سایت تخصصی **دانشجویان ارشد و دکترای برق**

(مرجع تخصصی تحصیلات تکمیلی برق)

تامین کننده منابع اموزشی و پژوشی دانشجویان ارشد و دکترای برق

www. asatiz .com

اساتید

تامین کننده منابع اموزشی و پژوشی دانشجویان ارشد و دکترای برق

کنکور دکترای برق

کتب و جزوات ارشد و دکترای برق

اموزشهای تخصصی برق (نرم افزار- مسائل درسی و ...)

کنفرانسها و ژورنالهای برق

ازمون نظام مهندسی برق

بورس و تحصیل در خارج از کشور

فهرست مطالب

عنوان | صفحه

فصل اوّل: مقدّمه‌ای بر مسائل عایق‌های الکتریکی و فشار قوی ۱

۱-۱- مقدّمه..... ۱

۱-۲- ویژگی‌های الکتریکی و خواصّ فیزیکی و شیمیایی موادّ عایقی..... ۳

۱-۲-۱- رفتار مکانیکی مادّهٔ عایقی..... ۴

۱-۲-۲- رفتار گرمایی مادّهٔ عایقی ۴

۱-۲-۳- رفتار شیمیایی..... ۵

۱-۲-۴- خصوصیّات الکتریکی..... ۵

۱-۲-۵- عوامل اقتصادی..... ۶

۱-۳- طبقه‌بندی مواد..... ۶

فصل دوم: عایق‌های گازی..... ۹

۲-۱- مقدّمه..... ۹

۲-۲- یونیزاسیون در گازها..... ۱۰

۲-۳- ترکیب مجدّد..... ۱۳

۲-۴- انواع یونیزاسیون در گازها ۱۴

۲-۴-۱- یونیزاسیون ضربه‌ای ۱۴

۲-۴-۱-۱- احتمال یونیزاسیون در اثر برخورد..... ۱۶

۲-۴-۱-۲- یونیزاسیون ضربه‌ای مرحله‌ای..... ۱۷

۲-۴-۲- یونیزاسیون نوری ۱۹

۲-۴-۳- یونیزاسیون حرارتی..... ۲۰

۲-۴-۴- یونیزاسیون سطحی..... ۲۲

عنوان | صفحه

۲-۵- نظریهٔ تخلیهٔ الکتریکی گازها بر اساس یونیزاسیون ضربه‌ای..... ۲۷
۲-۵-۱- فاصلهٔ آزاد ذرّات در گاز ۲۸
۲-۵-۲- رابطهٔ میانگین فاصلهٔ آزاد با یونیزاسیون و نقش الکترون‌ها ۳۲
۲-۵-۳- توزیع آماری فاصلهٔ آزاد..... ۳۳
۲-۵-۴- ضریب تخلیهٔ الکتریکی..... ۳۵
۲-۵-۵- پدیدهٔ بهمن الکترونی و تخلیهٔ الکتریکی تانزند ۳۹
۲-۵-۵-۱- محاسبهٔ جریان تخلیهٔ الکتریکی غیر مستقل ۴۲
۲-۵-۵-۲- ارتباط جریان تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل با فاصلهٔ الکترودها ۴۳
۲-۵-۵-۳- تخلیهٔ الکتریکی مستقل ۴۵
۲-۵-۵-۴- محاسبهٔ جریان تخلیهٔ الکتریکی مستقل ۴۸
۲-۵-۵-۵- ولتاژ شکست گاز در میدان‌های الکتریکی یکنواخت(قانون پاشن) ۵۱
۲-۵-۵-۵-۱- وضعیّت (P.d)min > (P.d) ۵۵
۲-۵-۵-۵-۲- وضعیّت (P.d)min < (P.d) ۵۶
۲-۵-۵-۵-۳- وضعیّت (P.d)min = (P.d) ۵۶
۲-۵-۵-۵-۴- حوزهٔ صحّت قانون پاشن..... ۵۷
۲-۵-۶- ولتاژ شکست گازهای الکترونگاتیو ۵۷
۲-۵-۶-۱- محاسبهٔ ولتاژ شکست هوا ۶۱
۲-۵-۶-۲- محاسبهٔ ولتاژ شکست گاز SF6 ..... ۶۳
۲-۵-۷- ولتاژ شکست در گازهای مخلوط (اثر پنینگ) ۶۴
۲-۵-۸- نظریهٔ استریمر ۶۵
۲-۶- زمان تأخیر در شکست الکتریکی گازها..... ۶۸
۲-۷- پدیدهٔ پس‌شکست و کاربردها ۷۱
۲-۷-۱- ناحیهٔ تابش (التهاب)..... ۷۲
۲-۷-۲- ناحیهٔ تخلیه ۷۳
۲-۸- تخلیهٔ الکتریکی گازها در میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت..... ۷۳
۲-۸-۱- تأثیر درجهٔ غیر یکنواختی روی نحوهٔ تخلیهٔ الکتریکی گازها..... ۷۷

عنوان | صفحه

۲-۸-۲- انواع میدان‌های غیر یکنواخت از نظر شکل الکترودها ۷۸
۲-۸-۲-۱- میدان الکتریکی بین دو میلهٔ نوک تیز ۷۹
۲-۸-۲-۲- میدان الکتریکی بین دو گوی کروی..... ۸۰
۲-۸-۲-۳- میدان الکتریکی بین میلهٔ نوک تیز و صفحه..... ۸۲
۲-۸-۲-۴- میدان الکتریکی بین دو گوی متّحدالمرکز ۸۷
۲-۸-۲-۵- میدان الکتریکی بین دو استوانه متّحدالمحور ۹۰
۲-۹- شکست الکتریکی گازها در ولتاژهای متناوب..... ۹۸
۲-۱۰- تغییرات ولتاژ شکست با افزایش فرکانس ۹۹

فصل سوّم: عایق‌های مایع..... ۱۰۱

۳-۱- مقدّمه ۱۰۱
۳-۲- عایق‌های مایع خالص و تجاری ۱۰۳
۳-۳- نظریهٔ شکست الکترونی ۱۰۴
۳-۴- مکانیزم شکست در اثر ذرّات ناخالص جامد..... ۱۰۶
۳-۵- مکانیزم شکست در اثر حباب‌های ناخالص گازی ۱۰۸
۳-۶- مکانیزم شکست در اثر ناخالصی قطرات مایع‌های دیگر ۱۱۱
۳-۷- عوامل مؤثّر بر ولتاژ شکست عایق مایع ۱۱۳
۳-۸- خواصّ لازم برای روغن ترانسفورماتورها ۱۱۷
۳-۹- آزمایش روغن ترانسفورماتورها..... ۱۱۹
۳-۱۰- تصفیهٔ روغن ترانسفورماتور ۱۲۱
۳-۱۰-۱- روش‌های تصفیهٔ فیزیکی ۱۲۲
۳-۱۰-۲- روش‌های تصفیهٔ شیمیایی ۱۲۳

فصل چهارم: عایق‌های جامد..... ۱۲۵

۴-۱- مقدّمه ۱۲۵

عنوان | صفحه

۴-۲- مکانیزم شکست ذاتی ۱۲۷
۴-۳- مکانیزم شکست الکترومکانیکی ۱۲۹
۴-۴- مکانیزم شکست حرارتی ۱۳۱
۴-۴-۱- نقش پارامتر ضریب تلفات عایقی در مکانیزم شکست حرارتی ۱۳۷
۴-۵- مکانیزم شکست فرسودگی ۱۴۱
۴-۶- مکانیزم شکست لبه‌ها ۱۴۴
۴-۷- تخلیهٔ الکتریکی سطحی ۱۴۷
۴-۸- ردگذاری در سطح عایق‌های جامد ۱۴۸
۴-۹- عایق‌های چندگانه در میدان‌های یکنواخت ۱۴۹
۴-۱۰- شکست خطوط میدان در عایق‌های چندگانه ۱۵۲
۴-۱۱-کنترل شدّت میدان در میدان‌های غیریکنواخت ۱۵۵

فصل پنجم: شناخت میدان‌های الکتریکی ۱۶۱

۵-۱- مقدّمه ۱۶۱
۵-۲- پیدا کردن میدان الکتریکی به‌وسیلهٔ اندازه‌گیری و آزمایش ۱۶۲
۵-۲-۱- تعیین جهت میدان با روش پرِکاه ۱۶۲
۵-۲-۲- تعیین پتانسیل میدان با روش جبرانی ۱۶۳
۵-۲-۳- تعیین شدّت میدان با استفاده از القای بار الکتریکی روی الکترود .. ۱۶۴
۵-۲-۴- اندازه‌گیری شدّت میدان با عبور نور از کریستال ۱۶۸
۵-۲-۵- تعیین شدّت میدان با روش‌های غیرمستقیم ۱۶۹
۵-۳- پیدا کردن میدان الکتریکی به روش ترسیمی ۱۷۱
۵-۳-۱- میدان الکتریکی با موادّ عایقی مختلف ۱۷۴
۵-۳-۲- ترسیم میدان در گوشه‌ها ۱۷۵
۵-۴- محاسبهٔ میدان الکتریکی با استفاده از روش‌های عددی ۱۷۷
۵-۴-۱- روش تفاضل محدود (FDM) ۱۷۷

عنوان | صفحه

۵-۴-۱-۱- تقسیم میدان با شبکهٔ غیریکنواخت ۱۸۰
۵-۴-۱-۲- موادّ مختلف در عایق ۱۸۱
۵-۴-۱-۳- میدان سه بعدی ۱۸۲
۵-۴-۱-۴- میدان دوّار ۱۸۳
۵-۴-۲- روش اجزای محدود (FEM) ۱۸۴
۵-۴-۳- روش بارهای فرضی (CSM) ۱۸۷
۵-۵- پیدا کردن میدان الکتریکی با روش نگاشت کانفورم ۱۹۱
۵-۵-۱- تابع نگاشت ماکسول ۱۹۶
۵-۵-۲- خم روکوفسکی ۱۹۹

فصل ششم: مقره‌های فشار قوی ۲۰۱

۶-۱- مقدّمه ۲۰۱
۶-۲- جنس مقره‌ها ۲۰۲
۶-۲-۱- مقره‌های چینی ۲۰۳
۶-۲-۲- مقره‌های شیشه‌ای ۲۰۴
۶-۲-۳- مقره‌های کامپوزیت ۲۰۵
۶-۲-۴- مقره‌های رزینی ۲۰۷
۶-۳- شکست الکتریکی در مقره‌ها ۲۰۷
۶-۳-۱- تخلیهٔ بین هادی و بدنه از طریق هدایت سطحی عایق ۲۰۷
۶-۳-۲- تخلیه در اثر افزایش ناگهانی ولتاژ بین هادی و بدنه در هوای خشک ۲۰۸
۶-۳-۳- تخلیه در اثر افزایش ناگهانی ولتاژ بین هادی و بدنه در هوای مرطوب . ۲۰۸
۶-۴- انواع مقره‌ها ۲۱۱
۶-۵- مقره‌های خطوط هوایی ۲۱۲
۶-۵-۱- مقره‌های سوزنی ۲۱۲
۶-۵-۲- مقره‌های آویزان بشقابی ۲۱۵

عنوان | صفحه

۶-۵-۳- مقره‌های کششی ۲۱۹
۶-۵-۴- مقرهٔ مهار ۲۲۰
۶-۵-۵- مقره‌های آویزان استوانه‌ای ۲۲۱
۶-۵-۶- مقره‌های چرخی ۲۲۲
۶-۵-۷- مقره‌های مخصوص ۲۲۳
۶-۶- مقره‌های اتّکایی (مقره‌های نوع ایستگاه) ۲۲۶
۶-۷- مقره‌های عبوری (بوشینگ‌ها) ۲۲۸
۶-۸- توزیع پتانسیل روی یک زنجیرهٔ مقره آویزان ۲۲۹
۶-۹- روش‌های متعادل کردن پتانسیل روی یک زنجیره مقره آویزان ۲۳۶
۶-۹-۱- افزایش مقدار m ۲۳۶
۶-۹-۲- درجه‌بندی کاپاسیتانس واحدهای مقره ۲۳۷
۶-۹-۳- کاربرد حفاظ استاتیکی یا حلقهٔ محافظ ۲۳۸
۶-۹-۴- لعاب هادی ۲۴۴
۶-۱۰- آزمایش مقره‌های خطوط هوایی ۲۴۵
۶-۱۰-۱- آزمایش‌های نوعی بر طبق استاندارد بین‌المللی IEC ۲۴۶
۶-۱۰-۲- آزمایش‌های روی مقره‌های نمونه، طبق استاندارد IEC ۲۴۹
۶-۱۰-۳- آزمایش‌های سری مقره‌ها ۲۵۵
۶-۱۱- شناسایی مقره‌ها ۲۵۶

فصل هفتم: کرونا ۲۵۷

۷-۱- مقدّمه ۲۵۷
۷-۲- کرونا در خطوط انتقال ۲۵۸
۷-۳- محاسبهٔ ولتاژ کرونا ۲۶۰
۷-۳-۱- ولتاژ بحرانی کرونای قابل‌رؤیت ۲۶۵
۷-۴- کرونا در خطوط انتقال سه فاز ۲۶۶

عنوان | صفحه

۷-۵- عوامل مؤثّر بر کرونا ۲۶۸
۷-۵-۱- شرایط جوّی ۲۶۸
۷-۵-۲- شرایط هادی‌ها ۲۶۸
۷-۶- تلفات کرونا ۲۷۲
۷-۶-۱- شکل تقریبی رابطهٔ پترسون برای تلفات کرونا ۲۷۵
۷-۷- عوامل مؤثّر بر تلفات کرونا ۲۷۷
۷-۷-۱- عوامل مربوط به فرسودگی خطوط ۲۷۷
۷-۷-۲- عوامل الکتریکی مؤثّر بر تلفات کرونا ۲۷۷
۷-۷-۳- عوامل جوّی مؤثّر بر تلفات کرونا ۲۷۸
۷-۷-۴- عوامل مربوط به هادی ۲۸۰
۷-۷-۵- روش عملی کاهش تلفات کرونا ۲۸۲
۷-۸- مزایا و معایب کرونا ۲۸۳

فصل هشتم: تولید ولتاژهای فشار قوی ۲۸۵

۸-۱- مقدّمه ۲۸۵
۸-۲- کاربرد ولتاژ فشار قوی DC ۲۸۶
۸-۲-۱- مزایای استفاده از خطوط HVDC ۲۸۸
۸-۳- تعریف ولتاژ DC ۲۹۰
۸-۴- تولید ولتاژ فشار قوی DC ۲۹۱
۸-۴-۱- یکسوساز نیم‌موج ۲۹۱
۸-۴-۲- یکسوساز تمام‌موج ۲۹۴
۸-۴-۳- مدارهای چند برابر کنندهٔ ولتاژ DC ۲۹۵
۸-۴-۳-۱- مدار ویلارد ۲۹۵
۸-۴-۳-۲- مدار والتن ۲۹۶
۸-۴-۳-۳- مدار چند برابرکنندهٔ ولتاژ آلیبون ۳۰۳

عنوان | صفحه

۸-۴-۳-۴- مدار انجترون و دلتاترون ۳۰۶
۸-۴-۴- مولّدهای الکترواستاتیک ۳۰۹
۸-۴-۴-۱- مولّد واندوگراف ۳۰۹
۸-۵- تولید ولتاژ فشار قوی AC ۳۱۱
۸-۵-۱- ترانسفورماتورهای سری ۳۱۲
۸-۵-۲- تولید ولتاژ فشار قوی AC با فرکانس بالا ۳۱۷
۸-۵-۳- مدار رزونانس برای تولید ولتاژ فشار قوی AC ۳۱۹
۸-۶- ولتاژ فشار قوی ضربه‌ای ۳۲۲
۸-۶-۱- موج ضربه‌ای استاندارد صاعقه ۳۲۳
۸-۶-۲- موج ضربه‌ای استاندارد سوئیچینگ ۳۲۴
۸-۶-۳- موج ضربه‌ای شکسته ۳۲۵
۸-۷- مولدهای ولتاژ ضربه‌ای ۳۲۶
۸-۷-۱- مدار RC تولید ولتاژ ضربه‌ای ۳۲۶
۸-۷-۲- مولّد ضربه‌ای چند طبقه - مدار مارکس ۳۳۳
۸-۷-۳- تولید امواج سوئیچینگ نوسانی ۳۳۸
۸-۸- مولّد جریان‌های ضربه‌ای ۳۴۱
۸-۸-۱- تعریف شکل موج‌های جریان ضربه‌ای ۳۴۱
۸-۸-۲- مدار تولید امواج جریان ضربه‌ای ۳۴۲
۸-۸-۳- تولید جریان‌های ضربه‌ای با دامنهٔ بالا ۳۴۴

فصل نهم: اندازه‌گیری ولتاژهای فشار قوی و تلفات عایقی ۳۴۵

۹-۱- مقدّمه ۳۴۵
۹-۲- اندازه‌گیری ولتاژهای DC ۳۴۵
۹-۲-۱- استفاده از مقاومت سری و میکروآمپرمتر ۳۴۵
۹-۲-۲- استفاده از مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر با امپدانس بالا ۳۴۶

عنوان | صفحه

۹-۲-۳- استفاده از دو الکترود کروی شکل فلزی ۳۴۸
۹-۲-۴- استفاده از ولت‌مترهای الکترواستاتیکی ۳۵۰
۹-۲-۵- استفاده از ولت‌متر مولّد ۳۵۲
۹-۳- اندازه‌گیری ولتاژهای AC ۳۵۵
۹-۳-۱- استفاده از دو الکترود کروی شکل فلزی ۳۵۵
۹-۳-۲- استفاده از ولت‌متر الکترواستاتیکی ۳۵۶
۹-۳-۳- استفاده از مقاومت سری و میکروآمپرمتر ۳۵۶
۹-۳-۴- استفاده از مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر با امپدانس بالا ۳۵۷
۹-۳-۵- استفاده از خازن سری و آمپرمتر ۳۵۷
۹-۳-۶- استفاده از مقسّم ولتاژ خازنی و ولت‌متر الکترواستاتیکی ۳۵۸
۹-۳-۷- استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT) ۳۶۰
۹-۳-۸- استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ (نوع مغناطیسی PT) ۳۶۳
۹-۳-۹- استفاده از خازن سری، آمپرمتر DC و دیودهای یکسوساز ۳۶۴
۹-۳-۱۰- استفاده از مقسّم خازنی، یکسوسازی ولتاژ و شارژ خازن تا حدّ دامنه ۳۶۶
۹-۴- اندازه‌گیری ولتاژهای ضربه‌ای ۳۶۷
۹-۴-۱- استفاده از دو الکترود کروی شکل برای تعیین دامنهٔ موج ضربه‌ای .. ۳۶۷
۹-۴-۲- استفاده از مقسّم‌های ولتاژی ۳۶۷
۹-۴-۳- اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای به‌وسیله مقسّم ولتاژ مقاومتی
یکسوسازی ولتاژ و شارژ خازن تا حدّ دامنهٔ ولتاژ ۳۷۰
۹-۵- اندازه‌گیری ظرفیت خازنی و ضریب تلفات عایقی ۳۷۱

فصل دهم: امواج سیّار در خطوط انتقال ۳۷۷

۱۰-۱- مقدّمه ۳۷۷
۱۰-۲- معادلات موج سیّار روی خطّ انتقال ۳۷۸
۱۰-۳- قوانین انعکاس و انتقال موج سیّار در خطوط انتقال ۳۸۶

عنوان | صفحه

۱۰-۴- بررسی حالت‌های خاص ۳۸۹
۱۰-۴-۱- خطّ انتقال با انتهای باز ۳۸۹
۱۰-۴-۲- خطّ انتقال با انتهای اتّصال کوتاه ۳۹۱
۱۰-۴-۳- اتصّال دو خط به یکدیگر ۳۹۴
۱۰-۴-۴- اتّصال چند خط در یک نقطه ۳۹۶
۱۰-۴-۵- اتّصال چند خطّ انتقال به‌صورت سری ۳۹۸
۱۰-۴-۶- اتّصال مقاومت در انتهای خط ۳۹۸
۱۰-۴-۷- اتّصال مقاومت در نقطهٔ اتصال دو خط ۳۹۹
۱۰-۴-۸- اتّصال سلف در انتهای یک خط ۴۰۴
۱۰-۴-۱۰- اتّصال خازن در انتهای خط ۴۰۶
۱۰-۵- میرایی موج سیّار ۴۱۱
۱۰-۵-۱- اثر مقاومت اهمی خطوط در میرایی امواج سیّار ۴۱۲
۱۰-۵-۲- میرایی موج ناشی از پدیدهٔ کرونا ۴۱۴
۱۰-۶- نمودار شبکه‌ای بیولی ۴۱۵

منابع و مآخذ ۴۲۱

واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی ۴۲۵

واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی ۴۳۱

فصل اوّل

مقدّمه‌ای بر مسائل عایق‌های الکتریکی و فشار قوی

۱ - ۱ - مقدّمه

اصولاً ولتاژهای کم‌تر از هزار ولت را فشار ضعیف، و بیش از هزار ولت را فشار قوی می‌گویند. دستگاه‌هایی را که با ولتاژهای بیش از هزار ولت کار می‌کنند، به اصطلاح "تجهیزات فشار قوی" می‌گویند. در عصر حاضر، برق فشار قوی موارد کاربرد فراوانی از قبیل استفاده در نیروگاه‌ها، ایستگاه‌های انتقال برق، خطوط انتقال برق، صنایع و آزمایشگاه‌های تحقیقاتی دارد؛ به‌طوری که موارد ذکر شده، از عوامل اساسی ادامهٔ بقای تمدّن روزگار ما شده است. همچنین برق فشار قوی، در تحقیقات هسته‌ای و دستگاه‌های شتاب دهنده الکترون مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای انتقال مقادیر زیاد انرژی الکتریکی در فواصل طولانی، استفاده از ولتاژ فشار قوی، به‌منظور کاهش تلفات و افزایش بازدهٔ خطوط انتقال، اجتناب‌ناپذیر است. از موارد دیگری که برق با ولتاژ بیش از صد کیلوولت استفاده می‌شود، در سیم‌پیچ جرقّهٔ اتومبیل‌ها و همچنین وسایل پرتونگاری (که در پزشکی و صنعت به‌کار برده می‌شوند) می‌باشد. در آزمایش‌هایی که جدیداً انجام می‌شود، از ولتاژهای تا ۶۰۰۰kV یا بیشتر نیز استفاده می‌شود.

در شرایطی که از ولتاژ فشار قوی استفاده می‌شود، طرّاحی دقیق سیستم عایقی

از اهمّیت زیادی برخوردار است. به‌همین منظور از عایق‌های مختلفی از قبیل گازها، جامدات و مایعات و ایجاد خلاء و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده می‌شود. برای صرفه‌جویی و اطمینان از انجام موفّق کار، باید دانش مربوط به عوامل فساد عایق و نیز عواملی راکه باعث کاهش ولتاژ شکست و از بین رفتن عایق می‌شوند، در طراحی مورد توجّه قرار داد. وظیفهٔ عایق‌ها، ایزولاسیون (جدا سازی الکتریکی) ولتاژهای فشار قوی نسبت به یکدیگر و همچنین نسبت به زمین می‌باشد، تا هم ولتاژ و جریان فشار قوی در مسیر مربوط به خود قرار گیرند و هم از بروز خسارت و ضرر و زیان به افراد و تجهیزات جلوگیری شود. عایق ایده‌آل (طبق تعریف)، یک نارسانای جریان الکتریسیته است که هیچ جریان الکتریکی را از خود عبور نمی‌دهد؛ ولی عملاً هیچ مادّه‌ای را در طبیعت نمی‌توان یافت که ویژگی‌های یک عایق ایده‌آل را داشته باشد. امّا برای استفاده‌های کاربردی، یک عایق، مادّه‌ای است که عبور جریان از خود را در حدّ بسیار کم و مطلوبی محدود نماید؛ به حدّی که بتوان از آن صرف‌نظر کرد. به‌عبارت دیگر، در ولتاژهای عادی، مقاومت الکتریکی عایق خیلی زیاد است. اگر در ولتاژهای بسیار بالا از عایق، جریان قابل ملاحظه‌ای عبور کند در حقیقت، عایق دیگر خاصیت عایقی خود را از دست داده، دچار شکست الکتریکی می‌شود؛ به‌عبارت دیگر، عایق تبدیل به هادی می‌شود. قبل از بروز شکست در عایق‌ها، عایق شبیه به یک خازن است که دو الکترود در دو طرف آن، صفحات خازن هستند و با اعمال ولتاژ به این خازن، شارژ می‌شود. پس از شکست الکتریکی عایق، این خازن در واقع دشارژ و تخلیه می‌گردد. به‌همین دلیل پدیدهٔ شکست الکتریکی عایق‌ها را، تخلیهٔ الکتریکی نیز می‌گویند. استقامت الکتریکی عایق‌ها را بر حسب بالاترین شدّت میدان الکتریکی قابل تحمّل، قبل از تخلیهٔ الکتریکی می‌سنجند و معمولاً آن بر حسب kV/cm یا kV/mm بیان می‌شود. بررسی عملکرد عایق‌ها، نیاز به بررسی‌های علمی (با استفاده از نظریه‌های فیزیکی و روابط ریاضی) و همچنین بررسی‌های تجربی (از طریق آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌های لازم)، روی عایق‌ها دارد و پیشرفت‌های حاصل در زمینهٔ مکانیزم تخلیهٔ الکتریکی عایق‌ها همواره با این دو مورد همگام بوده است.

همان‌گونه که گفتیم، موادّ عایقی، مقاومت فوق‌العادّه زیادی در برابر عبور جریان

از هادیهایِ دارای اختلاف پتانسیل نسبت به هم، از خود نشان می‌دهند که باعث می‌شود تا جریان نشتی در مقایسه با جریان‌های اصلی عبوری از سیم‌پیچ‌های ژنراتورها، موتورها و ترانسفورماتورها یا هادی‌های خطوط انتقال هوایی و یا کابل‌های زیرزمینی ناچیز باشد. به‌منظور درک بهتر چگونگی شکست موادّ عایقی، یک مطالعهٔ مختصر در مورد موادّ عایقی الکتریکی لازم است. از سال‌های آغاز پیدایش مهندسی برق تا سال ۱۸۳۰ میلادی، در اختراعات و آزمایش‌های الکتریکی، موادّ عایقی مورد نیاز در تجهیزات، به آسانی در دسترس بودند. امّا با پیشرفت و رشد صنعت برق، بعضی از موادّ عایقی مانند لاستیک، آسفالت، میکا، پنبه، شالاک (لاک شیشه‌ای)، پارچه وِرنی و غیره استفادهٔ عملی پیدا کردند. بنابراین تا قبل از جنگ جهانی دوم، میکا، پنبه نسوز، قیر و شالاک و موادّ مصنوعی نیز، به صنعت عایق‌کاری راه یافتند. بعد از جنگ جهانی دوم هم موادّ عایقی مانند پُلیتن، PVC، پلاستیک‌ها، پلی نامیدها، پلی‌کربنات‌ها، پلی‌استرن، پلی‌اتیلن و غیره در امر عایق‌کاری مورد استفاده قرار گرفتند.

۱-۲- ویژگی‌های الکتریکی و خواصّ فیزیکی و شیمیایی موادّ عایقی

کاربرد عایق‌ها در ساخت ژنراتورها، موتورها، ترانسفورماتورها، برقگیرها، خازن‌ها، کابل‌ها، کلیدهای فشار قوی، مقره‌ها و سایر تجهیزات فشار قوی بسیار گسترده است. با توجّه به نوع کاربرد و شرایط محیطی که عایق در آن قرار می‌گیرد، علاوه برخاصیت الکتریکی، سایر خواصّ فیزیکی و شیمیایی آن نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. ویژگی‌های یک مادّهٔ عایقی را برای استفاده‌های بخصوص می‌توان به‌صورت زیر، اولویت‌بندی نمود:

۱- رفتار مکانیکی
۲- رفتار گرمایی
۳- پارامترهای شیمیایی
۴- خصوصیت‌های الکتریکی
۵- عوامل اقتصادی

۱-۲-۱- رفتار مکانیکی مادّهٔ عایقی

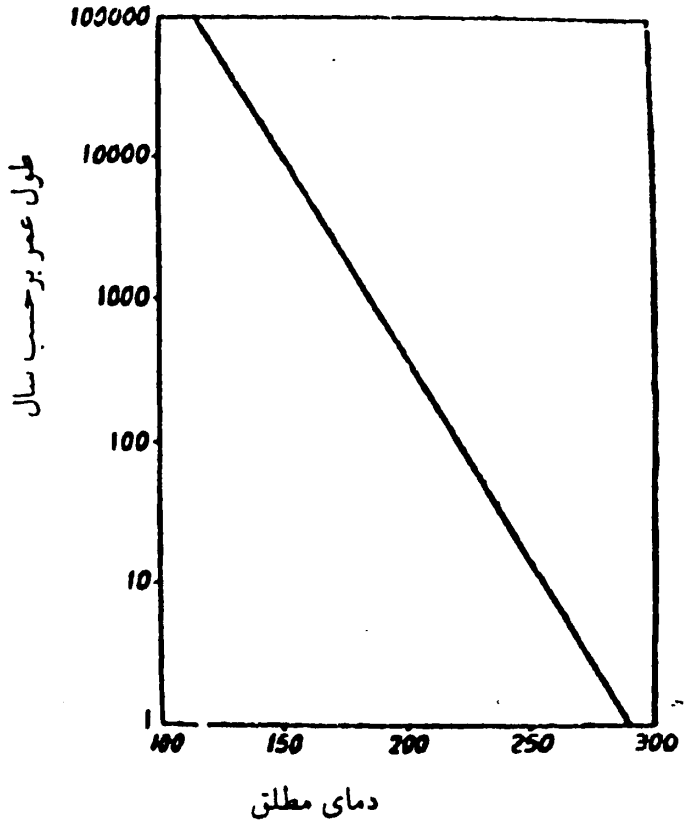
استحکام مادّهٔ عایقی، نیاز اصلی و اساسی آن می‌باشد. ضریب کشسانی برای یک ساختمان سخت، باید بالا و برای یک سیستم عایقی باید پایین باشد. به‌عنوان مثال، جنس صفحهٔ آستر شیار ماشین‌های الکتریکی باید به اندازهٔ کافی سفت باشد تا بتواند در مقابل صفحهٔ داخلی شکاف منبسط شده، بدون شکستن تا بخورد و نیز باید لبهٔ شکاف در مقابل ورقه ورقه شدن، ارتعاش، تأثیر شیمیایی روغن جلای به‌کار رفته، اثر افزایش دما، جذب رطوبت و غیره مقاومت کند. برآمدگی سیم‌پیچ باید در قبال فرسودگی، مقاومت زیادی کند و یا ضریب اصطکاک کمی داشته باشد. جلای عایقی باید کاملاً به سیم‌ها چسبیده باشد و الاستیته لازم برای انبساط را داشته باشد تا بر اثر تغییر دما، مس‌ها بتوانند به هم برسند. بنابراین، ملزومات مکانیکی بسته به نوع کاربرد برای یک عایق، متفاوت‌اند.

۱-۲-۲- رفتار گرمایی مادّهٔ عایقی

در به‌کارگیری بسیاری از عایق‌ها به نوعی از موادّ عایقی نیاز است که در یک دورهٔ کوتاه اضافه بار[۱] و در دماهای بسیار بالا منبسط نگردند. معمولاً ویژگی‌های فیزیکی موادّ با افزایش دما، تغییر می‌کنند. نیروی کششی در عایق‌ها نباید به نقطه‌ای برسد که باعث تغییر شکل و فرسودگی بیش از اندازهٔ آن شود. همچنین یک مادّهٔ عایقی از نوع ترموپلاستیک[۲]، نباید دمای عملکرد آن (حتّی برای یک زمان کوتاه) به دمای نقطهٔ ذوب برسد. وقتی موادّ عایقی برای مدّت طولانی‌تری در معرض حرارت قرار می‌گیرند، ترکیب شیمیایی آن‌ها تغییر می‌کند. این تغییر شیمیایی باعث تغییر ویژگی‌های فیزیکی از حالت مجاز به حالت غیرمجاز می‌شود و در نتیجه، کهنگی و فرسودگی مادّه را به‌همراه خواهد داشت. بنابراین، می‌توان گفت که مدّت زمان عملکرد عایق با دمای مطلق آن عایق، نسبت عکس دارد که نمودار آن برای اغلب عایق‌ها، یک نمودار تقریباً خطّی خواهد بود. در شکل (۱-۱) این ارتباط نشان داده شده است.

1- Over Load

۲- موادّی که در اثر گرما دادن به آن، نرم می‌شوند.



شکل (۱-۱): رابطهٔ بین دمای مطلق و کارکرد عایق

۱-۲-۳- رفتار شیمیایی

رفتار شیمیایی به تأثیر محیط روی مادّهٔ عایق بستگی دارد. معمولاً این محیط همان هوای حامل رطوبت است. اکسیژن موجود در هوا قادر است عایق را به‌گونه‌ای اکسید کند که به‌شکل زیان‌آوری، ویژگی‌های فیزیکی آن از بین رود. همچنین می‌تواند باعث تخریب بعضی عایق‌ها شود. به‌علاوه اثرات تخریبی روی سطح عایق باعث می‌شود که مقاومت عایقی پایین بیاید.

۱-۲-۴- خصوصیّات الکتریکی

از مهم‌ترین خصوصیّت‌های هر عایقی، استقامت الکتریکی آن است. استقامت الکتریکی عایق‌ها بر حسب حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی قابل تحمّل آن‌ها سنجیده می‌شود و معمولاً بر حسب kV/cm بیان می‌گردد. 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.

۱-۲-۵- عوامل اقتصادی

یکی از عوامل مؤثّر در طرّاحی عایق‌ها، طرح یک سیستم عایقی است، به‌گونه‌ای که بهترین عملکرد را به ازای قیمت مناسب داشته باشد. البتّه این موضوع به‌معنای تلاش برای کم کردن قیمت‌های در واحد وزن، برای سیستم‌های عایق‌کاری و تجهیزات آن نمی‌باشد. اگر با صرف هزینهٔ بیشتری برای یک یا چند قطعه در سیستم، بتوان ابعاد سیستم را کاهش داد، در نتیجه عاقلانه‌تر است که از عایق‌های گران‌تر، بیشتر استفاده شود. جملگی این مسائل باید پیرامون قیمت در واحد وزن، تولید، مصرف و تغییر طرّاحی برای انطباق در دماهای بالاتر مورد بررسی قرار گیرد.

۱-۳- طبقه‌بندی مواد

موادّ عایقی همیشه بر اساس دمای کار نامی آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. با ظهور بسیاری از موادّ جدید عایقی، طبقه‌بندی جدید مواد نیز مانند جدول (۱-۱) به‌وجود آمده است. این دسته‌بندی بر اساس دمای نامی عایق‌هاست. البتّه طول عمر نامی عایق‌ها وقتی معتبر است که دمای کار عایق در شرایط بهره‌برداری، همواره از دمای نامی آن بیشتر نشود.

جدول (۱-۱): طبقه‌بندی موادّ عایقی بر حسب دما

طبقه	دما (°C)
Y	۹۰
A	۱۰۵
E	۱۲۰
B	۱۳۰
F	۱۵۵
H	۱۸۰
C	بالای ۱۸۰

نمونه‌ای از موادّ عایقی در هر یک از طبقات جدول (۱-۱) عبارتند از:

طبقهٔ Y: کاغذ، پنبه، ابریشم، PVC، و لاستیک طبیعی؛

طبقهٔ A: پنبه و ابریشم یا کاغذی که به‌طور کامل در یک دی‌الکتریک مایع غوطه‌ور، آغشته و یا کاملاً پوشیده شده باشد؛

طبقهٔ E: پلی‌اتیلن، سلولز؛

طبقهٔ B: میکا، پشم شیشه، پنبه‌نسوز، پلی‌استر، باکلیت، آسبست، و غیره همراه با موادّ چسب‌دار مناسب؛

طبقهٔ F: اپوکسی‌رزین، و موادّ طبقهٔ B اصلاح یافته و قابل کاربرد در دماهای بالاتر؛

طبقهٔ H: لاستیک سیلیکون دار؛

طبقهٔ C: تفلون و عایق‌های گروه B که آغشته به چسبنده‌های غیر آلی شده باشند.

تجهیزات الکتریکی با طبقهٔ عایقی مخصوص می‌توانند در دمای بالاتری هم کار کنند، امّا عمر مفید آن‌ها کاهش می‌یابد. عمر تجهیزات، تابعی از دما و زمان است و در کلّ عملکرد اجزا، به عمل آن‌ها در سیستم بستگی دارد. رابطهٔ تقریبی برای تخمین عمر عایق‌ها را می‌توان به‌صورت زیر ارائه کرد:

$$L = L_{\circ} \times ۲^{-(\theta - \theta_{\circ})/\Delta\theta} \qquad (۱-۱)$$

که در این رابطه:

L = طول عمر عایق در شرایط کارکرد با دمای θ،

$L_{\circ}$ = طول عمر نامی عایق در دمای نامی $\theta_{\circ}$ مربوط به کلاس عایقی،

$\Delta\theta$ = پلهٔ دمایی است که عمر عایق نصف می‌شود (برای عایق‌های مختلف بین ۶ تا ۸ درجه سانتیگراد است).

فصل دوم

عایق‌های گازی

۲ - ۱ - مقدّمه

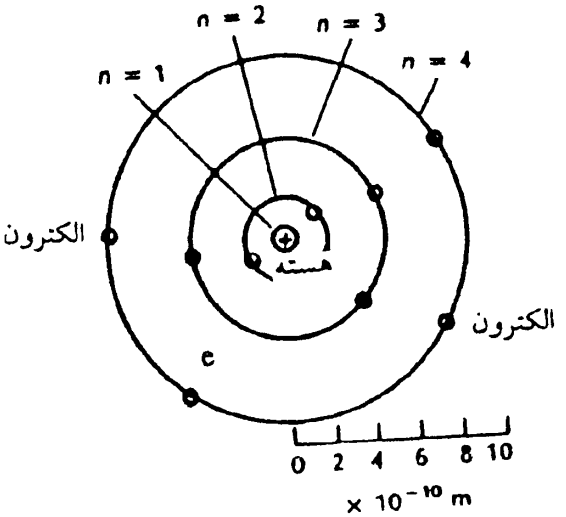
در مبحث عایق‌های فشار قوی، گازها دارای اهمّیت بالا و کاربردهای فراوانی در صنعت برق می‌باشند. از جمله این کاربردها می‌توان استفاده از آن‌ها را در کلیدهای فشار قوی نام برد. از مهم‌ترین عایق‌های گازی می‌توان به هوا، ازت (N_2)، دی‌اکسیدکربن (CO_2)، هیدروژن (H_2) و هگزافلوئورسولفور (SF6) نام برد. از گاز دی‌اکسیدکربن برای جلوگیری از اکسیداسیون استفاده می‌شود. همچنین هیدروژن دارای گرمای ویژهٔ ۱۵ برابر هوا و گاز SF6 دارای استقامت عایقی ۲ تا ۳ برابر هواست. گاز SF6 از لحاظ حرارتی بسیار پایدار و بدون اثر سوء روی فلزات است. از هیدروژن به‌دلیل خاصیت خوب انتقال گرمایی آن، معمولاً در خنک‌سازی ژنراتورها استفاده می‌کنند.

ایجاد جریان الکتریکی در داخل گازها نیاز به‌وجود ذرّات باردار (یعنی الکترون و یون) دارد. تحت تأثیر یک میدان الکتریکی، ذرّات باردار در راستای میدان الکتریکی حرکت کرده، یک جریان را به‌وجود می‌آورند. در صورتی که یک گاز از کلّیهٔ عواملی که منجر به ایجاد ذرّات باردار در آن می‌شود دور نگاه داشته شود، در آن صورت هیچ‌گونه جریان الکتریکی در آن به‌وجود نمی‌آید. این موضوع را می‌توان در خلاء مطلق (که یک عایق مطلق است)، مشاهده نمود. البتّه ایجاد خلاء مطلق امکان‌پذیر نیست؛ به‌عبارت دیگر، عایق مطلق وجود نخواهد داشت. از طرفی تعداد

ذرّات باردار داخل یک گاز در شرایط عادی خیلی کم است؛ بنابراین، گازها، عایق‌های خوبی هستند و جریان‌های الکتریکی در آن‌ها بسیار کم و در حدّ مطلوبی است.

۲-۲- یونیزاسیون در گازها

در مدل اتمی بور، الکترون‌هایی که دور هسته می‌گردند، دارای مدارهای مشخّصی هستند که هر مدار بیانگر سطح مشخّصی از انرژی است. کم‌ترین انرژی مربوط به نزدیکترین مدار به هسته است و مدارهای با شعاع بزرگ‌تر بیانگر سطوح انرژی بالاتری هستند. هر چه الکترون‌ها روی مدارهای بزرگ‌تر حول هسته در گردش باشند، اتم هم دارای انرژی بیشتری است (شکل ۲-۱ را ببینید).



شکل (۲-۱): ساختمان اتم خنثی (اتم A)

وقتی الکترون‌ها یکی از اَشکال پایدار خود را روی یکی از مدارها دارند، اتم در یک وضعیت پایدار قرار دارد. واحد انرژی الکترون‌ها را جهت سادگی الکترون‌ولت انتخاب می‌کنند. یک الکترون‌ولت، بیانگر مقدار کاری است که توسّط میدان الکتریکی برای انتقال یک الکترون بین دو نقطه با اختلاف پتانسیل یک ولت انجام می‌شود. مثلاً وقتی می‌گوییم یک الکترون دارای ۱۰eV انرژی است، بدین معناست که این الکترون بین دو نقطه از میدان الکتریکی که دارای اختلاف پتانسیلی برابر با ۱۰ ولت‌اند، حرکت کرده است. رابطهٔ بین الکترون‌ولت با دیگر واحدهای سنجش

انرژی را می‌توان از رابطهٔ انرژی الکتریکی بین دو نقطه، و بر اساس معادلهٔ زیر توصیف نمود:

$$W_{AB} = q\int_A^B E.ds = q.V_{AB} \qquad (۱-۲)$$

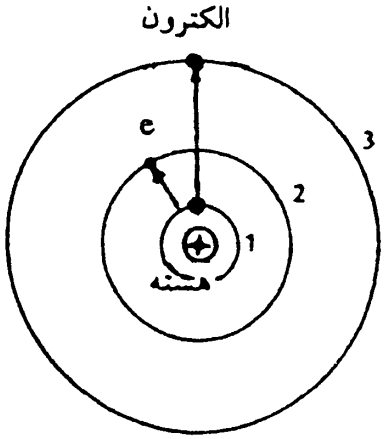
که در این رابطه، E شدّت میدان، q بار الکترون، و V_{AB} ولتاژ بین دو نقطهٔ A و B است. از آنجا که بار الکترون برابر $q = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}$ C است، بنابراین، داریم:

$$۱eV = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\times۱(V) = ۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\ \text{Jule یا}\ (Ws) = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۲}\ \text{ergs}$$

معمولاً در عمل، به‌جای انرژی از پتانسیل الکتریکی V بر حسب ولت صحبت می‌شود که مقدار عددی آن برابر مقدار انرژی با واحد الکترون‌ولت است. با توجّه به این‌که الکترون‌ها در هر مداری دارای انرژی معیّنی هستند، بنابراین، برای جدا کردن الکترون از اتم باید از خارج به آن انرژی بدهیم. عمل جدا شدن الکترون از اتم یا مولکول را "یونیزاسیون" و انرژی لازم برای انجام آن را "انرژی یونیزاسیون" (W_i) می‌گویند. چنان‌که ذکر شد، برای سنجش این انرژی، معمولاً پتانسیل یونیزاسیون V_i به‌کار می‌رود که از نظر عددی برابر با همان انرژی یونیزاسیون بر حسب الکترون‌ولت است. قسمتی از اتم را که بعد از یونیزاسیون باقی می‌ماند، یون مثبت می‌گویند که از نظر الکتریکی دارای بار مثبت بوده، مخالف علامت الکترون است. بعد از فرآیند یونیزاسیون، الکترون‌ها و یون‌های مثبت به‌طور مستقل و آزاد حرکت می‌کنند. این ذرّات، تحت تأثیر یک میدان خارجی، می‌توانند شتاب بگیرند و انرژی جنبشی کسب نمایند. این نکته نیز می‌تواند جالب باشد که یون‌ها هم انرژی یونیزاسیون و هم انرژی جنبشی را دارا هستند و تنها وقتی انرژی یونیزاسیون آن‌ها آزاد می‌شود که یک الکترون آزاد برای تشکیل یک اتم عادی (خنثی) با هر یک از آن‌ها دوباره ترکیب شود. معمولاً یون و الکترون در سطح الکترود و یا دیوارهٔ ظرف با هم ترکیب می‌شوند و انرژی گرمایی را به محیط منتقل می‌کنند. البتّه یون‌های منفی که شامل یک الکترون متّصل به یک اتم خنثی هستند نیز وجود دارند؛ امّا انرژی داخلی کم‌تری نسبت به یون‌های مثبت دارند. احتمال وجود یون‌های منفی در گازهای با درصد اکسیژن بالا، بیشتر خواهد بود.

اگر بخواهیم علاوه بر الکترون اوّل، الکترون دیگری از مولکول (یا اتم) گاز جدا کنیم، باید انرژی بسیار بیشتری به آن بدهیم. این انرژی را "پتانسیل دوم

یونیزاسیون" آن مولکول (یا اتم) می‌گویند. بنابراین، پتانسیل دوم یونیزاسیون خیلی بیشتر از پتانسیل اوّل یونیزاسیون است، اگر انرژی اعمال شده کم‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون باشد، ممکن است که الکترون فقط از مدار اوّلیهٔ خود به مداری با انرژی بالاتر برود؛ که این فرآیند را تحریک اتم می‌گویند (شکل ۲-۲ را ببینید).



شکل (۲-۲): ساختمان اتم تحریک‌شده (A^*)

به‌همین ترتیب، یک یون مثبت را نیز می‌توان تحریک نمود، ولی انرژی لازم برای تحریک آن از انرژی یونیزاسیون اتم خنثی بیشتر است. البتّه اتم تحریک شده فقط برای مدّت زمان کوتاهی می‌تواند در حال تحریک شده باقی بماند و پس از آن دوباره به حالت اصلی خود باز می‌گردد. این کار، توأم با آزاد سازی انرژی به‌صورت انرژی نورانی است که فرکانس نور تابیده شده f (چنانچه انرژی اتم در حال تحریک برابر با W_1 و در حالت موقعیّت اصلی آن برابر W_2 باشد)، از رابطهٔ (۲-۲) به‌دست می‌آید.

$$(W_1 - W_2) = h \cdot f \qquad (۲-۲)$$

در این رابطه h ثابت پلانگ و برابر با 6.6×10^{-34} J.sec می‌باشد. مدّت زمانی که یک الکترون روی مدارهای بالاتر می‌ماند، بسیار کوتاه است که این زمان در حدود 10^{-8} تا 10^{-7} ثانیه است. برای بعضی از اتم‌ها این زمان بیشتر و به حدود 10^{-2} ثانیه می‌رسد. به این حالت از اتم، "حالت نیمه‌پایدار"[1] (زمان ناپایداری بزرگ‌تر) می‌گویند. در جدول (۲-۱) انرژی لازم برای تحریک و یونیزاسیون گازها و بخار فلزات ارائه شده است.

1- Metastable

جدول (۲-۱): انرژی لازم برای تحریک و یونیزاسیون گازها و بخار فلزات

گاز یا بخار فلز	پتانسیل اوّل تحریک (eV)	پتانسیل اوّل یونیزاسیون	پتانسیل دوم یونیزاسیون	پتانسیل اوّل تحریک برای مدار با زمان ناپایداری بزرگ‌تر
H	۱۰/۱۵	۱۳/۵	–	–
H_2	۱۰/۸	۱۵/۹	–	–
N	–	۱۴/۵	۲۹/۴	–
N_2	۶	۱۵/۸	–	–
O	–	۱۳/۶	۳۴/۸	–
O_2	۷/۹	۱۲/۵	–	–
He	۱۹/۸	۲۴/۵	۵۴/۲	۱۹/۷-۲۰/۵۵
Hg	۴/۸۶	۱۰/۴	۱۸/۶	۴/۶۷-۵/۴۳-۷/۶۹
CO_2	۱۰/۰	۱۴/۴	–	–
H_2O	۷/۶	۱۲/۷	–	–
CS	۱/۳۸	۳/۸۸	۲۳/۴	–

۲-۳- ترکیب مجدّد

ترکیب مجدّد یون مثبت و الکترون آزاد، در اثر برخورد این دو با یکدیگر امکان‌پذیر خواهد بود که در این حالت، دوباره به یک اتم خنثی تبدیل می‌شوند. در اثر این ترکیب مجدّد، انرژی به‌صورت فوتون‌های نورانی آزاد می‌شود که فرکانس آن f و برابر است با:

$$h \cdot f = W_i + \Delta W_i$$

در این رابطه، W_i انرژی یونیزاسیون گاز و ΔW_i اختلاف انرژی جنبشی قبل و بعد از برخورد است. در گازهای الکترونگاتیو، الکترون آزاد نیز می‌تواند با یک اتم خنثی ترکیب شود و اتم خنثی به‌علّت داشتن یک الکترون اضافی به یک یون منفی (که ذرّه‌ای باردار است)، تبدیل شود. این خاصیت فقط در تعدادی از گازها مانند اکسیژن، کلر، فلور و SF6 وجود دارد که به آن‌ها "گازهای الکترونگاتیو" می‌گویند.

۲-۴- انواع یونیزاسیون در گازها

یونیزاسیون در گازها نیاز به شرایطی دارد تا بتواند انرژی لازم را برای یونیزه کردن اتم‌ها و مولکول‌های خنثای گاز را ایجاد کند؛ یعنی انرژیی که بتواند الکترون را از مدار گردشی خود به دور هسته جدا سازد. این انرژی به‌وسیلهٔ عوامل زیر تأمین می‌شود:

۱- برخورد ذرّات داخل گاز با یکدیگر و انتقال انرژی جنبشی (یونیزاسیون ضربه‌ای)؛

۲- تابش نور (یونیزاسیون نوری)؛

۳- حرارت دادن به‌منظور افزایش انرژی جنبشی ذرّات (یونیزاسیون حرارتی)؛

۴- صدور الکترون از سطح فلز الکترود احاطه کنندهٔ گاز (یونیزاسیون سطحی).

در ادامه به توضیح در مورد هر یک از روش‌های فوق می‌پردازیم.

۲-۴-۱- یونیزاسیون ضربه‌ای

اگر ذرّهٔ دلخواهی (مانند یون، الکترون و یا مولکول خنثی) با جرمی برابر m و سرعتی معادل V در مسیر حرکت خود در میدان الکتریکی داخل گاز، به یک اتم خنثی و یا یک مولکول برخورد کند، ممکن است در نتیجهٔ این برخورد، اتم خنثی یا مولکول، یونیزه شود و به یک الکترون و یک یون مثبت تقسیم گردد. شرط لازم برای این عمل آن است که انرژی جنبشی ذرّهٔ در حال حرکت ($\frac{1}{2}mV^2$)، از انرژی لازم برای یونیزه کردن گاز مربوط به آن بیشتر باشد. یعنی:

$$\frac{1}{2}mV^2 \geq W_i \qquad (۲-۳)$$

قابل ذکر است که در این میدان الکتریکی، اگر الکترون یا یون آزاد در مسیر خود با اتمی اصابت نکند، مرتباً از میدان، انرژی بیشتری گرفته و با سرعت بیشتری حرکت می‌کند. به‌عنوان مثال، در صورتی‌که یک الکترون در میدان الکتریکی با شدّت ۳۰۰۰۰V/cm، فاصله‌ای به طول 10^{-3}cm را بدون برخورد با ذرّه‌ای طی کند، انرژی دریافتی آن برابر ۳۰eV خواهد بود.

برای محاسبهٔ شرط یونیزاسیون ضربه‌ای، نیاز به یک سلسله محاسبات است. اگر یک الکترون با جرم m_e با سرعت اولّیهٔ V_{e0} به یک اتم خنثی با جرم m و ساکن برخورد نماید، سرعت آن پس از برخورد V_{e1} و سرعت اتم خنثی بعد از برخورد V_1

می‌گردد که در اثر این برخورد، انرژی Δ از الکترون به اتم خنثی منتقل می‌شود. اگر برخورد مذکور را از نوع الاستیک در نظر بگیریم، آنگاه مجموع انرژی الکترون و اتم، قبل و بعد از برخورد و همچنین اندازهٔ حرکت آن‌ها قبل و بعد از برخورد ثابت می‌ماند. در نتیجه می‌توان نوشت:

اصل بقای انرژی : $$\frac{1}{2} m_e V_{e0}^2 = \frac{1}{2} m_e V_{e1}^2 + \frac{1}{2} m V_1^2 + \Delta \qquad (۲-۴)$$

اصل بقای اندازهٔ حرکت : $$m_e V_{e0} = m_e V_{e1} + m V_1 \qquad (۲-۵)$$

از رابطهٔ (۲-۴) می‌توان نوشت:

$$V_{e0}^2 = V_{e1}^2 + \frac{m}{m_e} V_1^2 + \frac{2\Delta}{m_e} \qquad (۲-۶)$$

همچنین از رابطهٔ (۲-۵) داریم:

$$m V_1 = m_e (V_{e0} - V_{e1}) \qquad (۲-۷)$$

با تقسیم طرفین رابطهٔ (۲-۷) بر m_e داریم:

$$\frac{m}{m_e} V_1 = (V_{e0} - V_{e1}) \qquad (۲-۸)$$

طرفین رابطهٔ (۲-۸) را به توان ۲ می‌رسانیم. در نتیجه،

$$\left(\frac{m}{m_e}\right)^2 V_1^2 = (V_{e0} - V_{e1})^2 \qquad (۲-۹)$$

$$V_1^2 = (V_{e0} - V_{e1})^2 \left[\frac{m_e}{m}\right]^2 \qquad (۲-۱۰)$$

با جایگزینی رابطهٔ (۲-۱۰) در رابطهٔ (۲-۴) داریم:

$$V_{e0}^2 = V_{e1}^2 + \left(\frac{m_e}{m}\right)(V_{e0} - V_{e1})^2 + \frac{2\Delta}{m_e} \qquad (۲-۱۱)$$

و در نتیجه،

$$\Delta = \frac{m_e}{2}\left(V_{e0}^2 - V_{e1}^2\right) + \frac{m_e^2}{2m}(V_{e0} - V_{e1})^2 \qquad (۲-۱۲)$$

حال برای به‌دست آوردن حدّاکثر انرژی منتقل شده در اثر برخورد می‌توان نوشت که،

$$\frac{d\Delta}{dV_{e1}} = 0 \quad \Rightarrow \quad V_{e1} = \frac{m_e}{m_e + m} V_{e0} \qquad (۲-۱۳)$$

و در نتیجه حدّاکثر انرژی منتقل شده در اثر برخورد برابر است با:

$$\Delta_{max} = \frac{\frac{1}{2} m_e V_{e.}^2}{1 + \frac{m_e}{m}} \qquad (۱۴-۲)$$

با فرض این‌که $m_e << m$ باشد، آن‌گاه $\frac{m_e}{m} \cong 0$ بوده و،

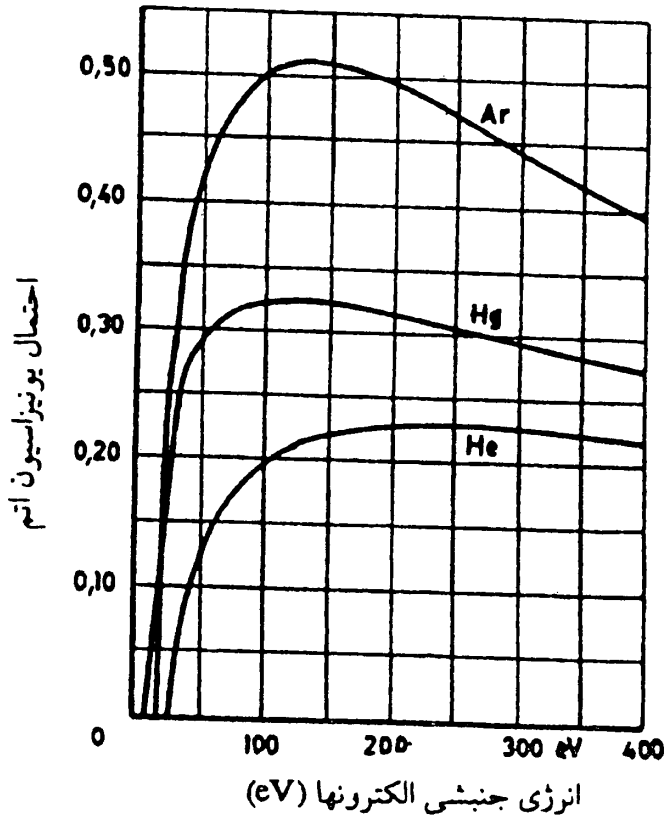
$$\Delta_{max} = \frac{1}{2} m_e V_{e.}^2 \qquad (۱۵-۲)$$

بنابراین، شرط لازم برای یونیزاسیون ضربه‌ای را می‌توان به این صورت بیان نمود که باید $\Delta_{max} \geq W_i$ باشد و یا $\frac{1}{2} m_e V_{e.}^2 \geq W_i$ باشد. البتّه این شرط، کافی نیست؛ زیرا بعضی از ذرّات (الکترون‌ها) با انرژی جنبشی بیشتر از انرژی یونیزاسیون اتم نیز وجود دارند که در عمل برخورد، تمام انرژی خود را منتقل نمی‌کنند. اگر میزان انرژی منتقل شده کم‌تر از انرژی یونیزاسیون باشد، عمل یونیزاسیون صورت نمی‌گیرد. معمولاً هر چقدر سرعت ذرّه بیشتر باشد، فرصت برای انتقال انرژی، کم‌تر است؛ زیرا زمان برخورد، کوتاهتر می‌شود. در عمل، معمولاً ذرّه‌هایی (مانند الکترون) با انرژی جنبشی کم‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون اتم‌ها و مولکول‌های گاز (W_i در رابطهٔ ۲-۱۵) عمل یونیزاسیون را موجب می‌شوند و این به‌دلیل فرآیندی است که به آن "یونیزاسیون مرحله‌ای" می‌گویند. برای مثال، انرژی یونیزاسیون بخار جیوه برابر ۱۰/۴eV است؛ امّا در عمل، مشاهده می‌شود که برای یونیزه شدن این گاز، انرژیی معادل ۴/۶۷eV هم کافی است (۴/۶۷ الکترون‌ولت انرژی محرکی است که الکترون را از یک مدار اصلی اتم خنثی روی مداری با زمان ناپایداری بزرگ‌تر انتقال می‌دهد).

