به نام خدا

عایق و فشار قوی

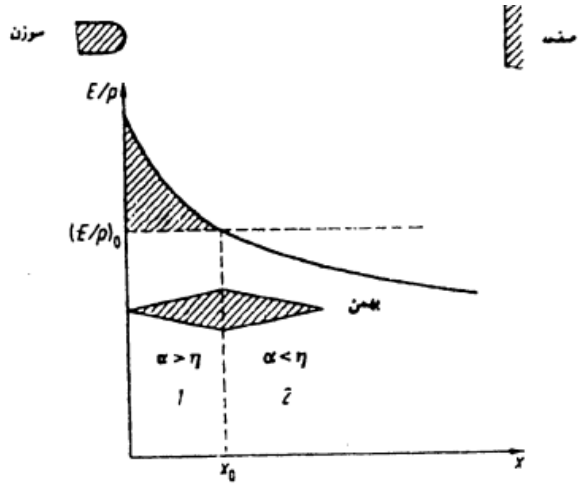
فصل دوم
عایق های گازی

مدرس:
بهروز آدینه

زمستان ۹۴

تخلیهٔ الکتریکی گازها در میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت

در میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت مانند میدان بین یک میله و صفحه (شکل ۲-۲۷ را ببینید)، شدّت میدان الکتریکی در نقاط مختلف میدان، متفاوت است. مثلاً نزدیک میله، شدّت میدان به مقدار حدّاکثر و در نزدیک صفحه، به حدّاقل خود کاهش می‌یابد. در این شرایط، ممکن است شدّت میدان حدّاکثر در اطراف میله به حدّ شدّت میدان لازم برای شکست گاز برسد؛ ولی شدّت میدان در بقیهٔ نقاط میدان، خیلی کم‌تر از آن باشد. بنابراین، یونیزاسیون و بهمن الکترونی فقط در حوالی میله (که شدّت میدان الکتریکی آن زیاد است)، رخ می‌دهد و در بقیهٔ نقاط، یونیزاسیون وجود ندارد. در نتیجه، تخلیهٔ الکتریکی موضعی، فقط در اطراف میله رخ می‌دهد. این تخلیهٔ الکتریکی ناقص، به‌صورت یک هالهٔ بنفش رنگ در اطراف میله ظاهر می‌شود که به آن کرونا[1] می‌گوییم. اگر شدّت میدان به حدّ کافی بزرگ باشد، جرقّه‌های موضعی از میله شروع شده ولی به الکترود دیگر نمی‌رسد. در



شکل (۲-۲۷): بهمن الکترونی در میدان الکتریکی غیر یکنواخت

1- Corona

نتیجه، ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند α در تمام نقاط میدان یکسان نخواهد بود و مقدار آن در نقاط با شدّت میدان زیاد، بیشتر، و در بقیهٔ نقاط کم‌تر می‌گردد. از این‌رو، در کلّیهٔ روابط مربوط به نظریهٔ تانزند، باید از انتگرال آن در طول فاصلهٔ الکترودها استفاده شود. اگر η معرف ضریب جذب الکترون به یون (ترکیب مجدّد) در واحد طول باشد، در آن‌صورت، برای میدان غیر یکنواخت بین میله و صفحه، در نقاط نزدیک به میله، $\alpha>\eta$ است ($\bar{\alpha}=\alpha-\eta>0$). در نتیجه، $\bar{\alpha}>0$ و انتگرال آن ($\int \bar{\alpha}.dx$) رو به افزایش است؛ ولی در نقاط دورتر از میله، $\alpha<\eta$ ($\bar{\alpha}=\alpha-\eta<0$) و $\bar{\alpha}<0$ و انتگرال آن ($\int \bar{\alpha}.dx$) رو به کاهش خواهد بود. در نتیجه، بهمن الکترونی فقط در نزدیک میله به‌وجود می‌آید. در حوالی میله، هنگامی‌که در x_0، مقدار $\int_0^{x_0} \bar{\alpha}.dx$ به 10^{+8} برسد، تخلیهٔ الکتریکی ناقص ایجاد می‌شود. بنابراین، شرط شکست کامل گاز در میدان‌های غیر یکنواخت هم به‌صورت رابطهٔ زیر در می‌آید.

