته شده اند . آرایش الکتروود بوسیله ولتاژ ضربه صاعقه استاندارد ($1/2/50 \text{ S } \mu$) که به وسیله یک مولد ضربه صاعقه با 50 KJ در 3 MV ولتاژ بار اعمالی تنش داده می شود . پلا رتیه ولتاژ ضربه صاعقه به پلا رتیه نیم کره بر می گردد . سطح ناهموار متفاوت بوسیله جریان شن تولید می شوند و پارامترهای مقطع ناهموار به وسیله یک روش دقیق اندازه گیری می شود یعنی اینکه عمق ناهمواری R_z از $5 \text{ m } \mu$ تا $50 \text{ m } \mu$ متغیر می باشد . یک رزین اپوکسی برای پوشش مورد استفاده قرار گرفته است . ضخامت پوشش از $50 \text{ m } \mu$ تا $300 \text{ m } \mu$ متغیر است و سطح ناهمواری همیشه بین $R_z = 6 \text{ m } \mu$ و $10 \text{ m } \mu$ پوشش داده شده است .

الکتروود صفحه جلا داده شده ($R_z = 5 \text{ m } \mu$) و بدون پوشش است . الکتروودها تمیز و دریک کشتی تست پر شده با گاز SF_6 در فشار 0.5 Mpa ، فشار مطلق قرار دارند .



شکل ۱- آرایش الکتروود صفحه-نیم کره

ارزیابی اندازه گیرها :

روش A: ولتاژ تست اعمالی را زیاد می کنیم تا تابع فرکانس تجمعی را معین کنیم . ولتاژها ، ولتاژهای ضربه صاعقه مثبت و منفی بودند . ولتاژها در پله های 18KV از یک مقدار تخمینی U_0 بالا برده می شوند تا وقتی که شکست الکتریکی اتفاق بیفتد . هر نمونه هر نمونه شامل ۵۰ عدد شکست بود . تابع فرکانس تجمعی تقریباً تابع توزیع نرمال بود و ۹۵٪ حاشیه اطمینان محاسبه شده بود .

روش B: برای اینکه روی تابع توزیع اولین شکست تحقیق کنیم یک هفت تیر کنترلی



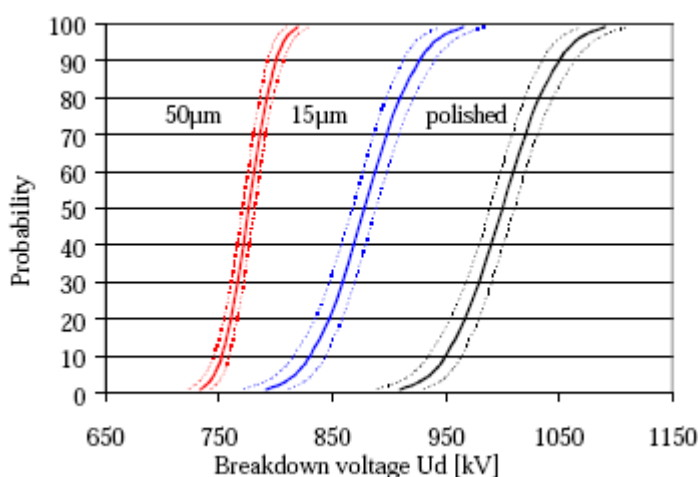
شکل ۲- تفنگ بادی کنترل شده برای تحقیق اولین شکست

بادی جمع می کنیم که ساختمان آن دیده می شود (شکل ۲) . بالاتر از ۸ الکترودیکسان می توان در کشتی تست جمع کرد . یک تخمین از توزیع نرمال یک تعداد شکست معین می توان با ۸ مورد شکست در نمونه انجام داد. بوسیله این تعداد کم از نمونه های تصادفی ۹۵٪ حاشیه اطمینان را وسیعتر می گیریم . یک مقایسه بوسیله استفاده از ناحیه اطمینان امکان پذیر است .

نتایج :

الکترودهای بدون پوشش :

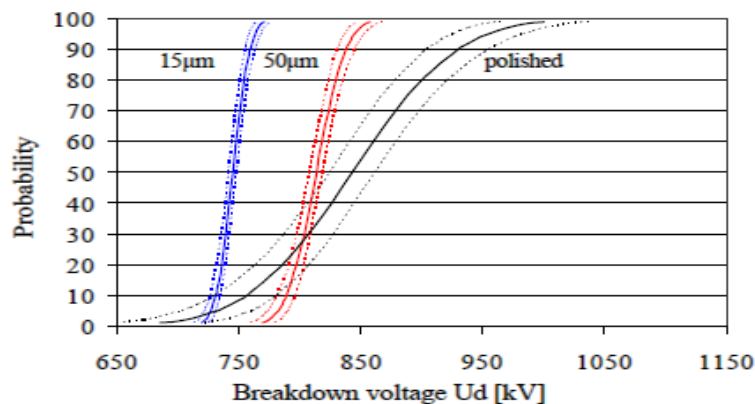
در ولتاژ ضربه صاعقه مثبت ولتاژ شکست الکتریکی ، با یک سطح ناهموارتر کاهش می یابد (شکل ۳) . این با نتایج انتشارات قبلی ثابت است .



شکل ۳- تابع توزیع نرمال با ۹۵٪ حاشیه اطمینان ولتاژ LI-مثبت، متغیر $R_{z,s}=40\text{ mm}$ بدون پوشش

در ولتاژ ضربه صاعقه منفی پایین ترین ولتاژ شکست می تواند در الکترودهای با یک سطح ناهموار $R_z=15\text{ mm}$ پیدا کرد . ولتاژ شکست الکتریکی برای الکترودهای با $R_z=5\text{ mm}$

خیلی مهمتر است . فقط در مقادیر بیشتر از ۵۰٪ استقامت عایقی الکتروود جلا داده شده بیشتر است (شکل ۴) .

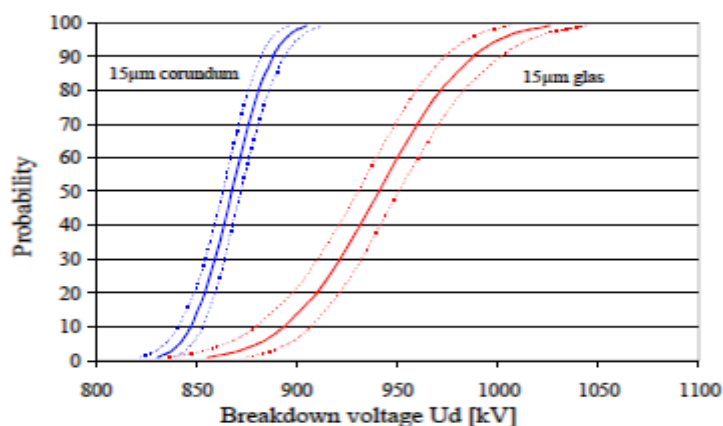


شکل ۴- تابع توزیع نرمال با ۹۵٪ حاشیه اطمینان ولتاژ LI - منفی، متغیر $R_{z,s}=40\text{ mm}$ بدون پوشش

این نتایج با نظریه پدرسون مناسب نبودند . او تصور می کرد که این اثر به وسیله پایداری کرونا سبب می شود .