۲-۴-۱-۱- احتمال یونیزاسیون در اثر برخورد

بالا رفتن سرعت ذرّهٔ محرّک (الکترون) در گاز، احتمال برخوردها را زیاد می‌کند؛ یعنی تعداد بیشتری از اتم‌ها شانس یونیزاسیون خواهند داشت و الکترون‌های آزاد بیشتری ایجاد می‌گردد. البتّه تجربه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این افزایش الکترون‌های آزاد، تا سرعت معیّنی است و از آن پس با زیادتر شدن سرعت (یعنی اضافه شدن انرژی الکترون‌ها)، احتمال یونیزاسیون کاهش می‌یابد. علّت این موضوع را می‌توان بدین صورت بیان نمود که در برخورد یک الکترون با یک اتم، میدان‌های الکترومغناطیسی آن‌ها، یکدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مورد الکترون‌های با سرعت‌های خیلی زیاد، مدّت تأثیر این میدان‌ها بسیار کم می‌شود؛ یعنی انرژی انتقال یافته به اتم، بسیار کوچک خواهد بود.

به‌عبارت دیگر، با افزایش سرعت، مدّت زمان برخورد کاهش یافته، فرصت لازم برای انتقال انرژی و جدا کردن الکترون ایجاد نمی‌شود. شکل (۲-۳)، احتمال یونیزاسیون را بر حسب انرژی جنبشی الکترون‌ها (بر حسب eV) نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳): احتمال یونیزاسیون در اثر برخورد با الکترون‌ها به‌عنوان تابعی از انرژی جنبشی الکترون‌ها

۲-۴-۱-۲- یونیزاسیون ضربه‌ای مرحله‌ای

عموماً یونیزاسیون ضربه‌ای به‌شکل مرحله‌ای و به روش‌های زیر امکان‌پذیر است:

الف) الکترونی (e_1) که انرژی کم‌تری از انرژی لازم برای یونیزاسیون (W_i) دارد، با اتم خنثی (A_1) برخورد می‌کند و الکترونی از آن را به مدار دورتری از هسته انتقال می‌دهد. حال چنانچه الکترون دیگری (e_2) این اتم تحریک شده (A_1^*) را مورد اصابت قرار دهد و انرژی خود را نیز به آن منتقل سازد، اتم پس از این اصابت و یا اصابت‌های بعدی، یونیزه شده، به الکترون (e) و یون مثبت (⊕) تقسیم می‌شود. بدیهی است که در اینجا شرط لازم و کافی برای وقوع پدیدهٔ یونیزاسیون ضربه‌ای

$$\Delta_{max} = \frac{\frac{1}{2} m_e V_{e.}^2}{1 + \frac{m_e}{m}} \qquad (۱۴-۲)$$

با فرض این‌که $m_e << m$ باشد، آن‌گاه $\frac{m_e}{m} \cong 0$ بوده و،

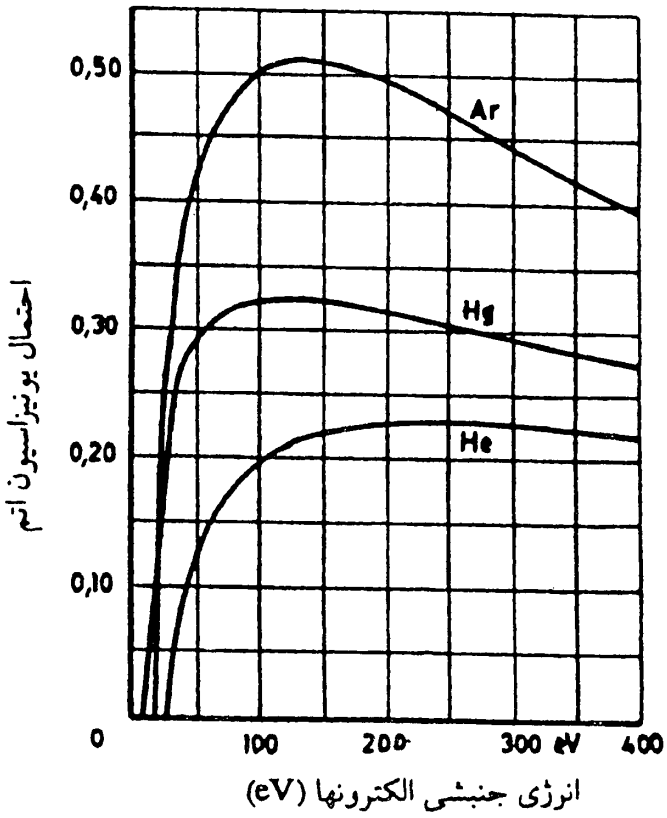
$$\Delta_{max} = \frac{1}{2} m_e V_{e.}^2 \qquad (۱۵-۲)$$

بنابراین، شرط لازم برای یونیزاسیون ضربه‌ای را می‌توان به این صورت بیان نمود که باید $\Delta_{max} \geq W_i$ باشد و یا $\frac{1}{2} m_e V_{e.}^2 \geq W_i$ باشد. البتّه این شرط، کافی نیست؛ زیرا بعضی از ذرّات (الکترون‌ها) با انرژی جنبشی بیشتر از انرژی یونیزاسیون اتم نیز وجود دارند که در عمل برخورد، تمام انرژی خود را منتقل نمی‌کنند. اگر میزان انرژی منتقل شده کم‌تر از انرژی یونیزاسیون باشد، عمل یونیزاسیون صورت نمی‌گیرد. معمولاً هر چقدر سرعت ذرّه بیشتر باشد، فرصت برای انتقال انرژی، کم‌تر است؛ زیرا زمان برخورد، کوتاهتر می‌شود. در عمل، معمولاً ذرّه‌هایی (مانند الکترون) با انرژی جنبشی کم‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون اتم‌ها و مولکول‌های گاز (W_i در رابطهٔ ۲-۱۵) عمل یونیزاسیون را موجب می‌شوند و این به‌دلیل فرآیندی است که به آن "یونیزاسیون مرحله‌ای" می‌گویند. برای مثال، انرژی یونیزاسیون بخار جیوه برابر ۱۰/۴eV است؛ امّا در عمل، مشاهده می‌شود که برای یونیزه شدن این گاز، انرژیی معادل ۴/۶۷eV هم کافی است (۴/۶۷ الکترون‌ولت انرژی محرکی است که الکترون را از یک مدار اصلی اتم خنثی روی مداری با زمان ناپایداری بزرگ‌تر انتقال می‌دهد).

۲-۴-۱-۱- احتمال یونیزاسیون در اثر برخورد

بالا رفتن سرعت ذرّهٔ محرّک (الکترون) در گاز، احتمال برخوردها را زیاد می‌کند؛ یعنی تعداد بیشتری از اتم‌ها شانس یونیزاسیون خواهند داشت و الکترون‌های آزاد بیشتری ایجاد می‌گردد. البتّه تجربه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که این افزایش الکترون‌های آزاد، تا سرعت معیّنی است و از آن پس با زیادتر شدن سرعت (یعنی اضافه شدن انرژی الکترون‌ها)، احتمال یونیزاسیون کاهش می‌یابد. علّت این موضوع را می‌توان بدین صورت بیان نمود که در برخورد یک الکترون با یک اتم، میدان‌های الکترومغناطیسی آن‌ها، یکدیگر را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در مورد الکترون‌های با سرعت‌های خیلی زیاد، مدّت تأثیر این میدان‌ها بسیار کم می‌شود؛ یعنی انرژی انتقال یافته به اتم، بسیار کوچک خواهد بود.

به‌عبارت دیگر، با افزایش سرعت، مدّت زمان برخورد کاهش یافته، فرصت لازم برای انتقال انرژی و جدا کردن الکترون ایجاد نمی‌شود. شکل (۲-۳)، احتمال یونیزاسیون را بر حسب انرژی جنبشی الکترون‌ها (بر حسب eV) نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳): احتمال یونیزاسیون در اثر برخورد با الکترون‌ها به‌عنوان تابعی از انرژی جنبشی الکترون‌ها

۲-۴-۱-۲- یونیزاسیون ضربه‌ای مرحله‌ای

عموماً یونیزاسیون ضربه‌ای به‌شکل مرحله‌ای و به روش‌های زیر امکان‌پذیر است:

الف) الکترونی (e_1) که انرژی کم‌تری از انرژی لازم برای یونیزاسیون (W_i) دارد، با اتم خنثی (A_1) برخورد می‌کند و الکترونی از آن را به مدار دورتری از هسته انتقال می‌دهد. حال چنانچه الکترون دیگری (e_2) این اتم تحریک شده (A_1^*) را مورد اصابت قرار دهد و انرژی خود را نیز به آن منتقل سازد، اتم پس از این اصابت و یا اصابت‌های بعدی، یونیزه شده، به الکترون (e) و یون مثبت (⊕) تقسیم می‌شود. بدیهی است که در اینجا شرط لازم و کافی برای وقوع پدیدهٔ یونیزاسیون ضربه‌ای

مرحله‌ای، زمان‌های بمباران و اصابت‌های متوالی است که باید حدّاقل کوتاه‌تر از زمان پایداری الکترون روی مداری غیر از مدار اصلی خود باشد. از اینجا اهمّیت حالات اتم تحریک شده با زمان ناپایداری بزرگ‌تر، در امکان دادن به تخلیهٔ الکتریکی گازها روشن می‌شود؛ زیرا در این حالات، الکترون به مدّت زمان 10^{-2} ثانیه روی مدار باقی می‌ماند. در روابط زیر، علامت KE مخفّف انرژی جنبشی[1] است.

$e_1 + KE + A_1 \Rightarrow e_1 + A_1^*$ (برخورد نوع اوّل)

$A_1^* + e_2 + KE \Rightarrow \oplus + e + e_2$ (برخورد نوع اوّل)

ب) بر اثر اصابت یک الکترون آزاد شده (e_1)، با یک اتم تحریک شده در حال برگشت (A_1^*)، اتم، انرژی از خارج گرفتهٔ خود را به الکترون می‌دهد و خود به‌حالت اصلی (A_1) باز می‌گردد. الکترون با گرفتن این انرژی، سرعت بیشتری می‌گیرد و با اصابت بعدی با اتم خنثای دیگری (A_2)، آن را یونیزه می‌کند.

$e_1 + KE + A_1^* \Rightarrow e_1 + KE + A_1$ (برخورد نوع دوم)

$A_2 + e_1 + KE \Rightarrow \oplus + e + e_1$ (برخورد نوع اوّل)

ج) بر اثر برخورد دو اتم تحریک شده با هم (A_1^* و A_2^*) که یکی از آن‌ها در حالت بازگشت به حالت عادی است، انرژی از اتم تحریک شده در حال برگشت، به اتم دیگر منتقل شده، در صورت تأمین انرژی یونیزاسیون، اتم تحریک شده، یونیزه می‌شود.

$A_1 + e_1 + KE \Rightarrow A_1^* + e_1$ (برخورد نوع اوّل)

$A_2 + e_2 + KE \Rightarrow A_2^* + e_2$ (برخورد نوع اوّل)

$A_1^* + A_2^* \Rightarrow \oplus + e + A_2$ (برخورد نوع دوم)

اصابت‌هایی که در آن‌ها یونیزاسیون با انتقال انرژی جنبشی یک ذرّه به ذرّهٔ دیگری انجام می‌شود، اصابت یا برخورد نوع اوّل نام دارد و یونیزاسیون‌هایی که بر اثر برخورد ذرّات و انتقال انرژی پتانسیل یکی به دیگری انجام می‌گیرد، برخورد نوع دوم نام می‌گیرند.

1- Kinetic Energy

۲-۴-۲- یونیزاسیون نوری

عامل مؤثّر دیگر برای ایجاد ذرّات با بار الکتریکی، یونیزاسیون نوری می‌باشد؛ بدین معنی که یونیزاسیون به‌وسیلهٔ تأثیر نور با طول موج‌های کوتاه انجام می‌گیرد. امواج نورانی با طول موج‌های کوتاه، دارای انرژی زیادی هستند که می‌توانند بر انرژی یونیزاسیون گازها غلبه کنند. برای آن‌که تابش نور بر گاز، به یونیزاسیون آن منجر شود، لازم است تا انرژی نورانی (که طبق قانون پلانگ برابر فرکانس نور (f) ضرب در عدد ثابت پلانک (h) می‌باشد)، بزرگ‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون گاز (W_i) باشد. یعنی،

$$h \cdot f \geq W_i$$

اگر طول موج نور را با λ نشان دهیم، با توجّه به رابطهٔ $\lambda = C/f$ خواهیم داشت:

$$\lambda \leq \frac{C \cdot h}{W_i}$$

در این معادله $C = ۳ \times ۱۰^{۸}$ m/sec سرعت نور است. برای مثال، در مورد بخار سزیم که حدّاقل انرژی یونیزاسیون $W_i = ۳/۸۸$ eV را در بین سایر گازها دارد، حدّاکثر طول موج نوری که بتواند آن را یونیزه کند عبارت است از:

$$\lambda = \frac{۳ \times ۱۰^{۸} \times ۶/۶ \times ۱۰^{-۳۴}}{۳/۸۸ \times ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}} = ۳/۱۸۹ \times ۱۰^{-۷}\ \mathrm{m} = ۳۱۸۹\ \mathrm{A}^{\circ}$$

چنین طول موجی در محدودهٔ ماوراء بنفش قرار دارد. برای سایر گازها، به‌دلیل داشتن انرژی یونیزاسیون بیشتر، طول موج مورد نیاز، کم‌تر از مقدار فوق خواهد بود. بنابراین، نورهای مرئی (که طول موج آن‌ها بین ۴۰۰۰ تا ۸۰۰۰ انگستروم A° است)، عملاً قادر به یونیزه کردن این گاز و سایر گازها نیستند. منابع معمولی تولید اشعهٔ ماوراء بنفش (لامپ‌های جیوه، کوارتز و غیره) طول موجشان کم‌تر از ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ انگستروم نیست. بنابراین، این منابع تنها قادر به یونیزه کردن گازهایی هستند که انرژی یونیزاسیون آن‌ها از ۶ تا ۸ الکترون‌ولت تجاوز نکند. امّا اغلب گازها دارای انرژی یونیزاسیون بیشتری هستند و بنابراین، به‌وسیلهٔ نور ماوراء بنفش قابل یونیزاسیون نمی‌باشند. امّا در عمل، بنابر دلایلی که ذکر می‌شود، یونیزاسیون نوری در اغلب گازها انجام‌پذیر است:

الف) همانند یونیزاسیون ضربه‌ای، مولکول و یا اتم گاز به‌طور متواتر، نور ساطع شده از اتم تحریک شده‌ای را که به حالت اصلی و معمولی خود باز می‌گردد، دریافت نموده و بالاخره یونیزه شود؛

ب) یک اتم تحریک شده و یک اتم تحریک نشده با هم مولکولی را تشکیل می‌دهند که انرژی یونیزاسیون آن از انرژی یونیزاسیون یک اتم کم‌تر است؛

ج) دلیل دیگر، وجود ذرّات خارجی معلّق در گاز، همانند گرد و غبار و رطوبت است که برای جدا شدن الکترون‌ها از مولکول‌های سطحی این ذرّات، انرژی کم‌تری از انرژی یونیزاسیون گاز لازم است و بر اثر برخورد فوتون‌ها با این ذرّات، الکترون‌های آزاد ایجاد می‌شوند؛

د) علاوه بر امواج ماوراء بنفش، امواج رادیواکتیو، اشعهٔ x، اشعهٔ گاما، و اشعه‌های کیهانی که در فرکانس‌های بالا (طول موج‌های کوتاه) بوده و انرژی زیادی دارند، قادر به یونیزاسیون نوری گازها هستند. در نتیجه، وجود تعداد کمی الکترون آزاد در کلّیهٔ گازها، به‌دلیل آن است که گازها به‌اندازهٔ بسیار کمی در معرض اشعه‌های کیهانی (که کم و بیش از خارج جو وارد جو زمین می‌شوند)، قرار می‌گیرند و تعداد کمی از اتم‌ها را یونیزه می‌کنند.

یکی از منابع مهّم یونیزاسیون نوری در گازها، برگشتن یون‌ها و مولکول‌های تحریک شده به وضعّیت عادی است. در این شرایط، مقدار زیادی فوتون‌های نوری آزاد می‌شوند که تعداد زیادی از آن‌ها انرژی لازم را برای یونیزاسیون گاز دارا هستند. چنان‌که بعداً خواهیم دید، این فوتون‌ها نقش بسیار مهمّی را در توسعه تخلیهٔ الکتریکی ایفا می‌کنند. یونیزاسیون نوری عامل مهمی در مکانیزم شکست الکتریکی تانزند[۱]، پدیدهٔ استریمر[۲] و پدیدهٔ کرونا[۳] است که در ادامهٔ این فصل، آن‌ها را بررسی خواهیم کرد.

۲-۴-۳- یونیزاسیون حرارتی

به‌طور کلّی، لفظ یونیزاسیون حرارتی، به یونیزاسیون حاصل از برخوردهای مولکولی و تشعشع و برخوردهای الکترونی به‌وجود آمده در گازهای با دمای بالا اطلاق

1- *Townsend Breakdown*

2- *Streamer Phenomena*

3- *Corona Phenomena*

می‌شود. یونیزاسیون حرارتی بیشتر در جرقّه‌های شدید و شعله‌های آتش حاصل می‌شود.

در صورتی‌که درجه حرارت گاز خیلی زیاد باشد، سرعت ذرّات داخل گاز زیاد شده، در اثر انرژی جنبشی زیاد، مولکول‌ها می‌توانند در برخوردها انرژی یونیزاسیون را تأمین نمایند. البتّه این نوع یونیزاسیون، زمانی اتّفاق می‌افتد که درجهٔ حرارت گاز، چندین هزار درجهٔ سانتیگراد باشد که وقتی این حالت پیش می‌آید که جریان الکتریکی عبوری از گاز، خیلی زیاد باشد. در این صورت، مقدار زیادی از انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود و در نتیجه، گاز را به شدّت گرم می‌کند (مانند شعله‌ها و قوس‌ها).

در قانون کلاسیک گازها ثابت می‌شود که برای ذرّه‌ای با جرم m، سرعت متوسّط V، و درجه حرارت T، در گاز رابطه‌ای به‌صورت زیر برقرار است:

$$\frac{۱}{۲} mV^{۲} = \frac{۳}{۲} KT \qquad (۱۶-۲)$$

در این رابطه، K ثابت بولتزمن و برابر $K = ۱/۳۸۰۴ \times ۱۰^{-۲۳}$ J/°K است. بنابراین، با افزایش درجهٔ حرارت گاز، سرعت حرکت مولکول‌ها زیادتر می‌شود و امکان این‌که ذرّات با سرعت زیاد و انرژی جنبشی در حدّ انرژی یونیزاسیون گاز به‌وجود آید، بیشتر می‌شود. همزمان با یونیزه شدن اتم‌های خنثای گاز، ترکیب مجدّد در اثر برخورد الکترون‌ها و یون‌ها نیز صورت می‌گیرد. اگر در هر لحظه، تعادلی بین ذرّات یونیزه شده و ترکیبات مجدّد صورت بگیرد، در آن‌صورت چگالی ذرّات باردار ثابت می‌ماند. بدیهی است با افزایش درجه حرارت، چگالی ذرّات باردار بیشتر خواهد شد. در حالت تعادل، درجهٔ یونیزاسیون θ نشان دهندهٔ نسبت تعداد مولکول‌های یونیزه شده در واحد حجم گاز به تعداد کلّ مولکول‌های گاز در واحد حجم گاز است. مقدار این درجهٔ یونیزاسیون، از رابطهٔ ساها[۱] به‌دست می‌آید:

$$\frac{\theta^{۲}}{۱-\theta^{۲}} = \frac{۱}{P} \frac{(۲\pi m_e)^{\frac{۳}{۲}}}{n} (KT)^{\frac{۵}{۲}} e^{-\frac{W_i}{KT}} \qquad (۱۷-۲)$$

1- *Saha Equation*

یا،

$$\frac{\theta^{۲}}{۱-\theta^{۲}} = \left[\frac{۲/۴\times ۱۰^{-۴}}{P}\right]\left[T^{۲/۵}\right]\left[e^{-\frac{W_i}{KT}}\right] \qquad (۱۸-۲)$$

در این روابط، $\theta = \frac{N_i}{N}$ درجهٔ یونیزاسیون گاز (N_i تعداد مولکول‌های یونیزه شده در واحد حجم و N تعداد کلّ مولکول‌ها در واحد حجم)، P فشار گاز بر حسب mmHg ، W_i انرژی یونیزاسیون گاز بر حسب J و K ثابت بولتزمن است. از رابطهٔ (۲-۱۸) درمی‌یابیم که در درجه حرارت معمولی، یونیزاسیون حرارتی ناچیز است و تنها در درجه حرارت‌های بالاتر از ۱۰۰۰°K به حدّ قابل ملاحظه‌ای می‌رسد.

۲-۴-۴- یونیزاسیون سطحی

تاکنون از تشکیل الکترون‌ها و یون‌ها بر اثر یونیزاسیون در حجم گاز صحبت کردیم. امّا الکترودهایی که گاز مورد نظر به‌عنوان عایق الکتریکی، فضای بین آن‌ها را پر کرده است (به‌ویژه کاتد)، نقش بسیار مهمّی را در تخلیهٔ الکتریکی ایفا می‌کنند. علّت این موضوع آن است که الکترون‌ها می‌توانند تحت شرایطی از سطح الکترودها خارج شوند که این را یونیزاسیون سطحی می‌نامند. این الکترون‌ها در شروع یونیزاسیون حجمی گاز، تخلیهٔ الکتریکی و نگهداشتن آن، و تکمیل قوس الکتریکی بسیار مؤثّرند. در شرایط عادی، نیروهای الکترواستاتیکی بین الکترون‌ها و یون‌های شبکهٔ مولکولی فلز الکترودها، مانع از خروج الکترون‌ها می‌شوند؛ بنابراین، برای جدا شدن الکترون‌ها از سطح الکترود، باید مقدار معیّنی کار انجام شود. انرژی لازم برای این امر را انرژی آزادسازی (خروج) (W_a) می‌گویند که این انرژی، به جنس و وضعیّت سطح الکترودها بستگی دارد. الکترون‌های آزاد یک فلز در میدان الکتریکی شبکهٔ کریستالی (که از یون‌های مثبت تشکیل شده است) واقع شده‌اند. این میدان در داخل فلز دارای پتانسیل ثابت $U_\circ$ است. این پتانسیل، محدود به داخل فلز بوده، در خارج از فلز وجود ندارد. با توجّه به این‌که این میدان به‌وسیلهٔ یون‌ها (که دارای بار الکتریکی مثبت هستند) پدید می‌آید و همچنین با توجّه به منفی بودن بار الکتریکی الکترون‌ها، انرژی پتانسیل در داخل فلز، منفی خواهد بود و مقدار آن برابر با $E_\circ = -eU_\circ$ است. این انرژی در خارج از فلز در حالی که میدان الکتریکی خارجی

موجود نباشد، برابر صفر خواهد بود. بنابراین، انرژی (پتانسیل) الکترون خارج از فلز، بزرگ‌تر از انرژی آن در داخل فلز بوده و تغییر این انرژی در سطح فلز جهشی است. با این تعریف می‌توان در روی سطح فلز به اصطلاح "پلّه‌ای از انرژی" تصوّر کرد که الکترون در موقع خروج خود از فلز باید از آن بگذرد و چون الکترون‌ها در فلز از همه سو به‌وسیلهٔ چنین پلهٔ انرژی محصور است، پس اصطلاحاً می‌توان گفت که الکترون‌های آزاد روی یک فلز در یک "گودال پتانسیل" با عمقی برابر U_0 قرار گرفته‌اند که نمی‌توانند بدون کمک انرژی خارجی، از فلز خارج گردند. جدول (۲-۲) انرژی خروجی الکترون را برای تعدادی از فلزها نشان می‌دهد. مقادیر بزرگ‌تر در این جدول، متعلّق به فلزهای کاملاً خالص است که از طریق شیمیایی و آزمایشگاهی به‌دست آمده‌اند.

جدول (۲-۲): انرژی آزاد سازی الکترون در چندین فلز مختلف

نام فلز	انرژی لازم برای خارج ساختن الکترون بر حسب الکترون‌ولت
ناتریم	۲/۱۲ - ۲/۲۸
آلومینیوم	۱/۷۷ - ۳/۹۵
مس	۳/۸۹ - ۴/۸۲
اکسید مس	۵/۳۴
نقره	۳/۰۹ - ۴/۷۴
طلا	۴/۳۳ - ۴/۹۰
آهن	۳/۹۲ - ۴/۷۹
نیکل	۳/۶۸ - ۵/۰۲
پلاتین	۳/۶۳ - ۶/۳۰
اکسید باریم	۱/۰۰
وانادیم	۰/۷۱

انرژی لازم برای صدور الکترون از فلز را می‌توان از طریق راه‌های زیر به فلز منتقل نمود:

الف) انتشار فتوالکتریکی[1] یا یونیزاسیون سطحی نوری: فوتون‌هایی که دارای انرژی بیش از انرژی آزادسازی باشند ($h.f \geq W_a$)، در برخورد با الکترودها می‌توانند الکترون از آن‌ها خارج کنند (انرژی فوتون‌ها به فرکانس نور مورد نظر بستگی دارد). برای بیشتر فلزات، فرکانس f در محدودهٔ امواج ماوراء بنفش قرار دارد؛ در حالی‌که انرژی فوتون بیش از انرژی آزاد سازی باشد، مازاد انرژی ممکن است به انرژی جنبشی الکترون تبدیل شود که،

$$\frac{1}{2} m_e V_e^2 = h.f - h.f_0 \qquad (۱۹-۲)$$

که m_e جرم الکترون و V_e سرعت آن، و $h.f_0$ انرژی حدّی لازم برای صدور الکترون از کاتد ($h.v_0 = W_a$) می‌باشد. قسمتی از الکترون‌ها از سطح خارجی کاتد آزاد نشده، بلکه از لایه‌های عمیق‌تر فلز آزاد می‌شود. این الکترون‌ها بخشی از انرژی خود را در زمان عبور از فلز از دست داده و بنابراین، با سرعت کم‌تر از آن‌چه که محاسبه شد، از سطح کاتد آزاد می‌شوند. در نتیجه تعداد زیادی از الکترون‌های آزاد شده بر اثر تابش فوتون‌ها، تنها ۴۰٪ از حدّاکثر ممکن انرژی جنبشی را دارا هستند. سرعت الکترون‌های ناشی از صدور فوتونی، تابعی از فرکانس اشعهٔ تابیده شده است و به دامنهٔ آن بستگی ندارد. با افزایش شدّت اشعهٔ فوتونی، تنها تعداد الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد افزایش می‌یابد و سرعت اوّلیهٔ آن‌ها با افزایش شدّت اشعه، بدون تغییر می‌ماند. بخش اعظمی از کوانتوم‌های نوری به‌وسیلهٔ فلز بازتاب می‌شوند؛ بنابراین، در آزاد ساختن الکترون بی‌تأثیر است. آن قسمت از انرژی نوری که به‌وسیلهٔ فلز جذب می‌گردد، بخشی از آن، صرف گرم کردن فلز می‌شود و قسمت کوچکی از کوانتوم‌های نوری، صرف آزاد ساختن الکترون‌ها می‌شود (حدّاکثر ۲۶٪ انرژی جذب شده به‌وسیلهٔ فلز). بنابراین، نسبت تعداد الکترون‌های آزاد شده به تعداد کوانتوم‌های نوری که به روی سطح فلز رسیده‌اند (در مواردی که سطح فلز کاملاً تمیز و صیقلی باشد) از 10^{-4} تا 10^{-3} تجاوز نمی‌کند.

1- Photo Electric Emission

ب) انتشار الکترون بر اثر بمباران سطح کاتد به‌وسیلهٔ یون‌ها و اتم‌های تحریک شده: انرژی یون‌هایی که به سمت کاتد می‌روند از دو مؤلّفهٔ انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل تشکیل شده‌اند. یون‌ها این انرژی‌ها را در زمان پدید آمدن (بر اثر یونیزه شدن اتم)، به‌دست می‌آورند. اگر انرژی جنبشی یون، در موقع برخورد به سطح کاتد زیاد باشد، می‌تواند الکترون‌هایی را از آن جدا کند و آزاد سازد؛ لیکن یون‌های با سرعت کم (که فاقد انرژی جنبشی کافی برای یونیزاسیون سطحی است)، در موقع برخورد به سطح کاتد، الکترون‌ها را به‌وسیلهٔ انتقال انرژی پتانسیل خود آزاد می‌سازد. این امر وقتی عملی است که انرژی پتانسیل یون (که برابر انرژی یونیزاسیون W_i است) حدّاقل دو برابر انرژی لازم برای خروج الکترون باشد. یعنی،

$$W_k + W_p \geq ۲W_a \qquad (۲-۲۰)$$

که W_k و W_p به ترتیب انرژی جنبشی و پتانسیل یون می‌باشند. البتّه به دلیل سرعت کم یون‌ها، انرژی پتانسیل یون که از طریق ترکیب مجدّد آزاد می‌شود، نقش عمده‌تری دارد. وقتی انرژی پتانسیل یون مثبت آزاد می‌گردد که این یون با یک الکترون، مجدّداً تشکیل اتمی بدهد؛ بدین معنی که وقتی یک الکترون آزاد در سطح کاتد روی آخرین مدار یک یون قرار می‌گیرد، انرژیی برابر اختلاف انرژی یونیزاسیون با انرژی خروجی الکترون $(W_i + W_a)$ آزاد می‌شود. این اختلاف انرژی که برابر با انرژی خروجی W_a است به الکترون آزاد دومی انتقال یافته و آن را از سطح فلز جدا می‌سازد. این الکترون پس از جدا شدن از سطح فلز، وارد میدان الکتریکی شده، بنابر قانون کولمب، جذب آند می‌گردد. با نگاهی به جدول (۲-۱) و (۲-۲)، دیده می‌شود که انرژی یونیزاسیون گاز، اکثراً بیش از دو برابر انرژی خروجی الکترون از سطح کاتد است. بنابراین، شرط لازم اشاره شده در بالا ($۲W_a$ $\leq W_k + W_p$) یا ($W_i \geq ۲W_a$) درست است؛ لیکن نباید از آن‌چه گفته شد نتیجه گرفت که هر یون با اصابت روی سطح کاتد، الکترونی را از آن آزاد می‌سازد؛ زیرا احتمال آن‌که انرژی داده شده به‌وسیلهٔ یون صرف آزاد شدن الکترونی شود بسیار کم است که در حدود ۱٪ تا ۲٪ می‌باشد. بنابراین، در برخورد هر یون مثبت با سطح فلز، الکترون آزاد نمی‌شود. با آن‌که تاکنون نحوهٔ انتقال انرژی یون مثبت به الکترون‌های آزاد فلز کاملاً روشن نشده است، این واقعیت که انرژی یون در آزاد ساختن

الکترون‌ها مؤثّر است، قابل قبول همگان است. لازم به ذکر است که در این میان آن قسمت از انرژی جنبشی یون که باقی می‌ماند، به‌وسیلهٔ مولکول‌های خنثی در فلز جذب می‌شود، الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد (به‌وسیلهٔ یون) دارای سرعت اولّیهٔ کمی هستند.

ج) **انتشار حرارتی**[۱]: در فلزات و در درجهٔ حرارت معمولی، الکترون‌ها انرژی لازم برای ترک سطح الکترودها را ندارند. اگر الکترون‌های گاز را در درجه حرارت معمولی در نظر بگیریم، آنگاه انرژی متوسّط حرارتی آن‌ها به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

$$\frac{۱}{۲}mV^{۲} = \frac{۳}{۲}KT = ۳/۸ \times ۱۰^{-۲}\ (\mathrm{eV}) \qquad (۲۱-۲)$$

این مقدار انرژی، خیلی کم‌تر از انرژی آزادسازی (که در جدول (۲-۲) آورده شده است) می‌باشد. در صورتی‌که درجه حرارت فلز به ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ درجه کلوین افزایش یابد، الکترون‌ها از جنبش‌های حرارتی شبکهٔ فلز، انرژی کافی را به‌دست می‌آورند. در نتیجه از سد پتانسیل فلز (سطح فلز)، می‌گذرند و سطح آن را ترک می‌کنند. این طریق صدور الکترون از فلز کاتد را "صدور گرم الکترون"[۲] می‌گویند. جریان انتشار الکترون، به درجه حرارت فلز بستگی دارد و چگالی آن از رابطهٔ "ریچاردسون"[۳] به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$J_s = \frac{۴\pi m_e e K^{۲}}{h^{۳}} T^{۲} e^{-\frac{W_a}{KT}} \quad \mathrm{Amp/m^{۲}} \qquad (۲۲-۲)$$

که e و m_e بار و جرم الکترون، h ثابت پلانک، K ثابت بولتزمن، T درجه حرارت مطلق، و W_a انرژی آزادسازی است. اگر $A = \frac{۴\pi m_e e K^{۲}}{h^{۳}}$ باشد، آنگاه با جای‌گذاری این مقادیر ثابت داریم:

$$A = ۱۲۰ \times ۱۰^{۴}\ \mathrm{Am^{-۲}deg^{-۲}}$$

$$J_s = A T^{۲} e^{-\frac{W_a}{KT}} \quad \mathrm{Amp/m^{۲}} \qquad (۲۳-۲)$$

1- *Thermionic Emission*

2- *Electron Emission*

3- *Richardson*

این رابطه نشان می‌دهد که چگالی جریان با افزایش درجه حرارت، زیاد شده، با افزایش انرژیِ آزاد سازی، کم می‌شود.

د) انتشار الکترون بر اثر شدّت میدان قوی: میدان الکترواستاتیکی قوی هم می‌تواند موجب خروج الکترون‌ها از سطح کاتد شود؛ زیرا میدان الکتریکی قوی در سطح الکترودها، تراز پتانسیل را در سطح فلز الکترود تغییر می‌دهد. و امکان خروج الکترون‌ها را فراهم می‌سازد. این امر به "اثر تیونل[1]" معروف است. صدور الکترون از فلز کاتد را با این روش، "صدور سرد الکترون" می‌گویند. برای ایجاد جریان انتشاری حدود چند میکروآمپر، شدّت میدانی در حدود 10^7 تا 10^8 ولت بر سانتیمتر لازم است. البتّه در سیم‌های نازک، نقاط تیز و نامنظمی‌های میکروسکوپی ممکن است در ولتاژهای نسبتاً پایین (حدود ۲ تا ۵kV)، شدّت میدان الکتریکی به این مقادیر برسد. به‌هر حال، شدّت میدان لازم برای خروج الکترون‌ها از سطح کاتد به مراتب قوی‌تر از میدان الکتریکی لازم برای تخلیهٔ الکتریکی گازها حتّی در فشارهای زیاد می‌باشد.

۲-۵- نظریهٔ تخلیهٔ الکتریکی گازها بر اساس یونیزاسیون ضربه‌ای

تا اینجا انواع مختلف یونیزاسیون در گازها و منابع تأمین انرژی آن را بررسی کردیم. چنان‌که دیده شد، یونیزاسیون نوری، نیاز به امواج نورانی با طول موج‌های کوتاه دارد و معمولاً گازها در شرایط عادی در معرض چنین امواجی قرار ندارند. یونیزاسیون حرارتی نیز در دماهای خیلی زیاد در حدّ دمای شعله‌ها و قوس‌ها رخ می‌دهد که گازها در این دماها قرار ندارند. در یونیزاسیون سطحی نیز به‌دلیل این‌که گازها تحت میدان الکتریکی خیلی قوی قرار نمی‌گیرند، صدور سرد الکترون رخ نمی‌دهد. ابنابراین، به‌همین علّت می‌توان گفت که کارآمدترین نظریه‌ها در بررسی یونیزاسیون گازها، یونیزاسیون ضربه‌ای است. با توجّه به اهمّیت یونیزاسیون ضربه‌ای در گازها، در این بخش به‌طور مفصّل به بیان نظریه این نوع یونیزاسیون خواهیم پرداخت.

شدّت میدان الکتریکی، بر ذرّات باردار گازی که بین الکترودهای دارای اختلاف،

1- Tunnel Effect

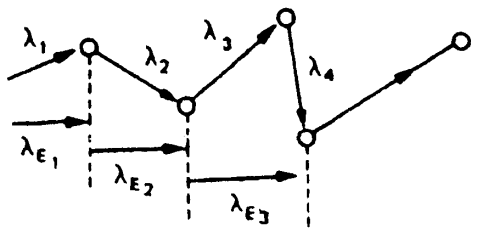
پتانسیل قرار گرفته، نیرو وارد می‌کند. این نیرو سرعت و انرژی ذرّات را افزایش می‌دهد و در نتیجه بر میزان و چگونگی برخوردها تأثیر می‌گذارد. بنابراین، برای بررسی دقیق‌تر فرآیند یونیزاسیون و محاسبهٔ انرژی ذرّات در هر لحظه، لازم است تا بیان روشنی از تراکم ذرّات و حرکت آن‌ها در میدان الکتریکی داشته باشیم و ارتباط این عوامل را با یکدیگر بیاموزیم. برای این منظور، فاصلهٔ آزاد ذرّات گاز را تعریف می‌کنیم. این مفهوم در محاسبهٔ مقدار انرژی که ذرّات باردار ضمن حرکت در راستای میدان الکتریکی از آن دریافت می‌کنند، اهمّیت دارد.

۲-۵-۱- فاصلهٔ آزاد ذرّات در گاز

مسیر حرکت ذرّات (الکترون، اتم، یون، و مولکول)، داخل گاز به‌صورت خطوط تقریباً مستقیم است. ذرّات گاز در هنگام حرکت با یکدیگر برخورد می‌کنند و در هنگام برخورد به تبادل انرژی می‌پردازند. فاصلهٔ بین دو برخورد متوالی بین ذرّات را، فاصلهٔ آزاد آن‌ها می‌گویند که آن را با λ نشان می‌دهیم. این موضوع در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. انرژیی که ذرّات در هنگام حرکت در میدان الکتریکی کسب می‌کنند، به طول فاصلهٔ آزاد (فاصله‌ای که ذرّات بدون برخورد طی می‌کنند) بستگی دارد. طول فاصلهٔ آزاد، یک کمّیت تصادفی است و به‌همین جهت از میانگین آن استفاده می‌کنیم و آن را با $\bar{\lambda}$ نشان می‌دهیم. میانگین فاصلهٔ آزاد به تراکم ذرّات یا چگالی گاز بستگی دارد. اگر ذرّه‌ای در واحد طول، تعداد برخوردهای متوالی آن Z باشد، آن‌گاه مقدار متوسّط طول فاصلهٔ آزاد آن برابر است با:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{Z}$$

برای محاسبهٔ $\bar{\lambda}$ فرض می‌شود که دو نوع ذرّه در داخل گاز وجود دارند. یک دستهٔ



شکل (۲-۴): مسیر حرکت و برخوردهای یک الکترون

ذرّات با شعاع r_1 و سرعت متوسّط $\bar{V}_1$ و یک دستهٔ دیگر با شعاع r_2 و سرعت متوسّط $\bar{V}_2$ وجود دارند. از نظریهٔ گازها درمی‌یابیم که سرعت متوسّط ذرّات داخل گاز برابر است با،

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{V}_1^2 + \bar{V}_2^2} \qquad (۲-۲۴)$$

اگر تعداد برخوردهای ذرّهٔ نوع اوّل با ذرّهٔ نوع دوم در واحد زمان در این گاز، برابر Z' باشد و فرض کنیم که ذرّات نوع اوّل در حال حرکت و ذرّات نوع دوم، ساکن باشند، آن‌گاه،

$$\bar{V}_1 = \bar{V} \qquad \text{و} \qquad \bar{V}_2 = 0$$

این فرض روی تعداد Z' تأثیری نخواهد داشت. بنابراین، یک ذرّه از نوع اوّل، در واحد زمان، فاصلهٔ $x = \bar{V} \times 1 = \bar{V}$ را طی می‌کند و در طول این مسافت با تمام ذرّات نوع دوم که فاصلهٔ مرکز ثقل آن‌ها از مرکز ثقل این ذرّه نوع اوّل مساوی یا کوچک‌تر از $(r_1 + r_2)$ است، برخورد می‌کند. بنابراین، ذرّهٔ اوّل در واحد زمان، با تمام ذرّات نوع دوم موجود در فضایی با حجم $\pi (r_1 + r_2)^2 \bar{V}$ برخورد می‌کند (شکل ۲-۵ را ملاحظه کنید). اگر تعداد ذرّات نوع دوم در واحد حجم را N بنامیم، آن‌گاه تعداد برخوردهای ذرّه نوع اوّل با ذرّات نوع دوم در واحد زمان برابر است با:

$$Z' = \pi (r_1 + r_2)^2 \bar{V} N = \pi (r_1 + r_2)^2 \sqrt{\bar{V}_1^2 + \bar{V}_2^2}\, N \qquad (۲-۲۵)$$

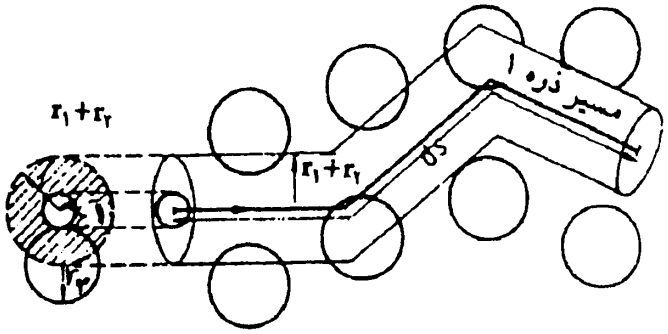
برای محاسبهٔ تعداد برخوردها در واحد طول، فرض می‌کنیم که ذرّه نوع اوّل با سرعت متوسّط $\bar{V}_1$ حرکت کند. در نتیجه،

$$Z = \frac{Z'}{\bar{V}_1} = \pi (r_1 + r_2)^2 N \frac{\sqrt{\bar{V}_1^2 + \bar{V}_2^2}}{\bar{V}_1} \qquad (۲-۲۶)$$

آن‌گاه طول متوسّط فاصلهٔ آزاد برابر است با:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{Z} = \frac{1}{\pi (r_1 + r_2)^2 N} \cdot \frac{\bar{V}_1}{\sqrt{\bar{V}_1^2 + \bar{V}_2^2}} \qquad (۲-۲۷)$$

اکنون حالات مختلف این برخوردها را مورد بررسی قرار می‌دهیم:



شکل (۲-۵): مدل نمادین برای سطح برخورد و فاصلهٔ آزاد

الف) اگر هر دو ذرّه، مولکول باشند:

$$\bar{V}_1=\bar{V}_2 \quad , \quad r_1=r_2=r$$
$$\bar{\lambda}=\frac{1}{4\sqrt{2}\,\pi r^2 N} \qquad (۲-۲۸)$$

ب) اگر ذرّهٔ اوّل الکترون و ذرّهٔ دوم مولکول باشد :

$$\bar{V}_1 \gg \bar{V}_2 \quad , \quad r_1 \ll r_2 \quad , \quad r_2=r$$
$$\bar{\lambda}=\frac{1}{\pi r^2 N} \qquad (۲-۲۹)$$

ج) اگر ذرّهٔ اوّل یون با سرعت زیاد و ذرّه دوم مولکول باشد:

$$\bar{V}_1 > \bar{V}_2 \quad , \quad r_1 \simeq r_2=r$$
$$\bar{\lambda}=\frac{1}{4\pi r^2 N} \qquad (۲-۳۰)$$

در بین سه حالت فوق، طولانی‌ترین فاصلهٔ آزاد، مربوط به برخورد الکترون با مولکول است.

اکنون می‌خواهیم فاصلهٔ آزاد متوسّط الکترون را در گازهای کامل مورد بررسی قرار دهیم. از رابطهٔ معروف در نظریهٔ گازها می‌توان نوشت:

$$N=\frac{P}{KT} \qquad (۲-۳۱)$$

که P فشار گاز، T دمای گاز و K ثابت بولتزمن است. مهّم‌ترین برخوردی که می‌تواند منجر به یونیزاسیون شود، برخورد الکترون با مولکول یا اتم خنثی گاز است (این

موضوع به‌دلیل طول فاصلهٔ آزاد بزرگ‌تر و امکان کسب انرژی جنبشی بیشتر از میدان الکتریکی است) که در این صورت خواهیم داشت:

$$\bar{\lambda} = \frac{۱}{\pi r^{۲} N}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{KT}{\pi r^{۲} P} \qquad (۳۲-۲)$$

همان‌گونه که از رابطهٔ اخیر مشخّص می‌شود، فاصلهٔ آزاد متوسّط در گازها به نوع گاز، دمای گاز و فشار گاز بستگی دارد. با افزایش دما، $\bar{\lambda}$ افزایش یافته و با افزایش فشار، $\bar{\lambda}$ کاهش می‌یابد. در جدول (۲-۳) متوسّط طول فاصلهٔ آزاد برای اتم‌ها و مولکول‌های چند نوع گاز و برای الکترون داخل گاز در دمای صفر درجه سلسیوس (۰°C) و فشار ۱bar نشان داده شده است.

البتّه روابطی را که برای میانگین طول فاصلهٔ آزاد به‌دست آوردیم، با مفروضات معیّنی صحیح می‌باشند؛ به‌ویژه آن‌که یون‌ها و الکترون‌ها را نمی‌توان همواره ذراتی با محدودهٔ معیّن تصوّر کرد؛ زیرا آن‌ها در اطراف خود دارای میدان الکتریکی هستند و وقتی دو ذرّه به هم نزدیک می‌شوند تأثیر متقابل این میدان‌ها بر هم افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، شعاع ذرّات با توجّه به مقدار گرما، سرعت و حرکت نسبی آن‌ها و عوامل دیگری تغییر می‌کند. پس تعیین این‌که در چه فاصله‌ای تأثیر متقابل ذرّات را برخورد بنامیم، مشکل است؛ امّا به هر حال، روابط فوق برای نشان دادن تابعیّت فاصلهٔ آزاد از نوع گاز، گرما و فشار کافی است. علاوه بر این، از آنجایی که در شرایط معمولی درجه حرارت T تغییرات بسیار اندکی دارد، می‌توان مقدار آن را در رابطهٔ،

جدول (۲-۳): فاصلهٔ آزاد متوسّط برای چند گاز مختلف در دمای ۱۵°C و فشار ۷۶۰mmHg

نوع گاز	$H_۲$	$O_۲$	$N_۲$	$CO_۲$	$H_۲O$	مقیاس
متوسّط فاصلهٔ آزاد مولکول	۱۱/۷۷	۶/۷۹	۶/۲۸	۴/۱۹	۴/۱۸	$۱۰^{-۸}$m
متوسّط فاصلهٔ آزاد الکترون	۶۳	۳۶/۰۰	۳۳/۰	۲۲/۰	۱۳/۰۰	$۱۰^{-۸}$m
وزن‌مولکولی	۲/۰۱۶	۳۲/۰۰	۲۸/۰۲	۴۴/۰۰	۱۸/۰۰	

$$\bar{\lambda}_e = \frac{KT}{\pi r^2 P}$$

ثابت فرض نمود. بنابراین، در درجه حرارت ثابت رابطهٔ اخیر به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{1}{\lambda_e} = AP \qquad (۳۳-۲)$$

که $A = \frac{\pi r^2}{KT}$ مقدار ثابتی است که به نوع گاز و درجه حرارت مطلق آن بستگی دارد. از آنجا که حرکت ذرّات گاز در جنبش‌های حرارتی کمیتی تصادفی است، بنابراین، طول فاصلهٔ آزاد حقیقی ذرّات، با متوسّط طول فاصلهٔ آزاد آن‌ها تفاوت زیادی دارد. از این‌رو، ممکن است که میانگین طول فاصلهٔ آزاد برای ذخیره انرژی لازم جهت یونیزاسیون کافی نباشد و در عین حال باز هم یونیزاسیون داشته باشیم.

۲-۵-۲- رابطهٔ میانگین فاصلهٔ آزاد با یونیزاسیون و نقش الکترون‌ها

در درجه حرارت و فشار معمولی، گازها عایق خوبی هستند. هدایت هوا در میدان الکتریکی نسبتاً ضعیف، در حدود 10^{-16} تا 10^{-17} آمپر بر سانتیمتر مربع است. این مقدار هدایت اندک به این دلیل است که هوا در شرایط معمولی، مختصری توسّط اشعه‌های کیهانی و موادّ رادیواکتیو (که در زمین و اتمسفر آن وجود دارند) یونیزه می‌شود و به‌طور متوسّط حدود ۵۰۰ جفت ذرّات مثبت و منفی در هر سانتیمتر مکعب هوا موجود است. در میدان الکتریکی قوی، این ذرّات باردار، سرعت می‌گیرند و انرژی لازم را برای یونیزه کردن اتم‌ها و مولکول‌های خنثی در برخورد با آن‌ها به‌دست می‌آورند. در این میان، الکترون‌ها به دلیل بزرگ‌تر بودن طول فاصلهٔ آزاد آن‌ها نسبت به ذرّات دیگر، انرژی بیشتری کسب می‌کنند و در برخوردهای الاستیک مقدار کمی از انرژی خود را از دست می‌دهند و دوباره در میدان الکتریکی به سرعت انرژی به‌دست می‌آورند. امّا در برخوردهای غیر الاستیک، الکترون‌ها مقدار زیادی از انرژی خود را در برخورد با اتم‌ها و مولکول‌ها به‌صورت انرژی پتانسیل به آن‌ها منتقل می‌کنند و موجب یونیزاسیون و یا تحریک آن‌ها می‌شوند. بنابراین، در فرآیند یونیزاسیون، الکترون‌ها نقش اصلی را بر عهده دارند. با توجّه به این‌که یونیزاسیون ضربه‌ای توسّط الکترون‌هایی که در میدان الکتریکی انرژی به‌دست آورده‌اند به شکست الکتریکی گازها می‌انجامد، بررسی آن دارای اهمّیت

است. اگر $\bar{\lambda}_e$ میانگین فاصلهٔ آزاد در جهت میدانی با شدّت E باشد، آن‌گاه متوسّط انرژیی که یک الکترون در طی مسیر $\bar{\lambda}_e$ به‌دست می‌آورد، عبارت است از:

$$\Delta W = eE\bar{\lambda}_e \qquad (۳۴-۲)$$

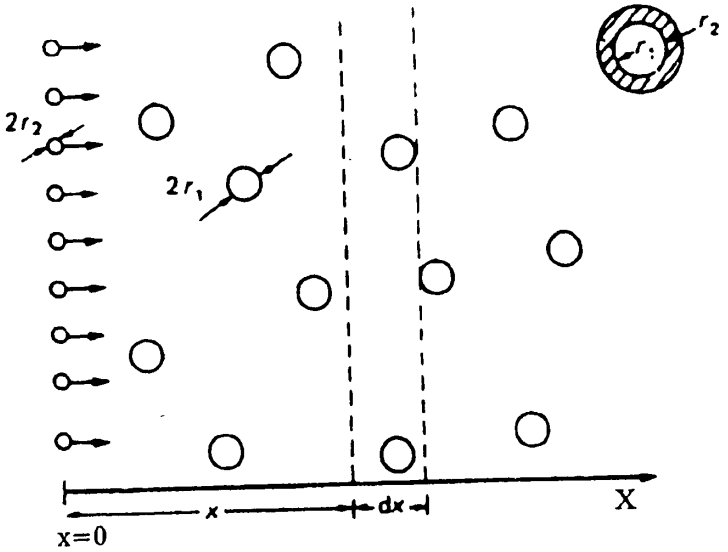
و چون $\bar{\lambda}_e = \frac{1}{AP}$ است، متوسّط انرژی با $\frac{E}{P}$ متناسب است. یعنی،

$$\Delta W \overset{=}{\propto} \frac{e}{A} \cdot \frac{E}{P} \qquad (۳۵-۲)$$

برای این‌که برخورد، منجر به یونیزاسیون شود، باید ΔW بزرگ‌تر یا مساوی انرژی یونیزاسیون (W_i) مولکول یا اتم مورد برخورد، باشد. البتّه همان‌طور که گفتیم الکترون‌هایی با انرژی کم‌تر از W_i ممکن است مولکول را تحریک کرده، الکترون دیگری موجب یونیزاسیون آن شود. از طرف دیگر، گفتیم که همهٔ الکترون‌هایی که دارای انرژی بالاتر از W_i باشند، در برخورد با مولکول‌ها آن‌ها را یونیزه نمی‌کنند و به‌طور کلّی می‌توان گفت که یونیزاسیون در گازها یک فرآیند تصادفی و احتمالاتی است که هر چه سرعت الکترون‌ها بیشتر باشد احتمال یونیزاسیون بیشتر است، امّا این موضوع قطعی نیست.

۲-۵-۳- توزیع آماری فاصلهٔ آزاد

در بخش‌های قبل گفتیم که ذرّات باردار در فضای بین الکترودها سرعت و انرژی می‌گیرند و در برخورد با اتم‌ها و مولکول‌های گاز، آن‌ها را یونیزه می‌کنند. بر اثر یونیزاسیون، تعداد ذرّات باردار در حجم گاز افزوده می‌شود؛ در نتیجه تراکم ذرّات، زیاد شده، طول فاصلهٔ آزاد آن‌ها کم می‌شود. برای بررسی چگونگی افزایش ذرّات و توزیع تراکم و طول فاصلهٔ آزاد آن‌ها، شکل (۲-۶) را در نظر بگیرید: فرض کنید تعداد n_0 ذرّه (الکترون) از نقطهٔ $x=0$ در جهت x به حرکت درمی‌آید. با دور شدن از کاتد (در $x=0$)، تعداد ذرّات n که هیچ برخوردی در طول مسیر خود نداشته‌اند، به‌تدریج کاهش می‌یابند. با افزایش طول مسیر حرکت از x به اندازهٔ dx، مقدار n به اندازهٔ $-dn$ کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش، با تعداد ذرّات برخورد کرده در طول dx، برابر است. با توجّه به تعریف Z (تعداد برخوردهای یک الکترون در واحد طول)، یک الکترون در طی فاصلهٔ dx، تعداد $Z.dx$ برخورد با دیگر ذرّات گاز



شکل (۲-۶): مدلی برای تعیین فاصلهٔ آزاد

خواهد داشت و برای n الکترون تعداد برخوردها (و یا مقدار کاهش در ذرّات برخورد نکرده) در فاصلهٔ dx عبارت است از:

$$-dn = n.Z.dx \qquad (۳۶-۲)$$

علامت منفی به این دلیل است که n، بیانگر تعداد ذرّات برخورد نکرده و dnکاهش را در تعداد آن‌ها نشان می‌دهد. رابطهٔ (۲-۳۶) را به‌صورت زیر می‌نویسیم:

$$\frac{-dn}{n} = Z.dx \qquad (۳۷-۲)$$

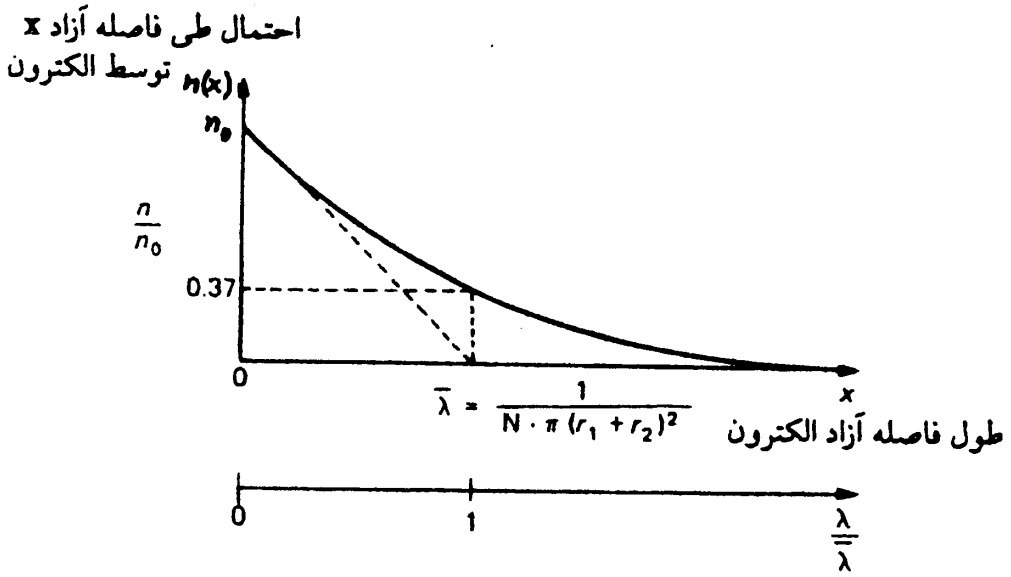
چون $Z=\frac{۱}{\lambda}$ است، با انتگرال‌گیری داریم :

$$\frac{n}{n_\circ} = e^{-x/\lambda}$$

$$n = n_\circ e^{-x/\lambda} \qquad (۳۸-۲)$$

بنابراین، تعداد ذرّات برخورد نکرده دارای توزیعی نمایی هستند که با افزایش فاصله از کاتد، از تعداد آن‌ها کاسته می‌شود. به‌عبارت دیگر، در حرکت الکترون‌ها از کاتد به سمت آند، پیوسته ذرّات بیشتری در برخوردها شرکت می‌کنند. این موضوع را می‌توان در شکل (۲-۷) مشاهده نمود.