$$\gamma\left[e^{\int_0^{x_0=d}\bar{\alpha}.dx}-1\right]\geq 1 \qquad (۲-۷۷)$$

در ضمن اگر شدّت میدان، شدیداً غیر یکنواخت باشد، شرط ارائه شده در رابطهٔ (۲-۷۷) تحقق نمی‌یابد و شکست کامل در بین الکترودها ایجاد نمی‌شود. البتّه در فاصله‌ای از میله به طول x_0 که شرط رابطهٔ (۲-۷۷) تحقّق می‌یابد، شکست موضعی یا تخلیهٔ الکتریکی ناقص به‌وجود می‌آید. در این حالت، شرط شروع وقوع تخلیهٔ الکتریکی ناقص (موضعی) را می‌توان به‌صورت رابطهٔ اخیر بیان نمود:

$$\gamma \left[e^{\int_0^{x_0} \bar{\alpha}\, dx} - 1 \right] \geq 1 \qquad (۲-۷۸)$$

این مطالب را می‌توان به‌طور واضح‌تر در شکل (۲-۲۷) مشاهده نمود. این شکل، بهمن الکترونی در میدان الکتریکی غیر یکنواخت و به‌عبارت دیگر، نمودار افزایش و کاهش تعداد الکترون‌ها در نزدیک میله را نشان می‌دهد. در قسمت ۱ از این شکل، بهمن الکترونی رشد می‌کند و در قسمت ۲ از بین می‌رود.

در میدان‌های غیر یکنواخت بر اثر متفاوت بودن شدّت میدان الکتریکی در نقاط مختلف فضای بین دو الکترود، به ازای ولتاژ نسبتاً کوچکی، ممکن است میدان الکتریکی در بعضی از نقاط میدان به حدّ شدّت میدان بحرانی برای یونیزاسیون و شکست گاز برسد و در بقیهٔ نقاط، به‌علّت ضعیف بودن شدّت میدان، یونیزاسیون به‌وجود نیاید. در این شرایط در نقاط با شدّت میدان قوی (در حدّ شدّت میدان لازم برای شکست گاز)، تخلیهٔ موضعی را خواهیم داشت؛ یعنی در آن نقاط، گاز یونیزه شده، نوری آبی رنگ را به‌شکل هالهٔ روشن، همراه با جرقّه‌های موضعی (در صورت بالا بودن ولتاژ به‌حد کافی)، خواهیم داشت. اگر ولتاژ، باز هم افزایش یابد، در بقیهٔ نقاط میدان نیز، شدّت میدان به‌حدّ کافی زیاد می‌شود و به‌مقدار بحرانی می‌رسد و در نتیجه، جرقّه‌های موضعی بین دو الکترود ادامه می‌یابند و شکست کامل گاز بین دو الکترود به‌وجود می‌آید.

اگر اختلاف شدّت میدان الکتریکی در نقاط مختلف میدان خیلی زیاد باشد، ولتاژ لازم برای شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی، خیلی کم‌تر از ولتاژ لازم برای شکست کامل گاز خواهد بود. بنابراین، تخلیهٔ الکتریکی موضعی با ولتاژهای خیلی کم‌تری اتّفاق می‌افتد؛ ولی اگر این اختلاف بین شدّت میدان نقاط مختلف کم باشد، اختلاف بین ولتاژ شروع تخلیهٔ موضعی و ولتاژ شکست کامل گاز نیز، کم‌تر خواهد شد.