این همبستگی سطح ناهموار و ولتاژ شکست الکتریکی برای مسیر پلاریته ، همچنین در یک فاصله شکاف $s=50\text{ mm}$ می توان پیدا کرد .

در کنار الکتروود های باد خورده با سنگ سنباده همچنین وزش با مرواریدهای شیشه نیز اعمال شده بود . بر خلاف سطح مشابه ناهموار $R_z=15\text{ m}\mu$ ولتاژ شکست الکتروودهای انفجار شیشه خیلی مهمتر است (شکل ۵) .



شکل ۵- تابع توزیع نرمال با ۹۵٪ حاشیه اطمینان. ولتاژ LI-منفی، متغیر R_z ، $p=0.5$ Mpa، $s=50$ mm، بدون پوشش

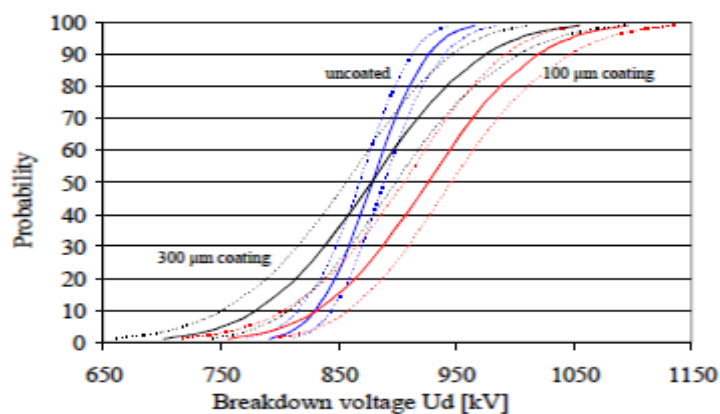
همبستگی بین هیچ پارامتر سطح ناهموار و ولتاژ شکست که بتوان پیدا کرد وجود ندارد. بعد از آزمایش ها ریشه های جرقه تحقیق شده بودند. روی هر الکتروود بدون پوشش ۵۰-۴۵ ریشه جرقه پیدا شد. تقریباً هر شکست الکتریکی ریشه خودش را دارد. (شکل ۶).



شکل ۶-۵۰ ریشه جرقه بعد از ۵۰ شکست الکتریکی بدون پوشش

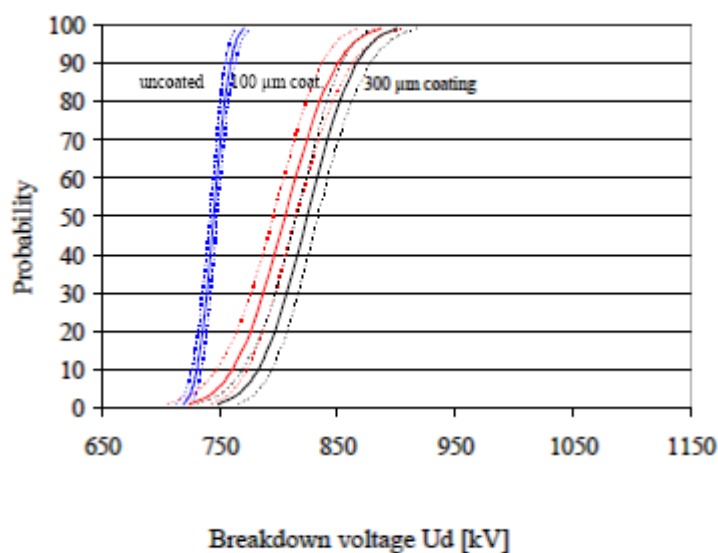
الکترودهای پوشیده شده :

با ولتاژ ضربه صاعقه مثبت یک گسترده آماری بزرگ از مقادیر، سبب شد یک تابع توزیع هموار نسبی برای الکترودهای پوشش دار اندازه گیری شود. مقایسه تابع توزیع الکترودهای بدون پوشش، با پوشش نتایج در بهبود یافتن ولتاژ شکست برای مقادیر بالاتر، در حالی که برای مقادیر کمتر مقدار ولتاژ شکست کاهش یافت (شکل ۷).



شکل ۷-تابع توزیع نرمال با ۹۵٪ حاشیه اطمینان. ولتاژ LI -مثبت، ضخامت پوشش متغیر، $R_z = 15 \text{ m}\mu$ ، پوشش دار

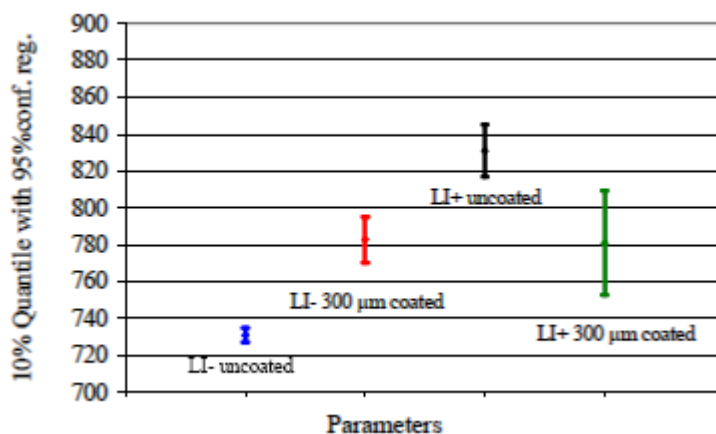
با پوشش دار کردن یک بهبودی مهم در ولتاژ ضربه صاعقه منفی می توان مشاهده کرد (شکل ۸).



شکل ۸-تابع توزیع نرمال با ۹۵٪ حاشیه اطمینان. ولتاژ LI -منفی، ضخامت پوشش متغیر، $R_z = 15 \text{ m}\mu$ ، پوشش دار

نتیجه برای اثر ضخامت پوشش روی احتمال شکست برای هر دو پلاریته که بتوان پیدا کرد مشخص نیست. برای طراحی و تست کردن سیستم های عایقی گاز مقادیر کمتر و پلاریته بحرانی ولتاژ ضربه صاعقه مطلوب هستند.

در سیستم های عایقی گاز فقط از آرایش های الکتروود شبه همگن استفاده می شود و پلاریته منفی یک نقطه بحرانی است . مقایسه مقدار ۱۰٪ الکترودهای پوشش دار و بدون پوشش با پلاریته مختلف ولتاژ شکست یک بهبودی قابل استفاده ۸٪ را می توان بدست آورد (شکل ۹) .