مقدار $\frac{n}{n_\circ}$ برابر نسبت ذراتی که مسیر x یا بیش از آن را بدون برخورد طی کرده‌اند، به کلّ ذرّات است. پس برای این ذرّات، عملاً طول فاصلهٔ آزاد بزرگ‌تر یا مساوی x است. با توجّه به آن‌که همهٔ ذرّات در وضعیت مشابهی هستند، بنابراین،،



شکل (۲-۷): توزیع آماری فاصلهٔ آزاد الکترون در گاز

می‌توان گفت که مقدار $e^{-x/\lambda}$ عبارت است از احتمال این‌که طول فاصلهٔ آزاد واقعی الکترون بزرگ‌تر یا مساوی x باشد. چنان‌که رابطهٔ (۲-۳۸) و شکل (۲-۷) نشان می‌دهد، طول فاصلهٔ آزاد همواره از صفر بزرگ‌تر است. همچنین احتمال این‌که یک ذرّه دارای طول فاصلهٔ آزادی برابر با میانگین فاصلهٔ آزاد باشد ($x = \bar{\lambda}$)، ۳۷٪ است.

۲-۵-۴- ضریب تخلیهٔ الکتریکی

اکنون که به مفهوم طول فاصلهٔ آزاد و توزیع آماری آن در فاصلهٔ بین الکترودها پی برده‌ایم، به چگونگی انجام یونیزاسیون (توسّط الکترون‌ها و یون‌ها) می‌پردازیم. گرچه ذرّات گاز به ویژه در میدان الکتریکی، پیوسته در حال حرکت و برخورد با یکدیگراند، امّا بدیهی است که تنها برخوردهایی به یونیزه شدن ذرّات می‌انجامد که انرژی کافی برای این کار را دارا باشند. برای بررسی این مطلب ابتدا ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند[1] یا ضریب تخلیهٔ الکتریکی α را تعریف می‌کنیم که عبارت است از تعداد یونیزاسیون‌هایی که یک الکترون در طی مسیری برابر واحد طول (مثلاً یک سانتیمتر)، در جهت میدان الکتریکی و در حجم گاز صورت می‌دهد.

1- *Townsend* تانزند نام یک دانشمند انگلیسی است که برای اوّلین بار، نظریهٔ تخلیهٔ الکتریکی گازها را اثبات کرده است.

مشابه این تعریف را برای یونیزاسیون توسّط یون‌ها نیز تعریف می‌کنیم که ضریب آن را با γ نمایش می‌دهیم. از آن‌چه قبلاً مورد بحث قرار گرفت یونیزاسیون انجام شده توسّط یون‌ها در مرحلهٔ دوم اهمّیت قرار دارد. لازم به ذکر است که در تعریف ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند فرض‌های ساده کنندهٔ زیر در نظر گرفته شده است:

اوّلاً، الکترون‌هایی که صاحب انرژی جنبشی کوچک‌تر از انرژی لازم برای یونیزاسیون می‌باشند قادر به یونیزاسیون ذرّات گاز نیستند. ثانیاً، الکترون‌هایی که انرژی جنبشی آن‌ها از انرژی یونیزاسیون بیشتر است، در برخورد خود با ذرّه‌های گاز، حتماً آن ذرّه‌ها را یونیزه خواهند کرد. می‌دانیم که با قبول فرض اوّل، آن تعداد از الکترون‌ها و یا یون‌هایی را که بر اثر یونیزاسیون چند مرحله‌ای پدید می‌آیند، به حساب نمی‌آوریم. همچنین با فرض دوم، امکان یونیزاسیون را بیش از آن‌چه که در عمل مقدور است در نظر می‌گیریم؛ زیرا با توجّه به تابعیت یونیزاسیون از سرعت الکترون دیدیم که علی‌رغم کفایت انرژی جنبشی الکترون، تمامی برخوردهای آن با ذرّه‌های گاز منجر به یونیزاسیون آن‌ها نمی‌گردد. ثالثاً، فرض می‌کنیم که الکترون در هر برخورد، تمامی انرژی جنبشی خود را به ذرّه می‌دهد و مجدّداً با سرعت صفر شروع به حرکت می‌کند؛ در حالی‌که در حقیقت، الکترون پس از برخورد با ذرّه، کلّیهٔ انرژی جنبشی خود را از دست نمی‌دهد و با در نظر نگرفتن این انرژی باقیمانده، امکان یونیزاسیون را کم‌تر از آن‌چه در واقعیّت موجود می‌باشد به حساب می‌آوریم. در چهارمین فرضمان قبول می‌کنیم که الکترون در جهت میدان حرکت می‌کند. بنابراین، از حرکت نامنظّم ذرّه چشم‌پوشی می‌کنیم که با این فرض، تعداد برخوردهای الکترون را در واحد طول میدان، کم‌تر از تعداد واقعی برخوردها در نظر گرفته‌ایم. در عمل این فرض‌ها صادق نیستند، امّا با کمک آن‌ها می‌توان رابطه‌ای برای ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند (α) به‌دست آورد که با نتایج آزمایشگاهی نزدیک باشد. برای این کار، فرض کنید الکترونی با بار q، مسیر x را در یک میدان الکتریکی یکنواخت با شدّت میدان E ($E=\frac{V}{d}$) بدون برخورد طی کند. از طرف میدان الکتریکی، نیرویی به اندازهٔ $F=E.q$ به این الکترون وارد می‌شود و الکترون تحت تأثیر این نیرو در راستای بردار میدان الکتریکی و در خلاف جهت آن با شتاب حرکت می‌کند و از میدان مذکور، انرژی دریافت می‌کند (انرژی جنبشی). این الکترون در انتهای مسیر بدون برخورد x انرژی $E.q.x$ را دریافت می‌کند. برای این‌که

برخورد این الکترون با یک مولکول به یونیزاسیون آن بیانجامد باید رابطهٔ زیر برقرار باشد:

$$E.q.x \geq W_i$$

یعنی الکترون قبل از برخورد باید مسافت x_i را بدون برخورد طی کند تا پس از برخورد، منجر به یونیزاسیون اتم یا مولکول گاز شود:

$$x_i \geq \frac{W_i}{Eq} = \frac{V_i}{E} \qquad (۳۹-۲)$$

اگر میانگین طول فاصله آزاد $\bar{\lambda}$ باشد، از رابطهٔ $\frac{n}{n} = e^{-x_i/\bar{\lambda}}$ احتمال این‌که الکترون مسافت x_i یا بیش از آن را بدون برخورد طی کند، برابر $e^{-x_i/\bar{\lambda}}$ خواهد بود. به‌عبارت دیگر، $e^{-x_i/\bar{\lambda}}$، درصد الکترون‌هایی است که می‌توانند فاصلهٔ آزادی به اندازه x_i داشته باشند. از طرفی تعداد کلّ برخوردها در واحد طول $1/\bar{\lambda}$ است؛ امّا در همهٔ این برخوردها، انرژی لازم برای یونیزاسیون موجود نیست. بنابراین، تعداد برخوردهای یک الکترون در واحد طول که منجر به یونیزاسیون می‌شوند (ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند α) برابر است با:

$$\alpha = \frac{1}{\bar{\lambda}} \; e^{-x_i/\lambda} \qquad (۴۰-۲)$$

با توجّه به رابطهٔ $\frac{1}{\bar{\lambda}} = AP$ و شرط x_i در رابطهٔ (۲-۳۹) داریم:

$$\alpha = AP\, e^{\frac{-V_i\, AP}{E}}$$

با توجّه به این‌که AV_i مقدار ثابتی است آن را با B نشان می‌دهیم. پس،

$$\alpha = AP\, e^{\frac{-BP}{E}} \qquad (۴۱-۲)$$

و یا به‌شکل کلّی‌تر خواهیم داشت:

$$\alpha = P\, f(\frac{E}{P}) \qquad (۴۲-۲)$$

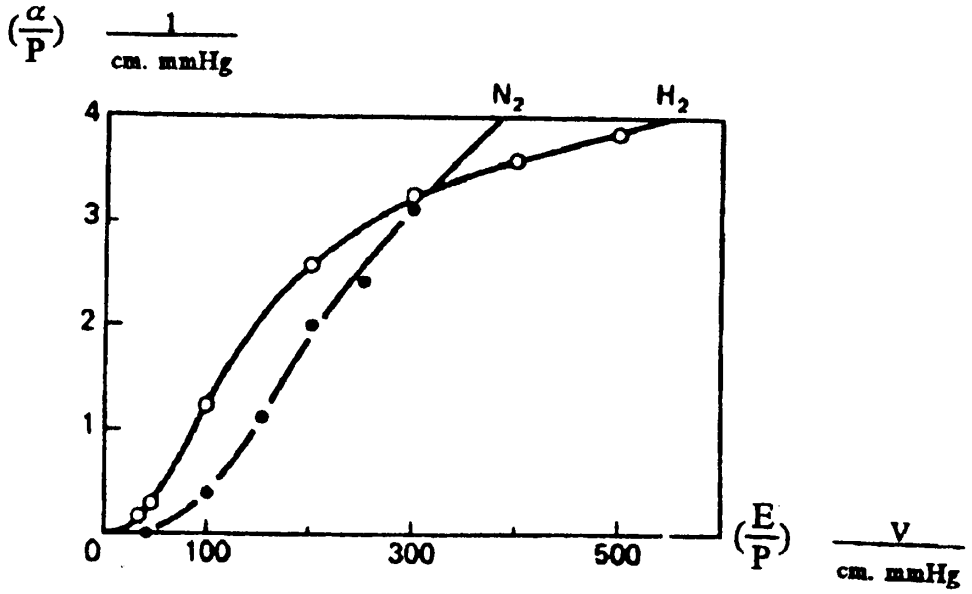
$$\frac{\alpha}{P} = f(\frac{E}{P}) \qquad (۴۳-۲)$$

چنان‌که قبلاً هم ذکر شد، در درجه حرارت ثابت، توزیع انرژی الکترون (ΔW) با $\frac{E}{P}$ متناسب است. از طرفی برای یک توزیع انرژی داده شده، احتمال انجام

یونیزاسیون متناسب با چگالی گاز یا فشار آن است. رابطهٔ (۲-۴۳)، این دو مورد را بیان می‌کند. در این رابطه، α از طرفی با P نسبت مستقیم دارد؛ زیرا با افزایش فشار، λ کم و تعداد برخوردها زیاد می‌شود. در نتیجه از یک طرف، تعداد یونیزاسیون‌ها در واحد طول (α) افزایش می‌یابد. این حالت بیشتر در فشارهای پایین رخ می‌دهد. از طرف دیگر (در فشارهای بالا) α با P نسبت عکس دارد؛ زیرا با افزایش بیشتر فشار و در نتیجه کوچک شدن λ، مقدار کسب انرژی الکترون‌ها از میدان الکتریکی کاهش می‌یابد و در نتیجه احتمال یونیزاسیون در اثر برخوردها در واحد طول، کاهش می‌یابد. چون این انرژی با شدّت میدان الکتریکی هم ارتباط مستقیم دارد، پس عبارت $(\frac{E}{P})$ در رابطهٔ اخیر ظاهر می‌شود؛ بدین معنا که در درجه حرارت ثابت، اگر نسبت $\frac{E}{P}$ ثابت باشد، ضریب یونیزاسیون ضربه‌ای توسّط الکترون‌ها (α) با فشار گاز نسبت مستقیم دارد. این رابطه با نتایج آزمایشگاهی نیز مطابقت دارد. البتّه با توجّه به این‌که در به‌دست آوردن رابطهٔ (۲-۴۱) با در نظر گرفتن مقادیر A و B از روابط نظری، تقریب‌های زیادی را در نظر گرفته‌ایم، بنابراین، رابطهٔ (۲-۴۳) دقّت زیادی ندارد؛ امّا برای تغییرات کوچک $\frac{E}{P}$ می‌توان ضریب‌های A و B را به‌صورت تجربی طوری به‌دست آورد که نتایج حاصل از این رابطه، با مشاهدات آزمایشگاهی به هم نزدیک باشند. جدول (۲-۴) مقادیر تجربی پارامترهای A و B چند گاز مختلف، و شکل (۲-۸) منحنی تابع رابطهٔ (۲-۴۳) را برای دو گاز هیدروژن H_2 و نیتروژن N_2 با استفاده از مقادیر تجربی A و B نشان می‌دهند.

جدول (۲-۴): نسبت $\frac{E}{P}$ در چند گاز مختلف

گاز	A بر حسب 1/cm.mmHg	B بر حسب V/cm.mmHg	محدوده E/P بر حسب V/cm.mmHg	پتانسیل یونیزاسیون گاز (V_i) برحسب ولت
H_2	۵	۱۳۰	۱۵۰-۶۰۰	۱۵/۴
N_2	۱۲	۳۴۲	۱۰۰-۶۰۰	۱۵/۵
هوا	۱۵	۳۶۵	۱۰۰-۸۰۰	–
CO_2	۲۰	۴۶۶	۵۰۰-۱۰۰۰	۱۲/۶
He	۳	۳۴	۲۰-۱۵۰	۲۴/۵
Hg	۲۰	۳۷۰	۲۰۰-۶۰۰	–



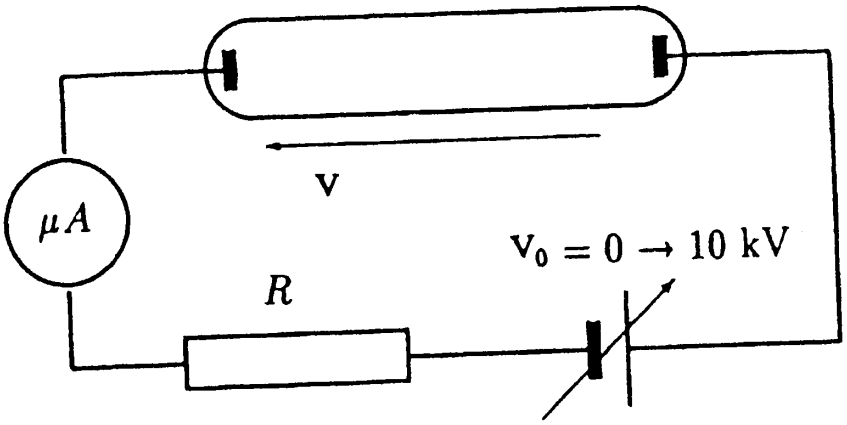
شکل (۲-۸): نحوهٔ تغییرات α/P با E/P

۲-۵-۵- پدیدهٔ بهمن الکترونی و تخلیهٔ الکتریکی تانزند

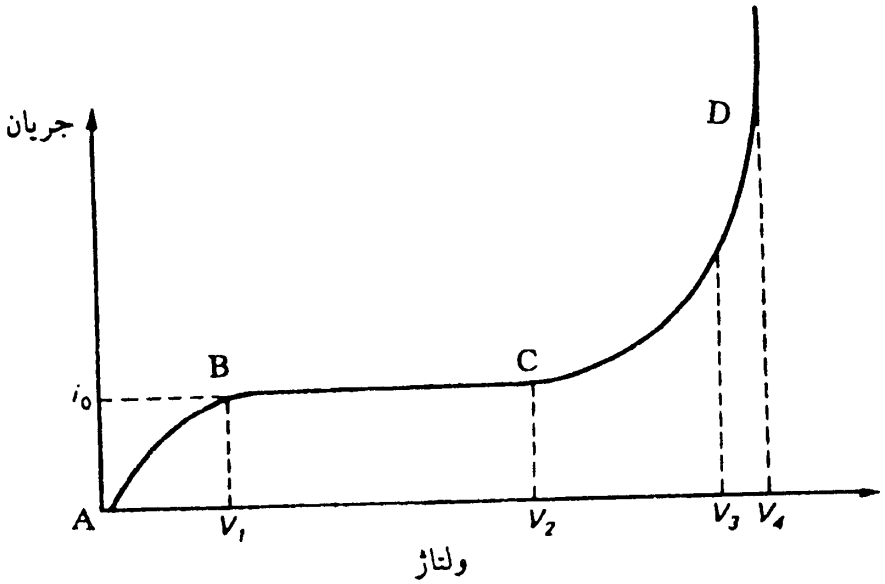
مطابق شکل (۲-۹)، یک گاز را در بین دو الکترود قرار می‌دهیم و الکترودها را از طریق یک مقاومت و آمپرمتر سری در مدار به منبع ولتاژ دائم متّصل می‌کنیم. چون در اثر عوامل خارجی مانند اشعه‌های کیهانی و اشعهٔ ایکس، همواره تعدادی الکترون آزاد در داخل گاز وجود دارد و یا از سطح الکترود کاتد صادر می‌شود، با اعمال میدان الکتریکی ناشی از ولتاژ منبع (V_0) الکترون‌های آزاد داخل گاز، در خلاف جهت میدان تحت تأثیر نیرویی که از طرف میدان الکتریکی به آن‌ها وارد می‌شود، به طرف آند حرکت می‌کنند و مرتباً انرژی آن‌ها توسّط میدان زیادتر می‌شود تا زمانی که به یک مولکول برخورد کنند. همچنین یون‌های مثبت داخل گاز به طرف کاتد و در جهت میدان حرکت می‌کنند. در این بین، تعدادی از الکترون‌ها و یون‌ها ترکیب شده، اتم خنثی را تشکیل می‌دهند و تعدادی از آن‌ها نیز انرژی کافی از میدان کسب کنند و می‌توانند الکترون‌هابه آند و یون‌های مثبت به کاتد برسند. در اثر الکترون‌ها و یون‌های رسیده به آند و کاتد، یک جریان الکتریکی در مدار برقرار می‌گردد و به‌وسیلهٔ آمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود که مقدار آن بسیار ناچیز است.

حال وقتی ولتاژ منبع را افزایش دهیم میدان الکتریکی داخل گاز زیادتر شده،

در نتیجه، یون‌ها و الکترون‌ها با سرعت بیشتری و کسب انرژی زیادتری حرکت می‌کنند. در این حالت، الکترون‌ها و یون‌ها فرصت کم‌تری برای ترکیب مجدد دارند و تعداد زیادتری الکترون و یون به آند و کاتد می‌رسد. بنابراین، جریان الکتریکی بیشتری به‌وسیلهٔ آمپرمتر سنجیده می‌شود. این افزایش جریان در اثر افزایش ولتاژ، یک رابطهٔ تقریباً خطی است (قسمت AB در مشخّصهٔ ولتاژ- جریان عایق در شکل ۲-۱۰). هنگامی‌که ولتاژ عایق به V_1 می‌رسد، دیگر با افزایش ولتاژ منبع، جریان الکتریکی در مدار تقریباً ثابت می‌ماند و به حالت اشباع می‌رسد (قسمت B تا C). در



شکل (۲-۹): مدار آزمایش برای نشان دادن عبور جریان گاز

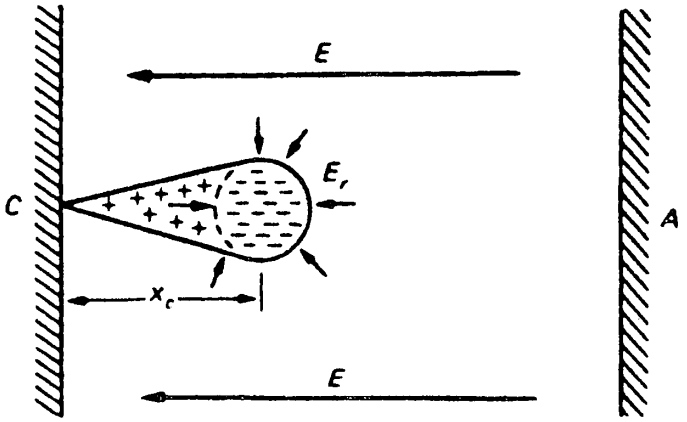


شکل (۲-۱۰): رابطهٔ بین جریان و ولتاژ قبل از وقوع جرقّه

این حالت، جریان مستقل از ولتاژ دو سر الکترود می‌گردد؛ زیرا از ولتاژ V_1 تا V_2 هر چه الکترون و یون به‌واسطه عوامل خارجی در گاز وجود دارند، به آند و کاتد می‌رسند و بیش از این، ذرّات بارداری وجود ندارند. بنابراین، با افزایش ولتاژ و کسب انرژی بیشتر توسّط ذرّات باردار، در تعداد ذرّات رسیده به آند و کاتد تغییری حاصل نمی‌شود و جریان ثابت می‌ماند. در این حالت، فقط اگر شدّت عامل خارجی افزایش یابد، مقدار این جریان اشباع، زیادتر می‌گردد.

حال اگر ولتاژ را باز هم افزایش دهیم، با افزایش شدّت میدان، الکترون‌های آزاد داخل گاز، آن قدر از میدان الکتریکی انرژی کسب می‌کنند که می‌توانند در مسیر خود در برخورد با مولکول‌های گاز، آن‌ها را یونیزه نمایند و الکترون‌های آزاد جدیدی را به‌وجود آورند. این الکترون‌های آزاد جدید نیز از میدان الکتریکی، انرژی کسب می‌کنند و در مسیر خود به طرف آند، الکترون‌های جدیدتری را در برخورد با مولکول‌های گاز به‌وجود می‌آورند. بدین ترتیب، به‌طور تصاعدی، تعداد الکترون‌ها و یون‌های مثبت داخل گاز افزایش می‌یابد و یک بهمن الکترونی تشکیل می‌شود. الکترون‌های آزاد به دلیل جرم کم‌تر و در نتیجه سرعت زیادتر آن‌ها، در سر پهن و کروی شکل این بهمن قرار می‌گیرند. همچنین یون‌های مثبت به‌دلیل جرم زیادتر و سرعت کم‌تر، در دنبالهٔ مخروطی شکل آن قرار می‌گیرند که در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است.

به‌سبب افزایش تصاعدی در تعداد الکترون‌های رسیده به آند و یون‌های مثبت رسیده به کاتد، جریان الکتریکی به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد و یک تخلیهٔ



شکل (۲-۱۱): شکل کلّی یک بهمن الکترونی

الکتریکی غیر مستقل به‌وجود می‌آید (منطقهٔ C-D در شکل ۲-۱۰). این تخلیه را از آن جهت، غیرمستقل می‌گویند که اگر عوامل خارجی قطع گردد، پروسهٔ تشکیل بهمن الکترونی قطع می‌شود و جریان الکتریکی نیز به صفر رسیده، قطع می‌گردد.

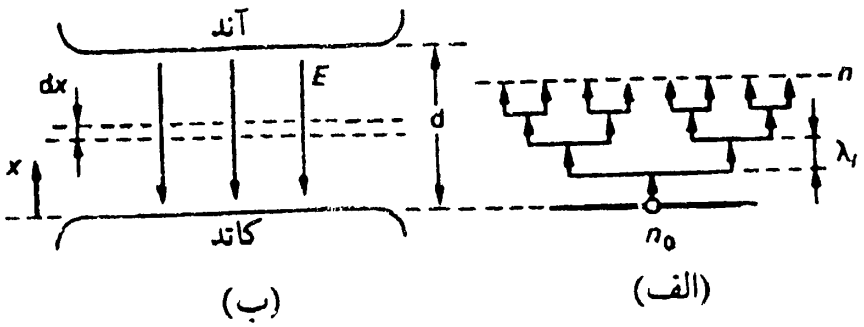
۲-۵-۵-۱- محاسبهٔ جریان تخلیهٔ الکتریکی غیر مستقل

برای محاسبهٔ جریان تخلیهٔ الکتریکی غیر مستقل، فرض می‌کنیم به‌دلیل عوامل خارجی در هر لحظه، n_0 الکترون آزاد از کاتد به طرف آند حرکت می‌کند. اگر این الکترون‌های آزاد اوّلیه (n_0)، در مسیر حرکت خود به طرف آند، در اثر برخورد با مولکول‌های گاز، یونیزاسیون انجام دهند و الکترون‌های آزاد جدیدی را به‌وجود آورند واین پروسه ادامه یابد، در آن صورت در فاصلهٔ x از سطح کاتد، تعداد الکترون‌های آزاد به n می‌رسد. این موضوع در شکل (۲-۱۲) قابل مشاهده است. میزان افزایش تعداد الکترون‌های آزاد در لایهٔ dx را (که در فاصلهٔ x از سطح کاتد قرار دارد) در اثر یونیزاسیون برابر dn در نظر می‌گیریم. با توجّه به این‌که تعداد الکترون‌های آزاد به‌وجود آمده در واحد طول به‌وسیلهٔ یک الکترون، همان ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند است، بنابراین، داریم:

$$dn = n\,\alpha\,dx$$

$$\frac{dn}{n} = \alpha\,dx$$

با انتگرالگیری در تعداد الکترون‌های آزاد از n_0 تا n و نیز در طول فاصلهٔ الکترودها از صفر تا x خواهیم داشت:



شکل (۲-۱۲): نمودار تکثیر یک بهمن الکترونی

$$\int_{n_\circ}^{n} \frac{dn}{n} = \int_{\circ}^{x} \alpha \cdot dx$$

و برای میدان یکنواخت که شدّت میدان الکتریکی و در نتیجه α در تمام نقاط آن ثابت است، خواهیم داشت:

$$\ln n \mid_{n_\circ}^{n} = \alpha \cdot x \mid_{\circ}^{x}$$

$$n = n_\circ e^{\alpha x}$$

در نتیجه، برای فاصلهٔ کاتد تا آند ($x=d$) تعداد الکترون‌های آزاد که به آند می‌رسند، برابر است با:

$$n_A = n_\circ e^{\alpha d} \qquad (۴۴-۲)$$

اگر طرفین رابطهٔ اخیر را در بار الکتریکی الکترون ضرب کنیم، شدّت جریان را به‌دست می‌آوریم (سطح الکترودها واحد فرض شده است):

$$I = I_\circ e^{\alpha d} \qquad (۴۵-۲)$$

چنان‌که از رابطهٔ اخیر مشخّص است، جریان I با پیش رفتن الکترون‌ها به سمت آند و انجام یونیزاسیون به‌طور نمایی اضافه می‌شود و $I_\circ$ مربوط به الکترون‌های آزاد اوّلیه است که برای وجود جریان، حضور این الکترون‌های اوّلیه الزامی است. این الکترون‌ها توسّط یک عامل خارجی (مثلاً تاباندن اشعه ماوراء بنفش به کاتد) تولید می‌شوند. بدین جهت، این مقطع از یونیزاسیون و تخلیهٔ الکتریکی در گاز را یونیزاسیون غیرمستقل یا تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل گویند؛ زیرا در این مقطع، برای ادامهٔ جریان یونیزاسیون، باید الکترون یا الکترون‌های اوّلیه توسّط عامل خارجی به‌وجود آید. لازم به یادآوری است که چون بهمن الکترونی در پی یونیزه شدن ذرّات گاز به‌وجود می‌آید و یونیزاسیون همواره با فرآیند ترکیب مجدّد همراه است، پس در این پدیده، مقدار زیادی فوتون‌های نوری آزاد می‌شود و معمولاً تخلیه با نور همراه است.

۲-۵-۵-۲- ارتباط جریان تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل با فاصلهٔ الکترودها

در قسمت قبل، جریان تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل را به‌صورت $I = I_\circ e^{\alpha d}$ به‌دست آوردیم. حال اگر از دو طرف این معادله، لگاریتم بگیریم خواهیم داشت:

$$\ln I = \ln I_{\circ} + \alpha d \qquad (۴۶-۲)$$

این رابطه نشان می‌دهد که منحنی $\ln I$ بر حسب فاصلهٔ بین الکترودها (d) باید خط مستقیمی با شیب α باشد. اگر $\ln I$ را بر حسب فاصلهٔ الکترودها (d) رسم نماییم یک رابطهٔ خطّی مطابق شکل (۲-۱۳) به‌دست می‌آید که از مقدار $\ln I_{\circ}$ شروع شده و شیب آن هم، همان ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند (α) است. برای اندازه‌گیری مقدار ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند (α) با ثابت نگهداشتن E و P و اندازه‌گیری جریان‌ها برای دو مقدار $d_۱$ و $d_۲$ می‌توان مقدار α را محاسبه نمود:

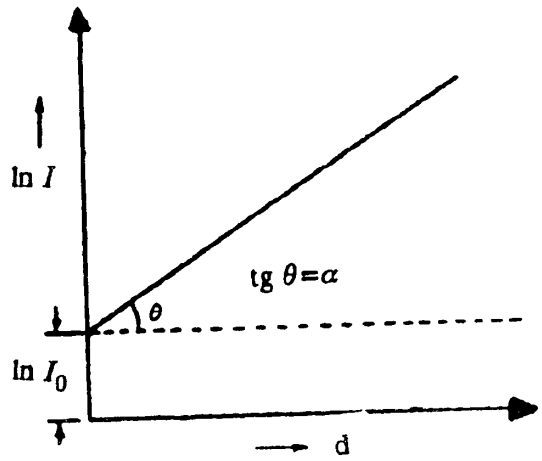
$$I_۱ = I_{\circ}\, e^{\alpha d_۱}$$

$$I_۲ = I_{\circ}\, e^{\alpha d_۲}$$

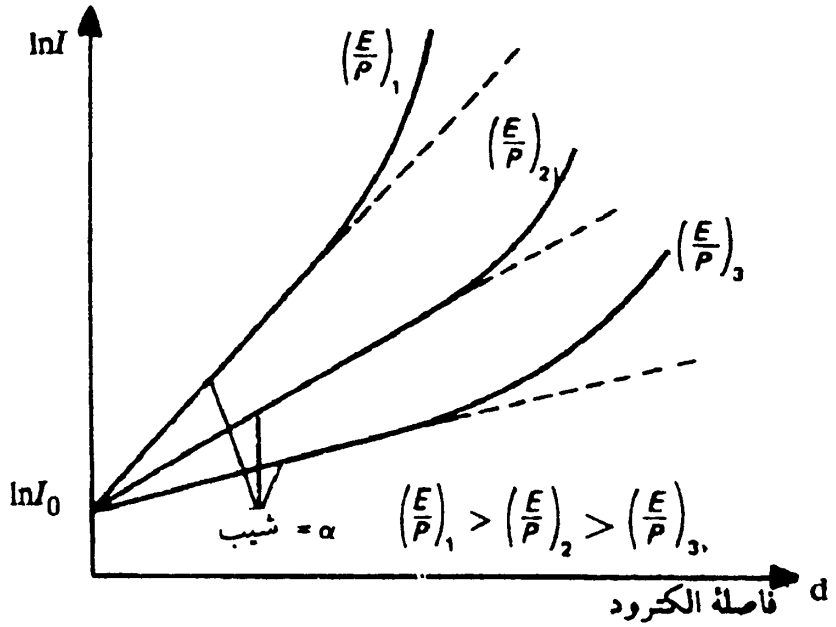
$$\frac{I_۱}{I_۲} = e^{\alpha(d_۱ - d_۲)}$$

$$\alpha = \frac{۱}{d_۱ - d_۲} \ln\left(\frac{I_۱}{I_۲}\right) \qquad (۴۷-۲)$$

تانزند ضمن آزمایش‌هایی مشاهده کرد که در ولتاژهای بالاتر، افزایش جریان از رابطهٔ (۲-۴۶) پیروی نمی‌کند و در این ولتاژها شدّت جریان، افزایش بیشتری را نسبت به آن‌چه از رابطهٔ (۲-۴۷) بر می‌آید، داراست. شکل (۲-۱۴) نمودار واقعی $\ln I$ بر حسب فاصلهٔ الکترودها را در نسبت‌های مختلف $\frac{E}{P}$ نشان می‌دهد. برای توضیح این اثر، وی به این نتیجه رسید که در ولتاژهای بالا، عامل دیگری بر افزایش



شکل (۲-۱۳): رابطهٔ خطّی بین **ln I** و فاصلهٔ الکترودها

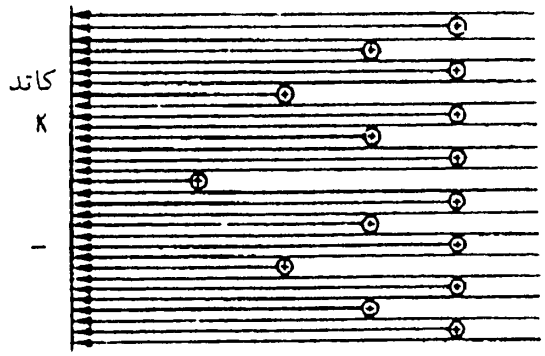


شکل (۲-۱۴): تغییرات لگاریتم جریان فاصلهٔ هوایی متناسب با طول فاصلهٔ الکترودها در یک میدان یکنواخت

جریان تأثیر می‌گذارد و همین امر موجب تخلیهٔ الکتریکی مستقل (خودنگهدار یا خودی) در گاز می‌شود که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

۲-۵-۵-۳- تخلیهٔ الکتریکی مستقل

در مدار آزمایش قبلی شکل (۲-۹)، فرض کنید که ولتاژ منبع را باز هم افزایش دهیم ($V>V_4$ در شکل ۲-۱۰). در این حالت، میدان الکتریکی داخل گاز قوی‌تر می‌شود؛ به‌طوری که یون‌های مثبت آن‌قدر انرژی از میدان کسب می‌کنند که می‌توانند در برخورد با سطح کاتد، بر انرژی آزاد سازی الکترون از سطح فلزی کاتد غلبه نمایند (شکل ۲-۱۵ را ببینید). در این صورت، علاوه بر n_0 الکترون آزاد شدهٔ اولّیه از سطح کاتد (در اثر عوامل خارجی)، یون‌های مثبت نیز تعدادی الکترون از سطح کاتد آزاد می‌کنند که این الکترون‌های ثانویهٔ تولید شده نیز، در میدان الکتریکی انرژی گرفته، الکترون‌های آزاد بیشتری در داخل گاز در اثر یونیزاسیون تولید می‌نمایند. در نتیجه، این پروسه ادامه یافته، بهمن الکترونی بزرگ‌تری تشکیل



شکل (۲-۱۵): برخورد یون‌ها به سطح کاتد و صدور الکترون از کاتد

می‌گردد و بالطبع، تعدادالکترون‌های آزاد رسیده به آند و یون‌های مثبت رسیده به کاتد، به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابند. در نتیجه، یک جریان تخلیهٔ الکتریکی زیادی توأم با جرقّه و شکست کامل گاز به‌وجود می‌آید. آنگاه به‌دلیل هادی شدن عایق گازی و افزایش ناگهانی جریان تخلیهٔ الکتریکی، ولتاژ دو سر عایق افت شدیدی پیدا می‌کند و جریان زیادی عبور می‌کند. در این حالت، بمباران سطح کاتد با یون‌های مثبت و صدورالکترون‌های ثانویه در اثر آن، عاملی برای تولید الکترون‌های آزاد بیشتری در گاز می‌شود. از این‌رو، اگر عامل خارجی یونیزاسیون نیز برداشته شود (یعنی $n_0=0$ گردد)، باز هم الکترون آزاد در گاز در اثر برخورد یون‌های مثبت به سطح کاتد به‌وجود می‌آید و جریان تخلیهٔ الکتریکی قطع نمی‌گردد (شکل ۲-۱۶ را ببینید). به این حالت، تخلیهٔ الکتریکی مستقل می‌گوییم. ولتاژ لازم برای شروع تخلیهٔ الکتریکی مستقل را ولتاژ شکست (V_b[1]) یا ولتاژ جرقّه (V_s[2]) می‌گویند.

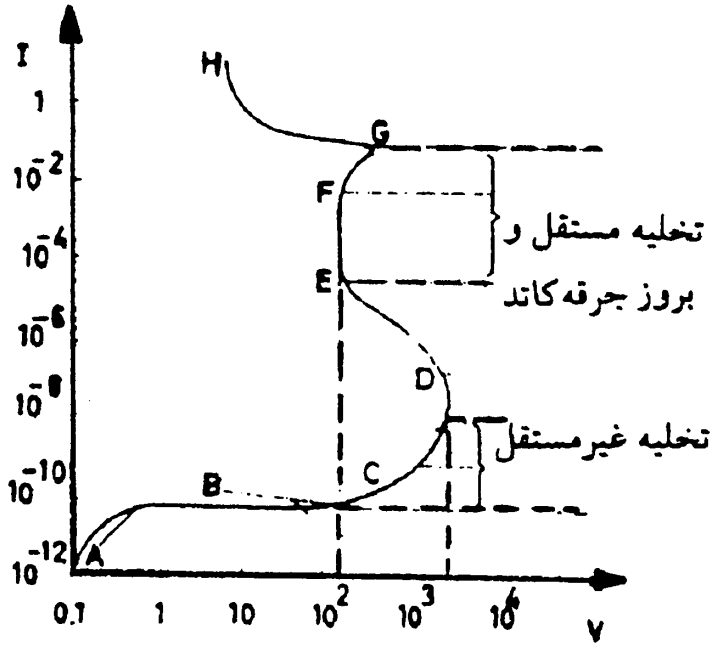
در عمل، گسترش بهمن اوّلیه شرایط لازم برای این امر را به‌وجود می‌آورد و الکترون ثانویه ممکن است بدون دخالت عامل خارجی به یکی از سه روش زیر به‌وجود آید:

الف) با بمباران کاتد توسّط یون‌هایی که از بهمن الکترونی اوّلیه ایجاد شده‌اند؛

ب) یونیزاسیون نوری در کاتد، بر اثر تشعشعات حاصل از بهمن الکترونی اوّلیه؛

ج) یونیزاسیون نوری در حجم گاز، بر اثر تشعشعات حاصل از بهمن الکترونی اوّلیه؛

1- V_b = *Breakdown Voltage* 2- V_s = *Spark Voltage*



شکل (۲-۱۶): تخلیهٔ الکتریکی مستقل و غیر مستقل

در فشارهای مختلف گاز، نقش هر کدام از عوامل فوق متفاوت است. در فشار کم گاز، یونیزاسیون سطح کاتد توسّط یون‌های مثبت نسبتاً شدید است. به‌طور متوسّط، یک الکترون بر اثر بمباران کاتد توسّط ده‌ها یون آزاد می‌شود؛ امّا در فشار اتمسفر، این عمل خیلی کُند اتّفاق می‌افتد؛ زیرا بیشتر یون‌ها در جلوی بهمن الکترونی متمرکزند. از طرف دیگر، برای یونیزاسیون سطحی در کاتد، لازم است که تمام فضای بین الکترودها توسّط یون‌ها اشغال شود؛ حتّی وقتی که فاصلهٔ الکترودها کوچک است (حدود ۱cm)، این امر به زمانی برابر ۵ میکرو ثانیه نیاز دارد. اگر فشار گاز کاهش یابد متناسب با آن، سرعت یون‌ها افزایش می‌یابد (به شرطی که شدّت میدان ثابت بماند)؛ بنابراین، زمان کم‌تری برای انجام یونیزاسیون در کاتد لازم است. گسترش یونیزاسیون نوری در کاتد به چنین زمان طولانی نیاز ندارد؛ زیرا فوتون‌های نوری با سرعت نور حرکت می‌کنند (خیلی بیشتر از سرعت یون‌ها). امّا با افزایش بیشتر فشار، اثر یونیزاسیون نوری هم کاهش می‌یابد؛ زیرا قسمت زیادی از فوتون‌های نوری توسّط مولکول‌های گاز جذب و یا در فضای اطراف پراکنده می‌شوند. یونیزاسیون نوری در حجم گاز، توسّط فوتون‌هایی با انرژی بیشتر نسبت به آن‌ها که یونیزاسیون سطحی را در کاتد موجب می‌شوند صورت می‌گیرد. از این‌رو،

به ناهمگنی بیشتری در میدان الکتریکی (که توسّط بارهای حجمی بهمن به‌وجود می‌آید) و در نتیجه به مقدار بیشتری از این بارها نیاز است. در نتیجه، نوع یونیزاسیون بیشتر در فشارهای زیادتر گاز صورت می‌گیرد.

از بحث فوق چنین بر می‌آید که در فشارهای پایین گاز، یونیزاسیون در کاتد نسبت به یونیزاسیون حجمی در گاز از اهمّیت بیشتری برخوردار است و این نوع یونیزاسیون در ولتاژهای پایین‌تری اتّفاق می‌افتد. در فشارهای متوسّط، یونیزاسیون در کاتد توسّط یون‌های مثبت به زمان نسبتاً زیادی نیاز دارد و احتمال وجود یونیزاسیون نوری در کاتد هم کم است. بنابراین، یونیزاسیون حجمی در این فشارها نقش عمده‌تری ایفا می‌کند و در فشارهای زیاد، یونیزاسیون نوری در حجم گاز دارای اهمّیت بیشتری است.

۲-۵-۵-۴- محاسبهٔ جریان تخلیهٔ الکتریکی مستقل

تعداد الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد به‌وسیلهٔ برخورد یک یون مثبت به کاتد را "ضریب یونیزاسیون دوم تانزند" می‌گویند و با γ نمایش می‌دهند. چون همهٔ یون‌های مثبت، انرژی لازم را برای آزادسازی الکترون از سطح کاتد ندارند، بنابراین، $\gamma < 1$ است. میزان انرژی کسب شده توسّط یون‌های مثبت در مقدار γ مؤثّر است و چون انرژی کسب شده توسّط یون‌های مثبت نیز مانند الکترون‌ها تابعی از شدّت میدان الکتریکی و فشار گاز است، بنابراین:

$$\gamma = f(\frac{E}{P}) \qquad (۴۸-۲)$$

علاوه بر این، γ به میزان انرژی آزادسازی الکترون از سطح فلز کاتد نیز بستگی دارد. برای فلزات مختلف، مقدار γ تغییر می‌کند. همچنین، γ به نوع گاز نیز بستگی خواهد داشت. در جدول (۲-۵) ضریب γ برای بعضی از کاتدها و گازهای مختلف ارائه شده است.

آزادسازی الکترون از سطح کاتد به‌وسیلهٔ یون‌های مثبت را "صدور ثانویه الکترون" می‌گویند و الکترون‌های آزاد شدهٔ آن را "الکترون‌های ثانویه" می‌گویند. جدول (۲-۶) نحوهٔ افزایش تصاعدی الکترون‌ها را با صدور ثانویه نشان می‌دهد.

جدول (۲-۵): ضریب دوم تانزند برای بعضی از کاتدها در گازهای مختلف

جنس کاتد	آرگون	هیدروژن	هلیوم	هوا	ازت	نئون
آلومینیوم	۰/۱۲	۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۳۵	۰/۱	۰/۰۵۲
مس	۰/۰۶	۰/۰۵	–	۰/۰۲۵	۰/۰۶۵	–
آهن	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۱۵	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۲۲

جدول (۲-۶): روند تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل و مستقل

تعداد یون‌های مثبت تولید شده	الکترون‌های رسیده به آند	خروج الکترون از سطح کاتد
$n_\circ e^{\alpha d}-n_\circ=n_\circ(e^{\alpha d}-1)$	$n_\circ e^{\alpha d}$	$n_\circ$
$n_\circ(e^{\alpha d}-1)+\gamma n_\circ(e^{\alpha d}-1)^2$	$[n_\circ+\gamma n_\circ(e^{\alpha d}-1)]e^{\alpha d}$	$n_\circ+\gamma n_\circ(e^{\alpha d}-1)$
.....	$[n_\circ+\gamma n_\circ(e^{\alpha d}-1)+\gamma^2 n_\circ(e^{\alpha d}-1)^2]e^{\alpha d}$	$n_\circ+\gamma n_\circ(e^{\alpha d}-1)+\gamma^2 n_\circ(e^{\alpha d}-1)^2$
.....	.....	.....

در نهایت، جملات ستون دوم جدول (۲-۶)، معّرف الکترون‌های رسیده به آنـد می‌باشد که:

$$n_A = n_\circ e^{\alpha d}[1+\gamma(e^{\alpha d}-1)+\gamma^2(e^{\alpha d}-1)^2+\ldots]$$

با فرض این‌که $z=\gamma(e^{\alpha d}-1)<1$ باشد آن‌گاه سری هندسی فوق همگرا می‌شود و مجموع آن قابل محاسبه است.

$$n_A = n_\circ e^{\alpha d}[1+z+z^2+z^3+\ldots] = \frac{n_\circ e^{\alpha d}}{1-z}=\frac{n_\circ e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} \qquad (۲-۴۹)$$

با ضرب کردن رابطهٔ اخیر در بار یک الکترون داریم:

$$I=\frac{I_\circ e^{\alpha d}}{1-\gamma(e^{\alpha d}-1)} \qquad (۲-۵۰)$$

اکنون ثابت می‌کنیم که شرط تخلیهٔ الکتریکی مستقل این است که مخرج کسر مساوی صفر و یا کوچک‌تر از آن باشد؛ یعنی،

$$1-\gamma(e^{\alpha d}-1)\leq 0 \qquad (۵۱-۲)$$

در این حالت، حتّی اگر عامل خارجی نیز قطع گردد، جریان الکتریکی خیلی زیاد خواهد بود که همراه با شکست الکتریکی گاز می‌شود. به منظور توجیه شرط تخلیهٔ مستقل می‌دانیم که $(e^{\alpha d}-1)$ تعداد یون‌های مثبت تولید شده در گاز توسّط یک الکترون آزاد اوّلیه $(n_0=1)$ است. در نتیجه $\gamma(e^{\alpha d}-1)$، تعداد الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد در اثر برخورد $(e^{\alpha d}-1)$ یون مثبت به آن است. حال اگر $\gamma(e^{\alpha d}-1)=1$ باشد، یعنی یون‌های مثبت تولید شده به‌وسیلهٔ یک الکترون آزاد اوّلیه می‌توانند در برخورد با سطح کاتد، همواره یک الکترون از سطح کاتد صادر کند و اگر عامل خارجی هم قطع شود و یک الکترون آزاد اوّلیه موجود نباشد، این الکترون آزاد تولید شده می‌تواند جانشین آن شود. بنابراین، بدون عامل خارجی، تخلیهٔ الکتریکی پایدار می‌ماند (یعنی حدّاقل باید $1-\gamma(e^{\alpha d}-1)=0$ باشد). اگر $\gamma(e^{\alpha d}-1)>1$ باشد یعنی در اثر یون‌های مثبت تولید شده به‌وسیلهٔ یک الکترون آزاد اوّلیه بیش از یک الکترون جدید جانشین آن می‌شود و در نتیجه، جریان تخلیهٔ الکتریکی مستقل با مقدار زیادی برقرار می‌گردد. بنابراین، در حقیقت $z=\gamma(e^{\alpha d}-1)\geq 1$ است و سری هندسی فوق همگرا نمی‌شود و مجموع آن رو به بی‌نهایت می‌گذارد. از این‌رو، رابطهٔ (۲-۵۰) صادق نیست و یک جریان بی‌نهایت از گاز عبور می‌کند که منجر به شکست کامل گاز توأم با جرقّه می‌شود.

علاوه بر یون‌های مثبت، مولکول‌های تحریک شدهٔ گاز نیز می‌توانند هنگام بازگشت به حالت عادی خود، فوتون‌های نورانی تابش نمایند که این فوتون‌ها در برخورد با سطح کاتد می‌توانند موجب صدور الکترون آزاد از سطح کاتد شوند و فتویونیزاسیون در داخل حجم گاز نیز می‌تواند موجب افزایش تعداد ذرّات باردار داخل بهمن الکترونی شود؛ تأثیر همهٔ عوامل فوق را در همان ضریب γ منظور می‌کنند.

۲-۵-۵-۵- ولتاژ شکست گاز در میدان‌های الکتریکی یکنواخت (قانون پاشن)

شرط لازم را برای شروع تخلیهٔ الکتریکی مستقل توأم با شکست کامل گاز به‌صورت $\gamma(e^{\alpha d}-1)=1$ بیان نمودیم. در این رابطه، $\alpha=P.f_1(E/P)$ و $\gamma=f_2(E/P)$ است. حال در یک میدان الکتریکی یکنواخت با ولتاژ V و فاصلهٔ بین الکترودها برابر d شدّت میدان الکتریکی برابراست با:

$$E = \frac{V}{d} \qquad (۵۲-۲)$$

بنابراین، خواهیم داشت:

$$f_2\left(\frac{V}{P.d}\right)\left[e^{P.d\, f_1\left(\frac{V}{P.d}\right)} - 1\right] = 1 \qquad (۵۳-۲)$$

برای فشار معیّن P در گاز و فاصلهٔ ثابت d بین الکترودها، در یک حدّاقل ولتاژ معیّنی مانند V_b، شرط فوق برقرار می‌گردد که به آن "ولتاژ شکست گاز" یا "ولتاژ جرقّهٔ گاز" می‌گوییم. از رابطهٔ فوق نتیجه می‌گیریم که ولتاژ شکست گاز، تابعی از حاصل‌ضرب $P.d$ است؛ یعنی:

$$V_b = f(P.d) \qquad (۵۴-۲)$$

این بدین معنی است که برای دو میدان الکتریکی که در یکی از آن‌ها فاصلهٔ d بزرگ ولی فشار P کم باشد و برای دیگری بر عکس، فاصلهٔ d کوچک و فشار P زیاد باشد (به‌طوری که حاصل‌ضرب ثابت$=P.d$ باشد)، ولتاژ شکست در هر دو یکسان خواهد بود. این میدان‌ها را "میدان‌های مشابه" می‌گویند.

تابعّیت ولتاژ شکست از حاصل‌ضرب $P.d$ اوّلین بار به‌وسیلهٔ آقای پاشن به طریق تجربی و با آزمایش‌های متعدد، قبل از ارائه نظریهٔ تانزند ثابت گردید. از این‌رو، این قانون به‌نام "قانون پاشن"[1] معروف گردیده است. حال بر اساس شرایط شکست گاز در نظریهٔ تانزند، ولتاژ شکست گازها را محاسبه می‌کنیم. بدین منظور داریم:

1- Paschen

$$\gamma(e^{\alpha d} - ۱) = ۱$$

با تقسیم طرفین رابطهٔ اخیر بر γ و با انتقال (۱-) به سمت راست معادله و انتگرال‌گیری از طرفین داریم:

$$\alpha.d = \ln(۱ + \frac{۱}{\gamma})$$

قبلاً ضریب یونیزاسیون اوّل تانزند را به‌صورت $\alpha = APe^{-BP/E}$ محاسبه کردیم. در میدان‌های یکنواخت $E=V/d$ است که برای محاسبهٔ ولتاژ شکست به جای V، ولتاژ شکست V_b را جایگزین می‌کنیم. در نتیجه، با جایگذاری α و E در معادلهٔ اخیر، خواهیم داشت:

$$APde^{-BPd/V_b} = \ln(۱ + \frac{۱}{\gamma})$$

در این رابطه، γ مقدار کوچکی است؛ بنابراین، تغییرات $\ln(۱ + \frac{۱}{\gamma})$ در مقایسه با تغییرات α بسیار کوچک است. در نتیجه، علی‌رغم این‌که $\gamma = f_۲(E/P)$ است، می‌توان مقدار $\ln(۱+\frac{۱}{\gamma})$ را برای جنس معیّنی از کاتد به مقدار تقریباً ثابتی در نظر گرفت. با لگاریتم گرفتن از دو طرف رابطهٔ اخیر داریم:

$$\ln(AP.d) - \frac{BP.d}{V_b} = \ln[\ln(۱ + \frac{۱}{\gamma})]$$

$$\frac{BP.d}{V_b} = \ln\left[\frac{AP.d}{\ln[۱+\frac{۱}{\gamma}]}\right]$$

پس ولتاژ شکست گاز در میدان‌های یکنواخت برابر است با:

$$V_b = \frac{B\ P.d}{\ln\left[\frac{AP.d}{\ln(۱+\frac{۱}{\gamma})}\right]} \qquad (۵۵-۲)$$

رابطهٔ اخیر، ولتاژ شکست را به‌صورت تابعی از حاصل ضرب فشار در فاصلهٔ الکترودها بیان می‌کند. ضریب γ در رابطهٔ اخیر با بررسی‌های نظریه به‌راحتّی قابل محاسبه نیست. علاوه بر این، مقدار آن به فشار، حرارت، شدّت میدان، و حتّی در

فشارهای کم به جنس کاتد نیز، بستگی دارد. به‌همین علّت، این ضریب را به‌طور تجربی به‌دست می‌آورند. برای هوا و در فشار کم، مقدار γ در حدود (۰/۰۲ - ۰/۰۲۵) می‌باشد. اگر این معادله را روی محورهای مختصات و بر حسب $P.d$ رسم کنیم، منحنی ولتاژ شکست گاز بر حسب $P.d$ مطابق شکل (۲-۱۷) برای هر گازی و برای جنس معیّن کاتد به‌دست می‌آید. به این منحنی، به‌اصطلاح، "منحنی پاشن" می‌گویند.

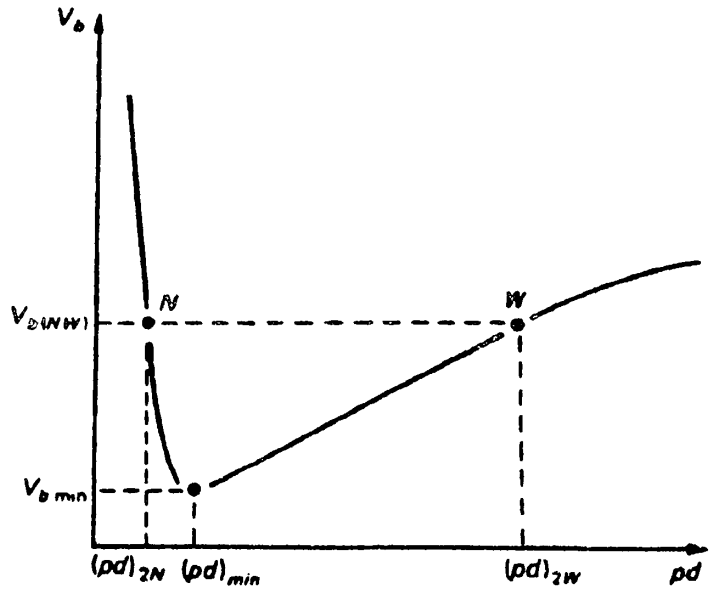
مثلاً برای گاز هوا با کاتد از جنس مس داریم:

$$A = ۱۴/۶ \frac{۱}{\text{cm.mmHg}} \quad ، \quad B = ۳۶۵ \frac{\text{Volt}}{\text{cm.mmHg}} \quad ، \quad \gamma = ۰/۰۲۵$$

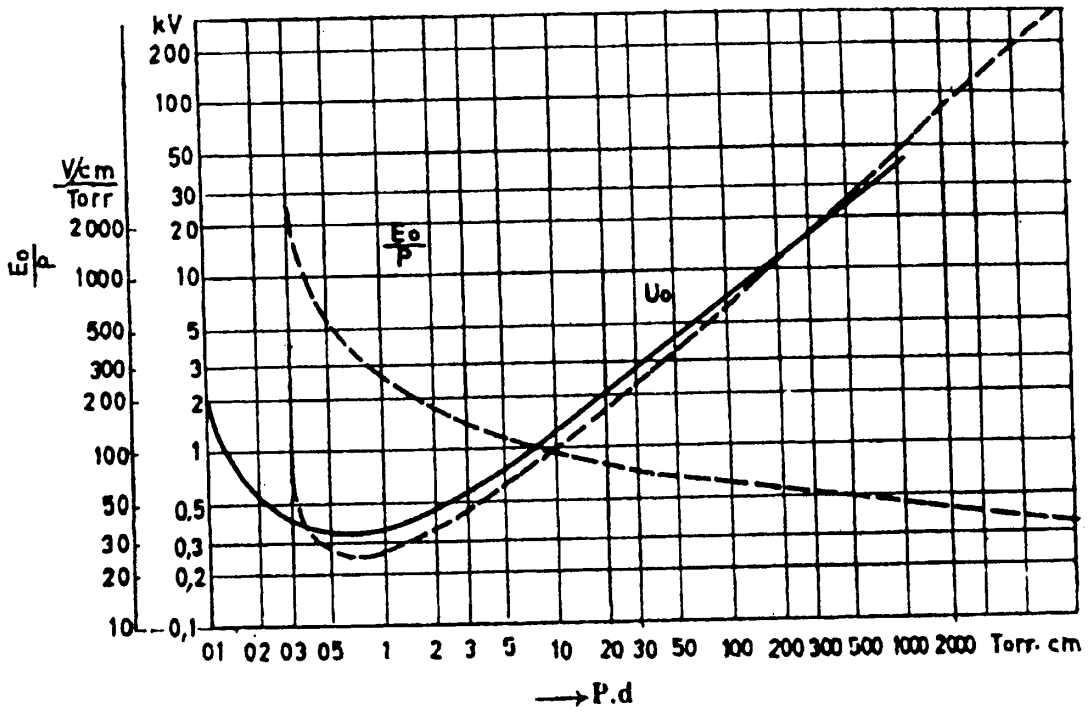
از شکل (۲-۱۸) در می‌یابیم که حدّاقل ولتاژ شکست هوا در $P.d = ۰/۵۷\text{cm.mmHg}$ و در ولتاژ $۰/۳۲۵\text{kV}$ اتّفاق می‌افتد.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نیز بسیار نزدیک به مقادیر به‌دست آمده از فرمول حاصل شده می‌باشند که صحت آن را تأیید می‌کنند.