هر گونه ناهمواری در سطح الکترودهای تجهیزات فشار قوی مانند صفحات خازن‌های فشار قوی، کنتاکت کلیدهای فشار قوی و غیره (هر چند که خیلی هم کم باشند)، باعث ایجاد میدان الکتریکی غیر یکنواخت و افزایش شدید میدان الکتریکی روی نقاط نوک تیز روی سطح (بر اثر ناهمواری‌های ایجاد شده) می‌شود. این افزایش میدان، سبب تخلیهٔ جزئی و ایجاد حرارت‌های موضعی شدید (کربنیزه شدن و ذوب شدن سطح عایق جامد) می‌گردد. از این‌رو، در ساخت این تجهیزات، باید سطح الکترودها را خیلی تمیز و صاف و صیقلی و بدون ناهمواری ساخت.

برای تعیین میزان غیر یکنواختی در میدان‌های غیر یکنواخت، پارامتر جدیدی را به‌نام درجهٔ غیر یکنواختی به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$K = \frac{E_{max}}{E_{av}} \qquad (۷۹-۲)$$

E_{max} حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی موجود در میدان و E_{av} میانگین شدّت میدان الکتریکی در میدان است.

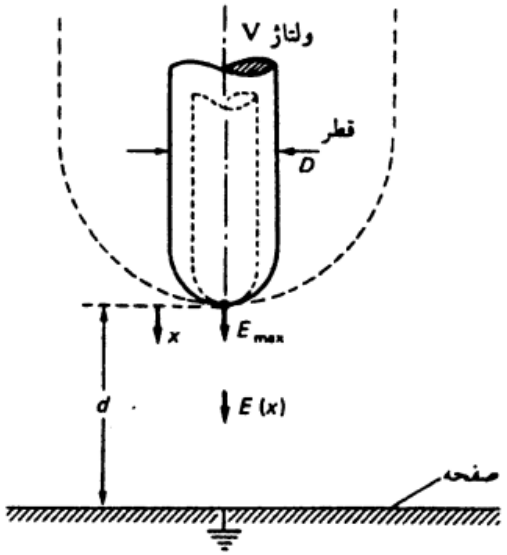
اگر فاصلهٔ بین الکترودهای میدان غیر یکنواخت d، و ولتاژ اعمالی بین آن‌ها V باشد، آنگاه،

$$E_{av} = \frac{V}{d} \qquad (۸۰-۲)$$

$$K = \frac{E_{max}}{V/d} = \frac{d E_{max}}{V} \qquad (۸۱-۲)$$

در میدان الکتریکی ایجاد شده بین الکترودهای میله و صفحه (مطابق با شکل ۲-۲۸)، حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی اطراف میله و روی سطح میله است؛ زیرا هر چه به سطح میله نزدیک می‌شویم، تراکم خطوط میدان بیشتر می‌شود. حال اگر شعاع خمیدگی میله (R) یا به‌عبارت دیگر قطر میله (D) را زیاد کنیم، حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی (که اطراف میله است)، نسبت به حالت قبل کم می‌شود و هر چه که شعاع خمیدگی را زیادتر کنیم، E_{max} کم‌تر می‌شود و در نتیجه، درجهٔ غیر یکنواختی میدان کاهش می‌یابد و بالطبع، اختلاف شدّت میدان الکتریکی بین نقاط مختلف میدان کم‌تر می‌شود. اگر میله را به‌صورت صفحه در آوریم (یعنی در حقیقت شعاع خمیدگی میله را بی‌نهایت کنیم) در آن صورت، شدّت میدان در تمام نقاط میدان برابر شده و $E_{max}=E_{av}=V/d$ و $K=1$ خواهد بود.