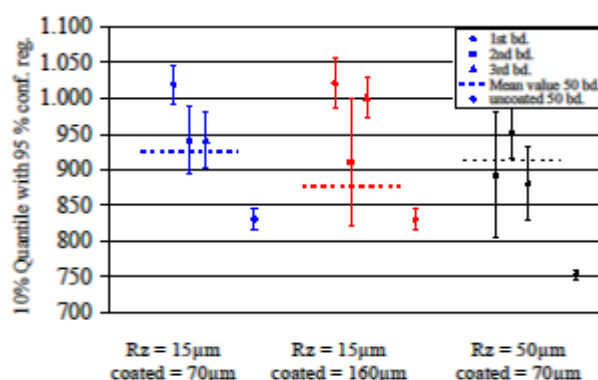
شکل ۹-۱۰٪ مقدار با ۹۵٪ حاشیه اطمینان. پوشش دار-بدون پوشش، $R_z=15 \text{ m}\mu$ ، $s=40 \text{ mm}$ ، LI مثبت و منفی تعداد ریشه های جرقه ۲۵-۳۰ و ۲-۵ برای الکتروود های پوشش دار با ضخامت $100 \text{ m}\mu$ و $300 \text{ m}\mu$ به ترتیب است .



شکل ۱۰-۵ ریشه جرقه بعد از ۵۰ شکست روی یک الکتروود با ضخامت پوشش $300 \text{ m}\mu$

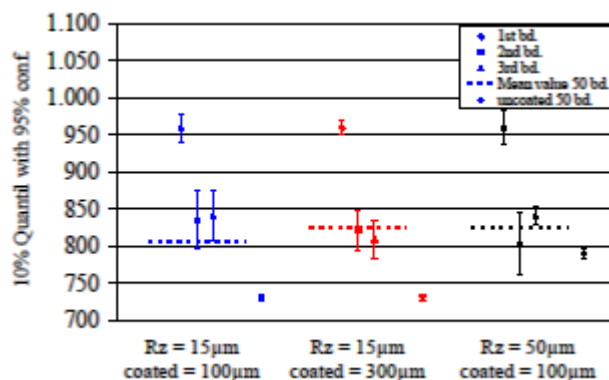
اولین شکست :

آن مشخص بود که اولین ولتاژ شکست روی هر الکتروود بیشتر از بعدی است. هفت تیر مونتاژ شده به تعیین تابع توزیع نرمال 1^{st} ، 2^{nd} ، ...، i^{th} ، شکست با حاشیه اطمینان برای سطح ناهموار مختلف، ضمانت پوشش و پلاریته ولتاژ ضربه صاعقه استفاده شد. برای پلاریته مثبت هیچ مهمتر نیست که بتوان اولین ولتاژ شکست را پیدا کرد. اولین حدود شکست ها (تقریباً ۸) یک روند رو به کاهش محکم را نشان می دهد و سپس به پایدار شدن اطراف یک مقدار به نظر می رسد. (شکل ۱۱).



شکل ۱۱-۱۰/ مقادیر با کمربند اطمینان از شکست اول و ولتاژ LI - مثبت ضخامت پوشش متغیر و $R_{z,s}=40mm$ در پلاریته منفی یک گستره آماری بزرگ مقادیر اندازه گیری شده نشان داد که حاشیه اطمینان پهن می شود.

با ولتاژ ضربه صاعقه منفی یک مقدار خیلی مهم برای اولین ولتاژ شکست می توان پیدا کرد. بعد از 2^{nd} و یا 3^{rd} به نظر می رسد تنش ولتاژ شکست اطراف یک مقدار ثابت پایدار می شود. این رفتار مستقل بود از سطح ناهمواری الکتروود آلومینیوم، ضخامت پوشش و تعداد ریشه های جرقه بعد از آزمایش دارد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲-۱۰/ مقادیر با کمربند اطمینان از شکست اول و ولتاژ LI-منفی ضخامت پوشش متغیر و $R_{z,s}=40\text{mm}$

نتیجه :

یک آرایش الکتروود صفحه - نیم کره پوشیده شده و بدون پوشش با ولتاژ ضربه صاعقه تنش داده شده اند .

الکترودهای بدون پوشش:

با ولتاژ ضربه صاعقه مثبت ولتاژ شکست با سطح ناهمواری بیشتر افزایش می یابد.

با ولتاژ LI-منفی هیچ رابطه ای مشخص بین ولتاژ شکست و سطح ناهمواری الکتروود آلومینیوم نمی توان پیدا کرد.

الکترودهای پوشش دار :

با تست کردن نسبی سیستم های عایقی گاز ، مقایسه مقادیر کمتر احتمال شکست (یعنی ۱۰٪) پیشنهاد می گردد .

با ولتاژ ضربه صاعقه مثبت تابع توزیع ولتاژ شکست آنها از الکتروود بدون پوشش می گذرد. و برای مقادیر کم هیچ بهبودی نمی توان پیدا کرد. یک بهبودی فقط می توان برای اولین معدود شکست ها پیدا کرد (تقریباً ۸ تا). با ولتاژ ضربه صاعقه منفی پوشیده

شده منجر به افزایش ولتاژ شکست برای همه مقادیر می شود . مقدار اولین شکست
مهمتر از مقدار شکست های متوالی برای سطح مختلف و پارامترهای پوشش دار است .
برای تست آرایش الکتروود یک بهبودی قابل استفاده ۸٪ را می توان بدست آورد.

The influence of surface roughness and coating on the Impulse Breakdown Voltage in SF₆

Ch. Lederle and J. Kindersberger

Institute of High Voltage Engineering and Electric Power Transmission,
Technical University Munich, GERMANY

Abstract: The surface roughness of SF₆ insulated systems has a significant influence on the breakdown voltage especially at high gas pressures. Small surface irregularities can reduce the breakdown voltage. A thin dielectric coating could be a possible remedy. To evaluate the influence of rough surfaces with and without dielectric coating the distribution function of the breakdown voltage is of interest. Low probability quantiles and the influence of the first breakdown are relevant for designing GIS systems. The paper deals with the probability function of the impulse breakdown voltage of aluminum electrodes with different surface roughness with and without dielectric coating in SF₆. A hemisphere-plane arrangement at a SF₆ pressure of 0,5 MPa was investigated. The half sphere was covered with thin epoxy resin coating. The plane electrode is polished and uncoated. The surface roughness and coating thickness were varied and the cumulative frequency functions of the breakdown voltage for positive and negative lightning impulse were measured.

The electrode configuration used in the experiments is shown in Figure 1. The hemisphere-plane electrodes are made of aluminum EN AW 6060. The electrode arrangement is stressed by standardized lightning impulse voltage (1,2/50μs) which is supplied by a lightning impulse generator with 50 kJ at 3 MV charging voltage. The polarity of the lightning impulse voltage (LI) refers to the polarity of the hemisphere. Different surface roughness were produced by sand blasting and the roughness profile parameters were measured by a tactile procedure. The mean roughness depth Rz was varied from 5 μm to 50 μm. An epoxy-resin was used as coating material. The coating thickness was varied from 50-300 μm and the surface roughness of the coating is always between Rz = 6 μm and 10 μm.