برای تعیین نقطهٔ حدّاقل منحنی ارائه شده در شکل (۲-۱۷)، از رابطهٔ (۲-۵۵) نسبت به $P.d$ مشتق می‌گیریم و آن را برابر صفر قرار می‌دهیم.



شکل (۲-۱۷): رابطهٔ بین V_b - $P.d$ (منحنی پاشن)



شکل (۲-۱۸): منحنی پاشن برای گاز همگن هوا (تئوریک ---- تجربی ——)

$$\frac{dV_b}{d(Pd)} = ۰$$

$$\frac{B \ln\left[\dfrac{APd}{\ln(۱+\frac{۱}{\gamma})}\right] - \dfrac{BPd}{Pd}}{\left[\ln\left(\dfrac{APd}{\ln(۱+\frac{۱}{\gamma})}\right)\right]^{۲}} = ۰$$

با ساده‌سازی خواهیم داشت:

$$\ln\left[\frac{APd}{\ln(۱+\frac{۱}{\gamma})}\right] = ۱$$

$$\frac{APd}{\ln(۱+\frac{۱}{\gamma})} = e$$

$$(Pd)_{min} = \frac{e\ln(۱+\frac{۱}{\gamma})}{A} \qquad (۵۶-۲)$$

در نتیجه،

$$V_{bmin} = \frac{\frac{B\,e\,\ln(1+\frac{1}{\gamma})}{A}}{\ln\left[\frac{e\,\ln(1+\frac{1}{\gamma})}{\ln(1+\frac{1}{\gamma})}\right]} = \frac{Be\ln(1+\frac{1}{\gamma})}{A\ln e} = \frac{Be\ln(1+\frac{1}{\gamma})}{A}$$

به‌عبارت دیگر، حدّاقل ولتاژ شکست به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{bmin} = B\,.\,(P.d)_{min} \qquad (۵۷-۲)$$

لازم به‌ذکر است که هر چه فشار گاز بالاتر رود، جنس الکترودها اهمّیت بیشتری پیدا می‌کند. همچنان که از شکل (۲-۱۷) ملاحظه می‌شود، گازها در P.dهای خیلی کم و Pdهای خیلی زیاد، از استقامت الکتریکی بالایی برخوردارند و در یک P.d معیّن، کم‌ترین استقامت الکتریکی را دارند.

۲-۵-۵-۵-۱- وضعیت $(P.d)_{min} > (P.d)$

با کم شدن فشار بیش از حد و یا کم شدن فاصلهٔ بین الکترودها، ولتاژ شکست گاز افزایش می‌یابد؛ زیرا با کم شدن فشار گاز، فاصلهٔ آزاد الکترون‌ها (به دلیل کم شدن چگالی مولکول‌ها) زیاد می‌شود و در نتیجه، تعداد برخوردهای الکترون با مولکول‌های گاز کاهش می‌یابد. همچنین ممکن است در فاصلهٔ کم الکترودها از همدیگر، تعدادی از الکترون‌ها فاصلهٔ بین دو الکترود را بدون برخورد طی نمایند. از این‌رو، نیاز به میدان قوی و در نتیجه ولتاژ بالایی برای شکست گاز می‌باشد تا تمام الکترون‌های آزاد انرژی لازم را برای یونیزاسیون در تمام برخوردها داشته باشند و بتوانند پدیدهٔ تخلیهٔ الکتریکی مستقل گاز را به‌وجود آورند و گاز دچار شکست کامل شود. از همین خاصیت در تکنولوژی ساخت کلیدهای خلاء فشار قوی استفاده می‌شود. در این نوع کلیدها، هنگام قطع کلید و باز شدن کنتاکت‌ها از همدیگر، هوا با فشار خیلی کم (خلاء نسبی)، وارد محفظه بین کنتاکت‌ها می‌شود و قدرت عایقی لازم را بین دو کنتاکت در موقع باز بودن کلید فراهم می‌کند.

۲-۵-۵-۵-۲- وضعیت $(P.d)_{min} < (P.d)$

با زیاد شدن فشار گاز، با فرض ثابت بودن فاصلهٔ بین الکترودها، ولتاژ شکست

افزایش می‌یابد؛ زیرا با زیاد شدن فشار گاز، فاصلهٔ آزاد الکترون‌ها (به دلیل متراکم شدن مولکول‌های گاز)، به‌شدّت کاهش یافته و الکترون‌ها برای این‌که بتوانند با طی این فاصلهٔ آزاد کوچک، انرژی لازم را برای یونیزاسیون گاز به‌دست آورند، باید در یک میدان الکتریکی خیلی قوی قرار بگیرند. بنابراین، ولتاژ شکست گاز افزایش می‌یابد. البتّه اگر فشار گاز ثابت باشد، با زیاد شدن فاصلهٔ الکترودها ولتاژ شکست به همان نسبت به‌صورت خطّی (حتّی در میدان یکنواخت $E=V/d$)افزایش نمی‌یابد و با افزایش فاصلهٔ d، شدّت میدان الکتریکی لازم برای شکست گاز به‌دلیل بزرگ‌تر شدن بهمن الکترونی و افزایش حجم یونیزاسیون، کاهش می‌یابد. از این خاصیت گازها در ساختن کلیدهای فشار قوی، مانند کلیدهای هوای فشرده یا کلیدهای گازی با گاز SF6 در فشار بالا، استفاده می‌شود. همچنین در عایق‌بندی خازن‌ها می‌توان از گاز با فشار زیاد سود برد.

۲-۵-۵-۳- وضعیت $(P.d)_{min} = (P.d)$

در حوالی $P.d$های نزدیک به $(P.d)_{min}$ فاصلهٔ آزاد الکترون‌ها به حدّی است که با یک میدان الکتریکی نسبتاً پایین، انرژی لازم برای یونیزاسیون مولکول‌های گاز توسّط الکترون‌ها کسب می‌شود و چگالی مولکول‌ها نیز به حدّی است که تعداد برخوردهای منجر به یونیزاسیون زیاد بوده، بنابراین، در ولتاژ نسبتاً کوچک، شکست کامل گاز (تخلیهٔ الکتریکی مستقل)، حاصل می‌شود. از این خاصیت گازها در ساختن لامپ‌های گازی استفاده می‌شود؛ زیرا در لامپ‌های گازی، ولتاژ فشار ضعیف باید بتواند لامپ را راه‌اندازی، و تخلیهٔ الکتریکی را در گاز برقرار کند. همچنین از این خاصیت در برقگیرها نیز می‌توان استفاده نمود[۱]. ولتاژ شکست کم

۱- برقگیر وسیله‌ای است که برای حفاظت دستگاه‌های الکتریکی نظیر ترانسفورماتورها و ژنراتورها در برابر اضافه ولتاژهای ناگهانی و زودگذر امواج سیّار ناشی از صاعقه یا سویچینگ استفاده می‌شود و قبل از دستگاه نصب می‌شود. بین هر یک از فازها و زمین یک برقگیر نصب می‌شود تا وقتی اضافه ولتاژ یا موج سیّار روی خط می‌خواهد وارد ترانسفورماتور شود، از ورود آن به ترانسفورماتور جلوگیری کند. در شرایط عادی، برقگیر باید مقاومت بسیار بالایی داشته باشد و در حقیقت، عایق باشد تا هیچ جریانی را به ←

گازها در ناحیهٔ حدّاقل منحنی پاشن، در تخلیهٔ الکتریکی درونی عایق‌های جامد (که احتمالاً حاوی حفره‌های کوچک گازی هستند) نیز، مهم است (خلل و فرج‌های به‌وجود آمده هنگام ساخت عایق). در صورتی‌که پیری این عایق در حوالی نقطهٔ حدّاقل باشد، هنگام اعمال ولتاژهای قوی به عایق جامد، ممکن است ولتاژ دو سر حفرهٔ گازی به حدّ نزدیک $V_{b\ min}$ رسیده، موجب تخلیهٔ الکتریکی و شکست موضعی در داخل عایق جامد شود و در نهایت، شکست داخلی عایق جامد را به‌وجود آورد.

۲-۵-۵-۵-۴- حوزهٔ صحّت قانون پاشن

قانون پاشن در محدودهٔ فشارهای خیلی زیاد و فاصله‌های خیلی زیاد بین الکترودها صادق نخواهد بود. برای هر گازی تا یک محدوده‌ای از Pd، این قانون معتبر است که علّت این موضوع، مؤثّر واقع شدن ناصافی سطح قطب‌ها، صدور سرد الکترون از قطب‌ها و اثر میدان الکتریکی ناشی از بارهای الکتریکی موجود در بهمن الکترونی روی میدان الکتریکی بین قطب‌هاست.

۲-۵-۶- ولتاژ شکست گازهای الکترونگاتیو

اتم‌ها و مولکول‌های بعضی از گازها خاصیت الکترون‌پذیری دارند و پس از کسب الکترون آزاد، تبدیل به یون منفی می‌شوند. اتم این گازها در مدار آخر خود، یک الکترون کم دارند و تمایل آن‌ها به دریافت الکترون به همین دلیل است. یون‌های منفی به‌علّت جرم زیاد، تحرّک و سرعت کم‌تری دارند. به‌دلیل داشتن میانگین فاصلهٔ آزاد کوتاهتر (در سرعت‌های بالا، میانگین فاصلهٔ آزاد آن‌ها، $\frac{1}{4}$ الکترون‌هاست) در یونیزاسیون نقشی را ایفا نمی‌کنند و مانند این است که آن الکترون از دست رفته باشد. بنابراین، امکان یونیزاسیون در گاز کم‌تر شده، موجب افزایش استقامت عایقی این دسته گازها می‌شود و ولتاژ شکست الکتریکی آن‌ها

زمین عبور ندهد؛ ولی وقتی یک موج با ولتاژ بالا به آن می‌رسد باید مقاومت آن کاهش یابد و اجازهٔ عبور جریان را به زمین بدهد؛ یعنی در حقیقت، قدرت عایقی آن شکسته شده، عایق، تبدیل به هادی شود تا اجازه دهد اضافه ولتاژ به‌وجود آمده سریعاًبه زمین تخلیه گردد و به ترانسفورماتور وارد نشود.

نسبت به سایر گازها مقدار بیشتری خواهد بود. گاز SF6 مهم‌ترین گاز الکترونگاتیو است و در صنعت برق مصارف زیادی به‌عنوان عایق گازی دارد.

مشابه ضریب α، ضریب جذب الکترون در واحد طول را تعریف می‌کنیم که با η نمایش می‌دهند. مقدار این ضریب، برابر است با تعداد برخوردهای یک الکترون در واحد طول که منجر به جذب اتم خنثی می‌شود. برای این ضریب، مشابه ضریب α می‌توان نوشت:

$$\frac{\eta}{P} = f(\frac{E}{P}) \qquad (۵۸-۲)$$

$$\eta = P\, f(\frac{E}{P})$$

برای $n_\circ$ الکترون آزاد اوّلیه صادر شده از سطح کاتد، چنانچه تعداد الکترون‌های آزاد در فاصلهٔ x از کاتد برابر dx باشد، در آن‌صورت، در فاصلهٔ dx (نوار باریک به عرض dx در فاصلهٔ x از کاتد)، تعداد الکترون‌های اضافه شده در اثر یونیزاسیون برابراست با:

$$dn_i = n\,\alpha \cdot dx$$

همچنین تعدادالکترون‌های از دست رفته در اثر اتّصال به مولکول‌های گاز در همین فاصله برابر است با:

$$dn_l = n\,\eta \cdot dx$$

بنابراین، تعداد کلّ افزایش الکترون‌های آزاد در فاصلهٔ dx برابراست با:

$$dn = dn_i - dn_l = n(\alpha - \eta)dx$$

$$\frac{dn}{n} = (\alpha - \eta)dx$$

$$\int_{n_\circ}^{n} \frac{dn}{n} = \int_{\circ}^{x} (\alpha - \eta)dx$$

$$n = n_\circ e^{(\alpha - \eta)x} \qquad (۵۹-۲)$$

در نتیجه، تعداد الکترون‌های آزاد رسیده به آند برابر $n_A = n_\circ . e^{(\alpha-\eta)d}$ و جریان یونیزاسیون در تخلیهٔ الکتریکی غیرمستقل ناشی از الکترون‌های آزاد، برابر $I_A = I_\circ . e^{(\alpha-\eta)d}$ خواهد بود. مقدار $(\alpha-\eta)$ را "ضریب یونیزاسیون مؤثّر گاز"

می‌نامند. اگر $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ باشد، آن‌گاه،

$$I = I_{\circ} e^{\bar{\alpha} d} \qquad (۶۰-۲)$$

چون در محاسبهٔ جریان، علاوه بر الکترون، باید یون‌های منفی را نیز در نظر بگیریم، آن‌گاه افزایش یون‌های منفی در فاصلهٔ dx برابر است با،

$$dn = \eta\, n \cdot dx = \eta n_{\circ} e^{(\alpha - \eta)x} dx$$

$$n_{-} = \frac{\eta n_{\circ}}{(\alpha - \eta)} \left[e^{(\alpha - \eta) d} - ۱ \right]$$

در نتیجه، تعداد کلّ بارها برابر خواهد بود با:

$$n = n_A + n_{-} = n_{\circ} \left[\frac{\alpha}{(\alpha - \eta)} e^{(\alpha - \eta) d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right] \qquad (۶۱-۲)$$

همچنین شرط شکست الکتریکی را در این گاز برای میدان یکنواخت می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\gamma \left(e^{\bar{\alpha} d} - ۱ \right) \geq ۱ \qquad (۶۲-۲)$$

در نتیجه،

$$\bar{\alpha} d \geq \ln \left(۱ + \frac{۱}{\gamma} \right)$$

$$(\alpha - \eta) \geq \ln \left(۱ + \frac{۱}{\gamma} \right) \qquad (۶۳-۲)$$

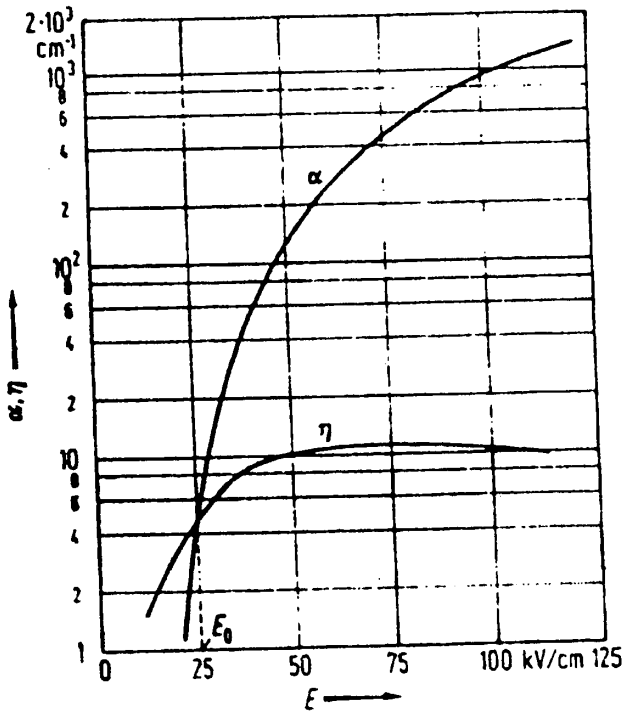
از طرفی داشتیم که:

$$\frac{\alpha}{P} = f_{۱}\left(\frac{E}{P}\right) \quad , \quad \frac{\eta}{P} = f_{۲}\left(\frac{E}{P}\right)$$

در نتیجه،

$$\frac{\alpha - \eta}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right) \qquad (۶۴-۲)$$

در حالت کلّی، نحوهٔ تغییرات α/P و η/P بر حسب E/P را می‌توان در شکل (۲-۱۹) مشاهده نمود. معمولاً برای مقادیر E/P خیلی کوچک، $\eta > \alpha$ است و در نتیجه، $(\alpha - \eta) < \circ$ می‌شود و بنابراین، شرط رابطهٔ (۲-۶۳) نمی‌تواند برقرار شود؛ یعنی، در این گازها برای مقادیر E/P کوچک‌تر از یک مقدار بحرانی معیّن، شکست



شکل (۲-۱۹): منحنی α/P و η/P بر حسب E/P در حالت کلّی

الکتریکی گاز اصلاً به‌وجود نمی‌آید و در نتیجه، تخلیهٔ الکتریکی مستقل نخواهیم داشت. مقدار E/P بحرانی، محل تلاقی منحنی‌های α/P و η/P است و این نقطه را اصطلاحاً نقطهٔ شروع یونیزاسیون مؤثّر گاز می‌نامند؛ زیرا از این نقطه به بعد، امکان یونیزاسیون در گاز فراهم می‌آید.

گاز هوا نیز به‌علّت وجود اکسیژن در آن، یک گاز الکترونگاتیو است و تخلیهٔ الکتریکی مستقل، زمانی در آن اتّفاق می‌افتد که،

$$\frac{E}{P} > ۲۴/۳۶ \text{ kV/(bar.cm)}$$

که ۱/۰۱۳bar=۷۶۰mmHg است. برای گاز SF6 هنگامی تخلیهٔ الکتریکی مستقل ایجاد می‌شود که،

$$\frac{E}{P} > ۸۷/۷ \text{ kV/(bar.cm)}$$

تذکّر: ضریب η را برای گازهای معمولی نیز به‌عنوان ترکیب مجدّد بین الکترون و یون مثبت می‌توان در نظرگرفت. بنابراین، $\bar{\alpha}=\alpha-\eta$ برای تمام گازها معتبراست.

۲-۵-۶-۱- محاسبهٔ ولتاژ شکست هوا

برای گاز هوا رابطهٔ تجربی زیر به‌نام "رابطهٔ شومن"[۱] در محدودهٔ $۲۴/۴\text{kV/(bar.cm)} \le E/P \le ۶۰\text{kV/(bar.cm)}$ صادق است:

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = \frac{\alpha - \eta}{P} = C\left[\left(\frac{E}{P}\right) - \left(\frac{E}{P}\right)_c\right]^۲ \qquad (۶۵-۲)$$

در این رابطه، C یک ثابت به‌مقدار $C=۰/۲۲\text{bar.cm/kV}$ و $(E/P)_c$ که نقطهٔ شروع یونیزاسیون مؤثّر گاز است، برابر $(E/P)_c=۲۴/۳۶\text{kV/(bar.cm)}$ است (برای فشار $P_c=۱\text{bar}$ و $t=۲۰^\circ\text{C}$، شدّت میدان مربوط به شروع یونیزاسیون مؤثّر گاز هوا $E_c=۲۴/۳۶\text{kV/cm}$ می‌باشد). از شرط شکست گازها داشتیم،

$$\bar{\alpha} d = \ln\left(۱ + \frac{۱}{\gamma}\right)$$

با تقسیم طرفین رابطهٔ اخیر بر ضریب $P.d$ خواهیم داشت:

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = \frac{۱}{P.d}\ln\left(۱ + \frac{۱}{\gamma}\right)$$

در صورتی‌که به‌جای $\bar{\alpha}/P$ از رابطهٔ تجربی (۲-۶۲) استفاده کنیم، می‌توان نوشت:

$$C\left[\left(\frac{E}{P}\right) - \left(\frac{E}{P}\right)_c\right]^۲ = \frac{۱}{P.d}\left[\ln\left(۱ + \frac{۱}{\gamma}\right)\right]$$

اکنون با فرض $\ln(۱+۱/\gamma)=K$ خواهیم داشت:

$$\frac{K/C}{Pd} = \left[\left(\frac{E}{P}\right) - \left(\frac{E}{P}\right)_c\right]^۲$$

$$\sqrt{\frac{K/C}{P.d}} = \frac{E}{P} - \left(\frac{E}{P}\right)_c$$

$$\left(\frac{E}{P}\right) = \left(\frac{E}{P}\right)_c + \sqrt{\frac{K/C}{P.d}}$$

طرفین رابطهٔ اخیر را در $P.d$ ضرب می‌کنیم؛ در نتیجه،

1- Schumann

$$E.d = \left(\frac{E}{P}\right)_C P.d + \sqrt{\frac{K}{C}}\ \sqrt{P.d}$$

سمت چپ رابطهٔ اخیر، همان ولتاژ شکست گاز در میدان یکنواخت است. بنابراین، داریم:

$$V_b = \left(\frac{E}{P}\right)_C P.d + \sqrt{\frac{K}{C}}\ \sqrt{P.d} \qquad (۶۶-۲)$$

در فشار P_c=۱bar و t=۲۰°C، E_c برابر E_c=۲۴/۳۶kV/cm است و با فرض استفاده از الکترودهای مسی، (K/C)=۴۵/۱۶(kV)^۲/cm می‌باشد. بنابراین،

$$V_b = ۲۴/۳۶ \times P.d + ۶/۷۲ \times \sqrt{P.d} \qquad (۶۷-۲)$$

در این رابطه، P بر حسب bar و d بر حسب cm است.

حال اگر P=۱bar و d=۱cm باشد، آنگاه E_b≅۳۱kV/cm خواهد بود. برای شدّت میدان شکست در هوا می‌توان نوشت:

$$E_b = ۲۴/۳۶ + \sqrt{\frac{۴۵}{d}}\ \text{kV/cm} \qquad (۶۸-۲)$$

رابطهٔ اخیر در محدودهٔ ۰/۰۱bar.cm تا ۵۰۰bar.cm با نتایج آزمایش‌ها مطابقت دارد.

به‌منظور در نظر گرفتن اثر درجه حرارت، می‌توان به‌جای فشار گاز از چگالی نسبی مولکولی گاز δ استفاده کرد. اگر P فشار گاز بر حسب mmHg و t دمای گاز بر حسب °C باشد، آنگاه،

$$\delta = \frac{P}{۷۶۰}\ \frac{۲۹۳}{۲۷۳ + t} \qquad (۶۹-۲)$$

و اگر P بر حسب bar و t بر حسب °C باشد، آنگاه،

$$\delta = \frac{P}{۱/۰۱۳}\ \frac{۲۹۳}{۲۷۳ + t} \qquad (۷۰-۲)$$

در این شرایط، تعداد برخوردهای یک الکترون در طول مسیر d با مولکول‌های گاز متناسب با δd است. با تقریب نسبتاً خوبی با داشتن ولتاژ شکست گاز در شرایط استاندارد (P=۷۶۰mmHg و t=۲۰°C و δ=۱)، می‌توان برای شرایط دیگر با دانستن δ مقدار V_b را به‌دست آورد؛ که،

$$V_{b(\delta)} = \delta\, V_{b\,(\delta=۱)} \qquad (۷۱-۲)$$

و یا،

$$E_{b(\delta)} = \delta\, E_{b\,(\delta=۱)} \qquad (۷۲-۲)$$

تذکّر: فقط اگر مقدار δ به عدد یک نزدیک باشد (مثلاً δ=۰/۹۵ یا δ=۱/۰۵)، رابطهٔ خطّی تقریبی فوق، صادق است. برای توضیح بیشتر در مورد پارامتر δ به فصل هفتم، بخش (۷-۳)، رابطهٔ (۷-۸) مراجعه کنید.

۲-۵-۶-۲- محاسبهٔ ولتاژ شکست گاز SF6

برای گاز SF6 در محدودهٔ ۸۷/۷kV/(bar.cm)≤E/P≤۱۲۰kV/(bar.cm) رابطهٔ تجربی زیر صادق است:

$$\frac{\bar{\alpha}}{P} = C\left[\left(\frac{E}{P}\right) - \left(\frac{E}{P}\right)_C\right] \qquad (۷۳-۲)$$

در این رابطه، C=۲۸(bar.cm)/kV و $(E/P)_C$=۸۷/۷kV/(bar.cm) است.

با ترکیب معادلهٔ فوق، با شرط شکست گازها [$\bar{\alpha}.d = \ln(۱+۱/\gamma)=K$] و K=۱۸ در میدان یکنواخت خواهیم داشت:

$$V_b = ۰/۶۵ + ۸۸/۵\,(P.d) \quad \text{kV} \qquad (۷۴-۲)$$

$$E_b = ۸۸/۵\,P + \frac{۰/۶۵}{d} \quad \text{kV/cm} \qquad (۷۵-۲)$$

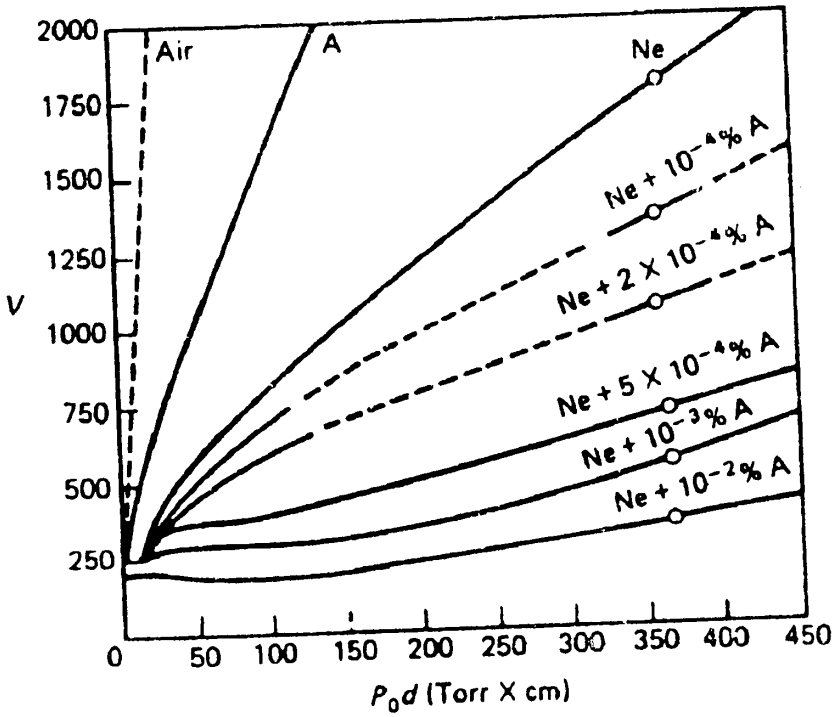
این رابطه برای محدودهٔ ولتاژ ۱kV<V_b<۲۵۰kV و برای محدودهٔ ۰/۰۴bar.cm≤$P.d$≤۳bar.cm صادق خواهد بود. در مقادیر بالاتر $P.d$، ولتاژ شکست V_b، با رابطهٔ تجربی زیر تعیین می‌شود:

$$V_b = ۴۰ + ۶۸\,(Pd) \quad \text{kV} \qquad (۷۶-۲)$$

لازم به ذکر است که گاز بی‌رنگ، بی‌بو، غیر سمّی و غیر قابل اشتعال SF6 کاملاً بی‌اثر است و باعث خوردگی نمی‌شود. همچنین قدرت انتقال حرارت این گاز در فشارهای مساوی، ۲ تا ۲/۵ برابر هواست.

۲-۵-۷- ولتاژ شکست در گازهای مخلوط (اثر پنینگ[۱])

قانون پاشن در مخلوط بعضی از گازها صادق نیست. به‌عنوان مثالِ شاخصی از این نوع گازهای مخلوط، می‌توان به مخلوط گازهای نئون و آرگون اشاره کرد. با اضافه کردن مختصری گاز آرگون به گاز نئون، ولتاژ شکست گاز مخلوط از ولتاژ شکست هر یک از گازها به تنهایی کم‌تر است و هر چه درصد آرگون اضافه شده بیشتر شود، ولتاژ شکست گاز مخلوط کم‌تر می‌شود؛ به‌طوری که با اضافه کردن ۰/۰۱٪ گاز آرگون به نئون، ولتاژ شکست با تغییر فشار گاز چندان تغییر نمی‌کند. این موضوع در شکل (۲-۲۰) نشان داده شده است. از این خاصیت در لامپ‌های نئون استفاده می‌شود. در این لامپ‌ها، تغییر فشار داخلی لامپ در خطّ تولید باعث تغییر شدید ولتاژ شکست گاز نمی‌شود. علّت این امر مربوط به اهمّیت یافتن یونیزاسیون



شکل (۲-۲۰): منحنی ولتاژ شکست در مخلوط نئون-آرگون در فاصلهٔ هوایی ۲cm در ۰°C (اثر پنینگ)

1- Penning

مرحله‌ای در مخلوط دو گاز است.

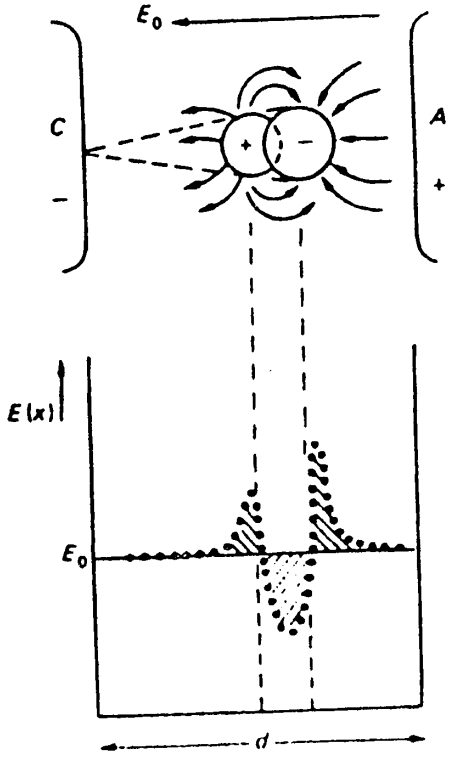
در مخلوط دو گاز، ممکن است انرژی لازم برای یونیزاسیون مولکول یا اتم گاز اوّل از انرژی لازم برای تحریک مولکول‌ها یا اتم‌های گاز دوم کم‌تر باشد. در این حالت، یونیزاسیون‌های بیشتری می‌تواند در اثر برخورد مولکول‌ها یا اتم‌های تحریک شدهٔ گاز دوم با مولکول یا اتم گاز اوّل صورت گیرد. مثلاً انرژی تحریک اوّل اتم گاز متااستیبل نئون به مقدار ۱۶eV می‌باشد؛ ولی انرژی یونیزاسیون اتم گاز آرگون ۱۵/۱eV است. بنابراین، اگر اتم تحریک شدهٔ گاز نئون به اتم گاز آرگون برخورد کند، اتم گاز آرگون یونیزه می‌شود.

۲-۵-۸- نظریهٔ استریمر[۱]

رشد عامل‌های بار در یک بهمن الکترونی، در میدانی یکنواخت $(E=V/d)$ با $e^{\alpha d}$ توصیف شده است. این موضوع تا وقتی معتبر است که بتوان از میدان‌های الکتریکی مربوط به بارهای فضای الکترون‌ها و یون‌ها در مقایسه با میدان خارجی E صرف نظر کرد. نظریهٔ تانزند بر مبنای انتشار الکترون‌های ثانویه از کاتد بر اثر بمباران آن توسّط یون‌های مثبت استوار است و مشاهده کردیم که به علّت تحرّک کم یون‌ها، این امر به زمانی حدود چند میکرو ثانیه نیاز دارد. لیکن در عمل و به ویژه در فشارهای بالاتر گاز، شکست الکتریکی بسیار سریع‌تر رخ می‌دهد. از طرفی در نظریهٔ تانزند، افزایش جریان و تخلیهٔ الکتریکی به شکل الکترودها مربوط نمی‌شود. همچنین در حالی که نظریهٔ تانزند شکل منظّم و گسترده‌ای را برای تخلیهٔ الکتریکی ارائه می‌کند، در عمل این پدیده به‌صورت کانال‌های باریک و نامنظّم جرقّه مشاهده می‌شود. بنابراین، نظریهٔ تانزند از توجیه این مشاهدات باز می‌ماند. بنابراین، نظریهٔ استریمر برای توجیه شکست گازها در این حالات ارائه گردیده است که به‌صورت‌های مختلفی توسّط دانشمندانی مانند آقایان لوب[۲] میک[۳]، و رائدر[۴] ارائه شده است. در نظریه‌های استریمر، تخلیهٔ الکتریکی مستقیماً به‌وسیلهٔ یک بهمن الکترونی و فتویونیزاسیون داخل گاز توجیه می‌شود. بنابراین، تخلیهٔ الکتریکی بدون

1- *Streamer*
2- *Loeb*
3- *Meek*
4- *Raether*

نیاز به انتشار ثانویهٔ الکترون‌ها از کاتد و تنها از طریق تشدید یونیزاسیون حجمی در جلو بهمن الکترونی صورت می‌گیرد؛ امّا این فرآیند نیاز به میدان الکتریکی شدیدی دارد که با توجّه به فرض یکنواختی میدان الکتریکی در فاصلهٔ بین الکترودها باید به توجیه آن پرداخت. بر اساس نظریهٔ استریمر وقتی‌که تعداد الکترون‌های آزاد داخل یک بهمن الکترونی تشکیل شده در داخل گاز، به حدود 10^{+8} یا بیشتر می‌رسد، خودِ بهمن الکترونی، ایجاد یک میدان الکتریکی بسیار قوی می‌کند که آن موجب تشویش در میدان خارجی اعمال شده به گاز (بین الکترودها) می‌شود. در جلو بهمن الکترونی، میدان اصلی با میدان حاصل از الکترون‌ها طبق شکل (۲-۲۱) هم جهت است. بنابراین، میدان منتجه تقویت می‌شود. کمی عقب‌تر در وسط بهمن میدان الکتریکی، بین الکترون‌ها و یون‌های بهمن الکترونی در خلاف جهت میدان اصلی است و میدان منتجه تضعیف می‌شود. در قسمت پشت بهمن، باز میدان حاصل از یون‌های بهمن با میدان اصلی هم جهت است و سبب تقویت میدان منتجه می‌شود؛ امّا به دلیل



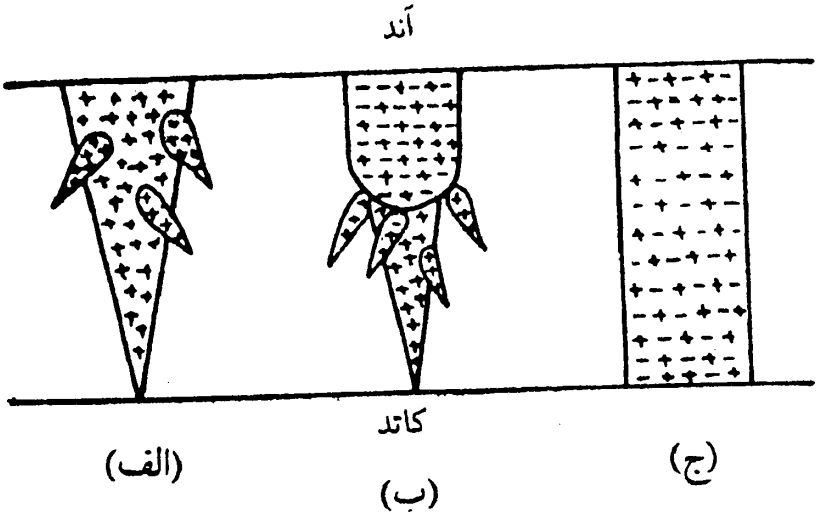
شکل (۲-۲۱): نموداری از اغتشاش میدان در یک فاصلهٔ هوایی به سبب بار فضای بهمن الکترونی

پراکندگی بیشتر یون‌ها، میدان منتجه در این ناحیه از ناحیهٔ جلو ضعیف‌تر خواهد بود.
اعوجاج در میدان الکتریکی وقتی قابل ملاحظه است که تعداد الکترون‌های داخل بهمن حدّاقل به 10^{+8} رسیده باشد. در این صورت، میدان‌ها در جلو و پشت بهمن به حدود میدان الکتریکی خارجی E_0 می‌رسند؛ در غیر این صورت، چون بعد بهمن الکترونی کوچک است، اعوجاج در میدان فقط در یک منطقهٔ خیلی کوچک مجاور بهمن اتّفاق می‌افتد و اثر مهمّی ندارد.

تشکیل میدان الکتریکی ناشی از بارهای فضایی، نقش بسیار مهمّی در تخلیهٔ الکتریکی در میدان‌های غیریکنواخت و کرونا دارند. الکترون‌های رأس بهمن الکترونی به‌علّت قرارگرفتن در میدان قوی‌تر، با سرعت بیشتری به طرف آند حرکت می‌کنند و در نقاط با شدّت میدان قوی در داخل گاز باعث تحریک مولکول‌های گاز می‌شود که این موضوع، باعث می‌گردد تا مولکول‌های تحریک شدهٔ گاز در بازگشت به حالت عادی خود، نور از خود ساطع کنند و منجر به فتویونیزاسیون شوند. در این حالت، بهمن‌های الکترونی کمکی ایجاد می‌شوند. الکترون‌ها به‌علّت سرعت زیادترشان به آند می‌رسند و یون‌های مثبت در داخل گاز با سرعت کم‌تری به طرف کاتد می‌روند. در نتیجه، میدان الکتریکی در نزدیکی آند قویتر شده، بهمن‌های الکترونی کمکی در افزایش تعداد یون‌های مثبت داخل گاز کمک می‌کنند و سراسر گاز را یک باره یون‌های مثبت و الکترون‌ها تشکیل می‌دهند. در نتیجه، یک حالت پلاسما بین آند و کاتد به‌وجود می‌آید که منجر به ایجاد استریمر (ستون نورانی) داخل گاز می‌شود. در شکل (۲-۲۲) نحوهٔ گسترش بهمن الکترونی در کانال استریمر نشان داده شده است. شکل (۲-۲۲-الف) بیانگر مرحله‌ای است که بهمن الکترونی به کانال‌های یونیزاسیون هدایت شده است و در شکل (۲-۲۲-ب) پدیدهٔ استریمر، نیمی از فاصلهٔ بین دو الکترود را طی کرده است و در نهایت در شکل (۲-۲۲-ج) دو الکترود به‌وسیلهٔ یک کانال هدایت به‌طور کامل با هم ارتباط پیدا کرده‌اند.

در اثر قرارگرفتن بهمن‌های کمکی به دنبال هم یا موازی هم، به‌صورت رشته‌های نامنظمی، جرقّه‌های الکتریکی رشته‌ای ایجاد می‌شود. این نوع تخلیه را "تخلیهٔ استریمر" یا "تخلیهٔ کانال"[1] می‌گویند. این نظریه، اساس توجیه شکست گاز در

1- *KANAL Spark*

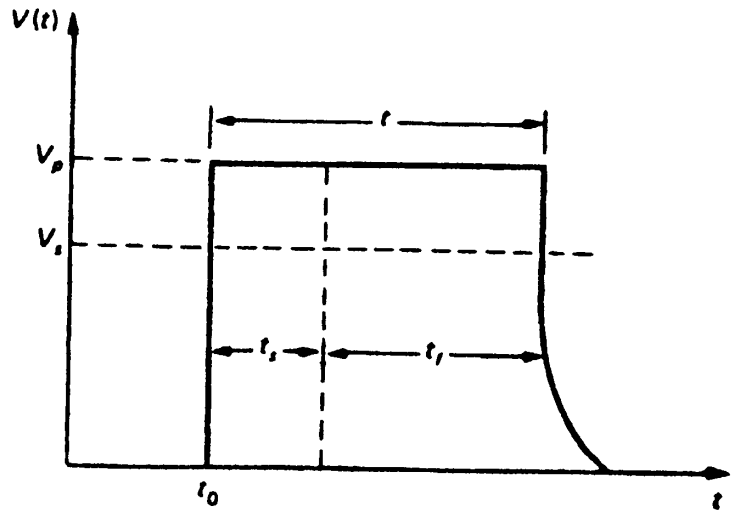


شکل (۲-۲۲): گسترش بهمن الکترونی در کانال استریمر

تخلیهٔ ناقص در میدان‌های الکتریکی غیریکنواخت را نیز تشکیل می‌دهد. شرط وقوع نظریهٔ استریمر در میدان یکنواخت، زمانی است که تعداد الکترون‌های به‌وجود آمده در اثر یونیزاسیون، به فاصلهٔ x از کاتد به $۱۰^{+۸}$ برسد. با فرض این‌که در یک فشار ثابت و در یک مقدار $x=x_c$ این شرط به‌صورت $e^{\alpha d} = ۱۰^{+۸}$ تحقّق یابد، در آن‌صورت، برای این‌که در یک میدان یکنواخت، پدیدهٔ استریمر را داشته باشیم باید $d \geq x_c$ باشد (که d فاصلهٔ بین الکترودهاست). در فشارهای بالای گاز، مقدار α افزایش می‌یابد. بنابراین، در x_c کوچک‌تری، شرط فوق برقرار می‌شود. در هر حال، نظریهٔ استریمر جایی که مقدار αx حدود ۱۸ تا ۲۰ یا بیشتر باشد، به‌وقوع می‌پیوندد.

۲-۶- زمان تأخیر در شکست الکتریکی گازها

مراحل ایجاد تخلیهٔ الکتریکی در گازها احتیاج به زمان دارد؛ زیرا مدّت زمانی طول می‌کشد تا الکترون‌های آزاد ناشی از عوامل خارجی در گازها بتوانند بهمن الکترونی ایجاد کنند و در نهایت، جریان تخلیهٔ الکتریکی مستقل توأم با جرقّه برقرار شود. اگر ولتاژ اعمال شده به گاز به‌تدریج افزایش یابد، فرصت کافی برای این پروسه به‌وجود می‌آید و ما متوجّه تأخیر در شکست الکتریکی نمی‌شویم؛ ولی اگر ولتاژ به‌صورت ضربه‌ای یا پالس یا پله‌ای افزایش یابد، از مدّت زمان اعمال ولتاژ پله‌ای یا ضربه‌ای تا شکست کامل را "زمان تأخیر در شکست گاز" می‌گویند (البتّه به شرط آن‌که دامنه موج ولتاژ، بیشتر از حدّ ولتاژ شکست گاز باشد). این موضوع در شکل (۲-۲۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۲۳): زمان تأخیر شکست بر اثر اعمال ولتاژ پله‌ای،
(V_s حدّاقل ولتاژ شکست گاز است)

این زمان t از دو قسمت تشکیل می‌شود:

۱) زمان بین اعمال ولتاژ پله‌ای تا موقعی که اوّلین الکترون آزاد تخلیهٔ الکتریکی در اثر یونیزاسیون به‌وجود می‌آید که به زمان تأخیر آماری[۱] (t_s) معروف است. این زمان یک زمان کاملاً اتّفاقی است و مقدار آن به شدّت عامل خارجی و مقدار اضافه ولتاژ بالاتر از حدّ ولتاژ شکست گاز بستگی دارد. هر چقدر که گاز در معرض عوامل خارجی شدیدتری (برای تولید الکترون آزاد) قرار گرفته باشد و همچنین هر چه اضافه ولتاژ بیشتری به گاز اعمال شده باشد، زمان تأخیر آماری کاهش می‌یابد.

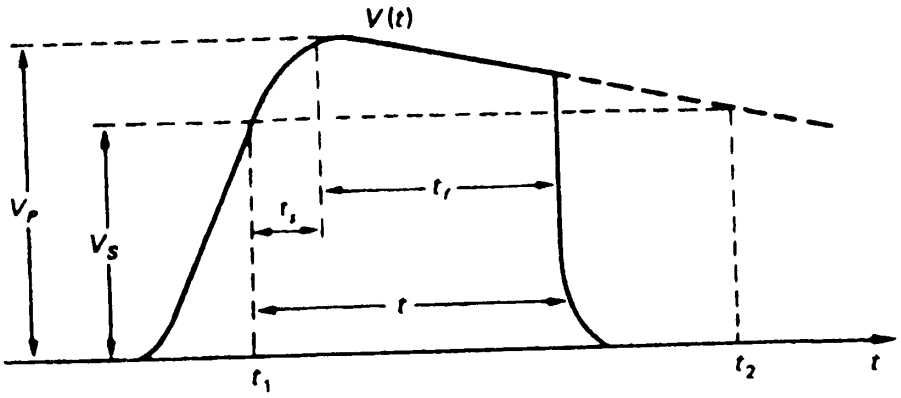
۲) زمان لازم برای توسعه الکترون‌های آزاد، تخلیهٔ الکتریکی و تشکیل بهمن الکترونی و در نهایت، شکست کامل گاز که به زمان شکل‌گیری تخلیه[۲] (t_f) معروف است. این زمان، اوّلاً به نحوهٔ عملکرد تخلیهٔ الکتریکی بستگی دارد؛ مثلاً در تخلیهٔ الکتریکی استریمر، زمان شکل‌گیری، کم‌تر از عملکرد تخلیهٔ تانزند است. ثانیاً، مقدار این زمان، به یکنواختی و غیریکنواختی میدان الکتریکی بستگی دارد. در میدان‌های غیریکنواخت، زمان شکل‌گیری طولانی‌تر است؛ زیرا شرط تخلیهٔ الکتریکی مستقل در همهٔ نقاط میدان وجود ندارد. ثالثاً، با افزایش فاصلهٔ بین

1- *Statistical Time Lag*

2- *Formative Time Lag*

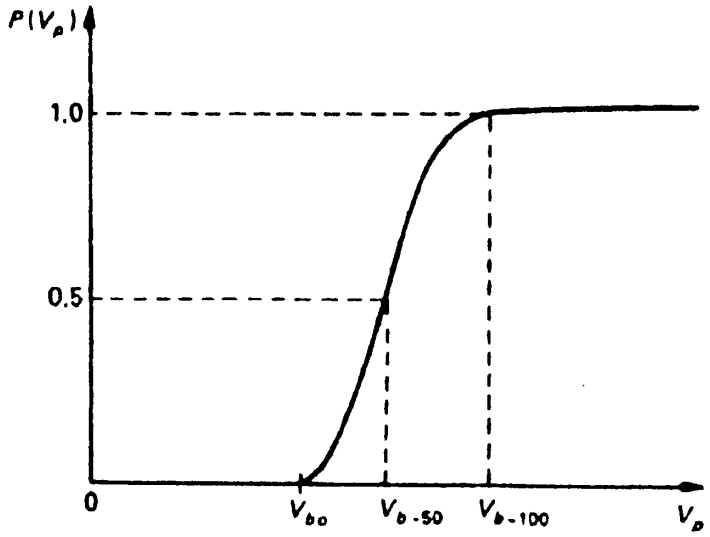
الکترودها، زمان شکل‌گیری زیادتر می‌شود. بالاخره زمان شکل‌گیری نیز مانند زمان تأخیر آماری با افزایش مقدار دامنه ولتاژ بیش از حدّ ولتاژ شکست کاهش می‌یابد.

زمان تأخیر شکست در گاز کمّیتی تصادفی است و مقدار معیّنی ندارد. این موضوع به دلیل آماری بودن بخشی از این زمان، یعنی زمان t_s است. بنابراین، وقتی با ولتاژهای ضربه‌ای ناشی از صاعقه‌های آسمانی سروکار داریم که ولتاژ با شیب زیاد نسبت به زمان، به مقدار دامنهٔ خود می‌رسد؛ چنانچه این مقدار دامنه، بیشتر از حدّ ولتاژ شکست گاز باشد و اضافه ولتاژ برای مدّت زمان تأخیر شکست یا بیشتر از آن باقی بماند، در گاز شکست کامل اتّفاق می‌افتد. به‌عبارت دیگر، بر اساس شکل (۲-۲۴)، اگر $\Delta t=t_2-t_1$ بزرگ‌تر از زمان تأخیر شکست گاز t باشد، در آن‌صورت، شکست گاز اتّفاق می‌افتد، در غیر این‌صورت، علی‌رغم اضافه ولتاژ صاعقه، شکست گاز حاصل نمی‌شود. چون زمان تأخیر شکست گاز مقدار معیّنی ندارد، از این‌رو، موضوع احتمال شکست گاز مطرح می‌شود. بدین منظور، اگر با یک مولد موج ضربه‌ای، موج‌های ضربه‌ای با دامنه‌های متفاوت تولید شده و در یک آزمایشگاه برای هر گاز به دفعات زیاد موج ضربه‌ای به آن اعمال شود، در بعضی از آزمایش‌ها شکست حاصل می‌شود و در تعدادی هم حاصل نمی‌گردد. بدین ترتیب می‌توان درصد احتمال شکست گاز معیّنی را برای موج‌های ضربه‌ای استاندارد با دامنه‌های متفاوت مشخّص کرد. بدیهی است برای دامنه‌های خیلی کم، اصلاً شکست اتّفاق نمی‌افتد و برای دامنه‌های زیاد، چون زمان تأخیر در شکست گاز کاهش می‌یابد، حتماً شکست گاز در همهٔ حالات اتّفاق می‌افتد. در بین این دو مقدار، ولتاژهایی



شکل (۲-۲۴): شکست در اثر اعمال ولتاژ ضربه

وجود دارد که بروز شکست یا عدم شکست در آن‌ها قطعی نیست و با احتمال خاصّی صورت می‌گیرد که منحنی توزیع احتمال شکل (۲-۲۵) را خواهیم داشت. مقدار ولتاژ $V_{b\text{-}100}$ مقدار دامنهٔ موجی است که موج‌های با دامنهٔ بالاتر از این مقدار باعث شکست گاز می‌شوند. این ولتاژ اهمّیت زیادی در تعیین سطوح حفاظتی دارد (نمونهٔ آن برای برقگیرهاست که باید حتماً شکست در اثر اضافه ولتاژها واقع شود). مقدار V_{b0} نیز در طراحی عایق‌ها بسیار مهم است و به‌عنوان سطح استقامت الکتریکی در برابر موج ضربه‌ای شناخته می‌شود. گاز در برابر موج‌های ضربه‌ای با دامنه کم‌تر از مقدار V_{b0} در همهٔ حالات، مقاوم است و هیچ‌گاه دچار شکست الکتریکی نمی‌شود. مقدار دامنه V_{b0} یقیناً خیلی بالاتر از مقدار حدّ ولتاژ شکست گاز در برابر یک موج ولتاژ دائم DC است.

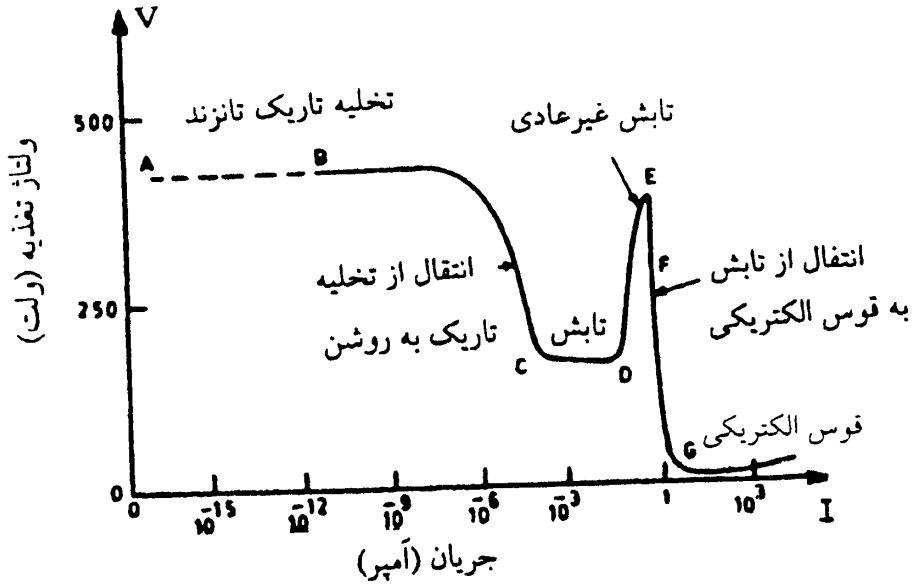


شکل (۲-۲۵): احتمال شکست در اثر ولتاژ ضربه با دامنه V_p

۲-۷- پدیدهٔ پس‌شکست و کاربردها

پس‌شکست[1]، پدیده‌ای است که پس از شکست الکتریکی در گاز رخ می‌دهد و به لحاظ فنّی دارای اهمّیت زیادی است. تابش و قوس الکتریکی، پدیده‌های پس‌شکست هستند و دستگاه‌های زیادی در این ناحیه فعّالیت می‌کنند. در تخلیهٔ تانزند (مطابق با شکل ۲-۲۶)، جریان به‌صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده است که

1- *Post Breakdown Phenomena*



شکل (۲-۲۶): دیاگرامی از نواحی مختلف تخلیه

به‌تدریج زیاد می‌شود و این افزایش جریان تا نقطهٔ B ادامه می‌یابد. در این نقطه، تخلیهٔ تانزند به سمت تابش پیش می‌رود و در ناحیهٔ B تا C، تخلیهٔ غیرمستقل انجام می‌شود. در نقطهٔ C تا D، جریان، مقداری افزایش و ولتاژ الکترودها اندکی کاهش می‌یابد و از نقطهٔ D تا E، دوباره ولتاژ شروع به افزایش می‌کند. در نقطهٔ E به بعد، با افزایش جریان، ولتاژ افت ناگهانی دارد (E-G). پدیده‌ای که در ناحیهٔ C تا G رخ می‌دهد، پدیدهٔ پس‌شکست است که از ناحیهٔ تابش (C-E) و ناحیهٔ قوس الکتریکی (E-G) تشکیل می‌شود.

۲-۷-۱- ناحیهٔ تابش (التهاب)

ناحیهٔ تابش با انتشار تابش درخشنده‌ای مشخّص می‌شود. رنگ تابش به موادّ کاتد و گاز به‌کار رفته بستگی دارد. این تابش درخشنده، قسمتی از اطراف کاتد را می‌پوشاند و در نتیجه، فضای بین کاتد و آند به‌طور متوالی خاموش و روشن می‌شود. این تابش را "تابش عادی" می‌گویند. اگر جریان افزایش یابد تخلیه، تمام سطح کاتد را می‌پوشاند که این حالت را "تابش غیرعادی" می‌گویند. در تخلیهٔ تابش، اساساً افت ولتاژ بین الکترودها ثابت می‌باشد که بسته به نوع گاز، برای جریان‌های ۱۰۰mA تا ۱۰۰A حدود ۷۵ تا ۳۰۰ ولت است. از خواصّ تخلیهٔ تابش، در بسیاری

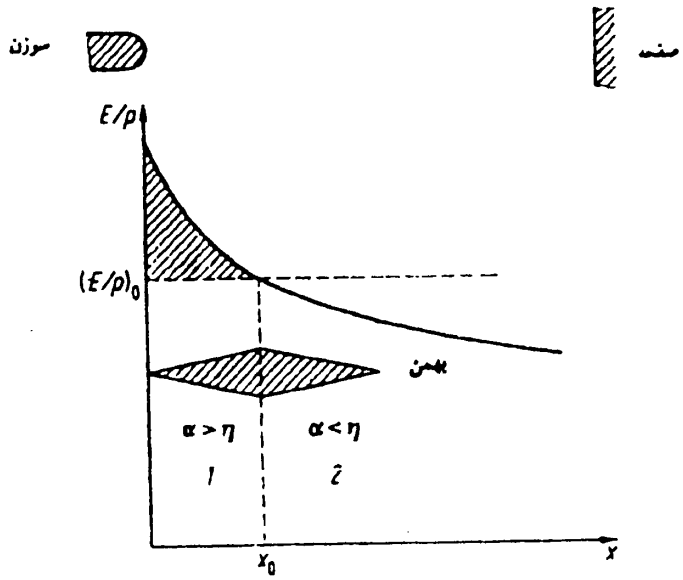
از کاربردهای عملی مانند لوله‌های تثبیت ولتاژ گازی با کاتد سرد و در یکسوسازی به‌عنوان نوسان کننده و یا به‌عنوان یک تقویت کننده استفاده می‌شود.

۲-۷-۲- ناحیهٔ تخلیه

اگر جریان فضای الکترودها به حدود ۱A یا بیشتر افزایش یابد، ولتاژ به‌طور ناگهانی به حدود ۲۰ تا ۵۰ ولت کاهش می‌یابد. این تخلیه به‌صورت درخشان و مغشوش ظاهر می‌شود (ناحیهٔ E-G) که این مرحلهٔ را "قوس تخلیه" می‌گویند. در این تخلیه، چگالی جریان ناحیهٔ کاتد به حدود $۱۰^{۳}$ تا $۱۰^{۷}$ $A/cm^{۲}$ می‌رسد. همچنین درجه حرارت قوس زیاد در حدود ۱۰۰۰°C تا چند هزار درجه سانتیگراد است. قوس ایجاد شده، دارای چگالی زیادی از الکترون‌ها و یون‌هاست که "پلاسما" نامیده می‌شود. مطالعهٔ قوس در کلیدهای قدرت (دژنگتورها) و دیگر کلیدها اهمّیت فراوانی دارد. قوس الکتریکی، یک منبع حرارتی با دمای بالا و منبع نوری شدید است که از آن در جوشکاری و برش فلزات استفاده می‌شود. همچنین در لامپ‌های کربنی به‌عنوان منبع نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد. پلاسمای با حرارت زیاد، برای تولید برق در هیدرومگنو دینامیک‌ها (MHP) و یا فرآیند پیوند هسته‌ای به‌کار می‌رود.

۲-۸- 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



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

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 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 $\int^{x_0}\bar{\alpha}.dx$ به 10^{+8} برسد، تخلیهٔ الکتریکی ناقص ایجاد می‌شود. بنابراین، شرط شکست کاملْ گاز در میدان‌های غیر یکنواخت هم به‌صورت رابطهٔ زیر در می‌آید.