اگر E_{max} به حدّ میدان بحرانی شکست عایقی هوا برسد، تخلیهٔ الکتریکی موضعی یا کرونا به‌وجود می‌آید. در کلیدهای فشار قوی برای جلوگیری از تخلیهٔ موضعی، هنگام باز شدن کنتاکت‌های استوانه‌ای کلید، آن‌ها را بین دو نیم کره با شعاع خمیدگی بزرگ قرار می‌دهند. درجهٔ غیر یکنواختی میدان‌ها را با پارامتر K مشخّص می‌کنند. مقدار $K=1$ بیانگر میدان یکنواخت، و همچنین بر اساس تجربه $K>3/3$، میدان غیر یکنواخت قوی، و $K<2$ میدان غیر یکنواخت ضعیف را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۲۸): آرایش میله-صفحه با ضریب غیر یکنواختی مختلف

تأثیر درجهٔ غیر یکنواختی روی نحوهٔ تخلیهٔ الکتریکی گازها

هر چه درجهٔ غیر یکنواختی میدان‌های الکتریکی بیشتر باشد، تخلیهٔ الکتریکی ناقص یا موضعی در آن با ولتاژ کم‌تری حاصل می‌شود؛ زیرا شدّت میدان الکتریکی قوی در بعضی از نقاط میدان با ولتاژ مختصری حاصل می‌شود.

اگر درجهٔ غیر یکنواختی میدان K خیلی کم باشد (یعنی میدان الکتریکی غیر یکنواخت ضعیف داشته باشیم)، ضریب یونیزاسیون α در تمام فاصلهٔ بین الکترودها تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. در این حالت، اگر شدّت میدان الکتریکی در نقطه‌ای از میدان به حدّ لازم برای یونیزاسیون گاز برسد، بهمن الکترونی تشکیل شده (به‌سبب قابل ملاحظه بودن ضریب α در تمام میدان) تمام فاصلهٔ بین الکترودها را طی می‌کند و مانند میدان‌های یکنواخت، شکست کامل گاز بین دو الکترود اتّفاق می‌افتد؛ یعنی، در این میدان‌ها، شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی با شکست کامل گاز توأماً اتّفاق می‌افتد. بنابراین، پدیدهٔ کرونا در این حالت تشکیل نمی‌شود و فقط شکست کامل گاز را خواهیم داشت.

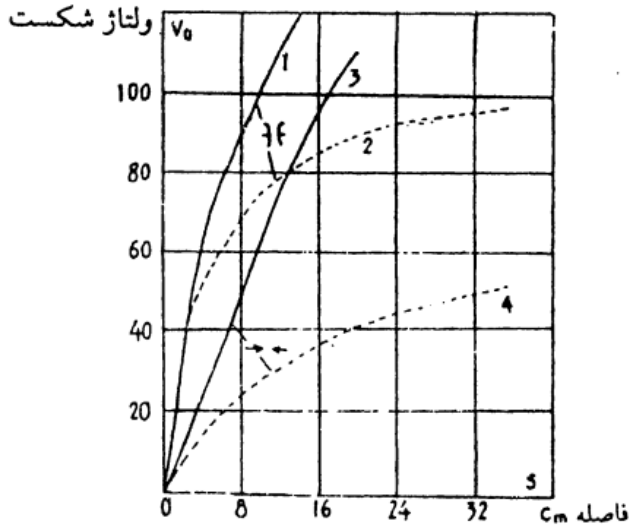
اگر درجهٔ غیر یکنواختی میدان، خیلی زیاد باشد (یعنی میدان الکتریکی غیر یکنواخت قوی داشته باشیم)، ضریب یونیزاسیون α در نقاطی از میدان، خیلی زیاد و در نقاط دیگری از میدان، خیلی کم می‌باشد. در این حالت، اگر شدّت میدان الکتریکی در نقاطی از میدان به حدّ بحرانی برسد، بهمن الکترونی در اثر یونیزاسیون فقط در همان قسمت تشکیل می‌شود؛ ولی در بقیهٔ نقاط میدان، یونیزاسیون اتّفاق نمی‌افتد. بنابراین، فقط در همان نقاط، یک هالهٔ آبی رنگ در اثر یونیزه شدن گاز توأم با جرقّه‌های موضعی ایجاد می‌شود که از الکترودِ قرار گرفته در میدان قوی، شروع شده، تا نقاطی که یونیزاسیون وجود دارد، ادامه می‌یابد. این جرقّه‌ها به‌صورت کانال‌های استریمر ایجاد می‌شود. در این حالت برای شکست کامل گاز (یعنی ادامه یافتن جرقّه‌های موضعی در تمام فضای گاز و رسیدن به الکترود دیگر)، نیاز به ولتاژ خیلی بالاتری نسبت به ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی می‌باشد.