The plane electrode is polished (Rz = 5 μm) and uncoated. The electrodes were cleaned and placed in a test vessel filled with SF₆ gas pressurized at 0,5 MPa absolute pressure.

Introduction

There is an ongoing trend to build compacter gas insulated systems and therefore the aim of this study is to improve the dielectric strength of gas insulated systems with SF₆ gas. The focus in this paper is on the gas insulation only.

In operation of gas insulated systems the breakdown voltage and the reliability can be reduced by surface irregularities [1]. It is well known that the dielectric strength can be enhanced by coating electrodes with an insulating material [2-5]. The measured improvement values vary in a wide range. A proper comparison can be done by a statistical evaluation of the breakdown voltage which requires determining the distribution function including confidence region. The damage of coating caused by root points and the influence on consecutive breakdowns requires special consideration. Therefore the statistics of the first few breakdowns is of interest.

Experimental set-up

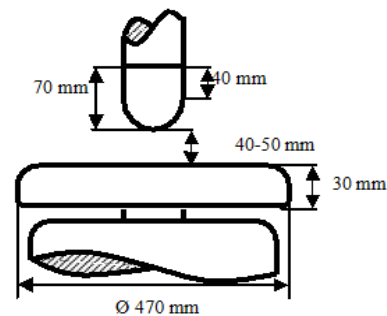


Figure 1: Hemisphere-plane electrode configuration

Evaluation of Measurements

Procedure A: To determine the cumulative frequency function the rising voltage test was applied [6]. The voltages were positive and negative lightning impulse voltages. The voltage was raised in 18 kV steps from an estimated value U_0 until a breakdown occurred. Each sample contained 50 breakdown values. The cumulative frequency function was approximated with the normal

tribution function and the 95%-confidence region has been calculated.

Procedure B: In order to investigate the distribution function of the first breakdown a pneumatically controlled revolver assembly has been constructed (figure 2). Up to 8 identical electrodes can be assembled in the test vessel. An estimation of the normal distribution of a certain breakdown number (i^{st} , d , ..., i^{th}) can be done with 8 breakdown values per sample. By using this small number of random samples the 95%-confidence region gets wider. A comparison by using the confidence region is possible.



Figure 2: Pneumatically controlled revolver assembly for investigation of first breakdown

Results

Uncoated electrodes: At positive LI-voltage the breakdown voltage decreases with a higher surface roughness (Figure 3). This is consistent with previously published results [1].

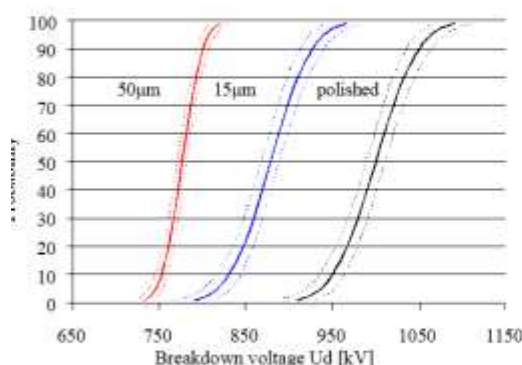


Figure 3: Normal distribution function with 95 % confidence region, positive LI-voltage, Variation of R_z , $s = 40$ mm, uncoated

At negative LI-voltage the lowest breakdown voltage can be found at the electrode with a surface roughness of $R_z = 15 \mu\text{m}$. The breakdown voltage for the electrode with $R_z = 50 \mu\text{m}$ is significantly higher. Only at quantiles higher than 50 % the dielectric strength of the polished electrode is higher (Figure 4).

These results do not fit with the theory of Pederson [1]. It is assumed that the effect is caused by corona stabilization.

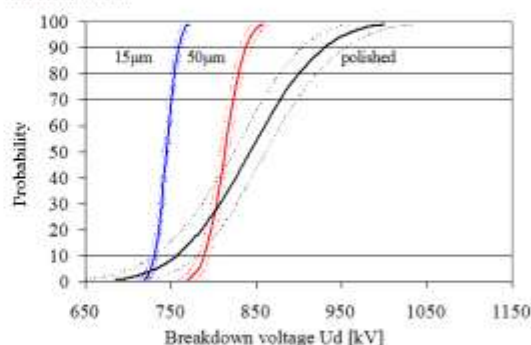


Figure 4: Normal distribution function with 95 % confidence region, negative LI-voltage, Variation of R_z , $s = 40$ mm, uncoated

This correlation of surface roughness and breakdown voltage for both polarities could also be found at a gap distance of $s = 50$ mm.

Beside electrodes blasted with corundum also blasting with glass pearls was applied. Despite similar surface roughness $R_z = 15 \mu\text{m}$ the breakdown voltage of glass blasted electrodes is significantly higher (Figure 5). No correlation between any parameter of the surface roughness and the breakdown voltage could be found.

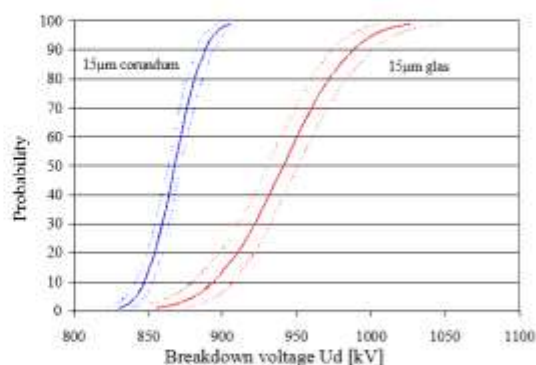


Figure 5: Normal distribution function with 95 % confidence region, negative LI-voltage, Variation of R_z , $p = 0,5$ MPa, $s = 50$ mm, uncoated

After the experiments the spark roots have been investigated. On each uncoated electrode 45-50 spark roots were found. Nearly every breakdown has its own root point (Figure 6).



Figure 6: 50 Spark roots after 50 breakdowns, uncoated

Coated electrodes: With positive LI-voltage a large statistical spread of the measured values causes a relatively flat distribution function for coated electrodes. Compared to the distribution function of uncoated electrodes, coating results in an improvement of the breakdown voltage for higher quantiles, while for lower quantiles the breakdown values decrease (Figure 7).