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

1- Corona

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:

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

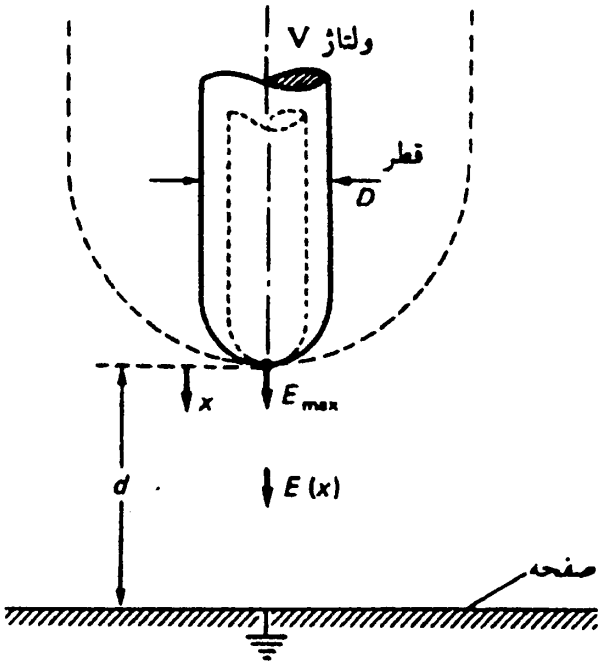
E_{max} حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی موجود در میدان و E_{av} میانگین شدّت میدان الکتریکی در میدان است.

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



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

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.

۲-۸-۱- 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.

۲-۸-۲- انواع میدان‌های غیر یکنواخت از نظر شکل الکترودها

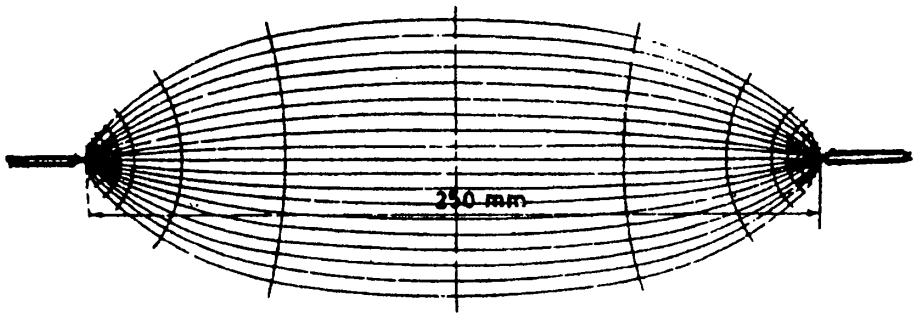
ملاحظه شد که در میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت قوی، با ولتاژ نسبتاً کمی ممکن است تخلیهٔ الکتریکی موضعی رخ دهد. تجزیه و تحلیل میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت در طرّاحی و ساخت تجهیزات فشار قوی حائز اهمّیت است؛ زیرا مقدار شدّت میدان الکتریکی ماکزیمم در یک دستگاه ممکن است به حدّ شدّت میدان شکست الکتریکی عایق آن نزدیک باشد. در این صورت با مختصری اضافه ولتاژ در این دستگاه، قدرت عایقی آن از بین می‌رود. بنابراین، لازم است در طرّاحی این دستگاه‌ها، مقدار شدّت میدان الکتریکی در نقاط مختلف میدان، محاسبه و

عوامل مؤثّر بر کنترل و تغییر آن‌ها مورد بررسی و شناسایی قرار گرفته و با تغییر آن‌ها، طراحی و ساخت دستگاه به‌نحوی انجام گیرد که میدان‌های الکتریکی بحرانی کنترل گردند.

میدان‌های الکتریکی غیر یکنواختی با شکل‌های مختلف الکترودها وجود دارند که عملاً نمونه‌هایی از آن‌ها در تجهیزات فشار قوی مشاهده می‌شود. در این قسمت به بررسی بعضی از این میدان‌هاو پارامترهای مؤثّر بر کنترل این میدان‌ها می‌پردازیم.

۲-۸-۲-۱- میدان الکتریکی بین دو میلهٔ نوک تیز

میدان الکتریکی ایجاد شده بین دو الکترود نوک تیز، یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت متقارن[۱] است، که محور تقارن در وسط فاصلهٔ بین دو الکترود قرار دارد. این موضوع در شکل (۲-۲۹) نشان داده شده است. میدان الکتریکی در نوک میله‌ها بیشتر از سایر نقاط است و هر چه زاویهٔ خمیدگی نوک میله‌ها کوچک‌تر باشد، شدّت میدان الکتریکی اطراف آن‌ها قوی‌تر خواهد بود. در وسط میدان، کم‌ترین شدّت میدان وجود دارد. بین گوشه‌های نوک تیز موجود در ژنراتورها و ترانسفورماتورها و نیز شاخک‌های حفاظتی برقگیرها (که در مسیر مقره‌ها و بوشینگ‌های

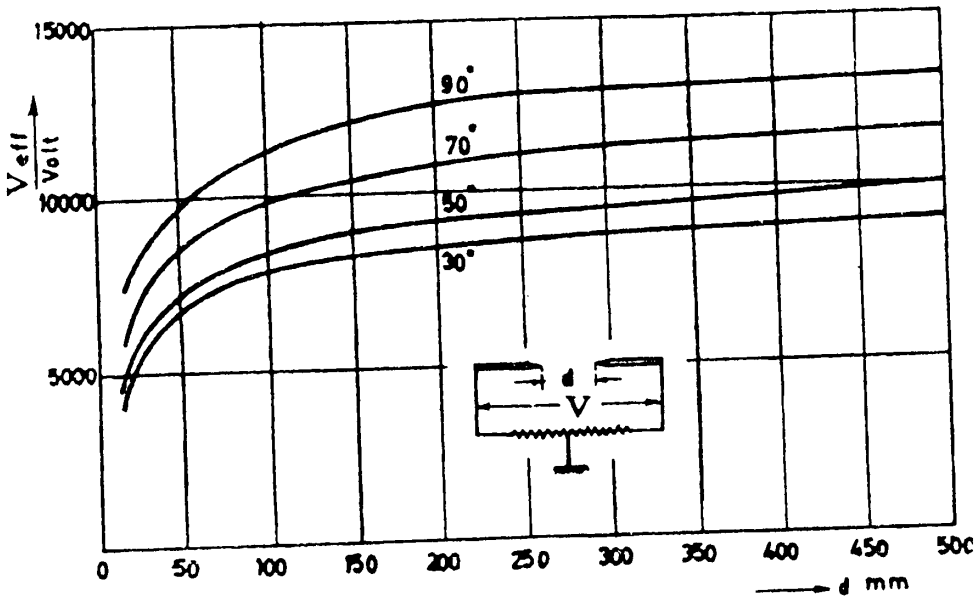


شکل (۲-۲۹): میدان بین دو میله نوک تیز

۱- میدان الکتریکی متقارن بدین معنی است که شدّت میدان الکتریکی روی دو الکترود با هم برابر است و نسبت به یک محورتقارن، شدّت میدان الکتریکی در طرفین محور در نقاط به فاصلهٔ مساوی با هم برابرند؛ یعنی، با عوض کردن پلاریته، شکل میدان عوض نمی‌شود.

ترانسفورماتورها برای حفاظت در برابر امواج ضربه‌ای ناشی از صاعقه به‌کار برده می‌شود) نمونه‌هایی از این نوع میدان هستند.

در این میدان، با ولتاژ نسبتاً کمی تخلیهٔ الکتریکی موضعی اطراف میله‌های نوک تیز به‌وجود می‌آید. هر چه زاویه نوک تیز میله کم‌تر باشد، در ولتاژ کم‌تری تخلیهٔ الکتریکی موضعی به‌وجود می‌آید. با افزایش فاصلهٔ بین الکترودها، تا اندازه‌ای ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی افزایش می‌یابد، ولی برای مقادیر بزرگ d، افزایش فاصلهٔ تأثیر چندانی در ولتاژ شروع تخلیهٔ موضعی ندارد (شکل ۲-۳۰ را ببینید). البتّه ولتاژ لازم برای شکست کامل بین الکترودها با افزایش فاصلهٔ بین الکترودها افزایش می‌یابد. این یک قاعدهٔ کلّی در مورد میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت است که اصولاً در این نوع میدان‌ها ولتاژ تخلیهٔ موضعی، بیشتر تابع شکل الکترود، و ولتاژ تخلیهٔ کامل، بیشتر تابع فاصلهٔ الکترودهاست. تأثیر فاصلهٔ در ولتاژ تخلیهٔ موضعی و تأثیر شکل الکترودها در ولتاژ تخلیهٔ کامل، معمولاً ناچیز است.



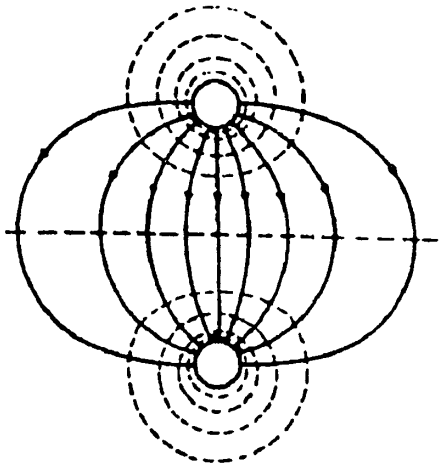
شکل (۲-۳۰): ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی بر حسب فاصلهٔ بین دو الکترود

۲-۸-۲-۲- میدان الکتریکی بین دو گوی کروی

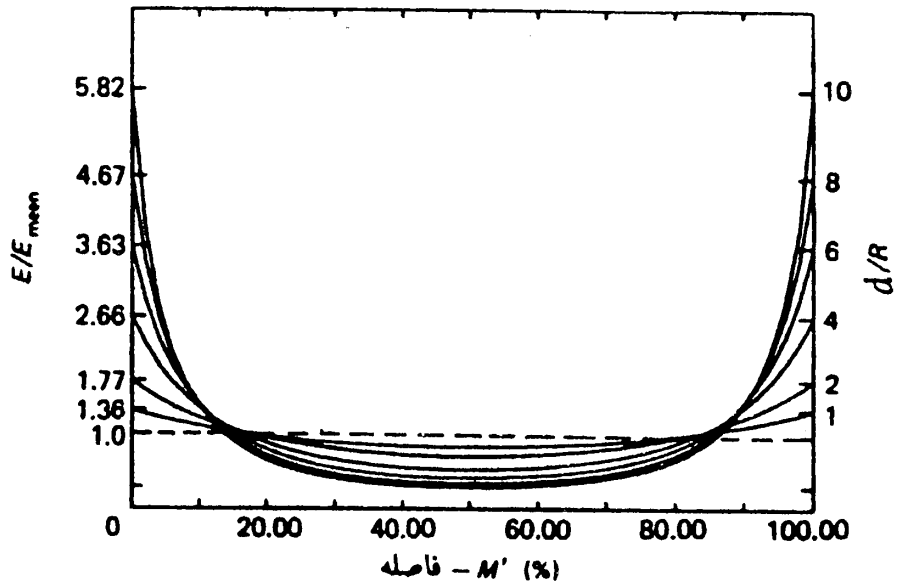
اگر دو گوی با شعاع‌های مساوی R، و به فاصلهٔ d از یکدیگر قرار داشته باشند و نسبت d/R هم خیلی کوچک باشد، در آن‌صورت، میدان الکتریکی تقریباً یکنواخت

بین دو کره ایجاد می‌شود. از دو کره با فاصلهٔ $d<R$ به‌طور وسیعی برای ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت در آزمایشگاه فشار قوی و برای مطالعهٔ پدیدهٔ تخلیهٔ الکتریکی و نیز اندازه‌گیری ولتاژ شکست استفاده می‌شود. غیر یکنواختی در لبه‌های تیز میدان بین دو صفحه، در میدان بین دو کره با $d<<R$ وجود ندارد (شکل ۲-۳۱ را ببینید). هر چه نسبت d/R بزرگ‌تر از یک باشد، میدان الکتریکی بین دو کره غیر یکنواخت‌تر می‌شود که در شکل (۲-۳۲) قابل مشاهده می‌باشد.

میدان الکتریکی غیر یکنواخت ایجاد شده بین دو کره با فاصلهٔ $d>R$، یک میدان

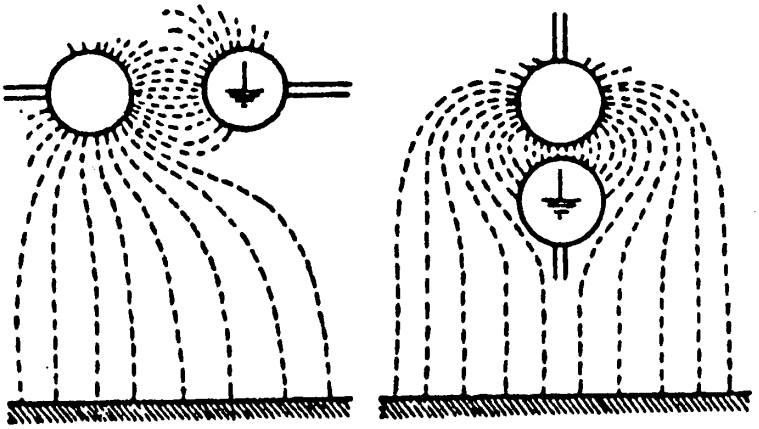


شکل (۲-۳۱): میدان بین دو گوی فلزی



شکل (۲-۳۲): توزیع شدّت میدان در راستای محور d به‌ازای نسبت‌های مختلف d/R

غیریکنواخت متقارن است که محور تقارن آن در فاصلهٔ وسط بین دو کره قرار گرفته است؛ ولی اگر یکی از کره‌ها زمین شده باشد و به کرهٔ دیگر ولتاژ متّصل شود، میدان غیر یکنواخت، حالت تقارن خود را تقریباً از دست می‌دهد و غیر متقارن می‌شود (شکل ۲-۳۳ را ببینید). علّت این موضوع آن است که با زمین کردن یک کره مقداری از خطوط میدان که از کرهٔ بالایی خارج می‌شوند، به‌جای این‌که به کرهٔ زمین شده بروند، به زمین می‌روند. بنابراین، شدّت میدان الکتریکی در اطراف کره‌ای که در بالا قرار دارد، بیشتر و در اطراف کرهٔ زمین شده کم‌تر می‌شود؛ ولی بین کرهٔ زمین شده و زمین (به‌دلیل یکسان بودن پتانسیل)، میدان وجود ندارد.



(الف) (ب)

شکل (۲-۳۳): میدان بین دو کره با کرهٔ اتّصال زمین؛
الف) حالت افقی دو کره؛ ب) حالت عمودی دو کره

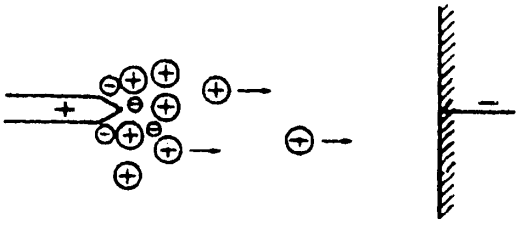
۲-۸-۲-۳- میدان الکتریکی بین میلهٔ نوک تیز و صفحه

میدان الکتریکی غیر یکنواخت بین یک میلهٔ نوک تیز و صفحه، یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت نامتقارن است. این میدان، مشابه نیمی از میدان الکتریکی به‌وجود آمده بین دو میلهٔ نوک تیز می‌باشد. در میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت نامتقارن، تغییر علامت ولتاژ روی الکترودها، تأثیر زیادی روی ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی و کامل دارد. یعنی پلاریتهٔ قطب‌ها بر ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی و ولتاژ شروع تخلیهٔ کامل مؤثّر است. برای بررسی اثر پلاریتهٔ قطب‌ها در میدان الکتریکی غیر یکنواخت میلهٔ نوک تیز و صفحه، دو حالت مختلف آن را، یک

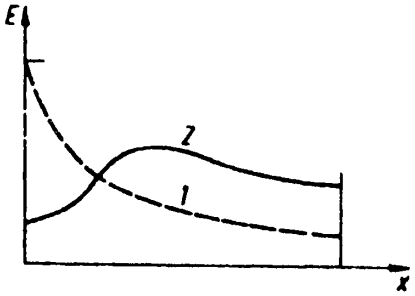
بار وقتی که پلاریتهٔ میلهٔ نوک تیز مثبت و پلاریتهٔ صفحه منفی است (میله آند- صفحه کاتد) و بار دیگر حالتی که میلهٔ نوک تیز منفی و صفحه مثبت است (میله کاتد - صفحه آند) بررسی می‌کنیم.

الف - میلهٔ نوک تیز مثبت - صفحه منفی

الکترون‌های آزاد صادر شده از کاتد، تحت تأثیر نیروی ناشی از میدان الکتریکی به طرف آند حرکت می‌کنند و چون در فضای اطراف الکترود کاتد، میدان الکتریکی به اندازه کافی قوی نیست، از این‌رو، نمی‌توانند یونیزاسیون انجام دهند. در عوض، هنگامی‌که الکترون‌های آزاد در نزدیکی میله قرار می‌گیرند، چون در یک میدان الکتریکی خیلی قوی قرار می‌گیرند، شروع به یونیزاسیون و تشکیل بهمن الکترونی می‌کنند و با سرعت زیادی جذب میلهٔ نوک تیز می‌شوند. در این حالت، یون‌های مثبت ایجاد شده به‌علّت سنگین بودن، با سرعت کمی به طرف کاتد حرکت می‌کنند. بنابراین، در نزدیکی میلهٔ نوک تیز، حجمی از بارهای فضایی (یون‌های مثبت) تشکیل می‌شود. این بار فضایی تشکیل شده ناشی از یون‌های مثبت (شکل ۲-۳۴ را ببینید)، باعث تضعیف میدان الکتریکی اوّلیه در نزدیک میله، و میدان الکتریکی



(الف)



(ب)

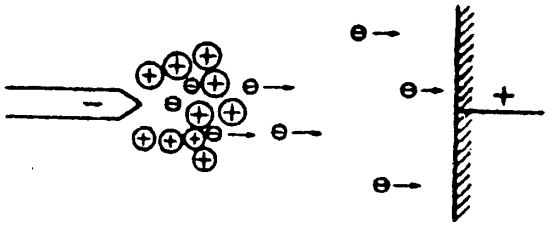
شکل (۲-۳۴): الف) بار فضایی تولید شده در فاصلهٔ هوایی میله مثبت-صفحه منفی ب) اغتشاش میدان توسّط بار فضایی (۱- بدون در نظر گرفتن بار فضایی، ۲- با در نظر گرفتن بار فضایی)

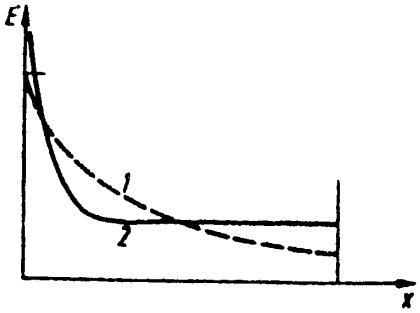
وسط میدان را تقویت می‌نماید. بنابراین، امکان یونیزاسیون اطراف میله نسبت به حالت قبل، کم‌تر شده، امکان یونیزاسیون در سایر نقاط میدان نسبت به حالت قبل بیشتر می‌شود. این حالت، مانند آن است که میلهٔ نوک تیز به صفحه، نزدیک‌تر شده باشد. به‌عبارت دیگر، میدان الکتریکی بین میله نوک تیز و صفحه تا حدودی یکنواخت می‌شود و امکان به‌وجود آمدن کرونا مشکل‌تر می‌گردد. در این حالت، اختلاف بین ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی و ولتاژ شکست کامل گاز کم‌تر می‌شود؛ زیرا ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی در آن افزایش یافته و ولتاژ شکست کامل گاز کاهش می‌یابد.

ب- میلهٔ نوک تیز منفی-صفحه مثبت

در این حالت، الکترون‌های آزاد شده از سطح کاتد یا الکترون‌های آزاد موجود در گاز، بلافاصله در یک میدان الکتریکی قوی قرار می‌گیرند و باعث یونیزاسیون گاز در آن ناحیه و تشکیل بهمن الکترونی می‌شوند. الکترون‌ها با سرعت زیاد به طرف آند حرکت می‌کنند، ولی چون در نزدیکی صفحه در یک میدان الکتریکی ضعیف قرار می‌گیرند، سرعت آن‌ها کم شده و دیگر یونیزاسیون انجام نمی‌دهند و فقط تعدادی از آن‌ها که ترکیب مجدد انجام نمی‌دهند، به آند می‌رسند. این در حالی است که یون‌های مثبت که در حال حرکت به طرف کاتد هستند (به‌علّت جرم زیاد)، سرعت کم‌تری دارند و در حوالی کاتد تشکیل بار فضایی مثبت می‌دهند.

در اثر تجمع بارهای مثبت اطراف میلهٔ نوک تیز کاتد (شکل ۲-۳۵ را ببینید)، میدان الکتریکی در حوالی میلهٔ نوک تیز بیشتر و تقویت می‌شود؛ زیرا میدان الکتریکی ناشی از بار فضایی یون‌ها در جهت میدان اعمال شدهٔ خارجی بین الکترودهاست و بر عکس، میدان الکتریکی در بقیهٔ نقاط میدان، به‌علّت مخالف بودن میدان بارهای فضایی با میدان خارجی، تضعیف می‌شود. از این‌رو، در این حالت، امکان یونیزاسیون اطراف میلهٔ نوک تیز، بیشتر و در بقیهٔ نقاط میدان نسبت به حالت قبل کم‌تر می‌شود. در نتیجه، امکان تخلیهٔ الکتریکی موضعی در اطراف میلهٔ نوک تیز با یک ولتاژ کم‌تری حاصل می‌شود و ولتاژ شکست کامل گاز، به‌علّت کاهش شدّت میدان الکتریکی نزدیک صفحه کمی افزایش می‌یابد. بنابراین، تفاوت ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی و ولتاژ شکست کامل گاز زیادتر می‌شود.

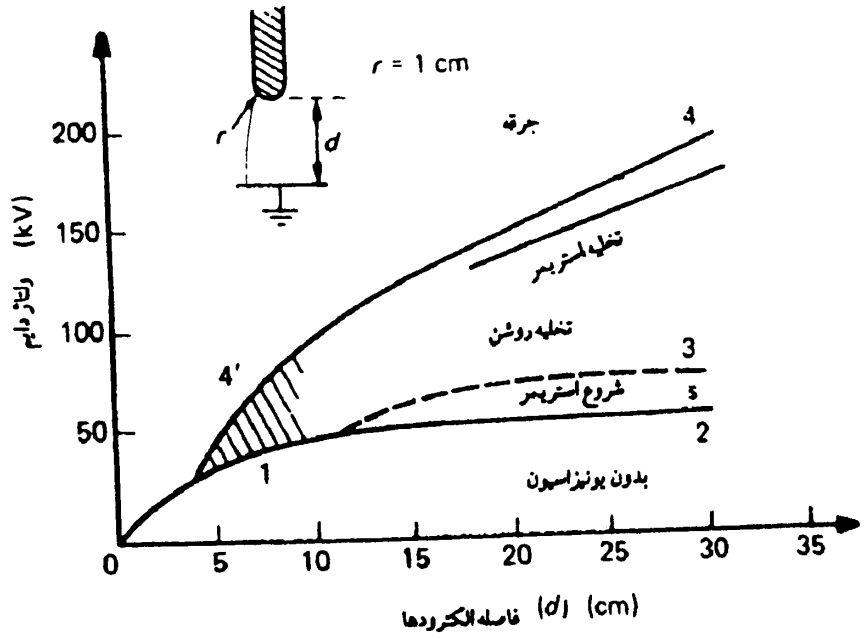




شکل (۲-۳۵): الف) بار فضایی تولید شده در فاصلهٔ هوایی میلهٔ منفی-صفحه مثبت ب) اغتشاش میدان توسّط بار فضایی (۱- بدون در نظر گرفتن بار فضایی، ۲- با در نظر گرفتن بار فضایی)

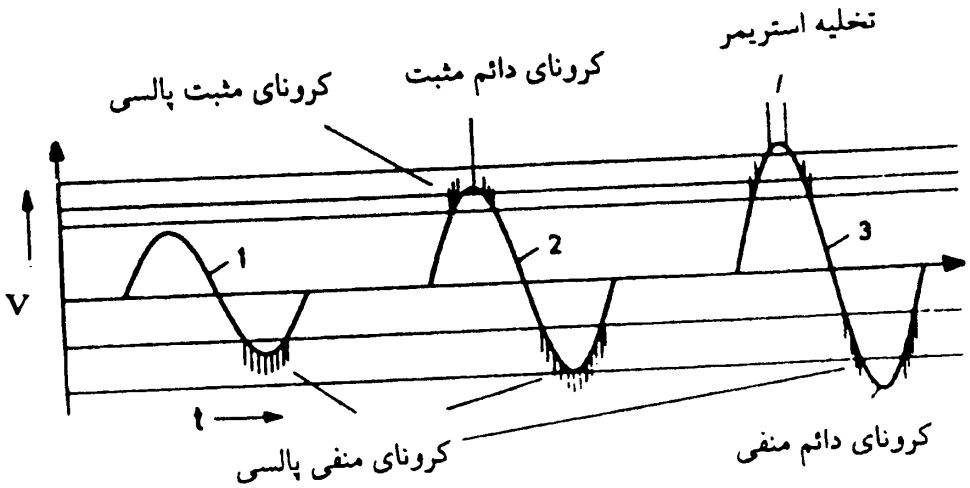
در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که ولتاژ شکست کامل گاز بین دو الکترود در حالت میله نوک تیز مثبت و صفحه منفی، کم‌تر از موقعی است که میلهٔ نوک تیز منفی باشد. همچنین ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی در حالتی که میلهٔ نوک تیز مثبت و صفحه منفی باشد، بالاتر خواهد بود. با تزریق ولتاژ متناوب، شکست گاز در آن نیم پریودی رخ می‌دهد که میلهٔ نوک تیز مثبت و صفحه منفی باشد. البتّه شکست کامل گاز در دامنهٔ ولتاژ مثبت (پیک موج) صورت می‌گیرد. هر چه فاصلهٔ این الکترود میله‌ای نوک تیز و صفحه در حالت میلهٔ نوک تیز مثبت و صفحه منفی، کم‌تر باشد، از غیر یکنواختی میدان کاسته می‌شود و از یک فاصلهٔ معیّن کم‌تر، قبل از بروز تخلیهٔ الکتریکی موضعی، شکست کامل گاز اتّفاق می‌افتد؛ زیرا با فواصل کم، میدان تقریباً یکنواخت می‌گردد. این وضعیت در شکل (۲-۳۶) قابل مشاهده است.

البتّه در تزریق ولتاژهای متناوب با فرکانس صنعتی نیز، تخلیهٔ الکتریکی موضعی یا شکست کامل گاز مثل تزریق ولتاژ DC خواهد بود و همان مشخّصات را خواهد داشت؛ زیرا فرکانس صنعتی به اندازهٔ کافی کم است و ولتاژ متناوب در طول مدّت



شکل (۲-۳۶): منحنی‌های آستانه برای حالات مختلف کرونای آند

زمانی که به اندازهٔ کافی بزرگ شده است، مانند ولتاژ دایم عمل می‌کند. در این حالت، برای میلهٔ نوک تیز و صفحه در هر دو نیم پرپود، تخلیهٔ جزئی را خواهیم داشت. البتّه در ولتاژ کم، کرونا نخواهیم داشت و با افزایش ولتاژ، ابتدا کرونا در نیم پرپود منفی اطراف میلهٔ نوک تیز ایجاد می‌شود و با افزایش بیشتر ولتاژ، کرونای مثبت نیز در اطراف میلهٔ نوک تیز ایجاد می‌گردد. (شکل ۲-۳۷ را ببینید).

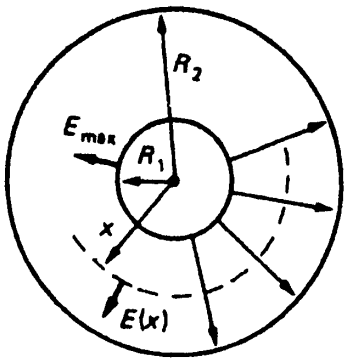


شکل (۲-۳۷): تخلیهٔ جزئی یا کرونا در ولتاژ متناوب

پایین بودن ولتاژ شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی در حالت میلهٔ منفی و صفحه مثبت، نسبت به میلهٔ مثبت و صفحه منفی را می‌توان به گونهٔ دیگری توجیه کرد. در حالت میلهٔ منفی، چون یون‌های مثبت در برخورد با کاتد در یک میدان الکتریکی خیلی قوی قرار می‌گیرند، انرژی زیادی برای آزاد کردن الکترون‌های ثانویه از سطح کاتد دارند (γ زیاد است). بنابراین، در شرط شکست گاز $\gamma(e^{\int \alpha.\, dx} - ۱) = ۱$ با γ زیاد، نیاز به $\int \alpha.dx$ کوچک‌تری است و از این‌رو، در میدان الکتریکی کم‌تری (ولتاژ پایین‌تری)، تخلیهٔ الکتریکی موضعی حاصل می‌شود ($\gamma=f(E/P)$). امّا در حالتی که پلاریته میله، مثبت و صفحه منفی باشد، یون‌های مثبت در برخورد با سطح کاتد (صفحه)، در یک میدان الکتریکی ضعیفی قرار گرفته و انرژی کم‌تری برای آزاد سازی الکترون از سطح کاتد دارند (γ کوچک است)، بنابراین، به میدان الکتریکی قوی‌تری برای شروع تخلیهٔ الکتریکی موضعی نیاز است.

۲-۸-۲-۴- میدان الکتریکی بین دو گوی متّحدالمرکز

میدان الکتریکی ایجاد شده در فضای بین دو گوی، با شعاع‌های $R_۱$ و $R_۲$ که مراکز آن‌ها با هم یکی است و $R_۲>R_۱$ باشد، یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت نامتقارن است. اگر بار الکتریکی $(+Q)$ روی کرهٔ داخلی و بار الکتریکی $(-Q)$ روی کرهٔ خارجی به‌طور یکنواخت توزیع شده باشد، شدّت میدان الکتریکی در هر نقطه از فضای بین دو کره که به فاصلهٔ R از مرکز آن‌ها قرار داشته باشد، طبق قانون گوس به‌دست می‌آید (شکل ۲-۳۸ را ببینید). اگر عدد دی‌الکتریک گاز موجود بین دو



شکل (۲-۳۸): میدان الکتریکی بین دو گوی متّحدالمرکز

کره برابر ε باشد، خواهیم داشت:

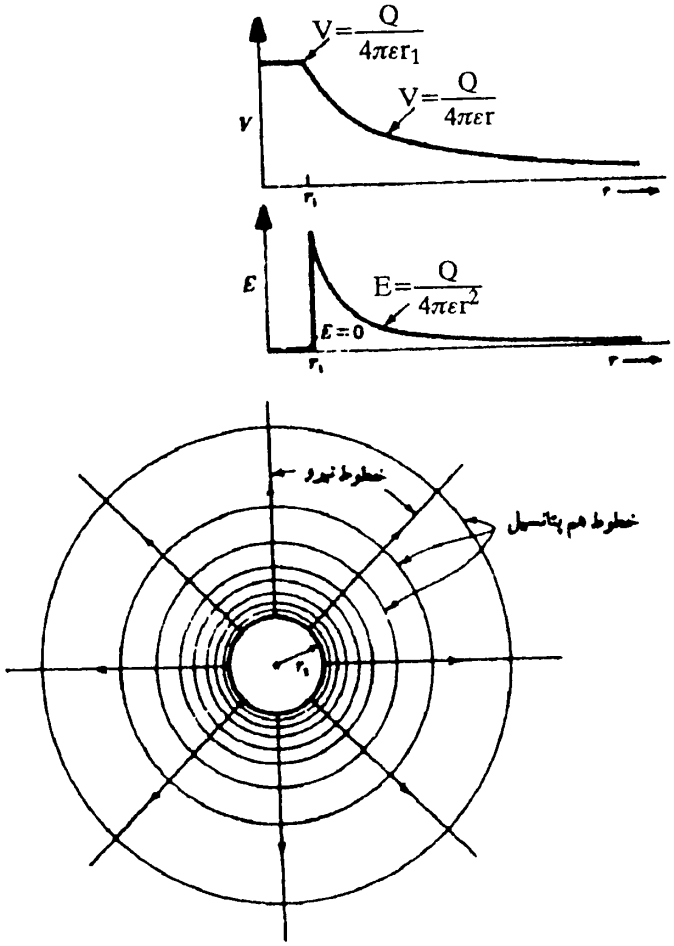
$$\varepsilon \oint E.dA = +Q \qquad (۸۲-۲)$$

با انتگرال‌گیری روی سطح بستهٔ گوسی که کره‌ای به شعاع R به مرکز دو کره است، می‌توان نوشت:

$$\varepsilon E(۴\pi R^{۲}) = Q$$

$$E = \frac{Q}{۴\pi\varepsilon R^{۲}} \qquad R_{۱} \le R \le R_{۲} \qquad (۸۳-۲)$$

از رابطهٔ اخیر و با توجّه به شکل (۲-۳۹) درمی‌یابیم که هر چه از سطح گوی داخلی دور شویم، شدّت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد و حدّاکثر آن روی سطح گوی داخلی است. شکل‌های (۲-۳۹-الف) و (۲-۳۹-ب)، نحوهٔ تغییرات ولتاژ و شدّت



شکل (۲-۳۹): تغییرات شدّت میدان الکتریکی ناشی از بار، روی سطح گوی داخلی

میدان اطراف کره را نشان می‌دهند و شکل (۲-۳۹-ج) خطوط هم‌پتانسیل و خطوط میدان را مشخّص می‌کند. اختلاف پتانسیل بین این دو گوی از انتگرال خطّی شدّت میدان الکتریکی بین دو گوی به‌دست می‌آید.

$$V_{12} = \int_{R_1}^{R_2} E.dl \qquad (۸۴-۲)$$

$$V_{12} = V_1 - V_2 = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{4\pi\varepsilon R^2} dR = \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\left(-\frac{1}{R}\right)_{R_1}^{R_2}$$

$$V_{12} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\left(-\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}\right) = \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 R_1}\right)$$

اگر گوی بیرونی را زمین کنیم و گوی داخلی را به ولتاژ V متّصل نماییم ($V_1 = V$)، آن‌گاه اختلاف پتانسیل بین دو کره برابر $V_{12} = V$ است که:

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 R_1}\right) \qquad (۸۵-۲)$$

در عمل، معمولاً به‌جای بار الکتریکی از اختلاف پتانسیل استفاده می‌کنند. بنابراین، با حذف بار الکتریکی Q بین روابط (۲-۸۳) و (۲-۸۵) خواهیم داشت:

$$\frac{Q}{4\pi\varepsilon} = V\left(\frac{R_2 R_1}{R_2 - R_1}\right)$$

در نتیجه،

$$E_{sph} = V\left(\frac{R_2 R_1}{R_2 - R_1}\right)\frac{1}{R^2} \qquad R_1 \le R \le R_2 \qquad (۸۶-۲)$$

E_{sph} شدّت میدان الکتریکی در فضای بین دو گوی هم‌مرکز است. از این رابطه، شدّت میدان حدّاکثر، روی سطح خارجی گوی داخلی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$E_{max} = V\left(\frac{R_2 R_1}{R_2 - R_1}\right)\frac{1}{R_1^2} = V\frac{R_2}{R_1(R_2 - R_1)}$$

در نتیجه،

$$E_{max\,sph} = \frac{V}{R_1(1 - R_1/R_2)} \qquad (۸۷-۲)$$

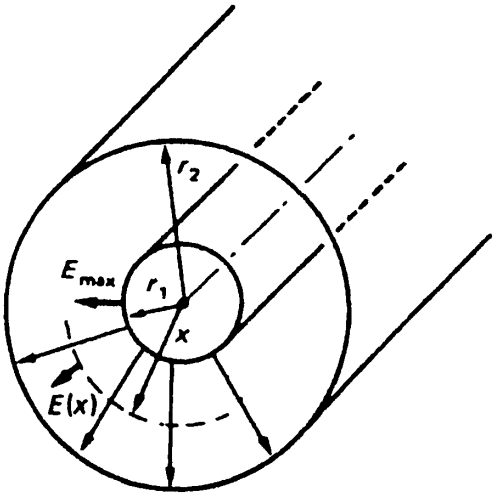
الکترودهای کروی شکل، غالباً به‌عنوان الکترودهای انتهایی تجهیزات فشار قوی استفاده می‌شوند که در بالای سر بوشینگ‌ها (محل عبور هادی‌ها به داخل تجهیزات فشار قوی نظیر ترانسفورماتورها)، قرار می‌گیرند. با صرف‌نظر کردن از آن‌چه که به کره‌ها متّصل شده است و با فرض این‌که شعاع کرهٔ بیرونی (فضای اتاق آزمایشگاه) نسبت به کرهٔ داخلی، خیلی بزرگ‌تر باشد ($R_2 >> R_1$)، آن‌گاه $\frac{R_1}{R_2} << 1$ است و می‌توان نوشت که $\frac{R_1}{R_2} \approx 0$ می‌باشد. این حالت، مانند میدان الکتریکی بین الکترود کروی شکل و زمین می‌باشد. در این حالت داریم:

$$E_{max} = \frac{V}{R_1}$$

با توجّه به شدّت میدان شکست هوا (E_b)، اگر E_{max} ایجاد شده روی سطح کره به حد میدان شکست هوا برسد، در اطراف الکترود کروی، تخلیهٔ الکتریکی موضعی و جرقّه‌های موضعی (به همراه پدیدهٔ کرونا) به‌وجود می‌آید. از این‌رو، با توجّه به ولتاژ اعمالی به الکترود کروی (یعنی V) و با در نظر گرفتن شدّت میدان شکست هوا (E_b)، شعاع الکترود کروی R_1 را باید به‌گونه‌ای انتخاب کرد که E_{max} کم‌تر از E_b هوا باشد و در حقیقت، E_{max} به حدّ E_b نرسد. به‌عنوان مثال، اگر شدّت میدان الکتریکی بحرانی برای شروع یونیزاسیون و تخلیهٔ الکتریکی موضعی اطراف الکترود کروی با قطر بزرگ، حدود ۲۵kV/cm باشد و به‌دلیل ناهمواری‌های احتمالی به‌وجود آمده در سطح الکترود کروی و یا وجود ذرّات گرد و غبار در هوا، حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی را برای شکست هوا نصف این مقدار و حدود ۱۲kV/cm در نظر بگیریم، آن‌گاه E_{max}=۱۰kV/cm بوده تا مقدار مناسب R_1 را برای یک ولتاژ معیّن V به‌دست آوریم. در این حالت با استفاده از رابطهٔ اخیر، مقدار شعاع R_1 برای ولتاژ V=۱۰۰kV برابر ۱۰cm خواهد شد.

۲-۸-۲-۵- میدان الکتریکی بین دو استوانهٔ متّحدالمحور

میدان الکتریکی ایجاد شده بین دو استوانه به شعاع‌های r_1 و r_2 ($r_2 > r_1$) و با محورهای مشترک نیز یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت است (شکل ۲-۴۰ را ببینید). نظیر این میدان را می‌توان در کابل‌های کواکسیال مشاهده نمود که استوانهٔ داخلی، هادی کابل و استوانهٔ خارجی، پوشش فلزی زمین شده است و بین دو



شکل (۲-۴۰): میدان بین دو استوانهٔ متّحدالمحور

استوانه عایق است.

اگر بار الکتریکی $+Q$ روی استوانهٔ داخلی به طول l و بار الکتریکی $-Q$ روی استوانهٔ خارجی به‌طور یکنواخت توزیع شده باشد، در آن‌صورت، برای گاز موجود بین این دو استوانه با عدد دی‌الکتریک ε، شدّت میدان الکتریکی در نقطه‌ای به فاصلهٔ r از محور این دو استوانه و در فاصلهٔ $r_1<r<r_2$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon \oint E.dA = +Q \qquad (۲-۸۸)$$

سطح بستهٔ گوس، استوانه‌ای به طول l و شعاع r است که هم‌محور با دو استوانهٔ دیگر می‌باشد. در نتیجه،

$$\varepsilon E(2\pi r l) = Q$$

$$E = \frac{Q}{2\pi\varepsilon r l} \qquad r_1 \le r \le r_2 \qquad (۲-۸۹)$$

با دور شدن از سطح استوانهٔ داخلی، مقدار r افزایش یافته و شدّت میدان الکتریکی E کاهش می‌یابد. حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی، روی استوانهٔ داخلی است. یعنی:

$$r = r_1 \Rightarrow E_{max} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon r_1 l}$$

برای محاسبهٔ اختلاف پتانسیل بین دو استوانه، از انتگرال خطّی شدّت میدان

الکتریکی بین دو استوانه در جهت میدان استفاده می‌کنیم:

$$V_{12} = \int_{1}^{2} E.dl$$

$$V_{12} = V_1 - V_2 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{2\pi\varepsilon l r} dr = \frac{Q}{2\pi\varepsilon l} \ln\frac{r_2}{r_1}$$

اگر استوانهٔ بیرونی را زمین کنیم ($V_2=0$) و به استوانهٔ داخلی ولتاژ V متّصل نماییم آن‌گاه،

$$V = \frac{Q}{2\pi\varepsilon l} \ln\frac{r_2}{r_1} \qquad (۹۰-۲)$$

برای حذف بار الکتریکی از معادلات، و جایگزینی ولتاژ به‌جای آن، از رابطهٔ اخیر، مقدار $\frac{Q}{2\pi\varepsilon l}$ را بر حسب اختلاف پتانسیل بین دو استوانه به‌دست می‌آوریم و در معادلهٔ شدّت میدان الکتریکی ارائه شده در رابطهٔ (۲-۸۹) قرار می‌دهیم. در نتیجه خواهیم داشت:

$$E_{cyl} = \frac{V}{r \ln\frac{r_2}{r_1}} \qquad (۹۱-۲)$$

که E_{cyl} شدّت میدان در فضای بین دو استوانهٔ هم‌محور است. حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی در شعاع $r=r_1$ و روی استوانهٔ داخلی صورت می‌گیرد. یعنی:

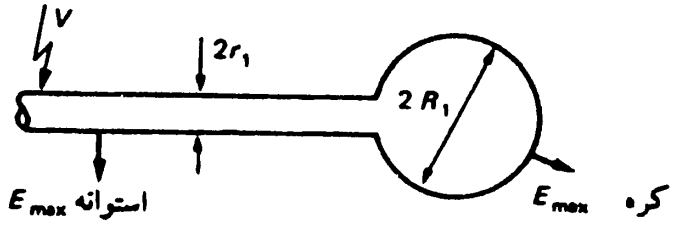
$$E_{max\ cyl} = \frac{V}{r_1 \ln\frac{r_2}{r_1}} \qquad r_1 < r < r_2 \qquad (۹۲-۲)$$

اکنون به کاربردهای استوانه‌های هم‌محور در صنعت برق اشاره می‌کنیم.

کاربرد اوّل: از یک هادی استوانه‌ای (باس‌بار) برای اتّصال مدارها به همدیگر در آزمایشگاه‌های فشار قوی استفاده می‌شود. شعاع هادی استوانه‌ای (r_1) باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که تخلیهٔ الکتریکی موضعی روی آن اتّفاق نیفتد. این هادی استوانه‌ای به‌دلیل محدود بودن طول آن، و برای آن‌که در انتهای آن تخلیهٔ الکتریکی موضعی اتّفاق نیفتد، باید به یک الکترود کروی شکل (مطابق شکل ۲-۴۱) اتّصال داده شود.

در این وضعیت، دیوارهای زمین شدهٔ آزمایشگاه، استوانهٔ خارجی و کرهٔ بیرونی، استوانه‌های متّحدالمحور و کره‌های متّحدالمرکز را تشکیل می‌دهند و به‌طور تقریبی می‌توانیم از اثر میدان‌های الکتریکی استوانه و کره روی یکدیگر صرف‌نظر کنیم.

حال اگر بخواهیم همان مقدار E_{max} را که روی سطح استوانه، ایجاد شده است، روی سطح کره نیز داشته باشیم، باید E_{max} استوانه را با E_{max} کره مساوی قرار دهیم.



$r_2, R_2 > r_1 ; R_2$

شکل (۲-۴۱): آرایش اتّصال استوانه و کره

در این حالت برای ولتاژ V داریم:

$$E_{max\ cyl} = E_{max\ sph}$$

$$\frac{V}{r_1 \ln\frac{r_2}{r_1}} = \frac{V}{R_1(1 - R_1/R_2)}$$

r_2= شعاع استوانه است که دیوارهای آزمایشگاه را تشکیل می‌دهد.

R_2= شعاع کره است که دیوارهای آزمایشگاه را تشکیل می‌دهد.

در نتیجه،

$$\frac{R_1}{r_1} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{(1 - R_1/R_2)}$$

با توجّه به آنکه معمولاً $R_2 >> R_1$ است، بنابراین، $\frac{R_1}{R_2} << 1$ و در نتیجه $\frac{R_1}{R_2} \cong 0$ می‌باشد. لذا،

$$\frac{R_1}{r_1} \approx \ln\frac{r_2}{r_1}$$

مثلاً اگر ابعاد آزمایشگاه طوری باشد که $r_2 = 20 r_1$، آنگاه داریم:

$$\frac{R_1}{r_1} \approx 3$$

ابعاد آزمایشگاه‌های فشار قوی برای جلوگیری از تخلیهٔ الکتریکی و شکست (بروز جرقّه در هوای آزمایشگاه بین الکترودهای فشار قوی و دیوارهای زمین شده)، خیلی بزرگ انتخاب می‌شوند (از نظر طول، عرض و ارتفاع).

تذکّر: البتّه برای شعاع‌های (قطرهای) کوچک، میدان شروع شکست موضعی گاز برای استوانه و کره با هم برابر نیستند. از این‌رو، مقادیر دقیق را می‌توان تنها با

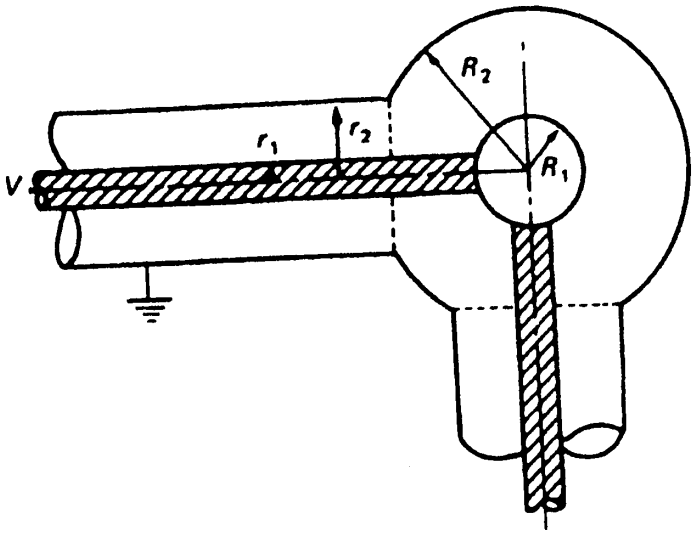
محاسبات دقیق میدان و خواصّ عایق به‌دست آورد.

کاربرد دوم: باس‌بارهای موجود در ایستگاه‌های برق گازی GIS[1] که تمام تجهیزات این ایستگاه‌ها در داخل عایق گازی SF6 قرار دارند. نمونه‌ای از این نوع، استوانه‌های هم محور هستند که استوانهٔ داخلی، هادی یا باس‌بار حامل ولتاژ شبکه است و بین آن و استوانهٔ فلزی بیرونی (که زمین شده است)، عایق گازی SF6 قرار دارد.

به‌منظور تغییر مسیر باس‌بارها در ایستگاه‌های برق GIS نیاز به یک زانو می‌باشد، این زانو مطابق شکل (۲-۴۲)، به‌وسیلهٔ اتّصال یک جفت کرهٔ متّحدالمرکز به استوانهٔ هم محور انجام می‌شود تا میدان الکتریکی کنترل شود؛ در غیراین‌صورت، میدان الکتریکی بحرانی ایجاد می‌شود. بنابراین، نمی‌توان استوانه‌ها را به‌طور مستقیم با زاویهٔ °۹۰ تغییر جهت داد. هدف آن است که ابعاد این سیستم به‌طور بهینه طرّاحی شود. برای حدّاکثر شدّت میدان روی سطح استوانه داخلی داریم:

$$E_{max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

برای این‌که E_{max} روی سطح استوانهٔ داخلی، از مقدار میدان شروع شکست E_b



شکل (۲-۴۲): اتّصال دو استوانه در موقعیّت خم

1- Gas Insulation Substation

زیادتر نشود، باید E_{max}، حدّاکثر به E_b برسد. اکنون ولتاژ قابل اعمال به هادی استوانهٔ داخلی برابر است با:

$$V = E_b r_1 \ln\frac{r_2}{r_1}$$

برای یک نسبتی از مقدار $\frac{r_2}{r_1}$، مقدار E_{max} روی سطح استوانهٔ داخلی، کم‌ترین مقدار خود را دارد و از این‌رو، می‌توان در این حالت، بیشترین اختلاف ولتاژ را بین دو استوانه اعمال نمود. یعنی بهترین استفاده از یک حجم معیّن عایق، صورت می‌گیرد. این مقدار را $(\frac{r_2}{r_1})_{opt.}$ می‌گویند.

برای محاسبهٔ $(\frac{r_2}{r_1})_{opt.}$، شعاع استوانهٔ خارجی r_2 را ثابت در نظر می‌گیریم. سپس تغییرات V را نسبت به r_1 در نظر گرفته، از آن نسبت به r_1 مشتق‌گیری و مساوی صفر قرار می‌دهیم، تا نسبت $(\frac{r_2}{r_1})_{opt.}$ پیدا شود.

$$\frac{dV}{dr_1} = E_b \ln\frac{r_2}{r_1} - E_b = 0$$

$$\left(\frac{r_2}{r_1}\right)_{opt.\,cyl} = e \qquad (۹۳-۲)$$

در این حالت،

$$r_2 \approx 2/72\, r_1$$

و در نتیجه،

$$E_b = \frac{V_b}{r_1 \ln\frac{r_2}{r_1}} = \frac{V_b}{r_1}$$

$$(V_b)_{opt.\,cyl} = r_1 E_b \qquad (۹۴-۲)$$

که $(V_b)_{opt.}$ بیشترین ولتاژ اعمالی با $E_{max}=E_b$ است.

این نسبت برای طرّاحی ابعاد کابل‌های فشار قوی یا باس‌بارهای کواکسیال با گاز SF6 خیلی مهم است. در این حالت، حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی روی سطح استوانهٔ داخلی به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. در طرّاحی کابل‌ها نیز نسبت $\frac{r_2}{r_1}$ را حدود ۲/۵ انتخاب می‌کنند تا E_{max} کم‌ترین مقدار خود را داشته باشد. در این حالت، درجهٔ غیر

یکنواختی دو استوانهٔ هم محور از یکدیگر، با فاصلهٔ $r_۲-r_۱$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{cyl} = \frac{(r_۲ - r_۱)}{r_۱ \ln\frac{r_۲}{r_۱}} \qquad (۹۵-۲)$$

حال اگر $\ln\frac{r_۲}{r_۱}=۱$ باشد، آن‌گاه $K_{cyl}=۱/۷۲$ خواهد شد که معرّف یک میدان غیر یکنواخت ضعیف است.

بالاترین ولتاژ شکست کامل گاز نیز عملاً در حوالی $(\frac{r_۲}{r_۱})_{opt.}$ اتّفاق می‌افتد، که با آزمایش معلوم می‌گردد.

پارامتر دیگری به‌نام ضریب بازده میدان η برای درجه‌بندی غیریکنواختی میدان‌های غیریکنواخت داریم که معمولاً بر حسب درصد بیان می‌شود. این ضریب، مشخّص کننده میزان استفادهٔ مؤثّر از یک میدان الکتریکی غیر یکنواخت را مشخّص می‌کند و مقدار آن، عکس درجهٔ غیر یکنواختی است:

$$\eta = \frac{۱}{K} \qquad (۹۶-۲)$$

در مورد استوانه‌های متّحدالمحور در حالت بهینه، پارامتر مذکور برابر است:

$$\eta_{opt.\ cyl} = \frac{۱}{۱/۷۲} = ۰/۵۸۸$$

در این حالت، ضریب استفاده از میدان ۵۸٪ است که مقدار نسبتاً خوبی می‌باشد.

برای کره‌های متّحدالمرکز نیز به‌همین ترتیب داریم:

$$E_{max} = \frac{V}{R_۱(۱ - R_۱/R_۲)}$$

$$V = E_{max} R_۱ \left(۱ - \frac{R_۱}{R_۲}\right)$$

با $R_۲$ ثابت داریم:

$$\frac{dV}{dR_۱} = ۰ \Rightarrow E_{max}\left(۱ - \frac{R_۱}{R_۲}\right) - \frac{۱}{R_۲} E_{max} R_۱ = ۰$$

بنابراین:

$$\left(\frac{R_۲}{R_۱}\right)_{opt.\ sph} = ۲ \qquad (۹۷-۲)$$

در نتیجه،

$$(V_b)_{opt.\,sph} = E_b \frac{R_۱}{۲} \qquad (۹۸-۲)$$

درجهٔ غیر یکنواختی در دو کرهٔ متّحدالمرکز به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$K_{sph} = \frac{(R_۲ - R_۱)}{R_۱\left(۱ - \frac{R_۲}{R_۱}\right)} = \frac{R_۲}{R_۱} \qquad (۹۹-۲)$$

در طراحی بهینه، $K_{sph}=۲$ بوده، که معرّف میدان غیر یکنواخت ضعیف است و ضریب استفاده از میدان هم $\eta=\frac{۱}{۲}=٪۵۰$ است.

نتیجه نهایی، اینکه در طراحی بهینه، باس‌بارهای ایستگاه‌های برق GIS ، باید شرایط زیر حاکم باشد:

$$r_۲ = e\, r_۱ \quad , \quad R_۲ = R_۱ \qquad (۱۰۰-۲)$$

همچنین برای برابر شدن شدّت میدان روی سطح استوانهٔ داخلی با سطح کرهٔ داخلی داشتیم:

$$\frac{R_۱}{r_۱} = \frac{\ln\left(\frac{r_۲}{r_۱}\right)}{(۱ - R_۱/R_۲)} \Rightarrow \frac{R_۱}{r_۱} = ۲$$

در نهایت به‌طور خلاصه می‌توان نوشت:

$$R_۲=۲R_۱ \Rightarrow R_۲=۴r_۱ \Rightarrow R_۲=\frac{۴}{e}r_۲ \Rightarrow R_۲\cong ۱/۴۷r_۲ \qquad (۱۰۱-۲)$$

در نتیجه فاصلهٔ بین استوانه‌ها و فاصلهٔ بین کره‌ها برابر است با:

$$R_۲ - R_۱ = ۲r_۱ \qquad (۱۰۲-۲)$$

$$r_۲ - r_۱ \cong ۱/۷۲r_۱ \qquad (۱۰۳-۲)$$

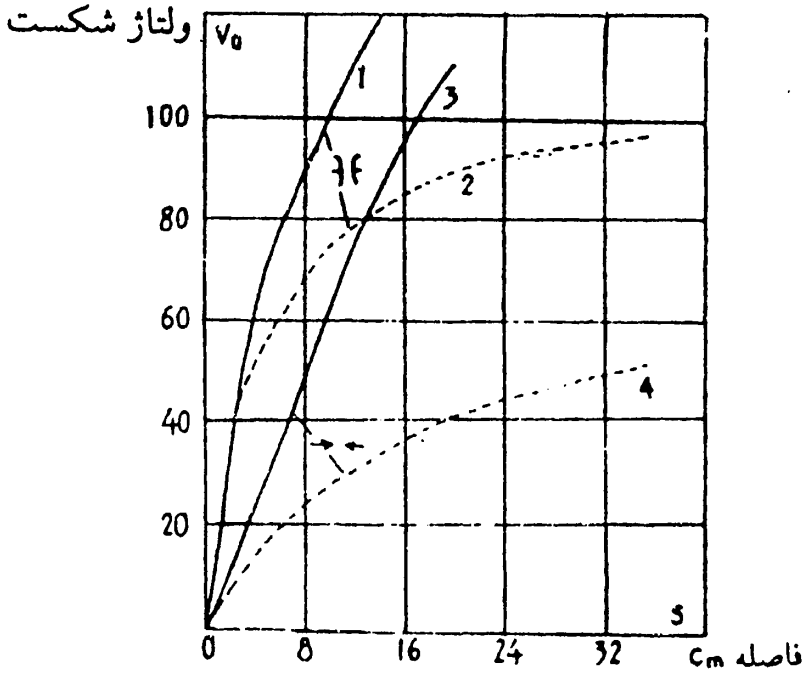
این شرایط در عمل هم کاملاً مشهود است که قطر کرهٔ بیرونی، خیلی بزرگ‌تر از شعاع استوانهٔ بیرونی نیست؛ ولی فاصلهٔ بین دو کرهٔ متّحدالمرکز $(R_۲ - R_۱)$، بزرگ‌تر از فاصلهٔ بین دو استوانهٔ هم محور است؛ زیرا غیر یکنواختی بیشتری در توزیع میدان بین کره‌ها نسبت به استوانه‌ها وجود دارد. به‌همین دلیل، حجم عایق‌کاری در فضای بین دو کره، بیشتر از فضای بین دو استوانه خواهد بود.