شکست الکتریکی گازها در ولتاژهای متناوب

در صورتی‌که به‌جای ولتاژ دائم، یک ولتاژ متناوب سینوسی با فرکانس f را به یک گاز اعمال کنیم، آنگاه چنانچه فرکانس ولتاژ اعمالی کم باشد، در هر نیم سیکل که پلاریتهٔ قطب‌ها عوض می‌شود، یک یونیزاسیون و تخلیهٔ الکتریکی مستقل به‌وجود می‌آید؛ یعنی، در هر نیم سیکل از کاتد، تعدادی الکترون آزاد ایجاد می‌شود که این الکترون‌ها در مسیر خود به آند، یونیزاسیون انجام می‌دهند و همهٔ آن‌ها به آند می‌رسند. بالطبع، همهٔ یون‌های مثبت تولید شده به کاتد و همهٔ الکترون‌ها نیز به آند می‌رسند. در نیم سیکل بعدی، مجدداً این کار تکرار می‌شود. بنابراین، ولتاژ شکست گاز با چنین ولتاژ متناوبی، با ولتاژ شکست گاز مربوط به ولتاژ دائم تقریباً برابر است.

حال اگر فرکانس ولتاژ متناوب اعمالی به گاز از یک مقدار فرکانس بحرانی f_{cr} زیادتر شود، ولتاژ شکست گاز کاهش می‌یابد. دلیل آن هم این است که با افزایش فرکانس، سرعت تعویض پلاریتهٔ قطب‌ها به حدّی زیاد می‌شود که در هر نیم سیکل، تعدادی از یون‌های مثبت به‌علّت سنگینی و سرعت کم آن‌ها و به‌علّت زمان بسیار کم یک نیم سیکل، زمان کافی برای رسیدن به کاتد را نمی‌یابند. از این‌رو، در هر نیم سیکل، به‌دلیل تجمّع فضایی، تعدادی یون مثبت واقع در فضای بین الکترودها، شدّت میدان الکتریکی در نقاط بین الکترودها تقویت شده، موجب کاهش ولتاژ لازم برای شکست الکتریکی گاز می‌شوند.

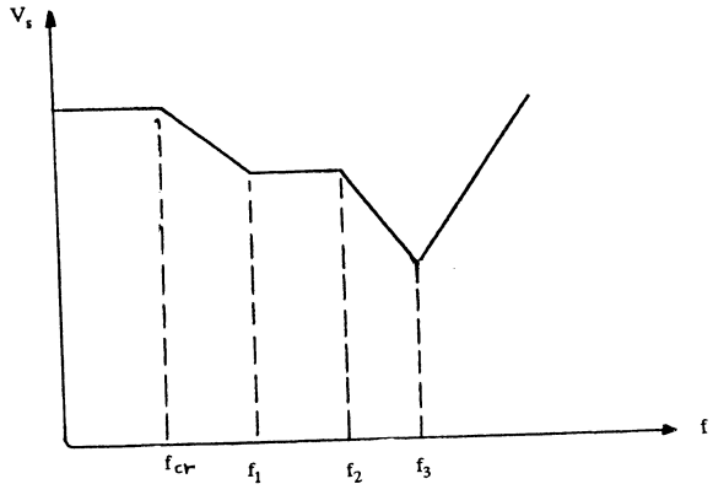
فرکانس بحرانی f_{cr} به فاصلهٔ بین الکترودها، فشار گاز و میزان غیر یکنواختی میدان بستگی دارد. با افزایش فشار گاز، برای رسیدن یون‌های مثبت به کاتد، زمان بیشتری لازم است، چون فاصلهٔ برخوردها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش فاصلهٔ بین الکترودها، زمان رسیدن یون‌ها به کاتد افزایش می‌یابد. بنابراین، با افزایش فشار یا افزایش فاصلهٔ بین الکترودها، f_{cr} کاهش می‌یابد. در میدان‌های غیریکنواخت، تشکیل بارهای مثبت در فضای بین الکترودها، بمراتب بیشتر خواهد بود و در نتیجه، شدّت میدان با شدّت بیشتری تقویت می‌شود و فرکانس بحرانی f_{cr} کاهش می‌یابد. شکل (۲-۴۳)، اثر غیر یکنواختی میدان و فرکانس را بر ولتاژ شکست نشان می‌دهد. در این شکل، منحنی‌های شمارهٔ ۱ و ۲ برای الکترودهای صفحه - صفحه و منحنی‌های شمارهٔ ۳ و ۴ برای الکترودهای سوزن - سوزن می‌باشد. منحنی‌های با خطّ پیوسته برای فرکانس ۵۰Hz و منحنی‌های خط‌چین برای فرکانس ۵۰۰kHz است.