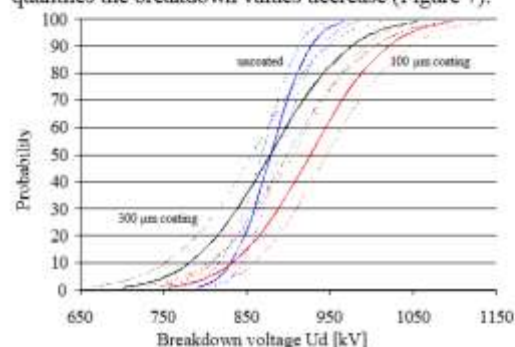
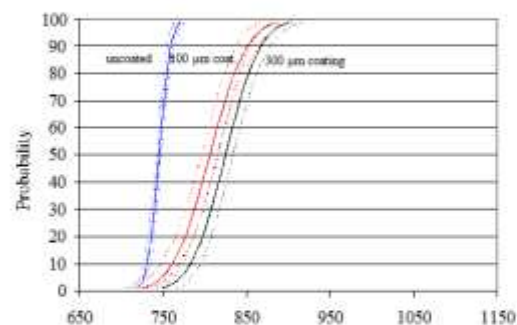


Figure 7: Normal distribution function with 95 % confidence region, positive LI, Variation of coating thickness, $R_z = 15 \mu\text{m}$, coated

A significant enhancement with coating can be achieved at negative LI-voltage (Figure 8)



Breakdown voltage U_d [kV]

Figure 8: Normal distribution function with 95 % confidence region, negative LI, Variation of coating thickness, $R_z = 15 \mu\text{m}$, coated

No definite conclusion can be found for the influence of the coating thickness on the breakdown probability for both polarities.

For designing and testing of gas insulated systems lower quantiles and the critical polarity of the LI-voltage are of interest. In gas insulated systems only quasi-homogeneous electrode arrangements are used and the negative polarity is the critical one. Comparing the 10% quantile of uncoated and coated electrodes with different polarity of the breakdown voltage a usable improvement of 8% can be achieved (Figure 9).

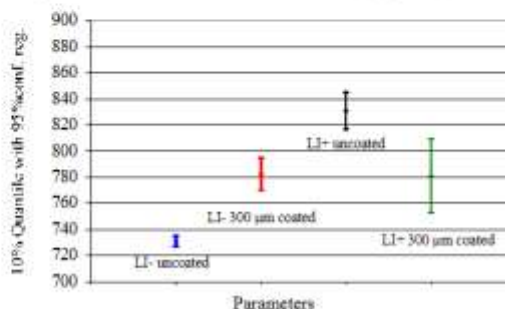


Figure 9: 10 % Quantile with 95% confidence region, coated-uncoated, $R_z = 15 \mu\text{m}$, $s = 40 \text{ mm}$, positive and negative LI.

The numbers of spark roots were 25-30 and 2-5 for coated electrodes with 100 μm and 300 μm thickness, respectively



Figure 10: 5 Spark roots after 50 breakdowns on an electrode with 300 μm coating thickness.

First breakdown: It was recognized that the first breakdown voltage on each electrode was higher than the following [2]. The revolver assembly was used to determine the normal distribution function of the 1st, 2nd,

... i^{th} , breakdown with confidence region for different surface roughness, coating thickness and polarity of LI-voltage. For positive polarity no significantly higher first breakdown voltage could be found. The first few breakdowns (approximately 8) showed a strong trend to decrease and then seemed to stabilize around a constant value (Figure 11). At positive polarity a large statistical spread of the measured values is indicated by the wide confidence region.

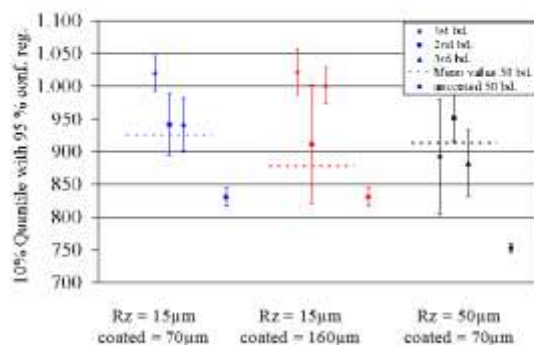


Figure 11: 10% Quantiles with confidence region of first 3 breakdowns, positive LI-voltage. Variation of coating thickness and R_z , $s = 40$ mm

With negative LI-voltage a significantly higher value for the first breakdown voltage could be found. After the 2nd or 3rd stress the breakdown voltage seemed to stabilize around a constant value. This behavior was independent of the surface roughness of the aluminum electrode, coating thickness and number of spark roots after the experiment (Figure 12).

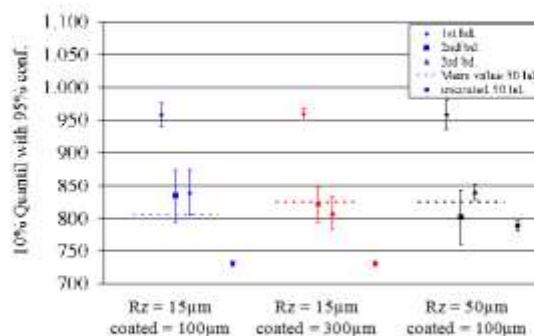


Figure 12: 10% Quantiles with confidence belt of first 3 breakdowns, negative LI-voltage. Variation of coating thickness and R_z , $s = 40$ mm.

The value of the breakdown voltage for coated electrodes is independent on the surface roughness of the aluminum electrode for both polarities.

Conclusion

A coated and uncoated hemisphere-plane electrode arrangement has been stressed with LI-voltage.

Uncoated electrodes:

- With positive LI-voltage the breakdown voltage decreases with higher surface roughness.
- With negative LI-voltage no definite correlation between the breakdown voltage and the surface roughness of the aluminum electrodes could be found.

Coated electrodes:

With respect to testing of gas insulated systems it is recommended to compare lower quantiles of the breakdown probability (e.g. 10%).

- With positive LI-voltage the distribution function of the breakdown voltage crosses those of the uncoated electrode. For low quantiles no improvement could be found. An improvement could only be found for the first few breakdowns (approximately 8).
- With negative LI-voltage coating leads to an increase of the breakdown voltage for all quantiles. The value of the first breakdown is significantly higher than the value of the consecutive breakdowns for different surface and coating parameters.
- For the tested electrode arrangement a usable improvement of 8% can be achieved by coating.

References

- [1] A. Pederson, *The Effect of Surface Roughness on breakdown in SF₆*, no.5 in IEEE Trans., PAS-94, p. 1749-1754, Sep 1975.
- [2] M. Honda, H. Okubo, H. Aoyagi, A. Inui, *Impulse breakdown characteristics of coated electrodes in SF₆ gas*, Kawasaki, Japan, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. PWRD-2 No.3, 1987
- [3] M.M. Morcos, K.D. Srivastava, *Dielectric coatings and particle movement in GIS/GITL systems*, USA, New York, Gaseous Dielectrics 8, 1998
- [4] K.D. Srivastava, R.G. van Heeswijk, *Dielectric coating-effect on breakdown and particle movement in GITL systems*, USA, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985
- [5] A.E. Vlastòs, *Influence of electrode coating on the impulse breakdown of SF₆*, Milan, Italy, 3rd Int. Symp. on High Voltage Engineering, paper 32.08, 1979
- [6] A.E. Vlastòs, *Influence of the electrode surface state on the breakdown of pressurized SF₆*, UK, 6th International Conference on Gas Discharge and their Application, 1980
- [7] A. Rein, J. Kulsetås, *Impulse breakdown of SF₆/N₂ insulation, influence of electrode covering; polarity effects*, Gaseous Dielectrics, Ed. Program Press, pp 315-321, 1982
- [8] W. Hauschild and W. Mosch, *Statistik für Elektrotechniker*, Berlin, Germany, VEB Verlag Technik, 1984

author address: Christoph Lederle, Josef
indersberger, Technical University of Munich,
stitute of High Voltage Engineering and Electric
ower Transmission, Arcisstr. 21, D- 80333 München,
ermany, Email: christoph.lederle@tum.de.