۲-۹- 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



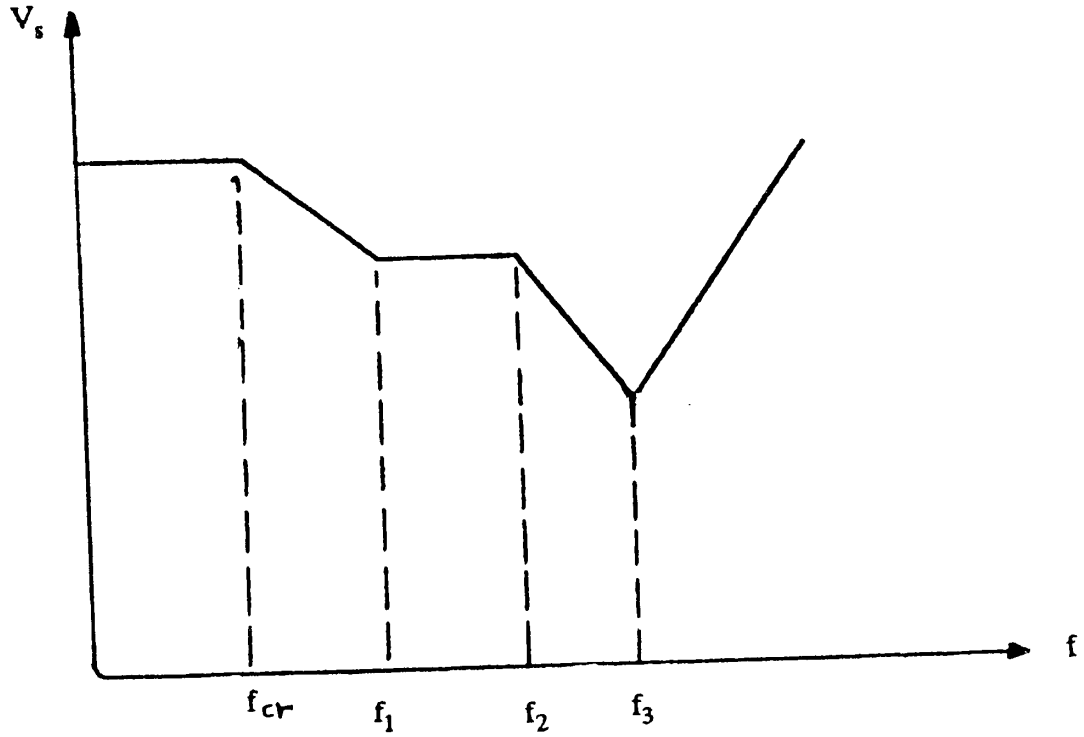
شکل (۲-۴۳): تأثیر غیریکنواختی میدان و فرکانس بر ولتاژ شکست؛
منحنی‌های پیوسته با فرکانس ۵۰Hz و منحنی‌های خط‌چین با فرکانس ۵۰۰kHz

منحنی‌های شمارهٔ ۳ و ۴ برای الکترودهای سوزن - سوزن می‌باشد. منحنی‌های با خطّ پیوسته برای فرکانس ۵۰Hz و منحنی‌های خط‌چین برای فرکانس ۵۰۰kHz است.

۲-۱۰- 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

فصل سوّم

عایق‌های مایع

۳-۱- مقدّمه

دانش مربوط به تخلیهٔ الکتریکی در عایق‌های مایع نسبت به عایق‌های گازی و حتّی عایق‌های جامد پیشرفت خیلی کم‌تری داشته است. در سال‌های اخیر، مایعات را از برخی جنبه‌ها مورد پژوهش قرار داده‌اند، ولی هنوز یک نظریهٔ جامع قابل قبول برای تخلیهٔ الکتریکی مایعات شناخته نشده است. بنابراین، به دلیل این‌که اطّلاعات به‌دست آمده، متنوّع و در برخی موارد با هم متناقض هستند، چنین یافته‌هایی نمی‌توانند منجر به دستیابی یک نتیجه‌گیری کلّی قابل قبول برای عایق‌های مایع شوند. عایق‌های مایع در کابل‌ها، خازن‌های فشار قوی، ترانسفورماتورها، کلیدهای قدرت و سرکابل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر آن، کار انتقال حرارت را در ترانسفورماتورها و خاموش کردن قوس الکتریکی در کلیدهای قدرت بر عهده دارند. روغن‌های معدنی و یا خام، معمولی‌ترین استفاده را به‌عنوان عایق مایع دارند. هیدروکربن‌های مصنوعی و هیدروکربن‌های هالوژن‌دار هم می‌توانند در بعضی از دستگاه‌ها به‌عنوان عایق مورد استفاده قرار گیرند (مانند روغن‌های سیلیکونی، هیدروکربن‌های فلوئور و ...). بعضی از روغن‌های گیاهی[۱] و استرها[۲] هم در حدّ

1- *Vegetable Oils*

2- *Esters*

کم‌تری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های مهمّ الکتریکی عایق‌های مایع عبارتند از:

الف) هدایت الکتریکی،

ب) قدرت دی الکتریکی (استقامت الکتریکی)،

ج) عدد عایقی.

هدایت الکتریکی عایق‌ها از $10^{-16}\ \frac{1}{\Omega}\text{-cm}$ تا $10^{-13}\ \frac{1}{\Omega}\text{-cm}$ تغییر می‌کند و قدرت عایقی در حدود ۳۰kV/cm تا ۵۰kV/cm و عدد عایقی تقریباً ۲/۲ تا ۵ است. دیگر ویژگی‌های مهمّ فیزیکی عبارتند از: چسبندگی و استحکام گرمایی. علاوه بر این خصوصیات، غیر اشتعال بودن و گرمای نهان تبخیر برای افت گرمایی نیز، در نظر گرفته می‌شود.

عایق‌های مایع مانند عایق‌های گازی می‌توانند به راحتی جاری شوند و فضاهای خالی کوچک را به‌راحتی پر کنند. همچنین در صورت بروز شکست الکتریکی در عایق‌های مایع، مجدّداً با کاهش میدان الکتریکی، خاصیت عایقی خود را به‌دست می‌آورند.

اصولاً تاکنون دو دسته نظریه در مورد تخلیهٔ الکتریکی عایق‌های مایع ارائه شده است. یک دسته نظریه‌هایی است که شکست الکتریکی عایق‌های مایع را بر اساس همان مدل شکست الکتریکی گازها، یعنی یونیزاسیون اتم‌ها بر مبنای برخورد الکترون‌ها به آن‌ها در یک میدان الکتریکی (نظریهٔ شکست الکترونی)، بیان می‌کنند. طبق این نظریه، الکترون از سطح کاتد در اثر اعمال میدان الکتریکی یا در اثر حرارت، آزاد می‌شود. این نوع نحوهٔ شکست، فقط وقتی قابل قبول است که مایع کاملاً خالص باشد؛ ولی عملاً چون عایق‌های مایع دارای مقدار زیادی ناخالصی می‌باشند، از این‌رو، ولتاژ شکست مایعات به دلیل وجود ذرّات ناخالصی در آن، خیلی کم‌تر از ولتاژ شکست یک عایق مایع خالص می‌باشد. دسته دوم نظریه‌های تخلیهٔ الکتریکی عایق‌های مایع، شکست الکتریکی مایعات را بر اساس همین ناخالصی‌ها توجیه می‌کنند. این ذرّات ناخالص شامل حباب‌های گازی، قطرات مایع دیگر (نظیر قطرات

آب) و ذرّات جامد غوطه‌ور در عایق مایع هستند که ولتاژ شکست عایق را پایین می‌آورند. تنها عایق مایعی که به‌طور وسیع مورد مطالعه و استفاده قرار می‌گیرد، روغن‌های عایقی هستند که در صورت خالص بودن کامل، استقامت الکتریکی آن‌ها بیش از ۱MV/cm خواهد بود. عمده‌ترین خواصّ الکتریکی که تعیین کنندهٔ یک مایع به‌عنوان عایق است، عبارتند از: استقامت الکتریکی بالا، ظرفیت الکتریکی بالا، ضریب تلفات عایقی کوچک و مقاومت مخصوص بالا.

روغنی که از تصفیهٔ نفت خام به‌دست می‌آید، مخلوطی از هیدروکروبن‌های مختلف است و نفوذپذیری الکتریکی نسبی آن‌ها بین ۲ تا ۲/۵ است. همچنین مقاومت مخصوص عایق‌های مایع باید بزرگ‌تر از $۱۰^{۹}\Omega.m$ باشد. با این تعریف، آب مقطر هم یک عایق مایع است؛ ولی این مایع را در سیستم‌های فشار قوی نمی‌توان استفاده نمود و در این سیستم‌ها باید از عایق‌های روغن با مقاومت مخصوص بیشتر از $۱۰^{۱۶}\Omega.m$ بهره جست.

۳-۲- عایق‌های مایع خالص و تجاری

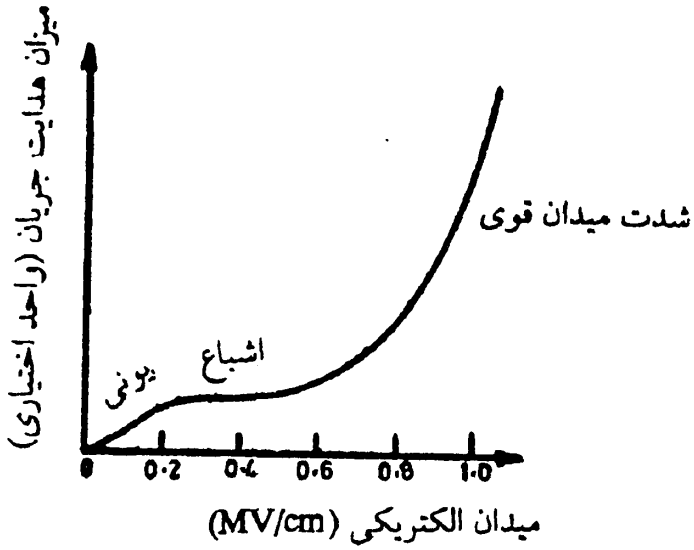
عایق‌های مایع بسته به درجهٔ خلوص آن‌ها، به دو دسته عایق‌های مایع خالص و تجاری تقسیم می‌شوند. روغن‌های خالص دارای درجه خلوص شیمیایی هستند. نسبت ناخالصی آن‌ها کم‌تر از ۱ در $۱۰^{۹}$ است و دارای ساختمان ساده‌ای می‌باشند. n-هگزان ($C_۶H_{۱۴}$) و n هپتان ($C_۷H_{۱۶}$) و هیدروکربن‌های پارافین را می‌توان از این دسته نام برد. بررسی جداگانهٔ عوامل مؤثّر بر هدایت و شکست الکتریکی مایعات با استفاده از عایق‌های مایع ساده و خالص آسان‌تر است. از طرف دیگر، عایق‌های مایع تجاری مانند روغن‌ها، از نظر شیمیایی خالص نیستند و از مخلوطی از مولکول‌های ارگانیک پیچیده (که مشخّص کردن یا تولید مجدّد آن‌ها با آزمایش‌های ساده امکان‌پذیر نیست)، تشکیل می‌شوند. حدّاکثر ولتاژ شکست چند مایع خالص در جدول (۳-۱) آمده است. عایق مایع الکتریکی به لحاظ داشتن خواصّ الکتریکی مورد نیاز، از نوع عایق تجاری است و از ترکیب روغن حاصل از نفت با موادّ افزودنی مخصوص به‌دست می‌آید.

جدول (۳-۱) : ولتاژ شکست چند عایق مایع خالص

نوع مایع	قدرت شکست حداکثر در چند عایق (MV/cm)
هگزان	۱/۱ - ۱/۳
بنزن	۱/۱
روغن ترانسفورماتور	۱/۰
سیلیکون	۱/۰ - ۱/۲
اکسیژن مایع	۲/۴
نیتروژن مایع	۱/۶ - ۱/۹
هیدروژن مایع	۱/۰
هلیوم مایع	۰/۷
آرگون مایع	۱/۱۰ - ۱/۴۲

۳-۳- نظریهٔ شکست الکترونی

وقتی الکترونی به درون مایع تزریق می‌شود، از میدان الکتریکی اعمالی انرژی می‌گیرد. در نظریهٔ شکست الکترونی، این‌گونه فرض می‌شود که برخی الکترون‌ها، میزان انرژی دریافتی از میدانشان، بیشتر از انرژیی است که در برخورد با مولکول‌ها از دست می‌دهند. اصولاً این نوع مکانیزم شکست برای مایع‌های خالص قابل توجیه است؛ امّا برای عایق‌های مایع تجاری، قابل استفاده نیست. مطالعات هدایت در مایعات با درجهٔ خلوص بالا نشان می‌دهد که در میدان‌های ضعیف، هدایت الکتریکی، بیشتر از نوع یونی و به‌صورت جابه‌جایی ناخالصی‌ها است که با افزایش شدّت میدان، به‌طور خطّی افزایش می‌یابد. با افزایش میدان، این جریان هدایتی به اشباع می‌رسد. در میدان‌های قوی که به شکست الکتریکی می‌انجامد، میزان هدایت سریع‌تر افزایش می‌یابد که تمایل به ناپایداری دارد. اعتقاد بر این است که این افزایش جریان ناشی از کلّ انتشار الکترون در کاتد (توسّط یک یا هر دو مکانیسم فوق یعنی انتشار حرارتی و انتشار بر اثر شدّت میدان قوی) است. شکل (۳-۱) سه مرحلهٔ مختلف هدایت عایق‌های مایع را در میدان الکتریکی نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱): مراحل مختلف هدایت عایق‌های مایع

در میدان‌های خیلی ضعیف، جریان از جابه‌جایی یون‌ها ایجاد می‌شود. در میدان‌های متوسّط، این جریان به اشباع می‌رسد. در میدان‌های قوی، جریان مذکور بر اثر انتشار الکترون‌ها از کاتد و انجام فرآیندی شبیه به یونیزاسیون اوّلیه و ثانویّه تانزند تا اندازه‌ای افزایش می‌یابد تا به شکست عایق بیانجامد. ولتاژ شکست به شدّت میدان، فاصلهٔ الکترودها، جنس کاتد و درجهٔ حرارت کاتد بستگی دارد. به‌علاوه لزجی، درجه حرارت، چگالی و ساختار مولکولی عایق مایع هم در ولتاژ شکست آن مؤثّر است.

به‌طور کلّی در عایق‌های مایع، شکست الکتریکی ناشی از انتشار الکترون توسّط کاتد را (خواه بر اثر میدان قوی و یا بر اثر حرارت)، "شکست الکترونی" می‌گویند. شرط لازم برای تشکیل بهمن الکترونی این است که انرژیی که یک الکترون در طی میانگین فاصلهٔ آزاد به‌دست می‌آورد، با انرژی لازم برای یونیزاسیون مولکول عایق مایع مساوی و یا بزرگ‌تر از آن باشد. یعنی:

$$eE\lambda \geq W \qquad (۱-۳)$$

در این رابطه، E شدّت میدان الکتریکی اعمال شده، λ میانگین طول فاصلهٔ آزاد، e بار الکتریکی یک الکترون و W انرژی لازم برای یونیزه شدن مولکول است.

۳-۴- مکانیزم شکست در اثر ذرّات ناخالص جامد

ناخالصی‌های جامد موجود در عایق‌های مایع تجاری، ممکن است به‌شکل رشته‌ها یا ذرّات جامد معلّق ریز نظیر براده‌های آهن ظاهر شوند. الیاف‌ها در روغن از صافی‌هایی که از جنس کنف یا الیاف‌های مصنوعی هستند، ایجاد می‌شوند که از این صافی‌ها برای جدا کردن ناخالصی‌ها استفاده می‌شود. این الیاف‌ها و ذرّات جامد می‌توانند استقامت الکتریکی روغن را کاهش دهند؛ مخصوصاً اگر مرطوب هم باشند.

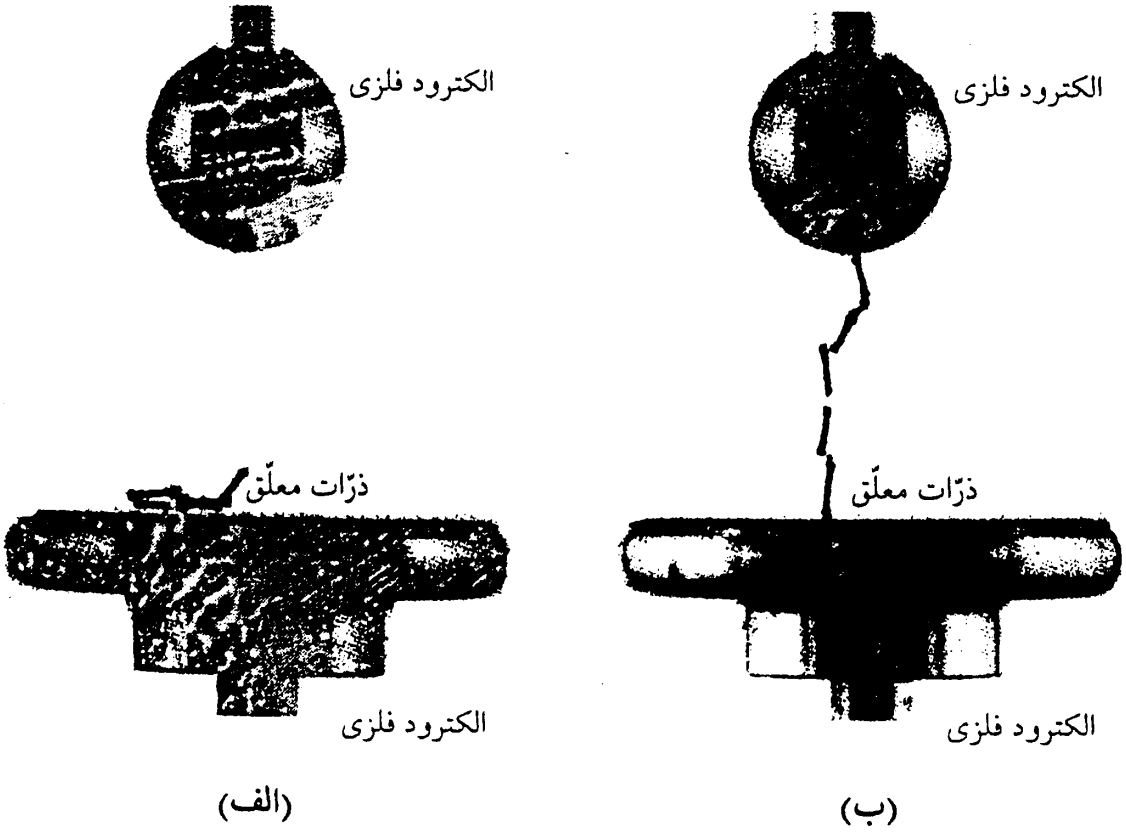
در طی یک آزمایش در یک ظرف روغن، دو الکترود به‌صورت میلهٔ نوک تیز-صفحه، یا کره-صفحه طبق شکل (۳-۲) قرار داده و الکترودها را به منبع ولتاژ متّصل می‌کنیم. اگر داخل ظرف روغن، چند تکّه نخ بیندازیم و ولتاژ منبع را به‌تدریج بالا ببریم، تکه‌های نخ (بر اثر نیروی اعمالی از میدان الکتریکی)، خود را به الکترودها رسانده، در جهت میدان الکتریکی قرار می‌گیرند. در حقیقت، از طرف میدان الکتریکی داخل عایق به این نخ‌های معلّق در روغن نیرویی وارد می‌شود و آن‌ها را به طرف نقاط با شدّت میدان بیشتر (الکترود کروی شکل)، جذب می‌کنند. به این ترتیب، تکّه نخ‌ها دنبال هم قرار گرفته، یک پل زنجیره‌ای را بین دو الکترود تشکیل می‌دهند. این موضوع در شکل (۳-۲) به وضوح مشخّص است.

اگر این نخ‌ها کمی مرطوب باشند، در اتصّال به الکترودها و به یکدیگر، جرقه‌های ریزی مشاهده می‌شود که باعث تخلیهٔ الکتریکی عایق و برقراری جریان در آن می‌شوند.

اکنون فرض کنید که ضریب نفوذپذیری این ذرّات ناخالصی (ε_2) با ضریب نفوذپذیری عایق مایع (ε_1)، متفاوت باشد. اگر این ناخالصی‌ها را ذرّات کروی با شعاع r فرض کنیم، آنگاه در شدّت میدان الکتریکی E نیروی F_e به ذرّات وارد می‌شود که عبارت است از:

$$F_e = \frac{1}{2} r^3 \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \text{ grad } E^2 \qquad (۳-۲)$$

اگر $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ باشد (مثلاً اگر ذرّات جامد الیاف‌های کاغذ در روغن باشند) این نیرو در جهت ناحیه با حدّاکثر شدّت میدان است و اگر ذرّات ناخالصی از جنس



شکل (۳-۲): اثر ذرّات معلّق در عایق روغن و به‌وجود آمدن پل؛
الف) قبل از وصل ولتاژ؛ ب) بعد از وصل ولتاژ

حباب‌های گاز باشند ($\varepsilon_2 < \varepsilon_1$)، در آن‌صورت، نیرو در جهت ناحیه‌ای است که کم‌ترین شدّت میدان را دارد. با افزایش ضریب نفوذ ذرّات معلّق (ε_2)، نیرو افزایش می‌یابد و برای ذرّات هادی با $\varepsilon_2 \to \infty$ نیرو عبارت است از:

$$F_e = F_\infty = \frac{1}{2} r^3 \operatorname{grad} E^2 \qquad (۳-۳)$$

وجود ذرّات فلزی بین الکترودها، میدان موضعی اطراف ذرّه را تا حدود ۳ برابر افزایش می‌دهند که ممکن است برای شروع تخلیهٔ الکتریکی کافی باشد. در ولتاژ DC و یا در ولتاژهای AC با فرکانس‌های کم، این نیرو باعث می‌شود تا ذرّات به سمت ناحیهٔ حدّاکثر شدّت میدان رانده شوند. در میدان‌های همگن هم، این نواحی بر اثر نامنظّمی‌های سطح الکترودها وجود دارند. از آنجا که این ذرّات پلاریزه می‌شوند و در راستای میدان قرار می‌گیرند، بنابراین، در صورتی‌که تعداد این ذرّات زیاد باشد، به دنبال یکدیگر قرار می‌گیرند و زنجیره‌ای بین دو الکترود ایجاد می‌کنند.

جریانی که در طول چنین زنجیره‌ای ایجاد می‌شود، حرارت موضعی را افزایش می‌دهد و از آنجاکه ضریب نفوذپذیری الکتریکی آب در مقایسه با روغن بسیار زیاد است، نیروی F بر ذرّات آب و یا ذرّات مرطوب، زیاد خواهد بود. بنابراین، وجود چنین ذرّاتی ولتاژ شکست را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. برای جلوگیری از این حادثه، می‌توان از موادّ جاذب رطوبت هوا مانند سلیکاژل[۱] در مسیر ارتباط روغن با هوا استفاده کرد. سلیکاژل در ابتدا آبی رنگ و پس از جذب رطوبت صورتی و یا بنفش رنگ می‌شود که باید آن را تعویض کرد و هر چند وقت یک بار با تصفیهٔ روغن، ذرّات معلّق آن را جدا ساخت.

اغلب موارد، همراه با عایق مایع، عایق جامدی، نظیر کاغذ نیز به‌کار برده می‌شود. از این کاغذهای جامد، به‌تدریج و به مرور زمان، ذرّات معلّق جدا شده، در عایق مایع غوطه‌ور می‌شوند. رطوبت هم معمولاً به‌دلایل مختلف از خارج وارد محفظهٔ عایق مایع می‌شود و یا از قبل در عایق وجود داشته است. همچنین ممکن است رطوبت به مرور زمان در اثر اکسیداسیون به‌وجود آید (در اثر تجزیهٔ روغن در اثر گرما و جرقه، هیدروژن به‌وجود می‌آید و با اکسیژنِ حل شده در مایع، ترکیب شده و H_2O تولید می‌شود). بنابراین، عملاً نمی‌توان به‌طور کامل از وجود ذرّات معلّق در عایق‌های مایع جلوگیری کرد؛ ولی باید تا حدّ امکان از حضور ذرّات معلّق و مرطوب در آن‌ها جلوگیری نمود. مثلاً باید قبل از پر کردن دستگاه با روغن، عایق‌های کاغذی را با درجه حرارت‌های بالا (در حدود ۱۰۰ درجه) و با خلاء، کاملاً خشک نمود تا رطوبت کاملاً از آن بیرون آید. سپس با وجود خلاء، دستگاه را با روغن پر کرد و برای جلوگیری از جذب رطوبت هوا به‌وسیلهٔ روغن دستگاه، از موادّ جاذب رطوبت هوا نظیر سلیکاژل در مسیر ارتباط روغن با هوا استفاده نمود.

۳-۵- مکانیزم شکست در اثر حباب‌های ناخالص گازی

در عایق‌های مایع همانند عایق‌های گازی، ممکن است اطراف الکترودهای نوک تیز، تخلیهٔ ناقص ایجاد شود که این موضوع باعث گرم شدن روغن، تجزیهٔ روغن و در

1- *Silicagel*

نتیجه به‌وجود آمدن حباب‌های گازی در روغن می‌شود. این حباب‌های گازی (البتّه تعدادی از آن‌ها)، ممکن است در روغن حل شوند و تعدادی از آن‌ها ممکن است در داخل روغن غوطه‌ور گردند. همچنین حفره‌های گازی ممکن است روی شیارهای ناصاف بر سطح کاتد به‌وجود آیند و یا در اثر تغییر درجه حرارت و فشار گاز و یا به‌هم‌زدن روغن، حباب‌های گازی در آن به‌وجود آیند. همچنین به‌علّت آن‌که روی ناهمواری‌های سطح الکترودها، دانسیته جریان زیادتر می‌باشد، از این‌رو، مایع اطراف آن بخار شده و حباب‌های گازی تشکیل می‌شود.

شدّت میدان الکتریکی در داخل حباب‌های گازی کروی شکل، با عدد مطلق دی الکتریک ۱ برابر است با:

$$E = \frac{۳\varepsilon_۱}{۲\varepsilon_۱ + ۱} E_۰ \qquad (۴-۳)$$

که در این رابطه،

$\varepsilon_۱$ = عدد مطلق دی الکتریک روغن،

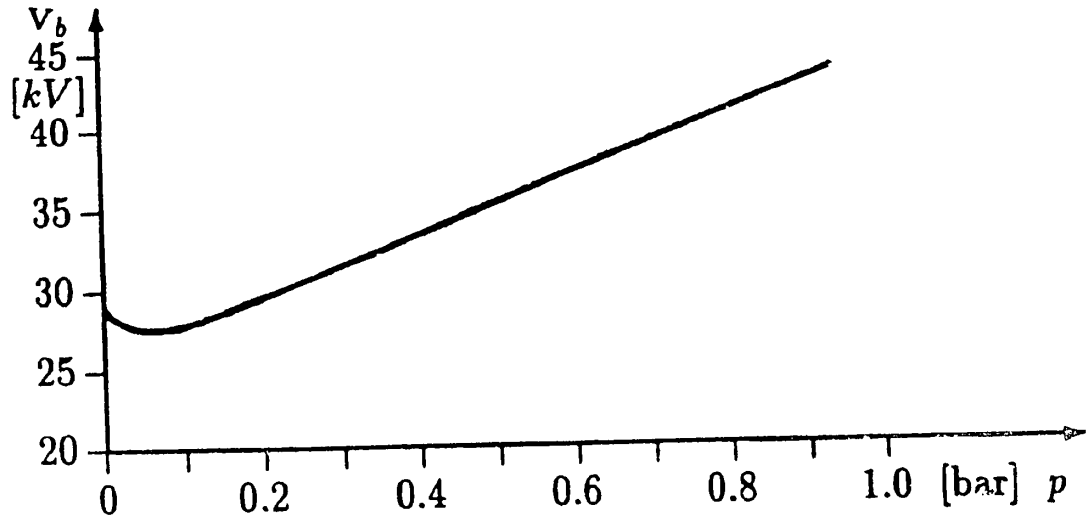
$E_۰$ = شدّت میدان الکتریکی داخل عایق مایع قبل از تشکیل حباب‌ها است.

هنگامی‌که این شدّت میدان الکتریکی، از شدّت میدان الکتریکی شکست حباب‌های گاز بیشتر باشد، شکست گاز داخل حفره‌ها رخ می‌دهد (معمولاً این شدّت میدان از شدّت میدان الکتریکی داخل عایق مایع بیشتر است و از طرفی استقامت الکتریکی حفره‌های گازی، خیلی کم‌تر از استقامت الکتریکی روغن است). گرمای ایجاد شده در اثر بروز جرقه و شکست الکتریکی در این حفره‌های گازی، باعث تبخیر مایع اطراف آن‌ها و در نتیجه، تشکیل حباب‌های گازی بیشتر شده و در نهایت، موجب تشکیل پل بین الکترودها و تخلیهٔ الکتریکی کامل عایق مایع می‌شود. پس از تشکیل حباب، بر اثر نیروهای الکترواستاتیکی، حباب‌ها در امتداد میدان کشیده می‌شوند و در عین حال حجم حباب ثابت می‌ماند. کشیدگی حباب در طول میدان، باعث قرار گرفتن ولتاژ بیشتری در دو سر آن می‌شود. وقتی شدّت میدان حباب به E و یا ولتاژ دو سر حباب به ولتاژ شکست گاز برسد، شکست الکتریکی در آن رخ می‌دهد. رابطهٔ تجربی زیر برای شدّت میدان شکست الکتریکی

حباب، توسّط "کائو"[1] ارائه شده است :

$$E_{\circ} = \frac{1}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \left\{ \frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\left(\frac{V_b}{2rE_{\circ}}\right) - 1} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (۵-۳)$$

در این رابطه، σ تنش سطحی مایع، ε_1 و ε_2 به‌ترتیب ضریب نفوذپذیری عایق مایع و حباب، r شعاع اوّلیه حباب کروی شکل (قبل از کشیده شدن در جهت میدان) و V_b افت ولتاژ در حباب می‌باشند. رابطهٔ (۳-۵) نشان می‌دهد که شدّت میدان الکتریکی لازم برای شکست الکتریکی مایع به اندازهٔ اوّلیه حباب بستگی دارد که آن هم، متأثّر از فشار و درجه حرارت است. این نظریه، تولید حباب اوّلیه را منظور نمی‌کند و در نتیجه، با نتایج آزمایشگاهی قدری متفاوت است. همچنین رابطهٔ (۳-۵) تغییر شکل حباب را در میدان الکتریکی در نظر نمی‌گیرد؛ چون استقامت الکتریکی حباب‌های گازی به فشار آن بستگی دارد. بنابراین، استقامت الکتریکی روغن‌های عایق نیز، به فشار بستگی خواهد داشت که این موضوع در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.

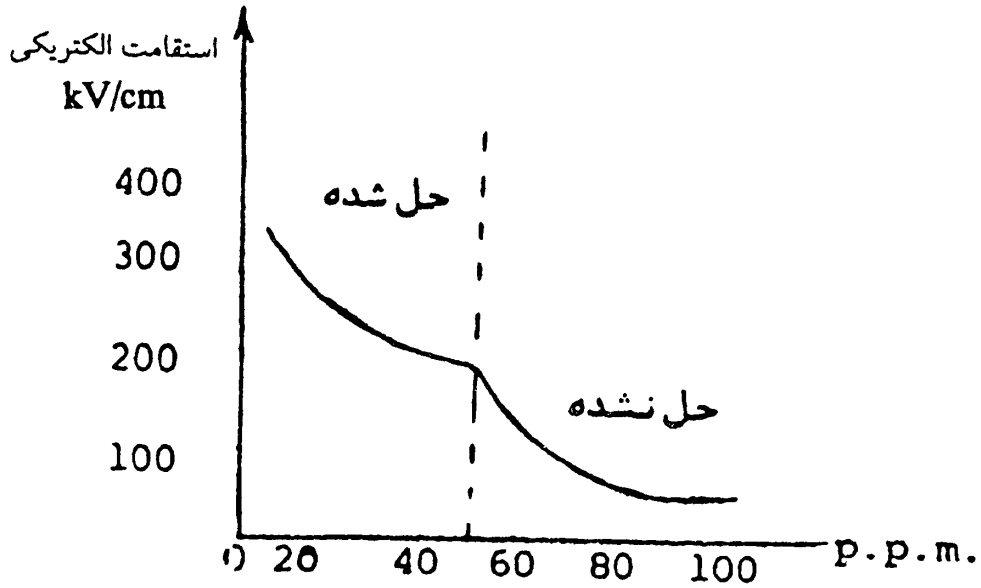


شکل (۳-۳): ولتاژ شکست عایق مایع برحسب تغییرات فشار

1- Kao

۳-۶- مکانیزم شکست در اثر ناخالصی قطرات مایع‌های دیگر

جذب رطوبت توسّط عایق مایع، استقامت الکتریکی آن را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد؛ به‌طوری که استقامت الکتریکی روغن‌ها به میزان زیادی به رطوبت آن‌ها بستگی دارد. اگر رطوبت به‌صورت محلول در روغن باشد، استقامت الکتریکی روغن کم‌تر از موقعی که به‌صورت قطرات آب شناور در روغن باشد، کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان در شکل (۳-۴) مشاهده نمود. میزان ۰/۰۱٪ آب در روغن، ۲۰٪ قدرت عایقی روغن را کاهش می‌دهد. اصولاً روغن در درجه حرارت ۲۰°C مقدار آبی که می‌تواند در آن حل شود، حدود ۸۰PPM[1] است، مقادیر بیشتر آب به‌صورت ذرّات ریز در روغن شناور و یا به‌صورت قطرات درشت، ته‌نشین می‌شوند. رطوبت موجود در ترانسفورماتور، از طریق نفس کشیدن ترانسفورماتور وارد آن می‌شود و یا از طریق اکسیداسیون روغن به‌وجود می‌آید. با استفاده از مادهٔ سلیکاژل، رطوبت هوای تنفس روغن قابل جذب است (تعویض به موقع سلیکاژل از اهمیت بالایی برخوردار است). همچنین رطوبت



شکل (۳-۴): تغییرات ولتاژ شکست روغن با درصد آب حل شده در آن

1- Part Per Million

روغن را هم می‌توان به کمک حرارت و پمپ خلاء از آن خارج کرد. رطوبت، باعث افزایش ضریب تلفات عایقی و در نتیجه، افزایش تلفات عایقی می‌شود (شکل ۳-۵ را مشاهده کنید). مقدار این تلفات عایقی (P) برابر است با:

$$P = V^{۲} c\, \omega \tan\delta \qquad (۶-۳)$$

در این رابطه، $\tan\delta$ ضریب تلفات عایقی، $\omega = ۲\pi f$، V ولتاژ اعمالی به عایق و C ظرفیت خازنی عایق مایع است. وجود قطرات مایع‌های دیگری نظیر قطرات آب در روغن، باعث می‌شود که در یک شدّت میدان الکتریکی بحرانی، این قطرات به‌صورت ناپایدار در آمده و در راستای میدان، به‌صورت کشیده در می‌آیند و باعث ایجاد یک مسیر با مقاومت کم بین الکترودها و در نهایت، موجب شکست کامل عایق مایع می‌شود. می‌توان ثابت کرد که میدان الکتریکی بحرانی ($E_{crit.}$) که در آن قطرات کروی شکل به شعاع R به حالت ناپایدار می‌رسند از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

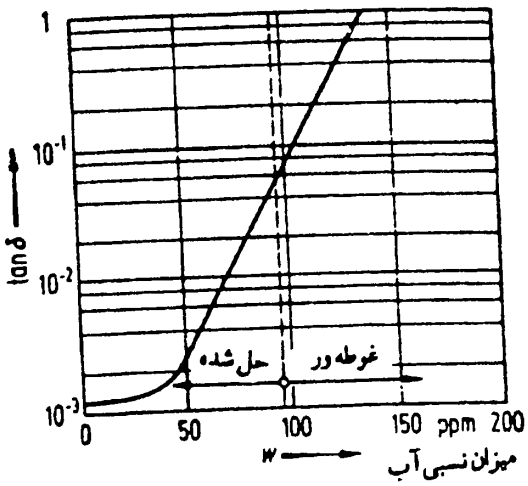
$$E_{crit.} = ۴۸۷/۷ \sqrt{\frac{\sigma}{R\varepsilon_{۱}}} \qquad \text{V/cm} \qquad (۷-۳)$$

که در این رابطه،

R = شعاع ذرّات کروی آب،

σ = کشش سطحی روغن بر حسب dyn/cm،

$\varepsilon_{۱}$ = عدد دی الکتریک روغن است.



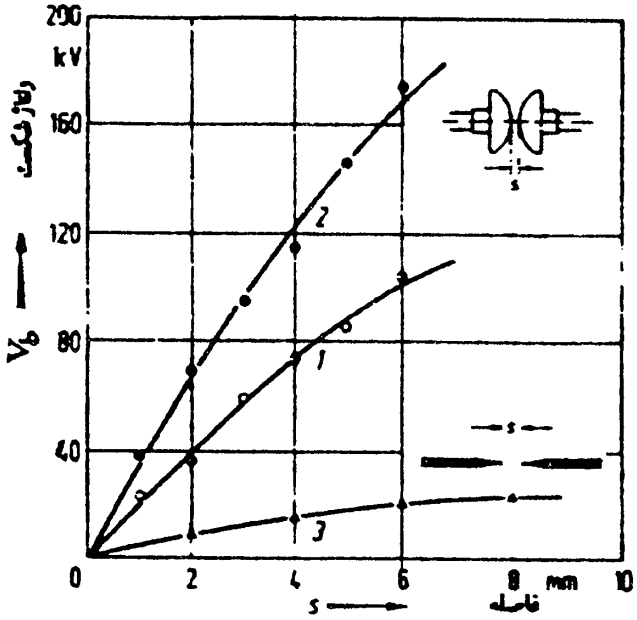
شکل (۳-۵): تغییرات ضریب تلفات عایقی با درصد رطوبت موجود در آن

۳-۷- عوامل مؤثّر بر ولتاژ شکست عایق مایع

وجود ناخالصی‌ها، منشأ شکست الکتریکی در عایق‌های مایع مورد استفاده در تجهیزات الکتریکی هستند. علاوه بر وجود رطوبت، گازهای حل شده و حل نشده در عایق مایع، و ذرّات جامد معلّق در آن نیز، باعث کاهش استقامت الکتریکی عایق‌های مایع می‌گردند. عوامل متعددی بر مقدار ولتاژ شکست عایق‌های مایع مؤثّرند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱) **جنس الکترودها:** جنس الکترودها و میزان ناهمواری سطح آن‌ها در ولتاژ شکست مؤثّرند. جنس الکترودها در انتشار الکترون از سطح کاتد مؤثّر است و ناهمواری سطح آن نیز، در زیاد شدن دانسیته جریان در نقاط نوک تیز و ایجاد حباب‌های گازی در اثر بخار شدن مایع اطراف آن مؤثّر هستند.

۲) **شکل الکترودها:** با ثابت بودن سایر عوامل، ولتاژ شکست عایق مایع به‌شکل الکترودها بستگی دارد (شکل ۳-۶ را ببینید). مثلاً ولتاژ شکست عایق مایع برای الکترودهای کروی شکل، بیشتر از الکترودهای میله‌ای نوک تیز است. هرچه میدان، غیریکنواخت‌تر باشد، ولتاژ شکست عایق مایع کم‌تر می‌شود؛ زیرا اطراف نقاط



شکل (۳-۶): ولتاژ شکست برای الکترودهای مختلف

میدان قوی، مایع گرم شده و تجزیه گشته و تولید گاز می‌کند.

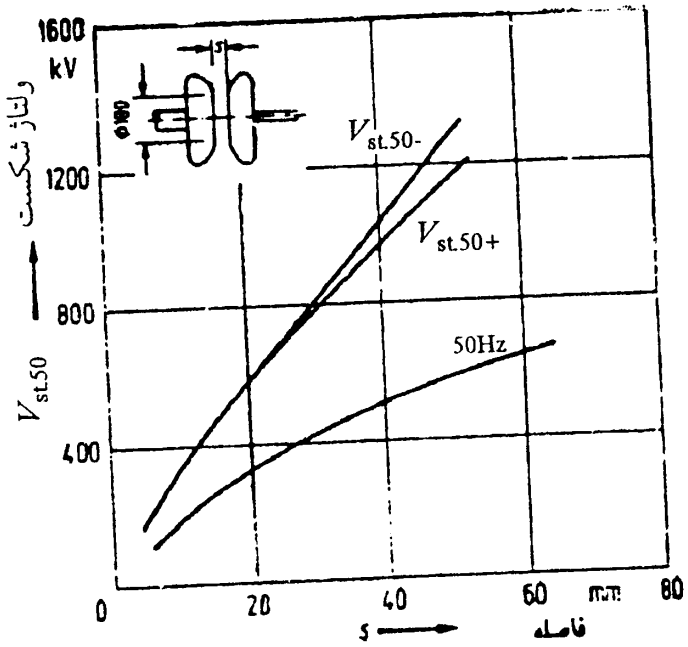
۳) فاصلهٔ بین الکترودها: با زیاد کردن فاصلهٔ بین الکترودها ولتاژ شکست به‌همان نسبت زیادتر نمی‌شود؛ بلکه ولتاژ شکست عایق مایع کم‌تر از مقدار مورد نظر است. این موضوع در رابطهٔ تجربی زیر مشخّص می‌شود:

$$V_s = A \cdot d^n \qquad (۸-۳)$$

که در این رابطه، d فاصلهٔ الکترودها، Aعدد ثابت و n عدد ثابت و کوچک‌تر از یک است. پارامترهای Aو n به شکل الکترودها و جنس آن بستگی دارند.

۴) شکل ولتاژ اعمالی به عایق: بسته به شکل ولتاژ اعمالی که آیا ولتاژ دائم یا متناوب یا ضربه‌ای باشد، ولتاژ شکست عایق متفاوت است. در شکل (۳-۷)، ولتاژ شکست روغن بین الکترودهای صفحه - صفحه برای ولتاژ متناوب ۵۰Hz و ولتاژ ضربهٔ مثبت و منفی با شکل موج ۱/۲/۵۰ میکروثانیه نشان داده شده است. در این شکل، $V_{st.50}$ دامنهٔ ولتاژ شکست با احتمال ۵۰٪ می‌باشد.

به‌طور کلّی ولتاژ شکست عایق مایع، به مدّت زمان اعمال ولتاژ بستگی دارد. اگر



شکل (۳-۷): ولتاژ شکست با اعمال ولتاژهای مختلف

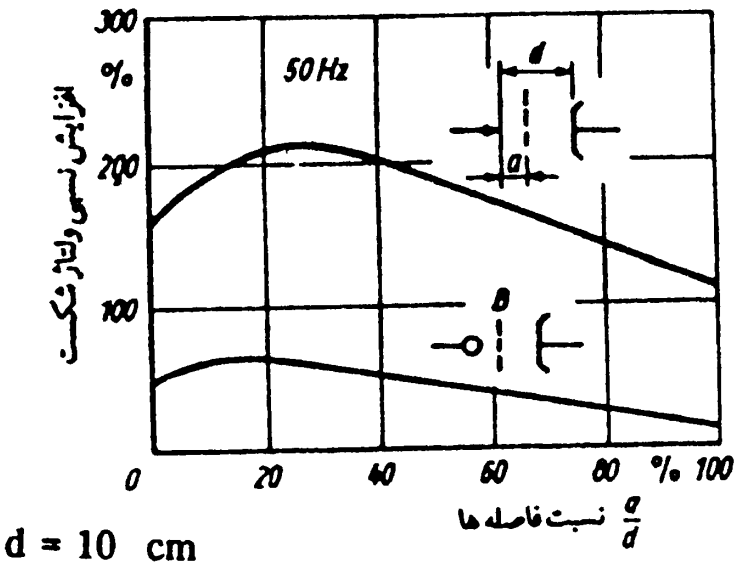
مدّت زمان اعمال ولتاژ، کوتاه مدّت باشد، استقامت الکتریکی آن بالاتر خواهد بود. بنابراین، ولتاژ شکست عایق مایع برای ولتاژهای ضربه‌ای، بیشتر از ولتاژهای متناوب با فرکانس صنعتی است. در حالت ولتاژ ضربه‌ای، زمان پیشانی و زمان نیم‌پشت موج در ولتاژ شکست عایق مؤثّر است. هر چه زمان نیم‌پشت موج بیشتر باشد، ولتاژ شکست مایع کم‌تر است. در مورد ولتاژهای ضربه‌ای با زمان خیلی کم، فرصتی برای به‌وجود آمدن پلی از ذرّات معلّق ایجاد نمی‌شود.

۵) **سرعت افزایش ولتاژ:** اگر ولتاژ را سریعاً بالا ببریم، در ولتاژ بالاتری، شکست الکتریکی واقع می‌شود؛ ولی اگر افزایش ولتاژ به‌تدریج، آهسته و با سرعت کم صورت گیرد، شکست عایق مایع در ولتاژ کم‌تری اتّفاق می‌افتد. دلیل آن هم فرصت یافتن ذرّات الیاف داخل روغن برای ساختن پل بین الکترودها و پلاریزاسیون است.

۶) **درجه حرارت روغن:** هر چه درجه حرارت روغن زیادتر شود، رطوبت آن کم‌تر می‌گردد و ولتاژ شکست آن بالاتر می‌رود. با افزایش درجه حرارت، میزان آب قابل حل در روغن بیشتر می‌شود و از این‌رو، استقامت الکتریکی آن افزایش می‌یابد (این موضوع در شکل ۳-۶ در مقایسهٔ منحنی‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است). البتّه افزایش بیش از حدّ درجه حرارت، موجب اکسیداسیون روغن و کاهش استقامت الکتریکی آن می‌شود.

۷) **پوشاندن الکترودها در کاغذ:** اگر دو الکترود در بردارندهٔ عایق مایع را در پوشش عایق‌های جامد کاغذی قرار دهیم، پل‌های تشکیل شده از ذرّات معلّق داخل مایع، به الکترودها نمی‌رسند. از طرفی چون عدد دی الکتریک کاغذ بیشتر است، از شدّت میدان الکتریکی اطراف الکترودها کاسته می‌شود. در این حالت، پوشاندن الکترودهایی که در ناحیهٔ شدّت میدان قوی‌تر هستند (مانند میلهٔ نوک تیز با شعاع خمش کم‌تر)، با کاغذ از اهمیت بیشتری برخوردار است؛ این کار باعث بالا رفتن ولتاژ شکست عایق مایع خواهد شد. هر چه ضخامت کاغذ بیشتر باشد، ولتاژ شکست بالاتر می‌رود.

۸) استفاده از ورقهٔ کاغذ نازک بین الکترودها: اگر بین دو الکترود در بردارندهٔ عایق مایع، ورقه‌های کاغذی قرار دهیم و به این ترتیب فاصلهٔ بین دو الکترود را به چند قسمت کوچک‌تر تقسیم کنیم، استقامت الکتریکی افزایش یافته و ولتاژ شکست افزایش می‌یابد. وجود این ورقه، مانع از تشکیل سریع پل‌های ناشی از ذرّات معلّق می‌شود. برای افزایش استقامت الکتریکی روغن در ولتاژهای بالا در تجهیزات الکتریکی فشار قوی، معمولاً از چندین ورقهٔ کاغذی بین الکترودها استفاده می‌شود. این ورقه‌های کاغذ باید روی سطوح هم پتانسیل قرار گیرند تا استقامت الکتریکی روغن را خیلی زیاد بالا برند. شکل (۳-۸) نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری درصد افزایش ولتاژ شکست را، در اثر قرار دادن یک ورقه کاغذ در عایق مایع نشان می‌دهد. نتایج این شکل، در حالتی است که عایق مایع، بین دو الکترود میلهٔ نوک تیز- صفحه یا دو الکترود کره- صفحه (در حالتی که ورقهٔ مذکور به فاصلهٔ a از الکترود میلهٔ نوک تیز یا الکترود کره قرار دارد)، قرار گرفته باشد. از این شکل معلوم می‌شود که در یک مقدار معیّن از نسبت $\frac{a}{d}$ لایهٔ کاغذ، بیشترین اثر را در افزایش ولتاژ شکست عایق مایع دارد. این حالت وقتی است که صفحه، انطباق نزدیکتری با سطوح هم‌پتانسیل میدان الکتریکی دارد.



شکل (۳-۸): درصد افزایش ولتاژ شکست، در اثر قرار گرفتن ورقهٔ کاغذی در عایق

به‌طور کلّی، ترکیب عایق‌های مایع با لایه‌های کاغذ، موجب افزایش استقامت الکتریکی عایق‌های مایع می‌گردد. از نظر اقتصادی نیز ترکیب عایق‌های مایع با لایه‌های کاغذی مناسب‌تر از استفاده از هر یک از عایق‌های مایع یا کاغذ به‌تنهایی است. گرچه استقامت الکتریکی کاغذ، بیشتر از عایق مایع است، ولی استفاده از آن به‌تنهایی مقرون به صرفه نیست؛ مگر آنکه فضای عایق‌کاری کم باشد. مهّم‌ترین نمونه‌های موارد کاربرد ترکیب عایق مایع روغن، با لایه‌های کاغذ در کابل‌های روغنی، بوشینگ‌ها (مقره‌های عبوری) و حتّی در داخل ترانسفورماتورها است.

۹) حجم عایق: آزمایش‌های متعدّد نشان می‌دهند که با افزایش حجم عایق مایع، استقامت الکتریکی کاهش می‌یابد.

۳-۸- خواصّ لازم برای روغن ترانسفورماتورها

بیشترین کاربرد روغن، در ترانسفورماتورهای قدرت است. روغن در این حالت، هم به‌عنوان عایق (همراه با کاغذ) برای ایزولاسیون استفاده می‌شود و هم با حرکت روغن در داخل ترانسفورماتور، عمل انتقال حرارت (ناشی از تلفات مسی و آهنی سیم‌پیچ‌ها و هسته) را به‌عهده دارد. بنابراین، روغن ترانسفورماتور باید:

۱- استقامت الکتریکی بالایی داشته باشد.

۲- ضریب تلفات عایقی آن کم و مقاومت مخصوص آن زیاد باشد.

۳- ویسکوزیته[1] آن کم باشد: برای اینکه روغن بتواند به‌راحتی حرکت کند. و در لابلای سیم‌پیچ‌ها و مسیر رادیاتورها به گردش درآید و عمل انتقال حرارت را به‌راحتی انجام دهد، لازم است غلظت روغن کم باشد. به‌عبارت دیگر، چسبندگی آن کم باشد.

۴- نقطه اشتعال آن بالا باشد. برای جلوگیری از آتش‌سوزی روغن در درجه حرارت‌های بالا، باید نقطهٔ اشتعال روغن بالا باشد. در این رابطه، نوعی از روغن‌های

1- Viscosity

نسوز ساخته شده که در آن‌ها مادّهٔ کلر وجود دارد و به‌نام "روغن‌های آسکارل"[۱] معروف است. امروزه معلوم شده است که این دسته از روغن‌های مصنوعی، سمّی و سرطان‌زا هستند و استفاده از آن‌ها در کلّیهٔ تجهیزات ممنوع شده است. به‌همین علّت، امروزه روغنی به‌نام "میدل"[۲] ساخته شده است که کیفیت مطلوبی دارد.

۵- داشتن حالت سیالی در درجه حرارت‌های پایین (نقطهٔ ریزش[۳] در دماهای خیلی پایین باشد): روغن باید حالت روانی و سیّال خود را در درجه حرارت‌های پایین حفظ کند. یعنی باید نقطهٔ انجماد آن خیلی پایین باشد؛ در غیر این‌صورت در درجه حرارت‌های پایین دچار ماسیدگی شده و مسیر لوله‌های رادیاتور را می‌بندد و عمل انتقال حرارت با مشکل مواجه می‌شود. این مسئله برای ترانسفورماتورهایی که در مناطق سردسیر قرار دارند، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۶- تولید اسید و لجن آن خیلی کم باشد: عایق روغن در درجه حرارت بالا در یک پروسهٔ شیمیایی (اکسیداسیون روغن)، به‌تدریج رنگ آن کدر می‌شود و تولید اسید و لجن می‌کند. این لجن‌ها و اسیدهای تولید شده، روی عایق‌های کاغذی قرار گرفته و موجب کاهش قدرت عایقی آن‌ها می‌شود. همچنین لجن‌های نشسته روی هستهٔ ترانسفورماتور و در مسیر رادیاتورها، کار انتقال حرارت را با مشکل مواجه می‌سازد که به‌تدریج ممکن است موجب پیری زودرس روغن شود. برای روغن‌های تازه، طبق استاندارد، عدد اسیدی نباید بیش از ۳ درصد و رسوبات و لجن‌ها نباید بیش از ۵ درصد باشد. وجود رطوبت نه تنها موجب کاهش استقامت الکتریکی روغن می‌شود، بلکه باعث اکسیداسیون بیشتر روغن و تولید اسید در آن می‌شود. وجود اسیدها باعث کاهش مقاومت الکتریکی روغن و افزایش تلفات دی‌الکتریک آن می‌شود. در ضمن باید اندازه‌گیری درجهٔ اسیدی روغن، بعد از هر چند وقت یک بار انجام شود تا در صورت نیاز، روغن تعویض شود.

شکل ظاهری روغن ترانسفورماتورها باید صاف، شفّاف و بدون موادّ معلّق یا

1- *Askarel*

2- *Middle*

3- *Pour Point*

موادّ ته‌نشین شده (رسوب) باشد. وزن مخصوص روغن در درجه حرارت ۲۰°C نباید از ۰/۹۸۵gr/cm^3 بیشتر باشد. همچنین نباید غلظت آن در ۲۰°C برای روغن‌های درجه یک و دو، به‌ترتیب از ۴۰ و ۲۵ سانتی‌استوک cs$^+$ بیشتر باشد. همچنین حدّاقل نقطهٔ اشتعال روغن‌های درجه یک، ۱۴۰°C و روغن‌های درجه دو، ۱۳۰°C است. نقطهٔ انجماد (ریزش) روغن‌های درجه یک، ۳۰°C- و روغن‌های درجه دو، ۴۵°C- است. این روغن‌ها نباید حاوی سولفورهای مخرّب باشند. به‌علاوه در درجه حرارت ۹۰°C، ضریب تلفات عایقی روغن تصفیه شدهٔ خشک تحت شدّت میدان ۵۰۰kV/mm تا ۱۰۰۰kV/mm ، نباید از ۰/۰۰۵ بیشتر باشد.

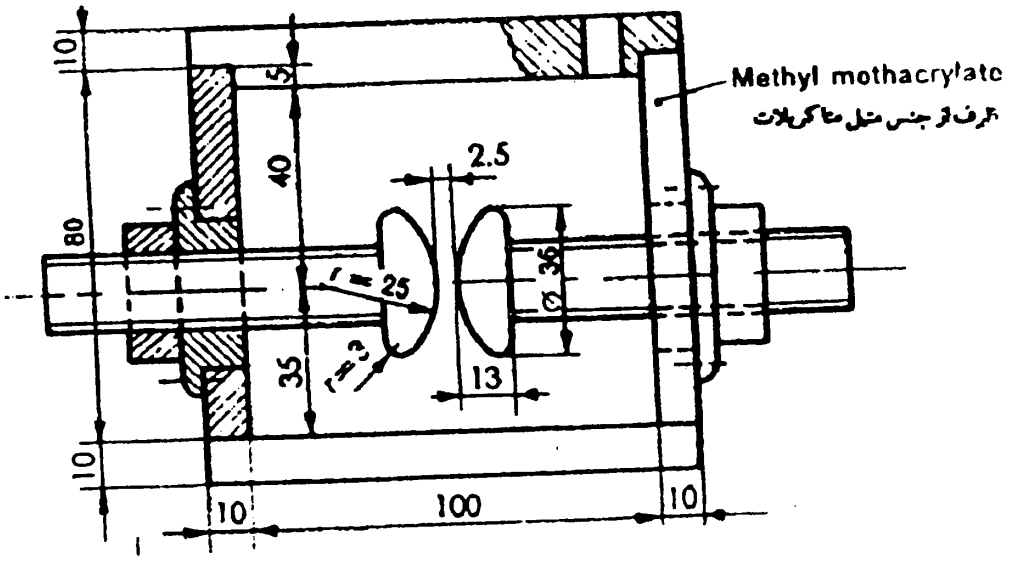
۳-۹- آزمایش روغن ترانسفورماتورها

برای جلوگیری به‌موقع از بروز خطرات و عیب‌های بزرگ در ترانسفورماتورها، باید هر سال از روغن ترانسفورماتورها نمونه‌گیری شود. با اندازه‌گیری بعضی از مشخّصات مهمّ روغن، به‌وسیلهٔ آزمایش‌های استاندارد شده در مورد ادامهٔ کار بیشتر روغن، یا به تعمیر ترانسفورماتور و یا تصفیهٔ روغن تصمیم گرفته می‌شود. مهّم‌ترین این آزمایش‌ها عبارتند از:

۱- تعیین ولتاژ شکست روغن

روغن نمونه‌برداری شده، در ظرف شیشه‌ای دستگاه مخصوص تعیین ولتاژ شکست روغن، ریخته می‌شود. این دستگاه، طبق استاندارد دارای دو الکترود قارچی شکل از جنس مس با شعاع خمش ۲۵mm است که به فاصلهٔ ۲/۵mm از یکدیگر قرار گرفته‌اند. این دو الکترود، به یک منبع ولتاژ متغیّر متناوب با فرکانس صنعتی متّصل شده‌اند. روغن نمونه باید به‌اندازه‌ای باشد که حدّاقل ۱۰mm از سطح الکترودها، از روغن پر شده باشد. محفظهٔ روغن این دستگاه در شکل (۳-۹) نشان داده شده است.