شکل (۲-۴۳): تأثیر غیریکنواختی میدان و فرکانس بر ولتاژ شکست؛

تغییرات ولتاژ شکست با افزایش فرکانس

در صورتی‌که فرکانس را مرتّباً از f_{cr} زیادتر کنیم، ولتاژ شکست گاز نیز مرتّباً کاهش می‌یابد (شکل ۲-۴۴ را ببینید). زمانی‌که فرکانسِ ولتاژ به فرکانس $f=f_1$ می‌رسد، افزایش فرکانس، دیگر کاهش قابل ملاحظه‌ای را در ولتاژ شکست گاز به‌وجود نمی‌آورد و تقریباً ولتاژ شکست با افزایش فرکانس ثابت می‌ماند. این موضوع به آن علّت است که در این حالت، مرتّباً تعدادی از یون‌های مثبت تولید شده با الکترون‌های آزاد، ترکیب مجدّد می‌شود و تعداد آن‌ها به حالت تعادل می‌رسد و تا فرکانس $f=f_2$، افزایش فرکانس، به‌مقدار کمی ولتاژ شکست گاز را کاهش می‌دهد. وقتی فرکانس از فرکانس f_2 زیادتر می‌شود، زمان هر نیم سیکل به قدری کوچک می‌شود که تعدادی از الکترون‌های آزاد نیز، علی‌رغم سرعت زیاد آن‌ها، فرصت رسیدن به آند را نمی‌یابند. از این‌رو، حجمی از بارهای منفی نیز در فضای بین الکترودها تشکیل می‌شود و شدّت میدان قوی‌تر می‌گردد و امکان یونیزاسیون و شکست گاز، افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند و بالطبع، ولتاژ شکست گاز شدیداً کاهش می‌یابد. اگر فرکانس از مقدار $f=f_3$ نیز زیادتر شود، دیگر ولتاژ شکست گاز کاهش نمی‌یابد و بر عکس افزایش پیدا می‌کند؛ زیرا زمان هر نیم سیکل شدیداً کاهش می‌یابد. کاهش زمان مورد نظر به‌حدّی است که حتّی تعداد زیادی از الکترون‌ها، فرصت لازم برای یونیزاسیون در یک نیم سیکل را به‌دست نمی‌آورند. در این حالت، فقط اگر ولتاژ اعمالی خیلی زیاد باشد، شکست گاز به‌وقوع می‌پیوندد که انرژی کسب شده توسّط الکترون، زیاد بوده، فاصلهٔ بین برخوردها کم می‌باشد. لازم به ذکر است که در فرکانس‌های بالا، قانون پاشن صادق نخواهد بود.



شکل (۲-۴۴): تغییرات ولتاژ شکست با تغییر فرکانس