Dielectric Strength of Different Gases in GIS

Denis Denisov, Heinz Rebholz, Wolfgang Köhler, Stefan Tenbohlen
University of Stuttgart, IEH, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, Germany
E-mail: Denis.Denisov@ieh.uni-stuttgart.de

Abstract: SF₆ is a gas with excellent dielectric properties and is commonly used in gas-insulated equipment. However it has the high global warming potential. Thus, the development of new gases or gas mixtures for GIS, GIL is strongly desired. For dimensioning the gas insulated systems the support insulators (spacers) are of special interest. Contaminations on the insulator surface can cause field distortions and may lead to a significant reduction of the breakdown strength. To reduce the amount of used SF₆, the gases CO₂, N₂ and dry air are examined as possible substitutes for SF₆ at pressure range from 0.1 to 1 MPa. Their behaviour under AC and LI stresses is investigated. The study compares the breakdown characteristics of these gases and their mixtures in case of clean boundary surfaces as well as for the particle contaminated. A short introduction into the theory of gas discharge is given as well.

Key Words: dielectric strength, gas mixtures, GIS, spacers, particle contamination.

INTRODUCTION

Pure SF₆ has excellent insulating and arc-quenching properties. Therefore it remains the main HV insulation medium in gas-insulated equipment nowadays. However there are some serious concerns about its future employment from the ecological point of view. The global warming potential of SF₆ is considered to be at least 23,900 CO₂ equivalents [1]. So SF₆ has been classified on the Kyoto conference on climate change among the greenhouse gases. And its emission in the atmosphere ought to be reduced. Therefore one intensively looks for the possible environmentally friendly substitutes now. Many efforts have been taken to investigate the insulation properties of nitrogen and air under higher pressures. It is known, that pure nitrogen would end up in uneconomical designs of GIS/GIL to sustain the required insulation level. Using N₂/SF₆ mixtures, with a small amount of SF₆, the dielectric strength of N₂ can be significantly increased. Even now, N₂/SF₆ mixtures are used in GIL with up to 95% nitrogen. However, N₂/SF₆ mixtures are subjected to the heavy influence of conducting particles with increasing gas pressure, as well as with decreasing SF₆ amount.

Therefore the present study compares the breakdown characteristics of these gases and their mixtures in case of clean boundary surfaces as well as for the particle contaminated.

INTRINSIC STRENGTH OF GASEOUS DIELECTRICS

Under normal conditions, i.e. with no energy applied from outside, there are practically no free electrons to carry a charge in a gas. Only in the presence of a free electron, which is needed to produce an avalanche, the breakdown can succeed. Depending on the number of free electrons in the gas, after a certain voltage the sudden change of electric conductivity takes place. This drastic change of dielectric properties results in immediate drop of the applied voltage, which is called an electrical breakdown in a gas.

Besides the cosmic and the earth radiations a few more mechanisms can generate free electrons needed to build the avalanche. These are:

- field emission,
- photoelectronic emission,
- thermoemission.

An initial electron available in a gas volume is accelerated by electric field and travels his mean free path until the collision with a neutral molecule. Depending on the kinetic energy gained between collisions the electron can either be attached to the molecule or another free electron can be released. In pure SF₆ electron attachment leads to formation of stable negative ions, which in turn can recombine with existing positive ions (ion-ion-recombination). Electron detachment can be caused by one of the following processes:

- auto detachment,
- photo detachment,
- collision detachment.

In the presence of electric field the collision detachment or impact ionization plays the major role in generating free electrons [2].

Depending on the distribution of electric field in a discharge gap two different breakdown mechanisms can be distinguished, they are: streamer breakdown in case of uniform fields and streamer-leader breakdown in case of highly non-uniform fields.

Breakdown in uniform fields

At exceeding the gas-specified critical field strength the attachment-detachment processes reach a point from which the ionization dominates (effective ionization coefficient $\alpha_{eff} > 0$). Now the electron avalanches can shape, and the number of charge carriers grows exponentially. When the ion concentration at the head of the avalanche exceeded 10^8 a steep rise in current, known as a streamer, happened and breakdown of the gap in uniform field followed [3]. On account of the electron-to-ion mass ratio the electrons travel faster to anode and leave slow ions at the place of their formation. That leads to the alteration of field in the gap and yields in further excitation processes at avalanche's head. When the streamer reached the opposite electrode it was heated instantaneous and thermally ionized. Finally the streamer breakdown occurs by means of this highly conductive "kanaf".

Breakdown in highly non-uniform fields

For non-uniform fields with a negative impurity or an electrode additionally the electron production by means of the field emission from metallic surface must be taken into account [4]. Since the critical field strength in the gap is confined by the divergent field characteristic there is no more prerequisite to further constant grow of the avalanche. So the pure streamer breakdown is prevented. On the contrary the combined discharge mechanism consisting of the streamer and a consequent leader is involved here. A slightly conductive streamer region turns into a dissociated, highly conductive leader (precursor mechanism). This effect reveals especially under transient voltage stresses. In the case of slowly changing stresses like operation AC voltage the corona stabilization effect prevails.

Influence of gas pressure on breakdown process

The decisive impact on formation of initial electrons has a mean free path, an imaginary average distance between collisions. The higher is the density of a gas, the shorter mean free path is. So in the same field at high pressures the electron gains less kinetic energy between collisions; that leads to the increase of dielectric strength. The surface roughness of electrodes acts in the opposite way, so that at the pressure range between 0.7-0.9 MPa no more linear increase of breakdown voltage is possible.

Flashover along the boundary gas/solid body

In order to achieve a satisfactory dielectric strength in GIS, the surfaces of support insulators (spacers) have to be correspondingly dimensioned. Spacers usually represent critical weak points within the whole

insulation and may reduce the reliability of the GIS. In GIS with its moving contacts the appearance of metallic particles is inevitable. Conductive particles produce plenty of charge carriers by means of the intensive partial discharge activity. New particles will lie on the spacer's surface along the field lines and further distort an applied field. Due to considerably higher dielectric constant of a spacer material in comparison to one of insulated gas the field strength rises locally on the surface already when the particle only approaches to the spacer. The reason for that is so called proximity effect. It becomes evident that due to the surface contamination field distortions can appear and badly reduce the dielectric strength of the whole arrangement [5].