در این آزمایش، ولتاژ منبع با سرعت ۲kV/sec به‌وسیلهٔ یک موتور به‌طور یکنواخت افزایش داده می‌شود تا این‌که جرقه، بین دو الکترود زده شود. به محض



شکل (۳-۹): مخرن آزمایش روغن

وقوع جرقه بین دو الکترود و برقراری جریان، رلهٔ اضافه جریان، منبع ولتاژ را سریعاً جدا می‌کند و به‌وسیلهٔ ولت‌متر دستگاه، حدّاکثر ولتاژی که در آن جرقه زده شده است، اندازه‌گیری می‌شود. قبل از انجام آزمایش، باید روغن به‌وسیلهٔ یک هم‌زن مخلوط شود تا به‌صورت همگن در آید. این کار به‌وسیلهٔ هم‌زن دستگاه خودکار انجام می‌شود. سپس روغن باید برای مدتی آرام گیرد تا دوباره آزمایش تکرار گردد. این آزمایش، شش بار تکرار می‌شود و مقدار متوسّط پنج آزمایش آخر، به‌عنوان ولتاژ شکست روغن تعیین می‌شود. بین هر دو آزمایش باید مدّت زمانی تأخیر داده شود تا آثار جرقه از بین برود. لولهٔ نمونه‌برداری روغن باید کاملاً خشک و عاری از رطوبت باشد. ولتاژ شکست روغن نباید از مقدار حدّاقل مجاز آن کم‌تر باشد (قبل از تصفیه، حدّاقل ۳۰kV و بعد از تصفیه، حدّاقل ۵۰kV). نمونهٔ روغن باید در حدّ امکان از کف ظرف ترانسفورماتور برداشته شود. در مورد کلیدهای قدرت نیز این آزمایش انجام می‌شود. فاصلهٔ الکترودها از دیوارهٔ ظرف، حدّاقل ۱۵mm و از سطح روغن حدّاقل ۱۰mm می‌باشد.

۲- آنالیز گازهای حل شده در روغن

گازهای حل شده در روغن (از روغن نمونه) به‌وسیلهٔ خلاء جدا سازی شده و با

استفاده از دستگاه مخصوص گاز کروماتوگرافی[1] درصد هر یک از اجزای آن تعیین می‌شود. بر حسب درصد گازهای موجود می‌توان به وجود تخلیهٔ الکتریکی جزئی در ترانسفورماتور یا معایب دیگر در آن (که ممکن است در آینده خطر عمده‌ای را به‌وجود آورند) پی برد. این گازها از قبیل اتان، متان، منواکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن، استیلن و اتیلن می‌باشد که درصد و ترکیب آن‌ها در روغن، تعیین کنندهٔ نوع و محلّ وقوع خطای جزئی در داخل یک دستگاه است که می‌تواند برای تعمیر محلّ مورد نظر به ما کمک نماید.

۳- اندازه‌گیری درجهٔ اسیدی روغن با استفاده از معرّف‌های شیمیایی

۴- اندازه‌گیری میزان رطوبت روغن

۵- بررسی رنگ ظاهری روغن (از نظر کدر بودن یا شفاف بودن)

۶- اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی tanδ (دستورالعمل IEC 60250)

۷- اندازه‌گیری مقاومت مخصوص

۸- اندازه‌گیری عدد عایقی

۹- اندازه‌گیری نقطهٔ اشتعال (دستورالعمل ASTM D93-66)

۱۰- اندازه‌گیری نقطهٔ انجماد (دستورالعمل ASTM D97-66)

۳-۱۰- تصفیهٔ روغن ترانسفورماتور

پس از آنکه روغن مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، بر حسب نوع روغن و شرایط سرویس، تغییراتی در آن مشاهده می‌شود که موجب تقلیل کیفیت و کاهش عمر مفید آن می‌شود. این تغییرات به‌سبب ورود ناخالصی‌ها و آلودگی به روغن و یا تغییرات شیمیایی ناشی از اکسیداسیون می‌باشد. در اثر اکسیداسیون روغن، ویسکوزیتهٔ آن افزایش یافته، اسیدیتهٔ آن بالا رفته، رنگ روغن کدر و تیره می‌شود. اگر نتایج

1- Gas Chromatography

آزمایش‌های روغن که در قسمت قبل اشاره شد، نیاز به تصفیهٔ روغن را اثبات نماید، باید به‌منظور جداسازی ناخالصی‌ها و احیای خواصّ اصلی مورد نیاز روغن، در مورد تصفیهٔ آن اقدام نمود.

روش‌های مختلفی برای تصفیهٔ روغن وجود دارد. این روش‌ها به دو دستهٔ عمدهٔ تصفیهٔ فیزیکی و تصفیهٔ شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شوند. در روش‌های تصفیهٔ فیزیکی با روش‌های فیزیکی نظیر عبور روغن از صافی‌ها یا گرم کردن روغن و غیره، ناخالصی‌های روغن را از آن جدا می‌کنند. در روش‌های تصفیهٔ شیمیایی با افزودن موادّ شیمیایی و ترکیب شیمیایی آن‌ها با روغن، خواصّ از دست رفته روغن مجدّداً احیا می‌شود.

۳-۱۰-۱- روش‌های تصفیهٔ فیزیکی

در این قسمت به چهار روش تصفیهٔ فیزیکی روغن اشاره می‌شود:

۱- **تصفیه از آب**: ساده‌ترین روش جداسازی آب از روغن این است که روغن را در ظرف بزرگی می‌ریزند و در ته ظرف، دریچه‌ای تعبیه می‌کنند. پس از مدّتی که روغن در ظرف بماند، چون آب سنگین‌تر از روغن است، در ته ظرف جمع می‌شود و می‌توان با باز کردن دریچه، آب را تخلیهٔ نمود. این روش نیاز به وقت زیادی دارد و دقّت آن نیز کم است؛ زیرا اگر دریچه زود بسته شود آب همچنان در روغن باقی خواهد ماند و اگر دریچه کمی دیر بسته شود، مقداری از روغن به هدر می‌رود.

روش دیگر برای این کار، حرارت دادن روغن است؛ زیرا درجه حرارت تبخیر آب پایین‌تر از روغن است و در صورت حرارت دادن روغن، آب به‌صورت بخار از روغن خارج می‌شود. حرارت دادن معمولاً در یک ظرف بسته و در خلاء انجام می‌گیرد تا سرعت عمل آن بیشتر شود. از پمپ‌های خلاء نیز برای گرفتن رطوبت روغن استفاده می‌شود.

۲- **روش گریز از مرکز برای جداسازی ناخالصی‌های جامد**: در این روش، روغن را در ظرف دوّار بزرگی می‌ریزند و پس از حرارت دادن تا حدّ دمای ۱۵ الی ۴۵ درجهٔ سانتیگراد، آن را به گردش در می‌آورند. جرم ناخالصی‌های جامد داخل

روغن معمولاً از جرم روغن بیشتر است؛ از این‌رو، در عمل گردش روغن، ناخالصی‌های جامد در اطراف جداره‌ٔ خارجی ظرف قرار گرفته و ته‌نشین می‌شوند و روغن خالص در وسط ظرف می‌ماند. این روش از نظر سرعت عمل و نحوهٔ تصفیه مناسب است.

۳- استفاده از فیلترهای کاغذی: با عبور روغن از فیلترهای کاغذی، ذرّات جامد غوطه‌ور در روغن نمی‌توانند از این فیلترها عبور کنند. همچنین آب موجود در روغن نیز، مقداری از آن توسّط این فیلترها جذب می‌شوند. هر چه منافذ این فیلترها ریزتر باشد، کیفیت تصفیه بهتر است. برای سرعت عمل در این روش، معمولاً روغن را با فشار وارد فیلترها می‌کنند.

۴- گاز زدایی برای جدا کردن گازهای محلول در روغن

با استفاده از تکنیک خلاء، عمل گاززدایی روغن و جدا کردن گازهای حل شده در روغن انجام می‌گیرد. با پودر کردن روغن و پاشیدن آن به داخل محفظه خلاء، علاوه بر گرفتن تمام آب غیرمحلول در روغن، مقدار آب محلول در آن نیز به حدّ ۱۰ppm کاهش می‌یابد. همچنین با این عمل، گازهای حل شده در روغن نیز به ۰/۲۵ درصد حجم، تقلیل می‌یابد.

۳-۱۰-۲- روش‌های تصفیهٔ شیمیایی

زمانی که با افزایش میزان اکسیداسیون در روغن، شرایط تشکیل لجن در آن فراهم می‌گردد، عمل تصفیهٔ فیزیکی به‌تنهایی قادر به جبران و احیای فساد روغن نبوده و از این‌رو، تصفیهٔ شیمیایی روغن انجام می‌گیرد. در تصفیهٔ شیمیایی، از فیلترهای فعّال (اکتیو) استفاده شده و با استفاده از عملیات مختلف، نظیر تصفیه با حلّال‌ها و تصفیه با اسید سولفوریک، پالایش انجام می‌گیرد. تصفیهٔ شیمیایی معمولاً با هزینهٔ زیادی انجام می‌شود؛ از این‌رو، فقط برای مصرف‌کننده‌های بزرگ، کارخانه‌های ترانسفورماتورسازی و مراکز بزرگ تعمیر ترانسفورماتورها مقرون به‌صرفه می‌باشد.

عبور روغن از خاک رنگبر[1]، یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها در تصفیهٔ شیمیایی است. در این روش، خاک رنگبر در یک منبع قرار می‌گیرد و روغنِ گرم توسّط پمپ، با فشار زیاد از این خاک عبور داده می‌شود. با انجام این عمل، عدد اسیدی روغن کاهش یافته و به حدّ مجاز خود می‌رسد. به‌علاوه دیگر خواصّ روغن، از قبیل ضریب تلفات عایقی و مقاومت مخصوص آن نیز بهبود می‌یابد. مقدار خاک رنگبر مورد نیاز، به میزان کهنگی روغن بستگی دارد و معمولاً بین یک تا هفت درصد وزن روغن می‌باشد. اضافه کردن موادّ ضدّ اکسیداسیون در هنگام تصفیهٔ فیزیکی در موقع گردش روغن نیز، یکی دیگر از روش‌های تصفیهٔ شیمیایی است.

1- Fullers Earth

فصل چهارم

عایق‌های جامد

۴-۱- مقدّمه

عایق‌های جامد بخش عمده‌ای از عایق‌های تأسیسات و تجهیزات الکتریکی را تشکیل می‌دهند؛ زیرا استقامت مکانیکی آن‌ها معمولاً زیاد است و دارای خاصیت عایقی خوبی نیز هستند. از جمله مهمترین موادّ عایق جامد مورد استفاده در صنعت برق را می‌توان به کاغذ، مقوای فشرده، چوب (فیبر)، میکا، شیشه، سرامیک‌ها، لاستیک و پلی‌مرهای مصنوعی از جمله پلی‌اتیلن، پلی‌استر و پلی ونیل کلراید (PVC[1]) اشاره نمود.

از نظر شکست عایقی، عایق‌های جامد با عایق‌های مایع و گاز خیلی متفاوت می‌باشند؛ زیرا عایق‌های جامد پس از وقوع تخلیهٔ الکتریکی در آن‌ها (بر خلاف گازها و مایعات) دیگر قابل استفاده به‌عنوان عایق نخواهند بود. البتّه در گازها و مایعات، بعد از وقوع شکست، دوباره با پایین آمدن ولتاژ به‌عنوان یک عایق، قابل استفاده بوده و خاصیت عایقی خود را دوباره به‌دست می‌آورند. عایق‌های جامد با بروز جرقّه در آن‌ها سوراخ شده و یک کانال کربنیزه شده (هادی) در آن‌ها به‌وجود می‌آید و خاصیت عایقی خود را از دست می‌دهند.

در شرایط معمولی، جریان الکتریکی در عایق‌های جامد به‌علّت آن‌که الکترون‌های آزاد بسیار کمی (کم‌تر از گازها و مایعات) در آن‌ها وجود دارد، بسیار

1- Poly Vinyl Chloride

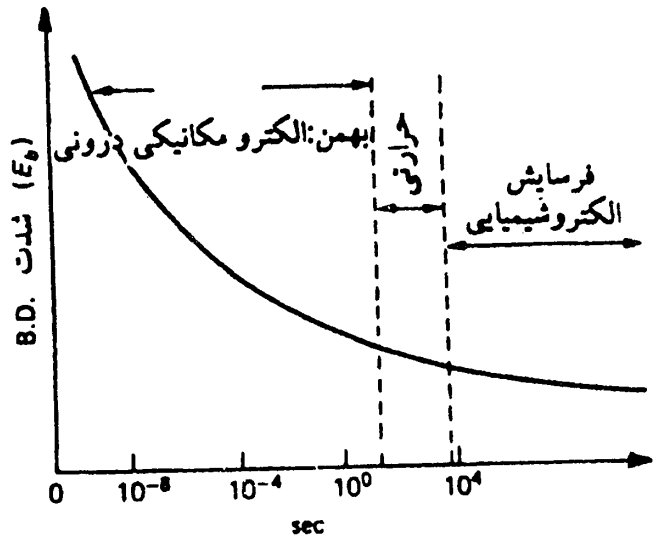
اندک است. معمولاً مقاومت اهمی عایق‌های جامد به‌قدری زیاد است که در هنگام اعمال ولتاژ به آن، جریان رسانایی عایق جامد در اثر الکترون‌های آزاد ناچیز است. به‌علاوه، پلاریزاسیون در عایق‌های جامد نیز، می‌تواند باعث ایجاد جریان شود (قطب‌بندی بارهای الکتریکی مثبت و منفی هر اتم تحت تأثیر میدان الکتریکی). همچنین حضور ناخالصی‌ها در عایق‌های جامد، الکترون‌های آزاد آن را افزایش داده و باعث افزایش جریان رسانایی عایق‌های جامد می‌شود.

تا کنون مکانیزم‌های مختلفی برای شکست الکتریکی عایق‌های جامد ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به‌موارد زیر اشاره نمود:

۱ - مکانیزم شکست ذاتی
۲ - مکانیزم شکست الکترومکانیکی
۳ - مکانیزم شکست حرارتی
۴ - مکانیزم شکست فرسودگی
۵ - مکانیزم شکست لبه‌ها

در صورتی‌که ولتاژ لازم برای هر یک از این مکانیزم‌های شکست را بر حسب زمان رسم کنیم، شکل (۴-۱) به‌دست می‌آید.

در طرّاحی عایق‌ها باید به تمام عواملی که منجر به یکی از این شکست‌ها می‌شوند توجّه شود، تا هیچ یک از آن‌ها به‌وجود نیاید. به‌عبارت دیگر، ولتاژ اعمالی



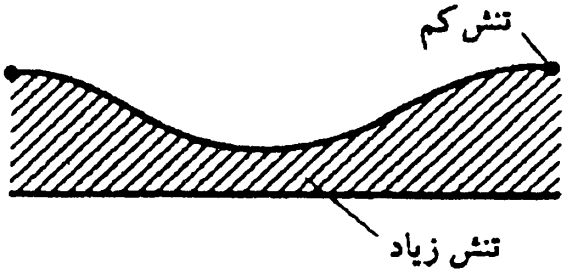
شکل (۴-۱): تغییرات استقامت الکتریکی بر اثر زمان اعمال ولتاژ

به عایق‌های جامد را باید تا حدّ امکان پایین‌تر از ولتاژهای شکست نگه داشت. در بخش‌های بعدی به بیان هر یک از این نظریه‌های شکست خواهیم پرداخت.

۴-۲- مکانیزم شکست ذاتی

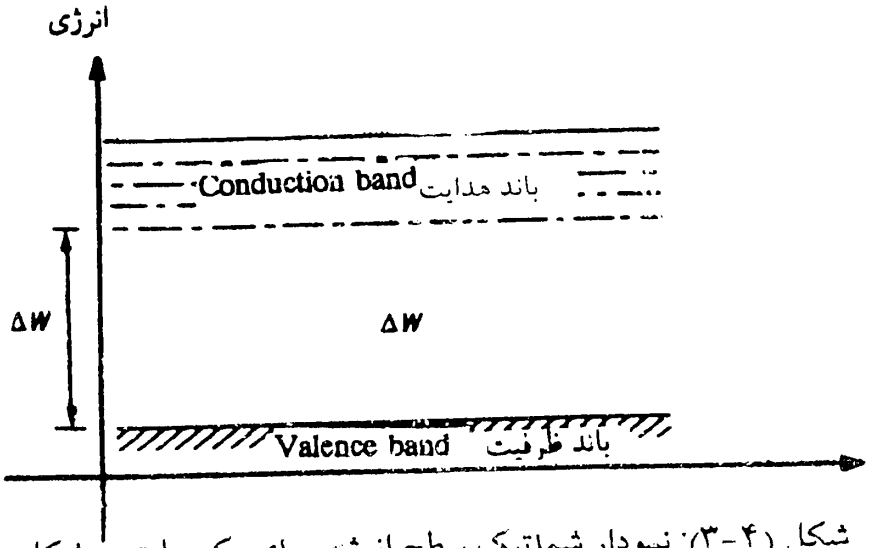
اگر عایق جامد، خالص و همگن و درجه حرارت و شرایط معمولی محیطی کاملاً تحت کنترل باشد و به گونه‌ای در یک میدان الکتریکی قرار گیرد که تخلیهٔ الکتریکی خارجی وجود نداشته باشد، در آن‌صورت، شکست الکتریکی در شدّت میدان‌های بالا و در حدود ۱ تا ۱۵MV/cm رخ می‌دهد. چنین شکست الکتریکی را که تنها به ترکیب شیمیایی و خواصّ عایقی یک مادّه بستگی دارد "شکست ذاتی" می‌گویند. ولتاژ شکست ذاتی، حدّاکثر ولتاژی است که ممکن است یک عایق تحمّل کند. در عایق‌های معمولی، شکست الکتریکی در شدّت میدان‌های بسیار پایین‌تر رخ می‌دهد. با این وجود، تلاش‌های زیادی برای اندازه‌گیری شدّت میدان شکست ذاتی صورت گرفته است. برای این کار نمونه‌ای مطابق شکل (۴-۲)، به گونه‌ای طرّاحی می‌شود که شدّت میدان در مرکز عایق جامد مورد آزمایش، زیاد و در لبه‌ها بسیار کم باشد تا تخلیهٔ در وسط مادّه صورت گیرد.

شکست ذاتی الکتریکی در زمانی بسیار کوتاه و در حدود 10^{-7} تا 10^{-8} ثانیه رخ می‌دهد. بنابراین، باید دارای ماهیتی الکترونی باشد. به‌طور کلّی شکست ذاتی در صورتی اتّفاق می‌افتد که الکترون‌های عایق از میدان اعمال شده، انرژی کافی برای عبور از باند ظرفیت را به باند هدایت به‌دست آورند. با وجود این‌که مکانیزم‌های مختلفی برای یافتن میدان بحرانی شکست ذاتی ارائه شده است، امّا هنوز هیچ کدام از آن‌ها نتیجهٔ کاملاً رضایت‌بخشی ارائه نمی‌دهند. مدل‌های ارائه شده در مکانیزم



شکل (۴-۲): نمونه عایق جامد برای مطالعه شکست ذاتی

انتقال انرژی، از الکترون‌های هدایت به شبکهٔ عایق و همچنین توزیع الکترون‌های هدایت تفاوت دارند. در عایق‌های خالص همگن، باندهای هدایت و ظرفیت با یک فاصلهٔ انرژی زیادی از هم جدا شده‌اند و در درجه حرارت معمولی الکترون، انرژی کافی برای انتقال از باند ظرفیت به باند هدایت را به‌دست نمی‌آورد. بنابراین، هدایت در عایق‌های کامل باید صفر باشد؛ لیکن در عمل، تمام بلورها (کریستال‌ها) شامل ناخالصی‌ها و یا نقص‌های کریستالی در شبکهٔ خود هستند. اتم‌های ناخالصی‌ها می‌توانند دارای باند هدایتی با انرژی پایین‌تر از باند هدایت عایق باشند (شکل ۴-۳ را ببینید). وجود ناخالصی‌ها، پهنای باند رسانایی را افزایش می‌دهد و ΔW را کم می‌کند. همچنین افزایش درجه حرارت نیز فاصلهٔ ΔW را کاهش می‌دهد؛ زیرا حرارت، خود مقداری از انرژی را تأمین می‌کند. به‌طوری که در درجه حرارت‌های بسیار پایین، میدان لازم برای شکست ذاتی به ۱۰۰MV/cm می‌رسد. با اعمال میدان الکتریکی به عایق، الکترون‌های هدایت از میدان انرژی می‌گیرند و با برخورد بین آن‌ها انرژی بین آن‌ها تقسیم می‌شود. در شرایط عادی این انرژی باید پراکنده شود. اگر کریستال، خالص و تعداد کمی الکترون وجود داشته باشد، بیشتر این انرژی در تأثیر متقابل الکترون - شبکه، به شبکهٔ عایق منتقل می‌شود. در شرایط ماندگار، درجه حرارت الکترون‌ها (T_e) نزدیک یا مساوی با درجه حرارت شبکه (T) است. در عایق‌های بی شکل، تأثیر متقابل الکترون‌ها بر همدیگر شدیدتر است و میدان، انرژی الکترون‌ها را سریع‌تر از آنکه بتوانند آن را به شبکه منتقل کنند بالا می‌برد و

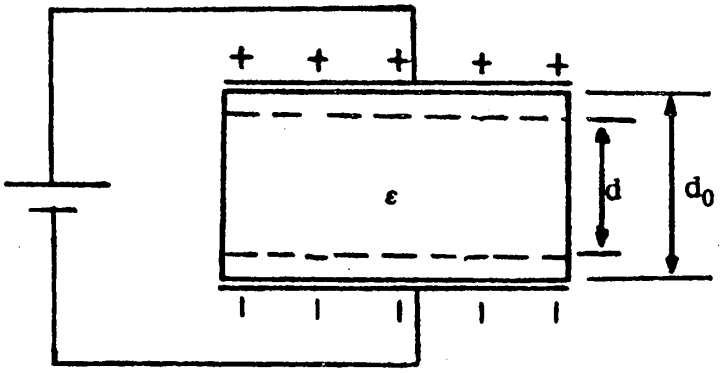


شکل (۴-۳): نمودار شماتیک سطح انرژی برای یک عایق بی‌شکل

درجه حرارت الکترون‌ها (T_e) بیشتر از درجه حرارت شبکه می‌شود. در نتیجه، تعداد بیشتری از الکترون‌ها به باند هدایت می‌رسند و افزایش انرژی الکترون‌ها تا شکست کامل عایق پیش می‌رود. به‌طور کلّی شکست ذاتی به حضور الکترون‌های آزاد که قابل حرکت در شبکه عایق هستند بستگی دارد. معمولاً تعداد کمی از این الکترون‌ها در عایق وجود دارند که با توجّه به نقص‌های ساختمانی شبکه و یا مقادیر اندک ناخالصی‌ها، و بسته به حرارت و شدّت میدان، ایجاد می‌شوند. با افزایش حرارت و شدّت میدان، الکترون‌های بیشتری از باند ظرفیت به باند هدایت منتقل می‌شوند و در هدایت شرکت می‌کنند.

۴-۳- مکانیزم شکست الکترومکانیکی

هنگامی‌که یک عایق با عدد دی‌الکتریک ε در یک میدان الکتریکی قوی قرار می‌گیرد، تحت تأثیر میدان، نیروی جاذبهٔ مکانیکی بر عایق، وارد می‌شود و بسته به میزان مقاومت مکانیکی آن، طول اوّلیهٔ عایق از d_0 به d می‌رسد (مطابق شکل ۴-۴). در شدّت میدان $10^6 V/cm$ ممکن است فشار مکانیکی بر عایق به چند kN/m^2 برسد. اگر d_0 ضخامت اوّلیهٔ قطعه عایقی با ثابت یانگ Y (که وابسته به میزان پلاستیسیته عایق جامد است) باشد و با اعمال ولتاژ V ضخامت عایقی به d کاهش یابد، آنگاه در صورت تحمّل نیروی الکترواستاتیکی توسّط قطعه عایق جامد، تنش فشاری ناشی از نیروی الکترواستاتیکی در تعادل با استقامت مکانیکی خواهد



شکل (۴-۴): نیروی الکترومکانیکی در عایق‌های جامد

بود. در این حالت، خواهیم داشت:

$$\varepsilon \frac{V^{۲}}{۲d^{۲}_{۰}} = \Upsilon \ln \left[\frac{d_{۰}}{d}\right] \qquad (۱-۴)$$

$$V^{۲} = d^{۲} \frac{۲\Upsilon}{\varepsilon} \ln \left[\frac{d_{۰}}{d}\right]$$

$$V = \sqrt{\frac{۲\Upsilon d^{۲}}{\varepsilon} \ln \left[\frac{d_{۰}}{d}\right]} \qquad (۲-۴)$$

با مشتق‌گیری از رابطهٔ (۴-۲) نسبت به d، ولتاژی که به ناپایداری مکانیکی عایق می‌انجامد، در شرایط زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}d} = ۰$$

$$\frac{d}{d_{۰}} = e^{-۱/۲} = ۰/۶ \qquad (۳-۴)$$

بنابراین، هیچ ولتاژی نمی‌تواند مقدار پایداری $d/d_{۰}$ کم‌تر از ۰/۶ تولید کند؛ زیرا اگر در این مقدار شکست ذاتی رخ ندهد، افزایش بیشتر در مقدار V به ناپایداری و فروپاشی مکانیکی عایق و همزمان شکست الکتریکی می‌انجامد. بنابراین، حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی که برای عایق قابل تحمّل است، عبارت است از:

$$V_{max} = ۰/۶\, d_{۰} \sqrt{\frac{\Upsilon}{\varepsilon}} \qquad (۴-۴)$$

و میدان شکست الکتریکی عایق:

$$E_{\max} = \frac{V_{\max}}{d_{۰}}$$

$$E_{max} = ۰/۶ \left[\frac{\Upsilon}{\varepsilon}\right]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۵-۴)$$

ملاحظه می‌شود که میدان شکست الکترومکانیکی عایق به مشخصه الکتریکی (ε) و مشخصّهٔ مکانیکی (Υ) جسم توأماً بستگی دارد. البتّه رابطهٔ اخیر تقریبی است؛ زیرا که Υ به تنش مکانیکی بستگی دارد. همچنین در تنش‌های فشار قوی، نظریهٔ الاستیته به خوبی مؤثّر نخواهد بود و تغییر شکل‌های پلاستیک نیز باید در نظر گرفته شوند.

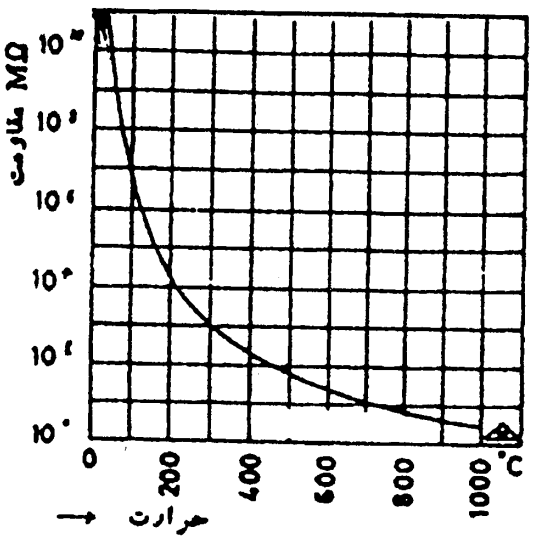
۴-۴- مکانیزم شکست حرارتی

به‌طور کلّی ولتاژ شکست عایق‌های جامد با ضخامت آن‌ها افزایش می‌یابد؛ امّا اگر این ضخامت از حدّ معینی بیشتر شود حرارتی که بر اثر جریان هدایتی عایق ایجاد می‌شود تعیین کننده خواهد بود. هر عایق جامدی دارای یک مقاومت الکتریکی است که به‌علّت استقامت الکتریکی بالای عایق‌های جامد، مقدار مقاومت آن بسیار بالا است؛ ولی بی‌نهایت نیست. در عایق‌ها و نیمه هادی‌ها بر خلاف هادی‌ها، با افزایش درجه حرارت عایق یا نیمه هادی، مقاومت آن کاهش یافته و قابلیت هدایت الکتریکی و رسانایی آن افزایش می‌یابد. این موضوع در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.

هنگامی‌که یک عایق، تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرد، به‌علّت جریان رسانایی بسیار کم آن و به خاطر تلفات دی‌الکتریک در اثر پلاریزاسیون (جدا شدن مرکز بارهای مثبت و منفی و حرکت دیپل‌ها برای قرار گرفتن در امتداد میدان)، به‌طور پیوسته در عایق حرارت تولید می‌شود. با افزایش دما، قابلیت هدایت عایق طبق رابطهٔ زیر افزایش می‌یابد:

$$\sigma = Ae^{-U/KT} \qquad (۴-۶)$$

در این رابطه، A و U اعداد ثابت، σ قابلیّت هدایت عایق، T دمای عایق و K ثابت



شکل (۴-۵): تغییر مقاومت عایق‌ها (سرامیک) بر اثر افزایش دما

بولتزمن است. دمای عایق جامد در اثر عبور جریان رسانایی I از آن (به‌سبب تلفات حرارتی RI^2) زیاد می‌شود. افزایش دما باعث افزایش قابلیّت هدایتی عایق و در نتیجه افزایش I خواهد شد که افزایش I، خودش تلفات حرارتی RI^2 را زیاد می‌کند و باعث بالاتر رفتن دمای عایق می‌شود. البتّه همزمان با افزایش دمای داخل عایق، حرارت ایجاد شده به محیط اطراف منتقل می‌شود. در این حالت، هر چه دمای محیط کم‌تر باشد انتقال حرارت بیشتر صورت می‌گیرد. دمای عایق، زمانی به حالت تعادل و پایدار می‌رسد که مجموع حرارت‌های انتقال یافته به محیط خارج، برابر مجموع حرارت‌های تولید شده در داخل عایق جامد باشد. امّا اگر درجه حرارت محیط در حدّ درجه حرارت داخل عایق شود، دیگر هیچ گونه انتقال حرارتی صورت نگرفته و ناپایداری حرارتی به‌وجود می‌آید. این موضوع، موجب افزایش ناگهانی درجه حرارت عایق و در نتیجه افزایش سریع جریان رسانایی از عایق شده و قوس الکتریکی در داخل آن زده می‌شود و در نهایت، عایق دچار شکست الکتریکی می‌شود.

با اعمال ولتاژ AC، شکست حرارتی عایق جامد در ولتاژ کم‌تری نسبت به اعمال ولتاژ DC ایجاد می‌شود؛ زیرا در ولتاژ AC، علاوه بر جریان ناشی از الکترون‌ها (که موجب ایجاد تلفات حرارتی در عایق جامد می‌شوند)، به‌واسطهٔ این‌که پلاریزاسیون در هر نیم سیکل تغییر داده می‌شود، در اثر جابجایی قطب‌های پلاریزاسیون، انرژی حرارتی اضافی (علاوه بر RI^2) به‌وجود می‌آید و می‌تواند ناپایداری حرارتی را زودتر انجام دهد. زیرا درجه حرارت عایق بیشتر می‌شود. بنابراین، استقامت الکتریکی عایق‌های جامد در ولتاژ متناوب AC نسبت به ولتاژهای DC و ضربه‌ای کم‌تر است. هدایت عایق‌ها به‌صورت نمایی با افزایش درجه حرارت، افزایش می‌یابد. بنابراین، حرارت تولید شده در عایق، خود عاملی برای افزایش جریان هدایتی می‌شود و تولید حرارت باز هم افزایش می‌یابد. اگر حرارت ایجاد شده به‌گونه‌ای از عایق خارج نشود، افزایش آن، سرانجام به شکست حرارتی عایق می‌انجامد. برای محاسبه شدّت میدان بحرانی شکست حرارتی، چگونگی دفع حرارت از عایق را بررسی می‌کنیم. حرارت تولید شده در عایق یا توسّط آن جذب می‌شود و درجه حرارت آن را بالا می‌برد و یا به طریق هدایت و تشعشع از آن خارج می‌شود. بخشی

از این حرارت (که در واحد حجم عایق) جذب عایق می‌شود، عبارت است از:

$$W_a = C_v \frac{dT}{dt} \qquad (۷-۴)$$

در این رابطه C_v گرمای ویژهٔ (ظرفیت حرارتی) عایق و T درجه حرارت آن است.
بخش دیگری از این حرارت از واحد حجم عایق دفع می‌شود که عبارت است از:

$$W_q = k \frac{d}{dx}\left(\frac{dT}{dx}\right) = \text{div}\,(k\ \text{grad}\ T) \qquad (۸-۴)$$

در این رابطه k ضریب هدایت حرارتی عایق است. بنابراین، مجموع حرارت‌های جذب شده و دفع شده در عایق (W_t)، به‌صورت زیر است:

$$W_t = C_v \frac{dT}{dt} + \text{div}\,(k\ \text{grad}\ T) = \sigma E^۲ \qquad (۹-۴)$$

σ هدایت الکتریکی عایق است. اگر ولتاژ متناوب باشد حرارت ناشی از تغییر دی‌پل‌ها بر اثر پلاریزاسیون نیز، اضافه می‌شود. محاسبهٔ وضعیت بحرانی شکست حرارتی به حل معادلهٔ فوق نیاز دارد. منظور از وضعیت بحرانی، حالتی است که درجه حرارت عایق به‌مقدار بحرانی (T_c) می‌رسد و عایق خاصیت خود را از دست می‌دهد و دچار ناپایداری حرارتی و شکست الکتریکی می‌شود. معادلهٔ (۴-۹) را برای حالت کلّی نمی‌توان با روش‌های تحلیلی حل کرد؛ زیرا C_v ، K، و σ کلاً تابع T هستند و σ هم به شدّت میدان الکتریکی اعمال شده بستگی دارد. به‌همین جهت دو حالت حدّی را برای حلّ معادلهٔ مذکور بررسی می‌کنیم.

حالت ۱: این حالت بیانگر شرایطی است که افزایش درجه حرارت عایق بسیار سریع باشد و بتوان از هدایت آن به خارج از عایق صرف‌نظر کرد. چنین وضعیتی در هنگام اعمال ولتاژهای ضربه‌ای کوتاه مدّت پدید می‌آید که آن را شکست حرارتی ضربه‌ای می‌گویند. برای حلّ معادلهٔ وضعیت بحرانی، می‌توان بدین گونه عمل کرد:

$$C_v \frac{dT}{dt} = \sigma E^۲ \qquad (۱۰-۴)$$

برای یافتن شدّت میدان بحرانی شکست حرارتی (E_c)، شدّت میدان اعمال شده را "تابع شیبی"[۱] فرض می‌کنیم؛ بنابراین،

1- Ramp Function

$$E = \frac{E_c}{t_c} \cdot t$$

پس داریم :

$$\sigma E^{۲} = C_v \frac{dT}{dE} \cdot \frac{dE}{dt} \qquad (۱۱-۴)$$

از طرفی داریم.

$$\sigma = \sigma_{\circ} e^{-U/KT}$$

که $\sigma_{\circ}$ هدایت در درجه حرارت عادی $T_{\circ}$ است. با قرار دادن مقدار σ در رابطهٔ (۴-۱۱) و انتگرالگیری داریم:

$$\int_{\circ}^{E_c} \frac{t_c}{E_c} \cdot \frac{\sigma_{\circ}}{C_v} E^{۲} dE = \int_{T_{\circ}}^{T_c} e^{\frac{U}{KT}} dT \qquad (۱۲-۴)$$

اگر $U >> KT$ و $T_c > T_{\circ}$ باشد، آنگاه رابطهٔ اخیر به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$\frac{۱}{۳} t_c \frac{\sigma_{\circ}}{C_v} E_c^{۲} = T_{\circ}^{۲} \frac{K}{U} e^{(U/KT_{\circ})}$$

بنابراین:

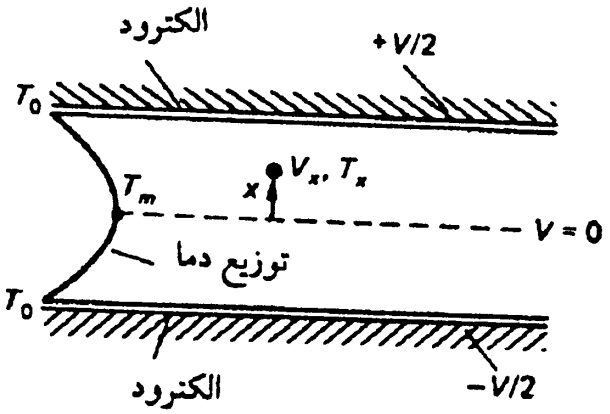
$$E_c = \sqrt{\frac{۳C_v KT_{\circ}^{۲}}{\sigma_{\circ} U t_c}} \; e^{\frac{U}{۲KT_{\circ}}} \qquad (۱۳-۴)$$

این رابطه نشان می‌دهد که برای فرا رسیدن شکست حرارتی، یک شدّت میدان بحرانی E_c و یک زمان بحرانی (t_c) لازم است. بنابراین، شکست حرارتی به مدّت زمانی بیش از شکست ذاتی نیاز دارد. از طرفی شدّت میدان بحرانی به‌علّت سرعت افزایش درجه حرارت، به درجه حرارت بحرانی T_c بستگی ندارد.

حالت ۲: این حالت بیانگر شرایطی است که ضخامت عایق کم و سطح الکترودها زیاد و در نتیجه، حرارت جذب شده توسّط عایق در برابر حرارتی که از طریق الکترودها دفع می‌شود، ناچیز باشد. در این حالت، رابطهٔ وضعیت بحرانی ارائه شده در رابطهٔ (۴-۹) به‌صورت زیر در می‌آید :

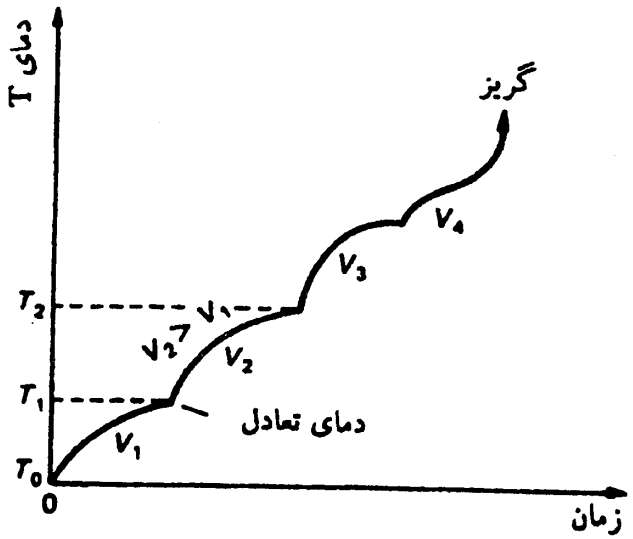
$$\sigma E^{۲} = \frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx}\right) \qquad (۱۴-۴)$$

برای حلّ این معادله، عایق بین الکترودها را مطابق با شکل (۴-۶) در نظر بگیرید.



شکل (۴-۶): مدل یک دی‌الکتریک برای حدّاقل ولتاژ شکست حرارتی

با اعمال ولتاژ، پس از مدّتی توزیع درجه حرارت در داخل عایق در درجه حرارت T_1 تثبیت می‌شود؛ در حالی که درجه حرارت سطح الکترودها تقریباً درجه حرارت محیط خواهد بود. با افزایش ولتاژ، تعادل حرارتی T_2 داخل عایق به‌دست می‌آید. اگر افزایش ولتاژ ادامه یابد، سرانجام افزایش درجه حرارت داخل عایق به شکست آن می‌انجامد (شکل ۴-۷ را ببینید). برای محاسبهٔ حدّاکثر ولتاژ شکست حرارتی،



شکل (۴-۷): منحنی دما-زمان با ولتاژهای مختلف

نقطه‌ای را داخل عایق به فاصلهٔ x از مرکز آن در نظر می‌گیریم که ولتاژ و درجه حرارت این نقطه را به ترتیب با V_x و T_x نشان می‌دهیم. با استفاده از روابط $\sigma E = J$ که J چگالی جریان است و $E = \frac{-\partial V}{\partial x}$ داریم:

$$-J \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{d}{dx}\left(k \frac{dT}{dx}\right) \qquad (۱۵-۴)$$

با انتگرالگیری تا نقطهٔ دلخواه x در داخل عایق خواهیم داشت:

$$-J \int_{۰}^{V_x} dV = \int_{۰}^{x} \frac{d}{dx}\left(k \frac{dT}{dx}\right) \qquad (۱۶-۴)$$

و یا:

$$-J V_x = k \frac{dT}{dx} \qquad (۱۷-۴)$$

$$V_x \, \sigma \frac{dV}{dx} = k \frac{dT}{dx} \qquad (۱۸-۴)$$

با قرار دادن $\sigma = \sigma_{۰} e^{-U/KT}$ و انتگرالگیری از مرکز عایق تا سطح الکترودها نتیجه می‌شود که،

$$\int_{۰}^{\frac{V_c}{۲}} V_x dV = \frac{k}{\sigma_{۰}} \int_{T_{۰}}^{T_c} e^{\frac{U}{KT}} dT$$

در نهایت،

$$V_c^{۲} = ۸ \frac{k}{\sigma_{۰}} \int_{T_{۰}}^{T_c} e^{\frac{U}{KT}} dT \qquad (۱۹-۴)$$

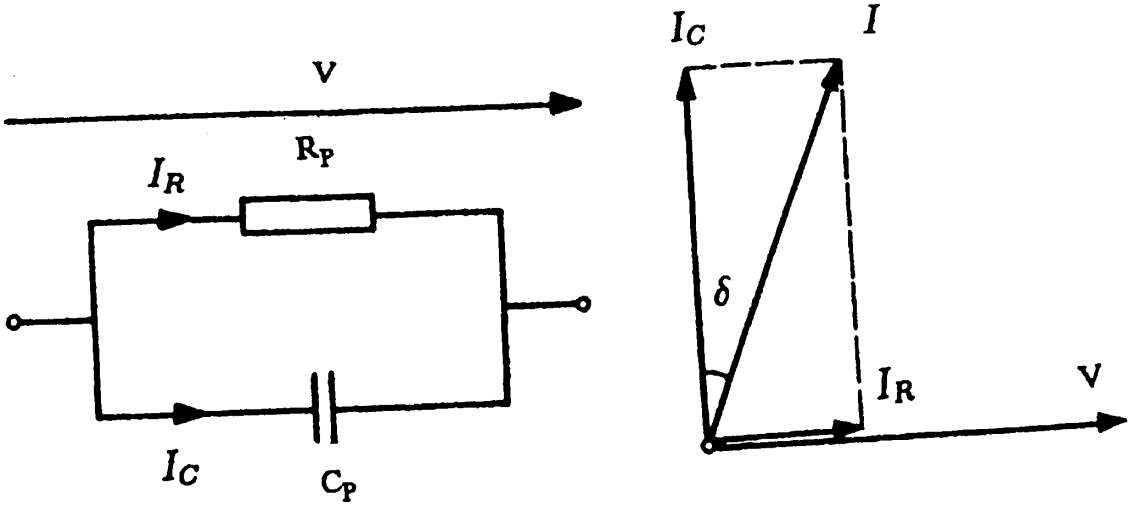
رابطهٔ اخیر، ولتاژ بحرانی شکست حرارتی را ارائه می‌دهد. دمای T_c درجه حرارت بحرانی در مرکز عایق است که در آن، ولتاژ شکست به ضخامت عایق بستگی ندارد؛ امّا در ضخامت‌های کم، با ریشهٔ دوم ضخامت متناسب است. در ولتاژ متناوب، همان‌گونه که گفتیم، به دلیل تلفات حاصل از پلاریزاسیون، حرارت بیشتری تولید می‌شود و ولتاژ شکست پایین‌تر می‌آید و با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابد. شکست حرارتی، مکانیزم شناخته شده‌ای در عایق‌های الکتریکی است. جدول (۴-۱) حدّاکثر ولتاژ شکست حرارتی بعضی از عایق‌های جامد را به‌ازای ضخامت یک سانتیمتر برای ولتاژهای DC و AC نشان می‌دهد.

جدول (۴-۱): حدّاکثر ولتاژ شکست حرارتی بعضی از عایق‌های جامد

مادهٔ عایقی	حدّاکثر ولتاژ حرارتی بر حسب MV/cm	
	DC	AC
کریستال: میکا	۲۴	۷ - ۱۸
نمک سنگی	۳۸	۱/۴
کوارتز: عمود بر محور	۱۲۰۰۰	--
موازی با محور	۶۶	--
ناخالص	--	۲/۲
سرامیک: استیتیت H.V.	--	۹/۸
استیتیت L.F.	--	۱/۵
چینی مرغوب	--	۲/۸
موادّ آلی: کاغذ خازن		
ابُنیت	--	۱/۴۵ - ۲/۷۵
پلی‌تن	--	۳/۵
پلی‌استیرن	--	۵
پلی‌استیرن در ۱MC/c	--	۰/۰۵
رزین‌های اکرلیک	--	۰/۳ - ۱/۰

۴-۴-۱- نقش پارامتر ضریب تلفات عایقی در مکانیزم شکست حرارتی

هر عایق جامد بین دو الکترود فلزی، یک خازن به‌وجود می‌آورد. اگر خازن کاملاً ایده‌آل باشد، تلفات انرژی حرارتی ندارد. در ولتاژ متناوب AC، جریان خازن ایده‌آل °۹۰ جلوتر از ولتاژ آن است. با توجّه به این‌که خازن‌ها (عایق‌ها) ایده‌آل نیستند، در نتیجه یک مقاومت اهمی R نیز همواره وجود دارد؛ بنابراین، جریان و ولتاژ آن دارای اختلاف فاز کم‌تر از °۹۰ خواهد بود و زاویهٔ بین آن‌ها به‌مقدار δ از °۹۰ کم‌تر است. مدار معادل یک خازن واقعی با تلفات را می‌توان به‌صورت شکل (۴-۸)، از ترکیب موازی یک مقاومت اهمی R_p و یک خازن ایده‌آل C_p شبیه‌سازی



شکل (۴-۸): نمودار برداری یک عایق واقعی و مدار معادل آن

کرد. در این حالت، جریان خازن در ولتاژ متناوب از دو مؤلّفه تشکیل شده است :

مؤلّفه خازنی (۴-۲۰)

$$I_c = j\, c_p \omega\, V$$

مؤلّفه اهمی (۴-۲۱)

$$I_R = \frac{V}{R_P}$$

در نتیجه، جریان کلّ خازن برابر است با،

$$I = I_R + I_c = \frac{V}{R_P} + j\, c_p\, \omega V = \left(\frac{1}{R_p} + j\, c_p\, \omega\right) V \qquad (۴-۲۲)$$

جریان I_R با ولتاژ V هم جهت است، ولی جریان I_c عمود بر V می‌باشد. از این‌رو، ضریب تلفات عایقی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{V/R_p}{\omega C_p V} = \frac{1}{R_p C_p \omega} \qquad (۴-۲۳)$$

به $\tan\delta$ "ضریب تلفات عایقی" می‌گویند. علّت قرار دادن این اسم آن است که تلفات حرارتی عایق، ضریبی از $\tan\delta$ است. در عایق‌ها معمولاً $\tan\delta$ خیلی کوچک است و جریان I تقریباً با I_c برابر است. ضریب تلفات عایقی مشخّص کنندهٔ مناسب بودن عایق است و به ابعاد عایق بستگی ندارد. البتّه با تغییر ابعاد عایق، ظرفیت C تغییر می‌کند، ولی R هم به نسبت عکس آن تغییر می‌نماید و در نتیجه، تقریباً $\tan\delta$ ثابت می‌ماند. البتّه مقدار $\tan\delta$ با فرکانس و درجه حرارت عایق تغییر می‌کند. مدار معادل دیگری که برای عایق‌ها می‌توان شبیه‌سازی کرد، از سری نمودن یک خازن ایده‌آل C_s و یک مقاومت سری R_s به‌دست می‌آید. البتّه این مدار

معادل، فقط برای ولتاژهای AC به‌کار می‌رود که در شکل (۴-۹) نشان داده شده است.

مشابه حالت قبل، $\tan\delta$ را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود.

$$V = V_c + V_R \qquad (۲۴-۴)$$

$$\tan\delta = \frac{V_R}{V_c} = \frac{R_s I}{I/c_s\,\omega} = R_s c_s\,\omega \qquad (۲۵-۴)$$

در حالت شبیه‌سازی موازی، تلفات حرارتی ایجاد شده در عایق در اثر مقاومت R_p عایق برابر است با:

$$W = R_p\, I_R^{۲} = R_p\,\frac{V^{۲}}{R_p^{۲}} = \frac{V^{۲}}{R_p} \qquad (۲۶-۴)$$

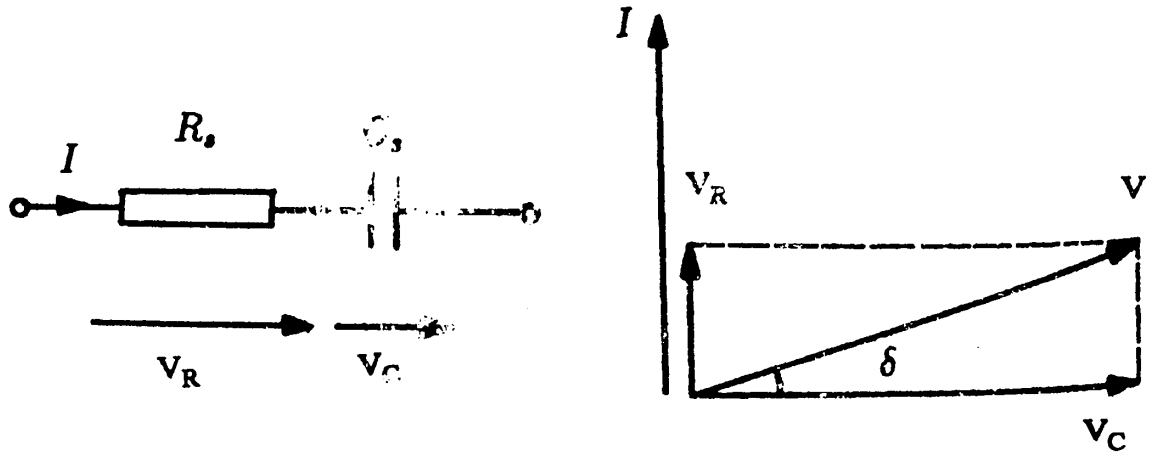
امّا از معادلهٔ (۴-۲۳) داریم:

$$\frac{۱}{R_p} = \omega\, C_p\, \tan\delta \qquad (۲۷-۴)$$

با توجّه به معادلات (۴-۲۶) و (۴-۲۷) می‌توان نوشت :

$$W = V^{۲}\, ۲\pi f\, C_p\, \tan\delta \qquad (۲۸-۴)$$

در این رابطه W توان حرارتی تولید شده در عایق بر حسب وات است. از رابطهٔ (۴-۲۸) مشاهده می‌شود که مقدار این تلفات با f، V، C و $\tan\delta$ در ارتباط است. با افزایش دمای عایق، بالطبع $\tan\delta$ نیز افزایش می‌یابد. رطوبت و ناخالصی‌ها نیز،



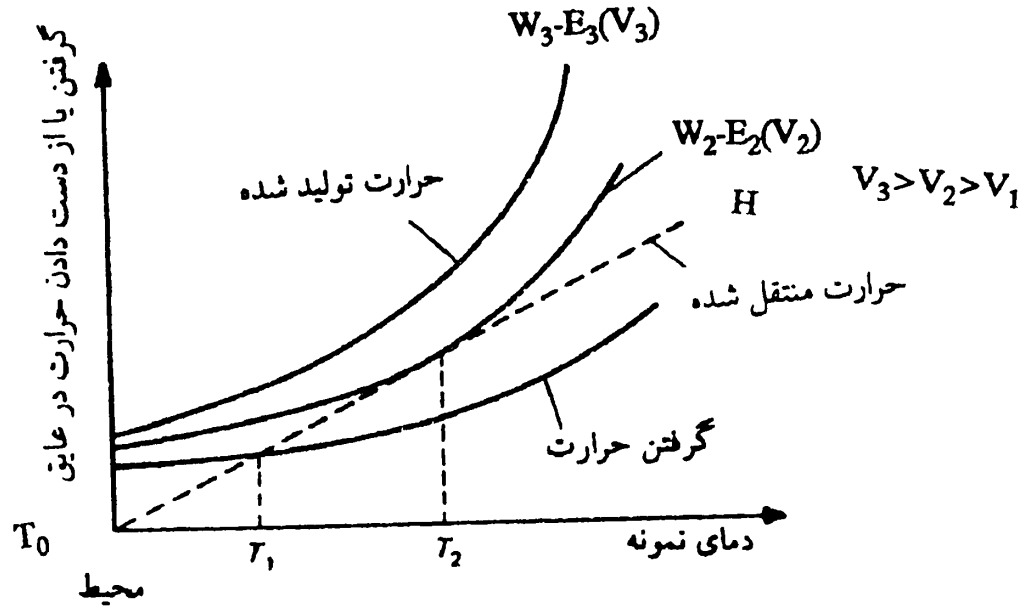
شکل (۴-۹) نوع دیگر مدار معادل خازن واقعی

باعث افزایش ضریب تلفات عایقی و افزایش تلفات حرارتی (W) در عایق می‌شوند. حرارت منتقل شده از عایق به محیط اطراف آن (H)، رابطهٔ خطّی مستقیم با اختلاف دمای جسم (T) و محیط (T_0) دارد. یعنی:

$$H \propto \Delta T = (T - T_0) \qquad (۲۹-۴)$$

اگر $W=H$ باشد، در عایق، تعادل حرارتی ایجاد می‌شود و شکست حرارتی به‌وجود نمی‌آید؛ ولی اگر $H<W$ شود، جسم دچار ناپایداری حرارتی و شکست الکتریکی می‌شود.

شرایط ناپایداری و شکست حرارتی در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است. در این شکل، انتقال حرارت (H) با یک خط مستقیم و حرارت‌های تولید شده در میدان‌های الکتریکی E_1، E_2 و E_3 با منحنی‌های جداگانه نشان داده شده‌اند. برای میدان E_1، در T_1 حرارت تولید شده با حرارت دفع شده در تعادل است. در میدان E_2، تعادل ناپایدار است و در میدان E_3، وضعیت تعادلی وجود ندارد. روشن است که شکست حرارتی در حالت ۲ نسبت به حالت ۱ به زمان بیشتری نیاز دارد. همچنین شکست حرارتی از هر نوع که باشد، نسبت به شکست ذاتی به زمان بیشتری نیاز دارد.



شکل (۴-۱۰): استحکام گرمایی تحت میدان‌های مختلف

۴-۵- مکانیزم شکست فرسودگی

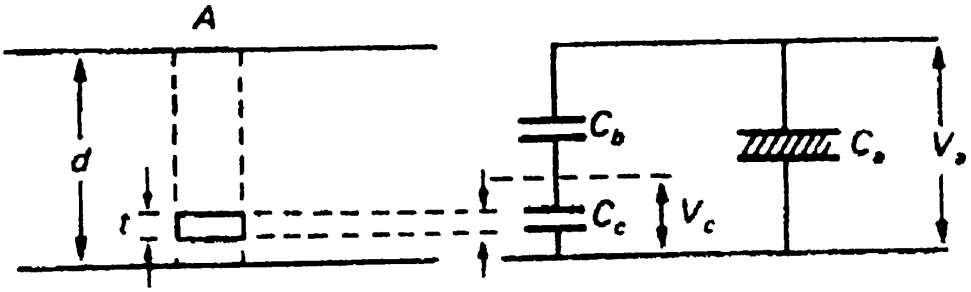
غالباً در عایق‌های جامد بر اثر گذشت زمان و به‌سبب وجود حفره‌های حاوی گاز، شکست الکتریکی اتّفاق می‌افتد. هر چند که فناوری ساخت عایق‌های جامد روز به روز پیشرفت می‌کند، ولی باز هم نمی‌تواند خالی از حفره‌های کوچک باشد. سطح الکترودها و عایق‌های جامد نیز، کاملاً صیقلی نیستند. بنابراین، معمولاً حفره‌های گازی حاوی هوا یا مایع، در داخل عایق‌های جامد وجود دارد که غالباً میدان الکتریکی شکست آن‌ها خیلی کم‌تر از میدان الکتریکی شکست عایق جامد است. از طرف دیگر، به‌علّت پایین بودن عدد دی‌الکتریک این حفره‌ها، شدّت میدان الکتریکی داخل این حفره‌ها بزرگتر از شدّت میدان الکتریکی داخل عایق جامد می‌شود. بنابراین، تحت شرایط کار، معمولاً ولتاژ دو سر این حفره‌ها ممکن است از حدّ ولتاژ شکست آن‌ها افزایش یابد و سبب شکست الکتریکی در آن‌ها شود. به‌عنوان مثال، شدّت میدان شکست هوا، ۲۰ تا ۳۰kV/cm است؛ ولی در سرامیک، شدّت میدان شکست حدود ۱۰۰kV/cm می‌باشد.