EXPERIMENT DETAILS

Test setup

A modified part of a commercial 420kV GIS was used as a test chamber, inside of which the experimental electrodes arrangement was installed. This arrangement contains two aluminium plates as HV and ground electrodes (1,2) as shown in Fig.1. It can host up to 12 spacers (5) shielded by specially shaped electrodes (3,4). Each test spacer can be selected pushing out a pneumatic controlled piston (7). A cylindrical solid insulator of 25 mm diameter and 45 mm height is employed as a spacer model. It is made of epoxy resin filled with aluminium oxide (Al_2O_3). To simulate the possible particle contamination (6) in GIS a 4 mm long NiCr-wire ($\varnothing 0.2$ mm) is attached to the surface with silicon in the middle of the spacer. The test chamber can be filled with a gas at the pressures up to 1.4 MPa. In the present work the pressure range between 0.1-10 MPa is investigated.

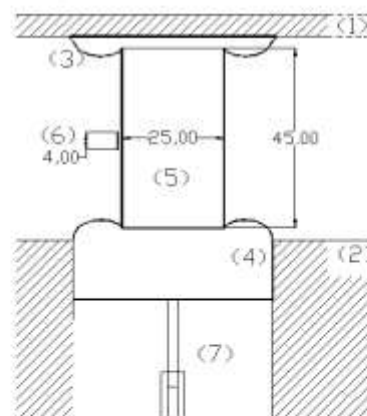


Fig. 1 Test setup with model spacer

1. HV electrode; 2. grounded electrode; 3, 4. specially shaped electrodes; 5. model spacer; 6. particle; 7. piston.

Generating and measuring test stresses

The overall test system is schematically shown in Fig.2. Voltage stresses can be produced either by a GIS encapsulated HV test transformer (380 V/510 kV, 50 Hz), or by an eight-stage Marx' impulse generator with standardized LI stress of 1.2/50 μ s up to 800 kV. The impulse voltage was normally increased from approximately 50% of the expected flashover voltage in 10% steps until flashover occurred. The AC voltage was raised with a rate of 6 kV/s. To prevent multiple breakdowns during the AC test a protective relaying turns off the voltage on primary side of the transformer immediately after succeeded breakdown. Transient LI stresses are measured by means of a capacitive HV divider and AC voltages using a capacitive filter on the primary side.

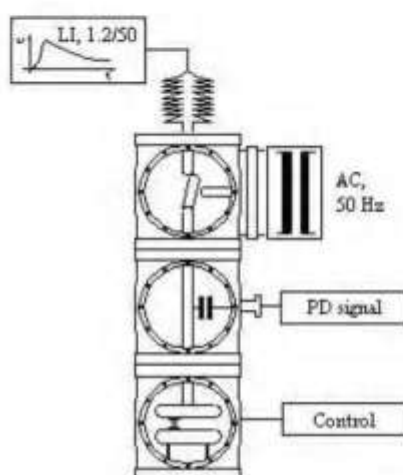


Fig.2 Test setup

Field distribution along the spacer

Field configuration impacts significantly on the gas discharge process. A simulation shown in Fig.3 demonstrates the referenced potential distribution along the spacer model.

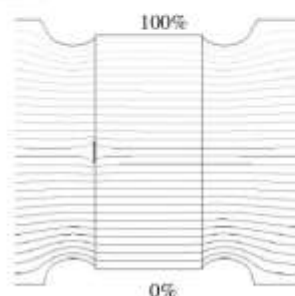


Fig.3. Potential distribution along the spacer

Hereinafter we will characterize the electric strength of a gas by its flashover field strength. So one can easily compare the measurements with the results of other experiments on a similar geometry. The flashover field strength E_F can be calculated from the measured flashover voltage U_F using a constant factor k_F :

$$E_F = k_F \times U_F. \quad (1)$$

The geometry-dependant factor k_F for the arrangement described above was found to be 0,224 cm⁻¹[6]. Local field distortions brought with a particle contamination are not considered in k_F .

Influence of surface roughness

Local rise of the field stress caused by the surface roughness of the electrodes can result in essential reduction of the streamer breakdown voltage. This field rise cannot be found analytically, so only evaluation of its influence can be done. In the test arrangement the electrodes with the average roughness height of 1,2 μ m are employed, i.e. no impact on breakdown behaviour is expected [7].

To keep the roughness height below 10 μ m during the experiments the electrodes was regularly polished. During the LI stress some tracks of the breakdown occasionally remain on the electrode surface as a result of a particle burnout. A typical picture is shown in Fig.4. Various tracks of previous tests have to be cleared to avoid additional PD sources. Thus, the independency of single tests is provided.

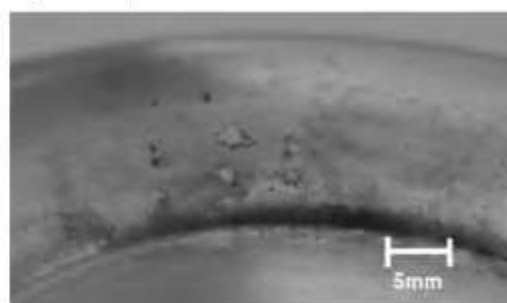


Fig.4 Breakdown tracks on the electrode

RESULTS AND DISCUSSION

Test realization

To determine the mean flashover voltage $U_{F,m}$ and the correspondent field strength $E_{F,m}$ a series of 12 separate spacer models was stressed per each test case. All values of flashover field strengths are referenced to the calculated peak values of applied voltages with the inherent confidence interval of 95% according to normal

distribution. Gas pressures marked on the graphs below correspond to absolute pressures in MPa.

Flashover field strength under AC stress

Flashover field strengths (with no contamination) in the following insulated gases: N_2 , CO_2 and compressed air vs. gas pressure are shown in Fig.5. Electric strength of the arrangement rises steadily with increasing pressure. Carbon dioxide and compressed air shows nearly no difference in their electric strengths. Nitrogen on the contrary stays far below them over the whole pressure range.

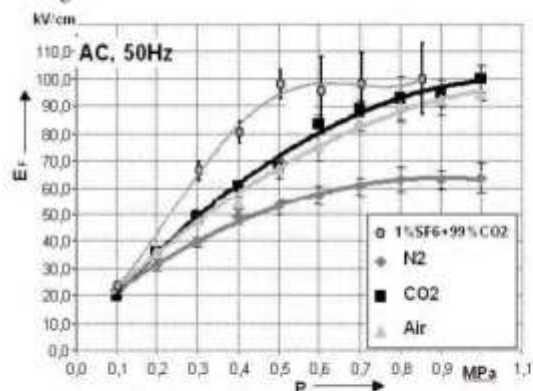


Fig.5 Flashover field strength vs. pressure for N_2 , CO_2 and compressed air (no particle contamination)

In the case with the metal particle contamination a significant reduction of breakdown voltage (up to 50%) can be observed in the Fig.6. The extent of reduction depends in general on the voltage type and on the field distribution in the gap [8].

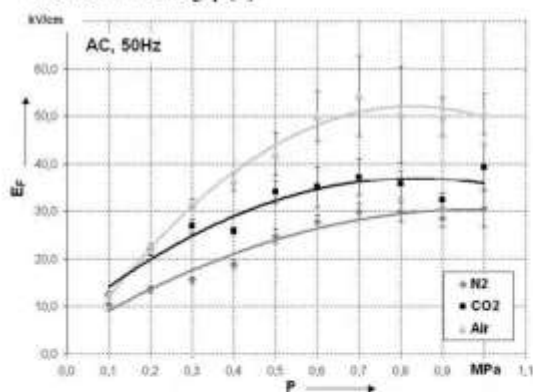


Fig.6 Flashover field strength vs. pressure for N_2 , CO_2 and compressed air (with particle contamination)

From direct comparison of Fig.5 and 6 follows that CO_2 demonstrates the highest reduction of the electric strength in slightly non-uniform fields. Moreover the

curves for CO_2 and for the air in distorted fields do not rise anymore after 0,6 MPa, which is a consequence of a stabilization corona.

Flashover field strength under LI stress

During the LI stress with positive polarity a surface charge accumulates on the particle contaminated spacer surface, once the PD-inception voltage exceeded and no breakdown occurred.

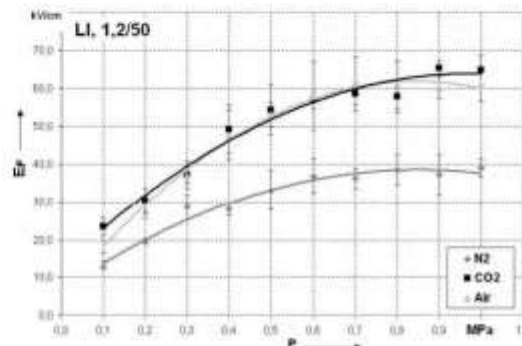


Fig.7 Flashover field strength vs. pressure for N_2 , CO_2 and compressed air (with particle contamination)

The results for this case shown in Fig. 7 prove again the similarity in CO_2 and air flashover behavior. However there is some increase in the flashover strength due to existent surface charge. Further investigations on this point are necessary.

Electric strength of SF_6/N_2 -mixtures

The electric strength of SF_6/N_2 mixture where SF_6 takes 5% of the volume is shown in Fig.8.

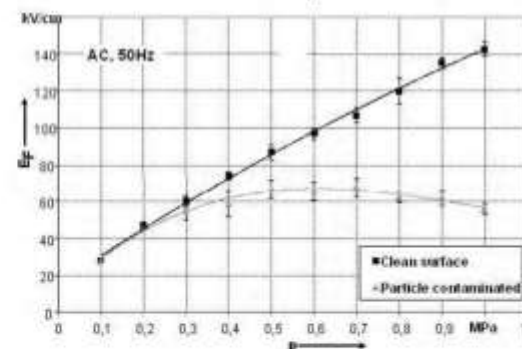


Fig.8 Flashover field strength of 95% N_2 +5% SF_6 gas mixture vs. absolute pressure [9]

It can be seen that the SF_6 -contained gas mixtures experience essential reduction of their electric strength in the presence of particle contamination. The SF_6/N_2 -

mixture demonstrates more than 50% decay of its dielectric properties under AC voltage stress at higher pressures.

Compressed air and CO₂ vs. 5%SF₆+95%N₂ and 1%SF₆+99% CO₂ mixtures

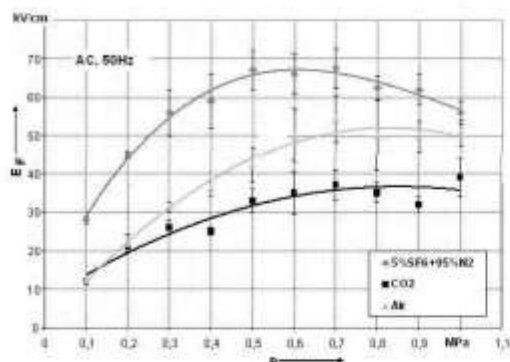


Fig.9 Flashover field strengths in compressed air, CO₂ and 5%SF₆+95%N₂ under AC stress with particle contamination vs. pressure

CONCLUSIONS

The presented tests in different gaseous dielectrics determine the flashover field strength of the given arrangement. As anticipated the flashover voltage along clean surface of spacers generally increases with rising gas pressure.

Among all tested gases CO₂ revealed the highest sensitivity to particle contamination. In case of positive lightning impulse voltage stress CO₂ and the air show few differences in dielectric behaviour over the whole pressure range.

Pure nitrogen has the lowest electric strength among considered gases. The strong reduction of its dielectric properties comparing to the air, which contains about 80% of nitrogen, has to be examined further. Adding a little amount of SF₆ to these gases results in a noticeable increase of the breakdown field strength.

If the employment of the pure SF₆ insulation and its mixtures will be legally forbidden in the future, compressed air or carbon dioxide insulations present themselves as possible substitutes. However higher pressures together with an increased impact of the contamination on the insulation performance has to be overcome in the design of future apparatuses.

REFERENCES

- [1] IPCC, "Intergovernmental Panel on Climate Change", 1999.
- [2] Olthoff J.K.; Van Brunt R.J.; Wang Y.; Champion R.; Doverspike L.: "Collisional Electron Detachment and Decomposition Rates of SF₆, SF₅ and F-SF₆." J. Chem. Phys. 91, 1989.
- [3] Pedersen A.; McAllister W.; Crichton G.C.; Vibholm S.: "Formulation of the streamer breakdown criterion and its application to strongly electronegative gases and gas mixtures". Archiv für Elektrotechnik 67, Springer Verlag, 1984.
- [4] Dietrich K.J.: „Untersuchungen zur Durchschlagentwicklung in einer schwach inhomogenen Anordnung in SF₆ bei Beanspruchung mit Blitzstoßspannung“. Dissertation RWTH Aachen, 1985.
- [5] Tenbohlen S.: „Der Einfluß dielektrischer Oberflächen auf die Durchschlagentwicklung in einer störstellenbehafteten SF₆-Anordnung“. Dissertation RWTH Aachen, 1997.
- [6] Schurer R.: „Der Einfluss von Störstellen auf Stützerflächen auf die elektrische Festigkeit von Isolieranordnungen in SF₆-isolierten Anlagen“. Dissertation Universität Stuttgart, 1999.
- [7] Mosch W.; Hauschild W.: „Hochspannungsisolierungen mit SF₆“, VEB Verlag Technik, Berlin 1979.
- [8] Sudarshan T.S.; Dougal R.A.: "Mechanisms of surface flashover along solid dielectrics in compressed gases": A review. IEEE Trans. On Electr. Insul. EI-21, Nr5, 1986.
- [9] Moukengue I.: „Beeinflussung der elektrischen Festigkeit von N₂/SF₆- und Luft/SF₆ Isolationen durch Metallpartikel auf der Stützoberfläche“. Dissertation Universität Stuttgart, 2001.

منابع و مآخذ

دکتر حسین محسنی. مهندسی فشار قوی الکتریکی پیشرفته.

مهندس مهدی ثقفی و دکتر رحمت الله هوشمند. عایق ها و فشار قوی.

مقاله های اینترنتی.

پایان