در صورتی‌که در یک حفرهٔ گازی، شکست الکتریکی اتّفاق بیفتد، لایه‌های کربن روی سطح عایق در محل حفره‌ها می‌نشیند و باعث رسانایی و افت مقاومت عایقی می‌شود. در نتیجه، به‌تدریج این حفره‌های درونی بزرگتر شده و به یکدیگر رسوخ کرده و یک کانال را به‌وجود می‌آورد تا در نهایت، منجر به تخلیهٔ الکتریکی عایق جامد می‌شوند. برای محاسبهٔ ولتاژ شکست در اثر تخلیهٔ موضعی در عایق‌های جامد، فرض می‌شود که درون یک عایق به ضخامت d، یک حفره مکعب مستطیل به ضخامت t به‌وجود آید (مطابق شکل ۴-۱۱). در این شکل، C_c ظرفیت خازنی حفره، C_b ظرفیت عایق جامد در قسمت‌های بالا و پایین حفره، و C_a ظرفیت بقیهٔ قسمت‌های عایق جامد است. با توجّه به این‌که $t << d$ و با فرض این‌که داخل حفرهٔ هوا باشد با یکنواختی میدان و مساوی بودن چگالی شار الکتریکی می‌توان نوشت:

$$\varepsilon_{\circ} E_c = \varepsilon_{\circ} \varepsilon_r E_b$$

$$E_c = \varepsilon_r \; E_b \qquad (۴-۳۰)$$

که E_c و E_b، به‌ترتیب، شدّت میدان الکتریکی در داخل حفره و قسمت‌های بالا و



شکل (۴-۱۱): تخلیهٔ الکتریکی در حفره و مدار معادل آن

پایین حفره است. همچنین ε_r عد دی‌الکتریک نسبی عایق جامد است. ظرفیت خازنی C_b و C_c را به‌صورت زیر خواهیم داشت:

$$C_b=\frac{\varepsilon_\circ \varepsilon_r A}{d-t} \qquad (۳۱-۴)$$

$$C_c=\frac{\varepsilon_\circ A}{t} \qquad (۳۲-۴)$$

روابط خازن‌های سری، مشابه مقاومت‌های موازی هستند که ولتاژ دو سر آن‌ها به نسبت عکس ظرفیت آن‌ها تقسیم می‌شود. بنابراین، ولتاژ دو سر حفره برابر است با :

$$V_c=\frac{C_b}{C_c+C_b} \quad V=\frac{\frac{\varepsilon_\circ \varepsilon_r A}{d-t}}{\frac{\varepsilon_\circ A}{t}+\frac{\varepsilon_\circ \varepsilon_r A}{d-t}} \quad V=\frac{V}{۱+\frac{۱}{\varepsilon_r}\left(\frac{d}{t}-۱\right)} \qquad (۳۳-۴)$$

اگر میدان الکتریکی لازم برای شکست الکتریکی حفره، برابر E_s (در ارتباط با ولتاژ V_s) باشد، آنگاه ولتاژ لازم برای دو سر عایق جامد که منجر به شکست الکتریکی درون حفره شود، برابر V_{cb} خواهد بود؛ آنگاه:

$$E_s=\frac{V_s}{t}$$

$$V_s=E_s\,.\,t \qquad (۳۴-۴)$$

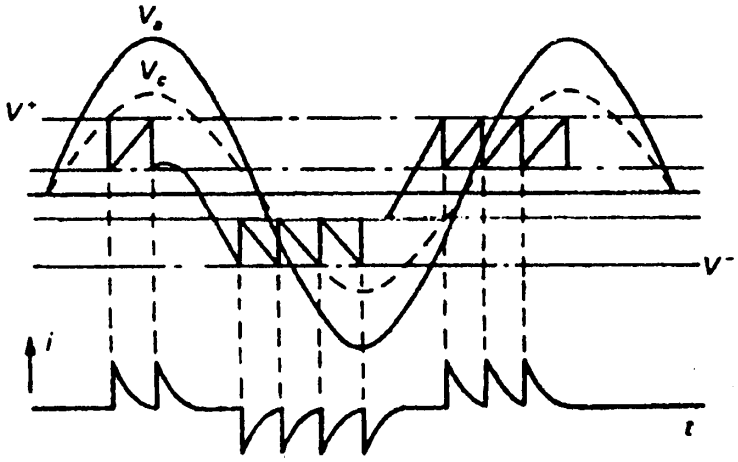
با جایگزینی رابطهٔ (۴-۳۴) در رابطهٔ (۴-۳۳) داریم:

$$E_s\,.t=\frac{V_{cb}}{۱+\frac{۱}{\varepsilon_r}\left(\frac{d}{t}-۱\right)}$$

$$V_{cb}=E_s.t\left[۱+\frac{۱}{\varepsilon_r}\left(\frac{d}{t}-۱\right)\right] \qquad (۳۵-۴)$$

امّا حفره‌های داخل عایق‌های جامد، معمولاً به‌شکل کروی هستند و میدان الکتریکی داخل آن‌ها حدوداً به ۱/۵ برابر میدان الکتریکی داخل عایق جامد می‌رسد. شکل (۴-۱۲)، ولتاژ دو سر حفرهٔ V_c (که با خط‌چین نشان داده شده است، به‌شرط این که شکست در داخل آن اتّفاق نیفتاده باشد) و ولتاژ دو سر عایق V_a را نشان می‌هد. زمانی‌که ولتاژ دو سر حفره به‌مقدار $V^+=V_s$ می‌رسد، تخلیه‌ای رخ می‌دهد و ولتاژ آن کاهش یافته و جرقّه در حفره خاموش می‌شود. آن‌گاه دوباره ولتاژ حفره هماهنگ با افزایش ولتاژ دو سر عایق (V_a) افزایش می‌یابد تا به V^+ برسد و دوباره تخلیه روی می‌دهد. بنابراین، در خلال بالا رفتن ولتاژ اعمالی، تعداد زیادی پالس تخلیه می‌تواند رخ دهد. همچنین پس از کاهش ولتاژ دو سر عایق در نیم‌سیکل منفی، وقتی ولتاژ دو سر حفره به‌مقدار $V^- = -V_s$ می‌رسد، تخلیه رخ می‌دهد. بدین ترتیب، در هر دورهٔ (سیکل) کامل، تعداد زیادی پالس تخیله مطابق شکل (۴-۱۲) رخ می‌دهد. در هر بار شکست حفره، جریان زیاد ناشی از تخلیهٔ الکتریکی عبور می‌کند که در شکل (۴-۱۲)، پالس‌های جریان تخلیه نیز ترسیم شده است.

با نفوذ آب در داخل کابل‌های فشار قوی با عایق پلی‌اتیلن، حفره‌های آب تشکیل می‌شود و در نتیجه، شکست الکتریکی در مدّت زمان کوتاهتری انجام می‌شود. در اثر تخلیهٔ جزئی اتّفاق افتاده در سطح داخلی حفره‌ها، پدیدهٔ فرسودگی اتّفاق می‌افتد و به‌تدریج لایه‌های کربنی ایجاد شده در سطح داخلی حفره‌ها بزرگتر شده و بعضی



شکل (۴-۱۲): زنجیرهٔ شکست حفره در اثر اعمال ولتاژ متناوب

از آن‌ها به‌هم وصل شده و کانال‌های تخلیه شبیه به یک درخت در عایق رشد می‌کنند و به‌تدریج با گذشت زمان، استقامت الکتریکی عایق کاهش می‌یابد.

با توجّه به این نوع مکانیزم شکست، ضعف عایق‌ها در مقابل اضافه ولتاژهای AC کاملاً روشن می‌شود. مشخّصات فنّی گوناگون بین‌المللی در آزمایش تحمّل ولتاژ AC، ولتاژهایی را به‌کار می‌گیرند که می‌توانند چند برابر ولتاژ نامی بوده و مدّت اعمال آن یک دقیقه یا بیشتر باشد. هدف این آزمایش، آشکار سازی نقاط ضعف اصلی عایق است؛ ولی چنین آزمایشی می‌تواند باعث ایجاد کانال‌های تخلیه شده و ولتاژ شروع تخلیه را به حدّی کم‌تر از ولتاژ نامی سیستم برساند و موجب تشدید نقطهٔ ضعف جزئی عایق شود. به‌منظور رفع این مشکل تا حدودی، آزمایش تحت ولتاژ DC یا ولتاژهایی با فرکانس کم (به‌جای اعمال ولتاژ AC)، پیشنهاد شده است. به‌عنوان مثال، معمولاً کابل‌های فشار قوی AC را به‌جای آزمایش با ولتاژ AC، با ولتاژ فشار قوی DC به‌طور مداوم آزمایش می‌کنند (آزمایش‌های دوره‌ای که سالی یک یا دو بار انجام می‌شود، با ولتاژ DC انجام می‌گیرد). علّت این امر آن است که اگر یک نقطهٔ ضعف جزئی در عایق کابل باشد، در صورت آزمایش با ولتاژ AC بدلیل همین پالس‌های تخلیه و ایجاد جرقّه در حفره‌های ریز در مدّت زمان آزمایش، موجب تشدید آن نقطهٔ ضعف و آسیب رسیدن به کابل می‌شود. دلیل دیگر آزمایش کابل‌های AC با ولتاژ DC، اقتصادی بودن آن است؛ زیرا بدلیل بالا بودن مقدار جریان خازنی کابل، منبع ولتاژ آزمایش باید قدرت تأمین جریان خازنی را داشته باشد که باعث گران شدن آن خواهد شد.

۴-۶- مکانیزم شکست لبه‌ها

در سیستم‌های عایق‌بندی عملی، معمولاً عایق جامد به یک یا چند مادّهٔ دیگر متّصل است. اگر یکی از این موادّ (به‌عنوان مثال) گاز یا مایع باشد، آن‌گاه ولتاژ شکست بیشتر تحت تأثیر ناحیهٔ ضعیف‌تر قرار می‌گیرد. معمولاً در تماس الکترودهای فلزی با عایق‌های جامد در لبه‌ها، میدان‌های الکتریکی خیلی قوی

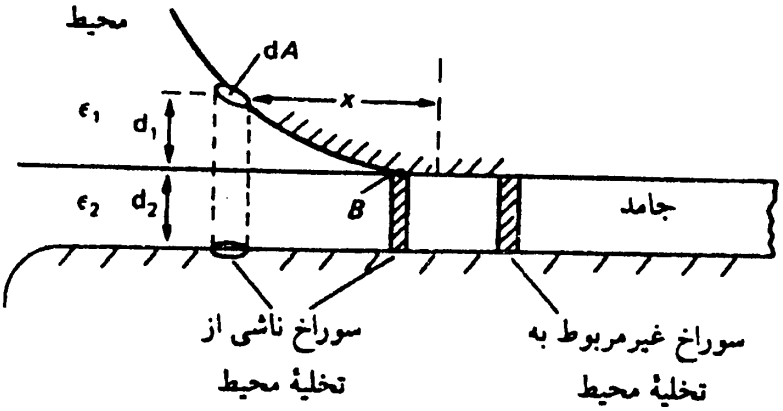
ایجاد می‌شود که می‌تواند منجر به ایجاد جرقّه‌های سطحی روی عایق‌های جامد شوند. این جرقّه‌های سطحی می‌توانند به تدریج باعث کربنیزه شدن سطح عایق و گسترش آن در داخل عایق نیز بشوند. این جرقّه‌ها به‌صورت شاخه‌های درخت ادامه یافته و از این‌رو، به این جرقّه‌ها، "شکست شاخه‌ای"[1] می‌گویند. بدین منظور یک قطعه عایق جامد بین الکترودهای صفحه-کره مطابق شکل (۴-۱۳) در نظر می‌گیریم، که در آن، از غیریکنواختی میدان در یک استوانه با سطح قاعده dA در فاصلهٔ x از نقطهٔ B که با عایق تماس دارد، صرف‌نظر می‌کنیم. با اعمال ولتاژ V بین الکترودها، بخشی از ولتاژ (V_1) روی محیط گازی (مثلاً هوا) و بخشی دیگر از این ولتاژ (V_2) روی عایق جامد می‌افتد. با فرض یکنواختی میدان، چگالی شار الکتریکی در هر دو عایق (D_1 و D_2) با هم برابر هستند. بنابراین:

$$D_1 = D_2$$

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$$

$$E_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} E_2 \qquad (۴-۳۶)$$

با توجّه به این‌که $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ (ε_1 عدد دی‌الکتریک هوا می‌باشد) است، در نتیجه $E_1 > E_2$ خواهد بود. به‌عبارت دیگر، میدان الکتریکی در قسمت هوا (یعنی در



شکل (۴-۱۳): مدل بررسی اثر لبه در عایق جامد

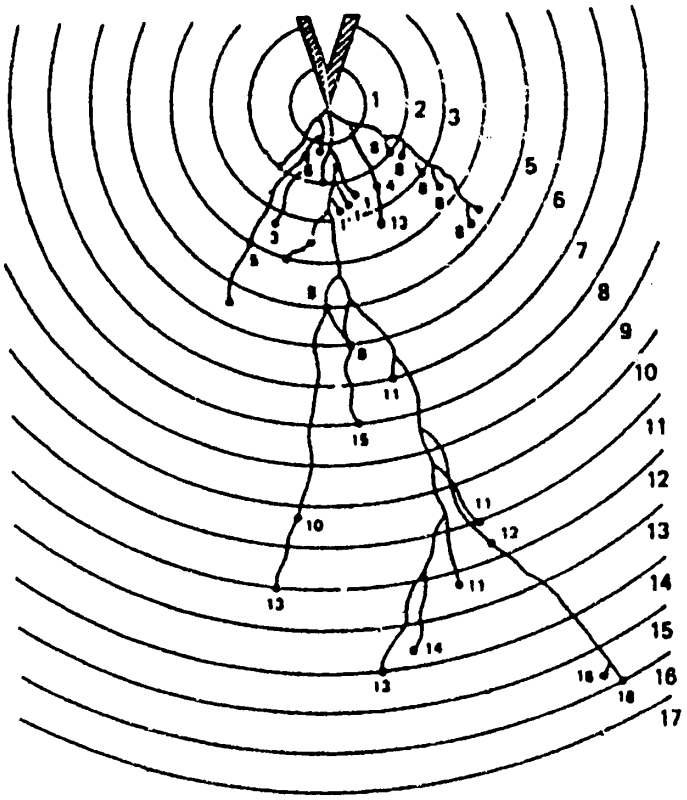
1- *Treeing Breakdown*

فاصلهٔ d_1) قوی‌تر از عایق جامد می‌شود. با توجّه به این‌که استقامت الکتریکی هوا پایین‌تر از عایق جامد است، ممکن است E_1 به حدّ ولتاژ شکست هوا برسد؛ ولی E_2 به حدّ شکست نرسد و در قسمت هوا شکست عایقی و جرقّه زده شود.

$$V_1 = E_1 d_1 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1} E_2 d_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{V_2}{d_2} d_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \frac{(V - V_1)}{d_2} d_1$$

$$V_1 = \frac{V d_1}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2} \qquad (۴-۳۷)$$

همان‌گونه که از شکل (۴-۱۳) مشاهده می‌شود، هر چه فاصلهٔ x کوچکتر شود، مقدار d_1 کوچکتر، ولی d_2 ثابت باقی می‌ماند. در نزدیکی نقطهٔ B؛ میدان E_1 خیلی قوی‌تر است و احتمالاً می‌تواند باعث شکست موضعی در هوا شود و منجر به ایجاد تخلیهٔ جزئی و جرقّه در سطح عایق گردد و به تدریج به‌طور شاخه‌ای به داخل عایق جامد سرایت کند (مانند شکل ۴-۱۴). با ادامهٔ این شاخه‌ها، قوس الکتریکی



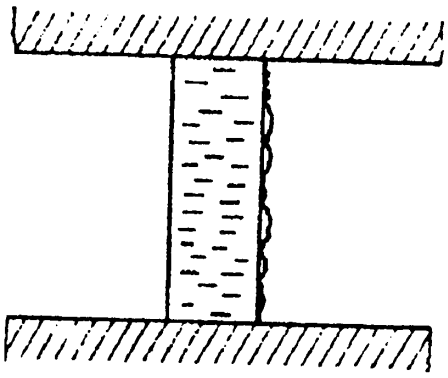
شکل (۴-۱۴): کانال‌های شکست بین الکترودهای صفحه-میله با منبع ولتاژ ضربه‌ای

داخل عایق جامد ایجاد شده و شکست عایقی در جامد رخ می‌دهد. البتّه به علّت غیریکنواختی میدان در این فضای گازی شکل، معمولاً شکست هوا به واسطه استریمر اتّفاق می‌افتد. گاهی به این مکانیزم شکست لبه، شکست به واسطه استریمر هم می‌گویند. در این حالت، کانال‌های استریمر به سطح عایق جامد برخورد کرده و آن را به‌تدریج سوراخ می‌کند. یک روش برای کاهش اثر لبه‌ها، افزایش قطر الکترودهاست. در شکل (۴-۱۴) نحوهٔ ایجاد کانال‌های شکست در یک میدان الکتریکی بین میله- صفحه، با منبع ولتاژ ضربه‌ای نشان داده شده است.

۴-۷- تخلیهٔ الکتریکی سطحی

با قرار دادن یک عایق در بین دو الکترود، ولتاژ شکست نسبت به وضعیت عدم حضور عایق به‌طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. در این حالت، جنس عایق، وضعیت سطح عایق (که تخلیه در امتداد آن صورت می‌گیرد)، و به‌ویژه شکل میدان‌های الکتریکی، دارای اهمیت هستند. منظور از تخلیهٔ سطحی، تخلیه‌ای است که روی سطح خارجی عایق جامد صورت می‌گیرد و در حقیقت، تخلیهٔ الکتریکی بر روی فصل مشترک دو عایق جامد و گاز ایجاد می‌شود (شکل ۴-۱۵ را ببینید).

ولتاژ شکست عایق‌های جامد معمولاً بالاتر از عایق‌های گازی است. اگر در یک میدان یکنواخت به فاصلهٔ d (فاصلهٔ دو الکترود از هم) ولتاژ را به‌تدریج بالا ببریم، در ولتاژی مانند V_1 در عایق گازی (مانند هوا) شکست ایجاد می‌شود. حال اگر یک عایق جامد را در آزمایش دیگری بین الکترودها قرار دهیم که استقامت الکتریکی آن از هوا بیشتر باشد، و



شکل (۴-۱۵): شکست روی سطح عایق جامد

ولتاژ منبع را افزایش دهیم، در ولتاژی مانند $V_۲$ $(V_۲ < V_۱)$ شکست گاز هوا روی سطح عایق جامد مانند شکل (۴-۱۵) اتّفاق می‌افتد. علّت این امر آن است که اولاً، سطح عایق جامد کاملاً صاف نیست و دارای برآمدگی و فرورفتگی‌هایی است که باعث می‌شود شدّت میدان الکتریکی در داخل فرورفتگی‌ها، از شدّت میدان یکنواخت گاز بیشتر شود. در نتیجه، در این فرورفتگی‌ها گاز یونیزه می‌شود و شرایط تخلیه به‌وجود می‌آید. ثانیاً، به‌علّت آن‌که سطح خارجی عایق جامد کاملاً تمیز نیست و یا حدّاقل میزان تمیزی در سطح آن یکنواخت نیست، بر اثر قرار گرفتن موادّ مختلف روی سطح خارجی عایق (مانند گرد و غبار یا رطوبت غیریکنواخت سطح)، تقسیم ولتاژ روی سطح عایق به‌طور یکنواخت صورت نمی‌گیرد. بنابراین، قسمت‌های کثیف و مرطوب دارای قابلیت هدایت بیشتری، و قسمت‌های خشک و تمیز دارای قابلیت هدایت کم‌تری است. در نتیجه، روی قسمت‌های کثیف و مرطوب، ولتاژ افت نمی‌کند و روی قسمت‌های خشک و تمیز (که مقاومت الکتریکی بیشتری دارند)، افت ولتاژ بیشتری وجود دارد و باید شدّت میدان الکتریکی بالاتری را تحمّل کنند. این مقدار زیاد شدن شدّت میدان الکتریکی در بعضی قسمت‌ها، باعث یونیزاسیون گاز و شکست عایق گازی مجاور آن می‌شود و منجر به بروز جرقّه روی سطح عایق جامد می‌گردد. به‌علاوه حضور آلودگی و رطوبت روی سطح عایق جامد، موجب افزایش جریان رسانایی روی سطح (به‌علّت تشکیل همین لایهٔ رسانا) شده، با زیاد شدن این جریان رسانایی روی سطح، ممکن است جرقّه روی سطح عایق زده شود.

۴-۸- ردگذاری[1] در سطح عایق‌های جامد

این پدیده نشان دهندهٔ به‌وجود آمدن یک مسیر هدایت به‌صورت لایهٔ کربنی و دائمی روی سطح عایق جامد است که در نتیجه، پایین آمدن استقامت الکتریکی عایق‌های جامد را به‌همراه خواهد داشت. این پدیده معمولاً در عایق‌های جامدی که از موادّ آلی ساخته شده‌اند، به‌وجود می‌آید. برای عایق‌هایی که در فضای آزاد قرار می‌گیرند، به مرور زمان، آلودگی‌های صنعتی یا املاح روی آن‌ها را می‌پوشاند. لایهٔ

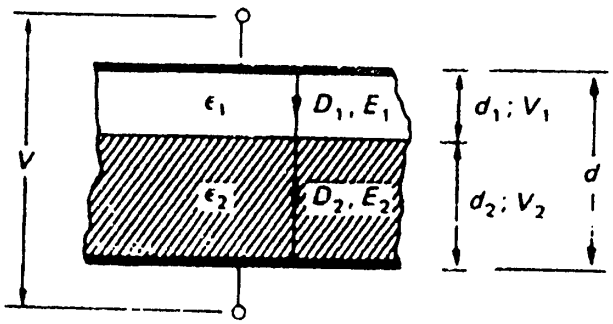
1- *Tracking*

آلودگی به‌همراه رطوبت، جریان نشتی سطح عایق را افزایش می‌دهد که باعث گرم شدن سطح عایق و در نتیجه خشک شدن لایهٔ رطوبت می‌شود. البتّه بین نقاط مرطوب جرقّه زده می‌شود و این جرقّه‌ها ممکن است بین دو الکترود هم زده شوند. گرمای ناشی از جرقّه‌های کوچک سبب کربنیزه شدن سطح عایق شده و برای همیشه ردّ اثر آن روی سطح عایق تشکیل می‌شود. این پدیده، استفاده از عایق‌های با موادّ آلی را برای محیط‌های خارجی محدود می‌سازد. شدّت اثرگذاری روی سطح، به ساختمان پلیمری عایق بستگی دارد. همچنین میزان گرد و غبار و ذرّات فلزی روی عایق، تأثیر بسیار مهمّی روی این موضوع دارد.

۴-۹- عایق‌های چندگانه در میدان‌های یکنواخت

در بعضی از دستگاه‌ها (مثل ترانسفورماتورها) چند عایق با عدد دی‌الکتریک مختلف در مجاور یکدیگر قرار می‌گیرند. یکی از دلایل این موضوع، می‌تواند به سبب مسایل مکانیکی باشد. مثلاً یک عایق معیّنی به دلیل نداشتن استقامت مکانیکی کافی، در مجاور یک عایق دیگر با استقامت مکانیکی قرار می‌گیرد، و یا مثلاً وقتی چندین لایهٔ نازک عایق کاغذ را مجاور هم قرار می‌دهیم به علّت توزیع آماری نقاط ضعیف در لایه‌های مختلف، مجموعهٔ آن‌هانسبت به یک لایهٔ ضخیم از استقامت مکانیکی بهتری برخوردار خواهد بود. در ابتدا دو عایق با ضریب نفوذپذیری الکتریکی ε_1 و ε_2 را در یک میدان یکنواخت و در یک ولتاژ V در نظر بگیرید (مطابق شکل ۴-۱۶).

با توجّه به این‌که چگالی شار در هر دو عایق برابر است، در نتیجه می‌توان نوشت:



شکل (۴-۱۶): عایق‌های مختلف در میدان‌های یکنواخت

$$D_1 = D_2$$
$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$$
$$E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1$$
$$V = V_1 + V_2 = E_1 d_1 + E_2 d_2 = E_1 d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_1 d_2$$

و در نتیجه،

(۳۸-۴)

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2}$$

به طریق مشابه می‌توان نوشت :

(۳۹-۴)

$$E_2 = \frac{V}{d_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} d_1}$$

E_1 هنگامی بیشترین مقدار را دارد که مقدار $d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} d_2$ کم‌ترین مقدار را داشته باشد. در این صورت، شرایط شکست الکتریکی برای عایق لایهٔ (۱) بدترین حالت است؛ زیرا باید میدان بیشتری را تحمّل کند. بنابراین، باید همیشه عایق‌ها را طوری انتخاب کنیم که با توجّه به استقامت الکتریکی هر یک از آن‌ها، مقادیر E_1 و E_2 به‌نسبت مناسبی توزیع شوند. البتّه هیچ ارتباطی بین عدد دی‌الکتریک عایق‌ها و استقامت الکتریکی آن‌ها وجود ندارد. در طرّاحی عایقی باید لایه‌های عایقی مجاور هم با انتخاب مناسب لایه‌ها طوری طرّاحی شوند که توزیع شدّت میدان الکتریکی بین آن‌ها متناسب با استقامت الکتریکی آن‌ها باشد تا از مجموعهٔ آن‌ها، استفادهٔ مناسبی به‌عمل آید. در نهایت از این رابطه، برخی نتایج را می‌توان به‌دست آورد:

الف) جایگزینی بخشی از یک مادّهٔ عایقی با ضریب ε_1 (مثلاً گاز موجود در یک فاصلهٔ هوایی دارای میدان یکنواخت)، با عایق دیگری با ضریب ε_2 ($\varepsilon_2 > \varepsilon_1$) سبب کاهش طول فاصلهٔ هوایی مؤثّر می‌شود؛ زیرا با فرض ثابت بودن E_1 در فاصلهٔ هوایی اوّلیه، طول فاصلهٔ هوایی $d' = d_1 + d_2 (\varepsilon_1/\varepsilon_2)$ به‌دست می‌آید که در آن ضخامت لایهٔ دوم به‌مقدار $d_2 (\varepsilon_1/\varepsilon_2)$ کاهش یافته است. همچنین با ثابت ماندن V_1 ، d، و $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ شدّت میدان E_1 پیوسته با افزایش ضخامت لایهٔ ۲،

ضریب دی‌الکتریک بزرگتر افزایش می‌یابد.

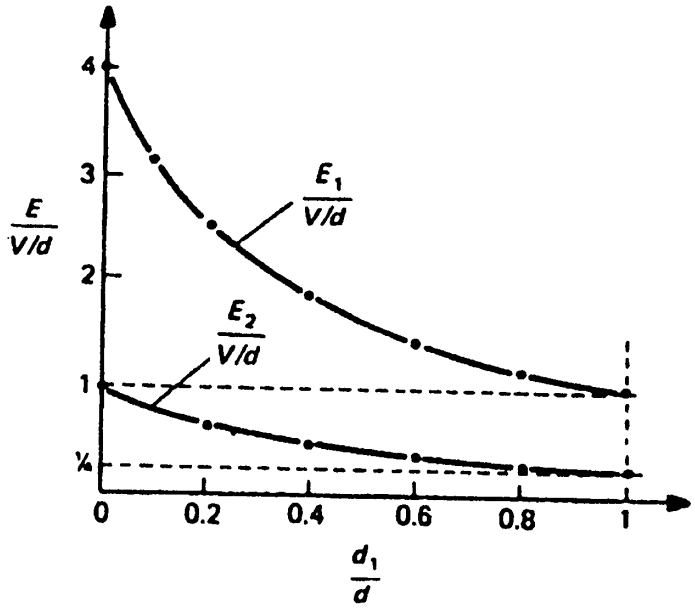
ب) افزایش مداوم شدّت میدان‌های E_1 و E_2 در سیستم صفحات موازی، متناسب با افزایش ضخامت d_2 برای $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ در شکل (۴-۱۷) رسم شده است.

بدترین حالت، برای وضعیتی است که $d_1 \to 0$ (یعنی، لایه‌های خیلی نازکی از مادّهٔ دارای ضریب نفوذپذیری الکتریکی کوچکتر) می‌رود؛ زیرا در این حالت، شدّت میدان به‌مقدار $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ برابر حالتی است که فاصلهٔ بین دو الکترود با یک عایق پر شود. از این نظر، سیستم عایقی چندگانه بسیار مضر است، ولی با وجود این، به‌سبب هزینهٔ بالای آن‌ها از عایق‌های چندگانه نمی‌توان صرف‌نظر نمود.

ج) با استفاده از مطالب موجود، می‌توان ضریب نفوذپذیری عایق‌های مخلوط را به‌دست آورد. این حالت، مثل مخلوط عایق‌های جامد با روغن است. فرض کنید دو عایق با ضریب دی‌الکتریک ε_1 و ε_2 و عایق منتجّه دارای ضریب دی‌الکتریک ε_{res} باشد. در این حالت می‌توان نوشت:

$$D = \varepsilon_{res} E = \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 \qquad (۴-۴۰)$$

آن‌گاه با استفاده از رابطهٔ (۴-۳۸) در معادلهٔ (۴-۴۰) داریم:



شکل (۴-۱۷): تغییر مقادیر نسبی E_1 و E_2 به ازای ولتاژ V با d_1 متغیر و $\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 4$

$$\varepsilon_{res}\frac{V}{d}=\varepsilon_1\frac{V}{\varepsilon_1\left(d_1/\varepsilon_1+d_2/\varepsilon_2\right)} \qquad (۴۱-۴)$$

در نتیجه،

$$\varepsilon_{res}E=\frac{1}{\left(\frac{d_1/d}{\varepsilon_1}\right)+\left(\frac{d_2/d}{\varepsilon_2}\right)}\left(\frac{V}{d}\right) \qquad (۴۲-۴)$$

که $\frac{V}{d}$ بیانگر مقدار متوسّط شدّت میدان درون عایق مخلوط است. همچنین d_1/d و d_2/d را می‌توان متناسب با حجم‌های عایق اوّل و دوم نسبت به حجم کل (v) دانست.

حجم نسبی عایق اوّل $= v_1 = v_1/v$

حجم نسبی عایق دوم $= v_2 = v_2/v$

در نهایت می‌توان ضریب دی‌الکتریک عایق منتجّه را به‌صورت زیر بیان نمود.

$$\varepsilon_{res}=\frac{1}{\frac{v_1}{\varepsilon_1}+\frac{v_2}{\varepsilon_2}} \qquad (۴۳-۴)$$

۴-۱۰- شکست خطوط میدان در عایق‌های چندگانه

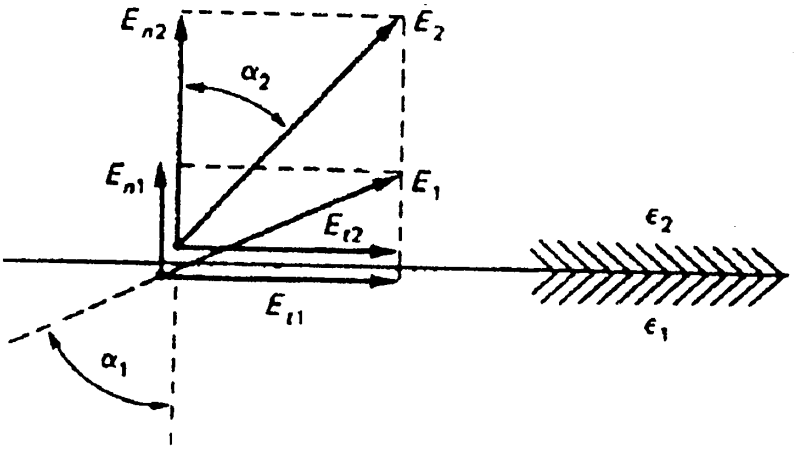
هنگامی‌که بردار جابه‌جایی شدّت میدان با زاویه‌ای غیر از °۹۰ مطابق با شکل‌های (۴-۱۸) و (۴-۱۹) به حدّ واسط بین دو عایق برخورد می‌کند، جهت آن در عایق دوم تغییر می‌کند. به‌طور کلّی می‌توان فرض کرد که هیچ بار آزادی در حدّ واسط بین دو عایق وجود ندارد و فقط بارهای پلاریزاسیون، شرایط مرزی را تعیین می‌کنند. با توجّه به‌شکل (۴-۱۸) و با انتگرال‌گیری سطحی، داریم:

$$\oint D.ds=Q=0$$

$$D_{1n}=D_{2n}$$

$$\varepsilon_1E_{1n}=\varepsilon_2E_{2n} \qquad (۴۴-۴)$$

همچنین اگر یک مسیر خطی را حول فصل مشترک بین دو عایق در نظر بگیریم، داریم:



شکل (۴-۱۸): قانون شکست اعمال شده، به شدّت میدان E ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$)

$$\int E.dl = V = 0$$

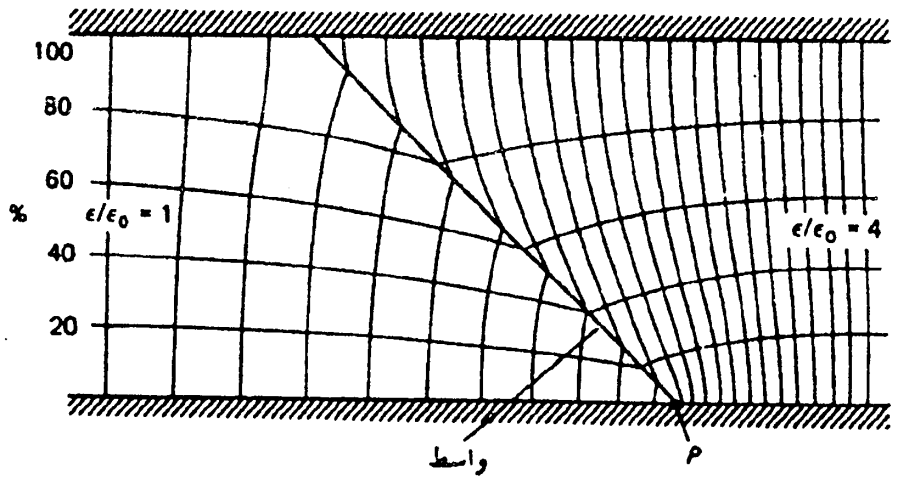
$$E_{1t} = E_{2t} \qquad (۴۵-۴)$$

به این ترتیب زوایای برخورد و شکست را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\frac{\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2} = \frac{E_{1t}/E_{1n}}{E_{2t}/E_{2n}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$$

$$\frac{\tan\alpha_1}{\tan\alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \qquad (۴۶-۴)$$

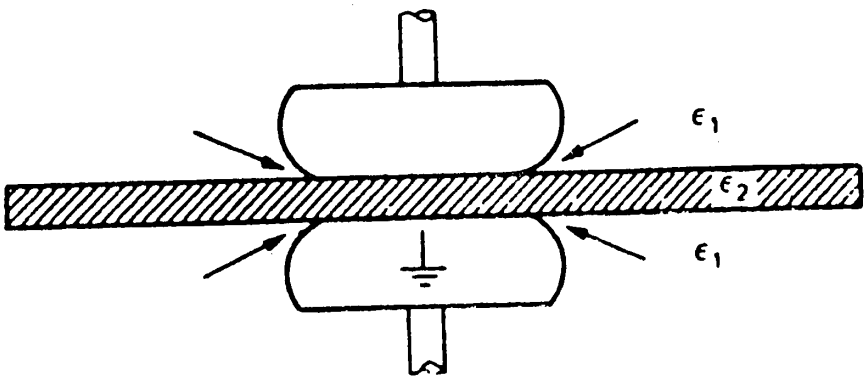
شکل (۴-۱۹) حالتی بین دو عایق متفاوت را نشان می‌دهد که حدّ واسط آن‌ها بر



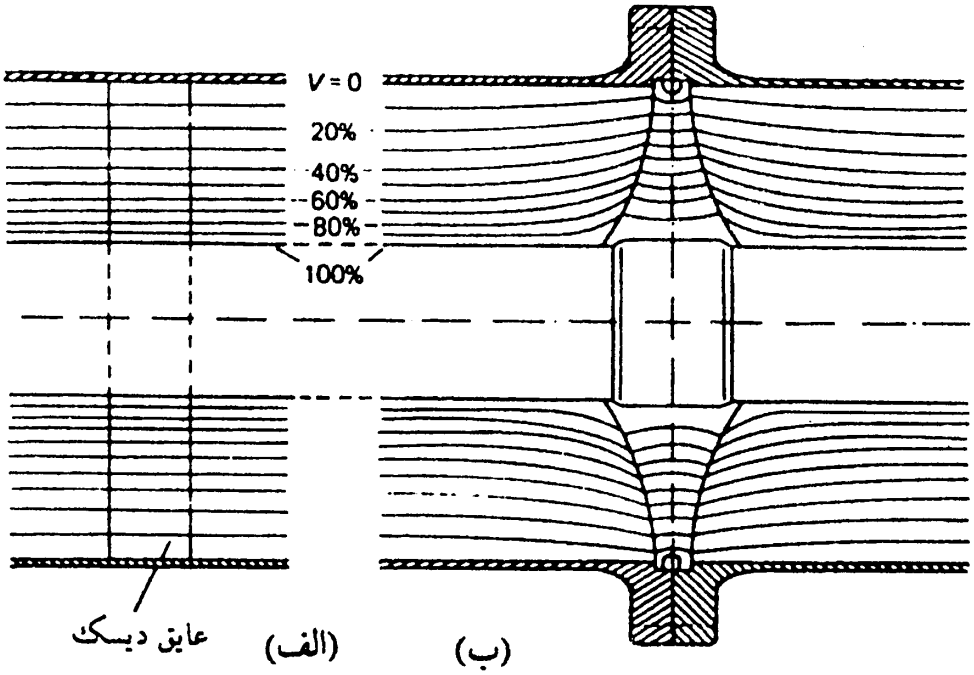
شکل (۴-۱۹): دو مادّهٔ عایقی مختلف بین الکترودهای سطح

سطح الکترودها عمود نمی‌باشد. در گوشهٔ P، فشردگی خطوط هم پتانسیل را مشاهده می‌کنیم که باعث افزایش شدّت میدان در آن نقطه شده است. این حالت را می‌توان با حالتی که فقط بخشی از عایق به الکترود چسبیده و حفره باقی مانده با مادّهٔ دارای استقامت الکتریکی نامناسب پر شده باشد، منطبق نمود. یک نوع از این حالت را که در خلال آزمایش تعیین استقامت الکتریکی عایق‌های جامد رخ می‌دهد، می‌توان مطابق با شکل (۴-۲۰) مشاهده نمود.

یکی دیگر از کاربردهای رابطهٔ زاویهٔ شکست را می‌توان در بهبود بخشیدن قدرت عایقی یک سیستم عایقی در نظر گرفت. به‌طور مثال در فاصلهٔ نگهدارنده‌های جامدی که در محفظه‌های بستهٔ ایستگاه‌های گازی (GIS) به‌کار می‌روند، می‌توان از این قانون استفاده نمود. در این ایستگاه‌های برق، هادی‌های استوانه‌ای هم محور گر چه توسّط گاز SF6 عایق می‌شوند، ولی در برخی نقاط، برای هادی داخلی از نظر مکانیکی، نیاز به عایق‌های جامد نگهدارنده است. با استفاده از یک صفحهٔ گرد از عایق جامد (شکل ۴-۲۱-الف را ببینید) خطوط شار شکسته نمی‌شود و نحوهٔ توزیع شدّت میدان به‌گونه‌ای است که مقدار E_t در امتداد سطح تماس عایق نگهدارنده با گاز، ثابت نخواهد بود. همچنین خطوط هم پتانسیل در سطح هادی‌ها بسیار نزدیک است. یک راه عملی، استفاده از عایقی مطابق شکل (۴-۲۱-ب) است که خطوط هم پتانسیل در داخل عایق نگهدارنده با توزیع یکنواخت‌تری همراه خواهد بود.



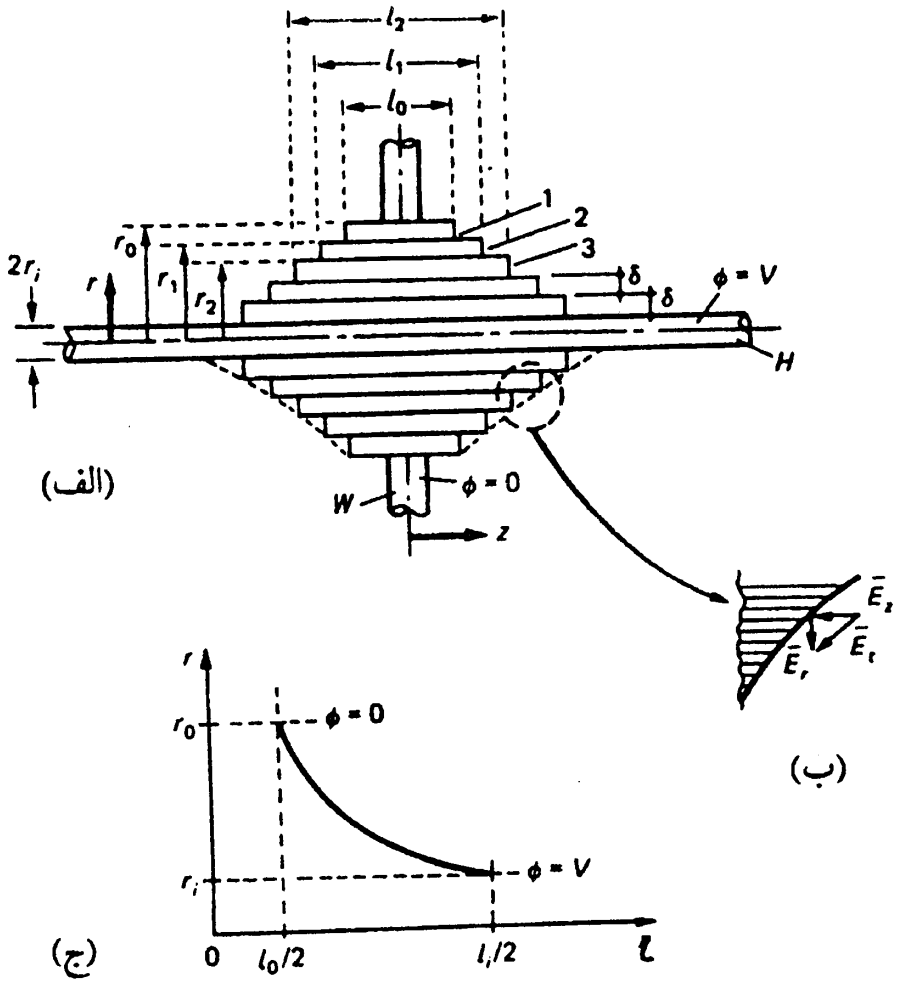
شکل (۴-۲۰) مناطق مشخّص شده با ↑ تحت تنش‌های شدید میدان الکتریکی با $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ هستند.



شکل (۴-۲۱): تکیه‌گاه هادی داخلی یک سیستم استوانه‌ای هم محور؛
الف) فاصلهٔ نگهدار گرد ساده، هیچ شکست خطوط میدان وجود ندارد؛
ب) فاصلهٔ نگهدار شکل داده شده

۴-۱۱- کنترل شدّت میدان در میدان‌های غیریکنواخت

همان‌گونه که قبلاً هم بیان گردید، قرار دادن عایق‌های چندگانه بین الکترودها باعث کنترل ولتاژ و شدّت میدان الکتریکی می‌شود. البتّه به‌طور کلّی، شکل دادن حدّ واسط‌ها، به‌شکلی که سطوح هم پتانسیل ایجاد کنند، مشکل است. در عمل برای رفع این مشکل، راه حلّ استفاده از الکترودهای (صفحه‌های) شناور پیشنهاد می‌شود که در شکل (۴-۲۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخّص است، هادی H به‌وسیلهٔ لایه‌های متعددی از عایق با دی‌الکتریک ε (بزرگتر از ε_0 خلاء) احاطه می‌شود. البتّه این لایه‌ها دارای طول‌های متفاوتی هستند که این لایه‌های با طول‌های مختلف، در غلاف‌های نازک هادی تعبیه شده و الکترودهای شناور را به‌وجود می‌آورند. این سیستم در واقع آرایشی از خازن‌های استوانه‌ای هم محور است که به‌طوری سری به هم متّصل شده‌اند و به این ترتیب، یک مقرهٔ عبوری



شکل (۴-۲۲): مقرهٔ عبوری خازنی: الف) آرایش خازن هم محور؛
ب) برشی از نمای غلاف‌های هادی برای ثابت بودن شدّت میدان شعاعی $\bar{E}_r$
ج) تغییرات طول لایه‌ها نسبت به فاصلهٔ شعاعی از محور

خازنی (بوشینگ فشار قوی) را تشکیل می‌دهند.

این عایق‌های با طول‌های مختلف l_1، l_2 تا l_n با عددهای دی‌الکتریک ε_1 و ε_2 تا ε_n، خازن‌هایی را با یکدیگر تشکیل می‌دهند. این حالت، مثل آن است که چند خازن به‌صورت سری به هم متّصل شده باشند، ظرفیت خازنی لایهٔ شمارهٔ x برابر است با:

$$C_x = \frac{2\pi\, \varepsilon_x\, l_x}{\ln\left(\frac{r_{x+1}}{r_x}\right)} \qquad (۴-۴۷)$$

در این رابطه، r_{x+1} شعاع بیرونی و r_x شعاع درونی این لایه است. ظرفیت خازنی کل، از اتّصال سری این خازن‌ها به‌دست می‌آید. اگر ظرفیت کل را با C نمایش دهیم، آن‌گاه خواهیم داشت:

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{C_i}} \qquad (۴۸-۴)$$

در این رابطه، n تعداد لایه‌هاست. در صورتی‌که ولتاژ بین پوسته و هادی V باشد، افت ولتاژ روی هر لایهٔ عایق برابر است با،

$$V_x = \frac{C}{C_x} V$$

$$V_x = \frac{V}{\frac{l_x \varepsilon_x}{\ln\left[\frac{r_{x+1}}{r_x}\right]} \sum_{i=1}^{n} \frac{\ln\left[\frac{r_{i+1}}{r_i}\right]}{l_i \varepsilon_{ri}}} \qquad (۴۹-۴)$$

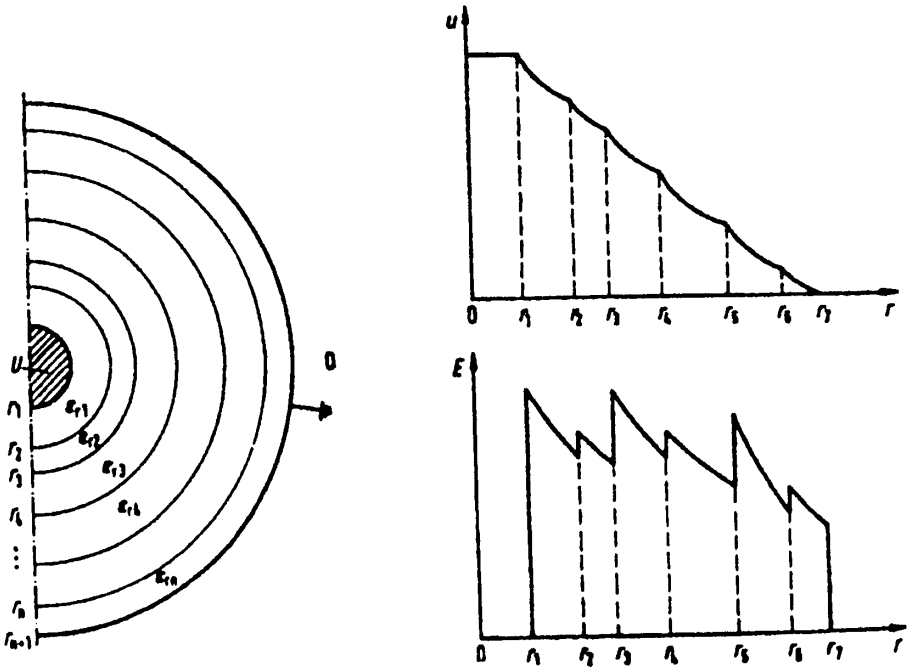
در این رابطه، طول لایه‌ها نامساوی فرض شده است. این مطلب در مورد مقره‌های عبوری یا بوشینگ‌ها پیش می‌آید. در بوشینگ‌های خازنی بین هر لایهٔ عایق یک ورقهٔ نازک هادی نیز قرار دارد. تغییرات شدّت میدان الکتریکی بر حسب شعاع در لایه‌ای از عایق برابر است با،

$$E_x(r) = \frac{V_x}{r \ln\left(\frac{r_{x+1}}{r_x}\right)} = \frac{V}{r\, l_x \varepsilon_x \sum_{i=1}^{n} \frac{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}{l_i \varepsilon_i}} \quad , \quad r_x < r < r_{x+1} \qquad (۵۰-۴)$$

در عبور از یک لایهٔ به لایهٔ دیگر، پتانسیل تغییر نمی‌کند، ولی شدّت میدان الکتریکی دارای یک جهش می‌باشد. نسبت شدّت میدان الکتریکی در دو لایهٔ مجاور برابر است با،

$$\frac{E_x(r)}{E_{x+1}(r)} = \frac{(\varepsilon_{x+1})(l_{x+1})}{(\varepsilon_x)(l_x)} \qquad (۵۱-۴)$$

در شکل (۴-۲۳) تغییرات پتانسیل و شدّت میدان الکتریکی بر حسب شعاع در چنین خازنی نشان داده شده است. در بوشینگ‌ها با انتخاب طول و شعاع لایه‌ها سعی می‌شود تقسیم ولتاژ، هم در جهت شعاع و هم در طول بوشینگ، به‌طور



شکل (۴-۲۳): کابل کواکسیال یا بوشینگ فشار قوی؛ تغییرات پتانسیل و شدّت میدان در لایه‌های مختلف آن

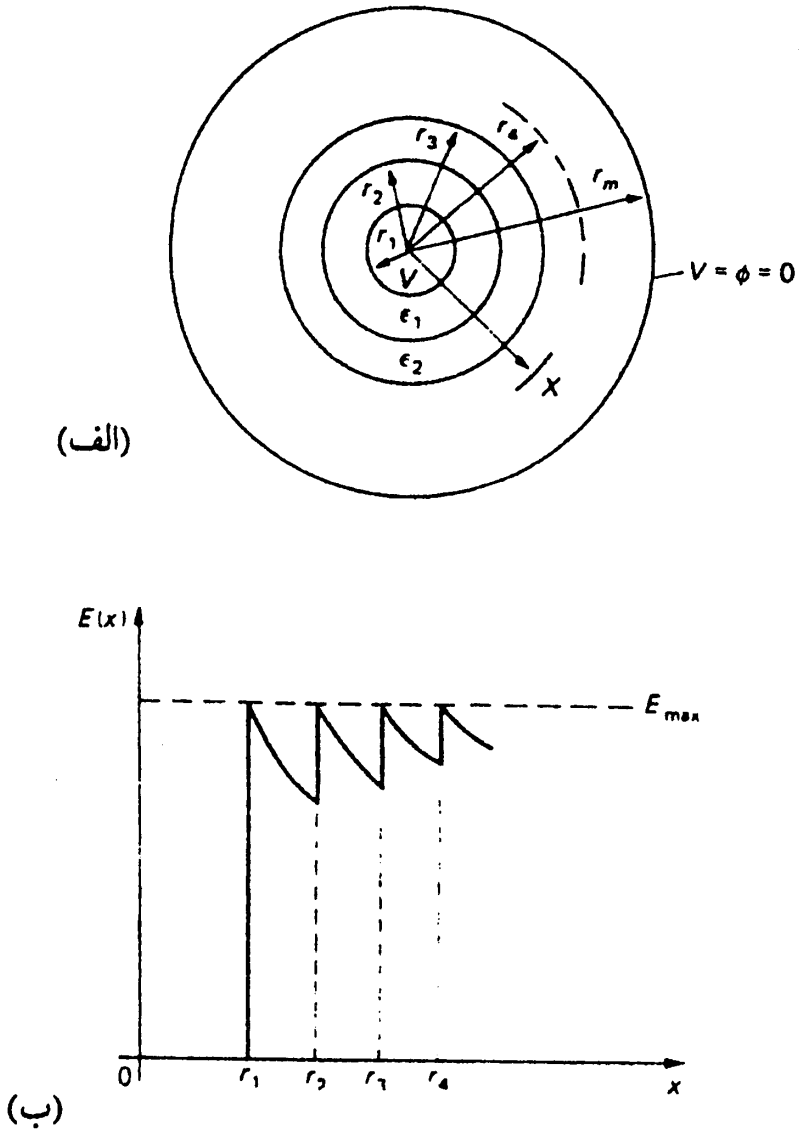
یکنواخت باشد. برای این‌که حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی در همهٔ لایه‌ها مطابق شکل (۴-۲۴) برابر باشد، با توجّه به رابطهٔ نهایی $E_x(r)$، باید رابطهٔ زیر را داشته باشیم:

$$r_1 l_1 \varepsilon_1 = r_2 l_2 \varepsilon_2 = \ldots\ldots = r_i\, l_i \varepsilon_i \qquad (۵۲-۴)$$

اگر ضخامت لایه‌های بوشینگ خیلی کم (و به‌صورت ورقه) باشد و همزمان با افزایش شعاع (r)، مقدار εl همواره در تمام لایه‌ها برابر باشد، شدّت میدان یکنواختی ایجاد می‌شود. در صورتی‌که جنس عایق تغییر نکند، برای لایه‌های مختلف باید داشته باشیم:

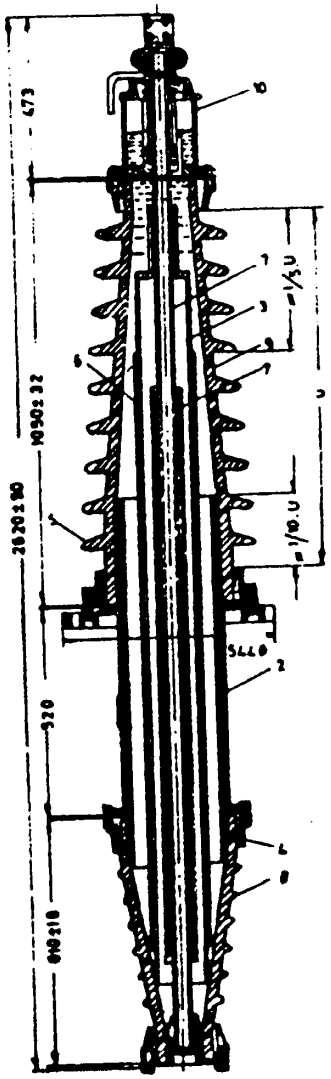
$$r_1 l_1 = r_2 l_2 = \ldots. = r_i\, l_i = \ldots. = r_n l_n \qquad (۵۳-۴)$$

می‌توان همزمان با افزایش شعاع، طول لایه‌ها راکاهش داد (لایه‌های بیرونی با طول کم‌تر)، که این موضوع در بوشینگ‌ها قابل مشاهده است. به‌همین دلیل، شکل ظاهری محفظهٔ بیرونی که روی مجموعهٔ لایه‌های عایقی کاغذی قرار می‌گیرد و از



شکل (۴-۲۴): کابل کواکسیال با لایه‌های با عددهای دی‌الکتریک متفاوت و تغییرات شدّت میدان

جنس چینی است، به‌صورت دو مخروط می‌باشد (شکل ۴-۲۵ را ببینید). بین این دو مخروط، فلانچ قرار دارد که روی بدنهٔ دستگاه نصب می‌شود. مخروط با طول بزرگتر در هوای آزاد و مخروط با طول کم‌تر، در داخل دستگاه (که معمولاً در مجاورت روغن قرار دارد)، قرار می‌گیرد. جریان نشتی سطحی در هوای آزاد بیشتر از روغن است و بنابراین، باید طول مسیر داخل هوای آزاد، بزرگتر از روغن باشد. البتّه گاهی در بعضی مسائل، طول عایق ثابت است، ولی جنس آن متفاوت است. در



شکل (۴-۲۵): مقرهٔ عبوری پر شده از روغن

این حالت، باید شرایط زیر برقرار باشد:

$$r_1\varepsilon_1 = r_2\varepsilon_2 = \dots = r_i\varepsilon_i = \dots = r_n\varepsilon_n \qquad (۵۴-۴)$$

در مواردی روی یک سیم هادی، لایه‌ای از کاغذ و سپس روغن می‌باشد و یا بر روی هادی، لایه‌ای از یک جنس مانند رزین اپوکسید و سپس هوا قرار دارد. در این حالت، استقامت الکتریکی لایهٔ اوّل (مثلاً رزین اپوکسید) چند برابر استقامت الکتریکی لایهٔ دوم (مثلاً هوا) است. در این شرایط سعی در مساوی کردن حدّاکثر شدّت میدان الکتریکی در این دو لایه نیست، بلکه معمولاً سعی می‌گردد تا شدّت میدان الکتریکی بر روی سطح عایق جامد (یعنی در هوا یا در روغن) به حدّاقل خود کاهش یابد.

فصل پنجم
شناخت میدان‌های الکتریکی

۵-۱ - مقدّمه

متناسب با رشد مصرف انرژی الکتریکی در دو قرن اخیر، سطح ولتاژ خطوط انتقال نیز افزایش یافته است. در نتیجه، با افزایش ولتاژ، شدّت میدان الکتریکی نیز زیاد می‌شود. بنابراین، طرّاحان تجهیزات الکتریکی مجبور شده‌اند تا به منظور حفظ رقابت با دیگر طرّاحان، درجهت کاهش ابعاد و وزن تجهیزات الکتریکی اقداماتی را انجام دهند. بدین منظور اگر درک صحیحی از خواصّ موادّ عایقی و آگاهی از چگونگی میدان‌های الکتریکی و روش‌های کنترل شدّت میدان موجود نباشد، آن‌گاه انجام این کار میسّر نخواهد بود. پس به منظور عایق‌کاری بهینهٔ تجهیزات، دانستن شکل و شدّت میدان الکتریکی ضروری است. البته نرم‌افزارهای قدرتمندی تهیه شده است که با استفاده از آن‌ها قادر خواهیم بود تا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را ترسیم نماییم که از آن جمله می‌توان به نرم‌افزارهای Matlab و Vector Field اشاره کرد.

در بخش‌هایی از فصل دوم، مختصری در مورد میدان‌های الکتریکی سخن به میان آمد و بعضی از میدان‌ها را از نظر روابط مربوط به معادلات شار و شدّت میدان‌های الکتریکی بررسی و محاسبه کردیم. در این فصل، روش‌های مختلف اندازه‌گیری، تعیین و محاسبهٔ میدان‌های الکتریکی، به‌طور اختصار بیان می‌شود. در این روش‌ها، نحوهٔ ترسیم خطوط میدان الکتریکی و خطوط هم‌پتانسیل بیان می‌شود. در هر کدام

از این روش‌ها، سعی بر این است تا با ارائهٔ اصول کلّی و صرف‌نظر از جزئیات روش‌ها، دید کلّی در مورد شناخت میدان‌های الکتریکی و خطوط هم‌پتانسیل برای خوانندگان ایجاد گردد.

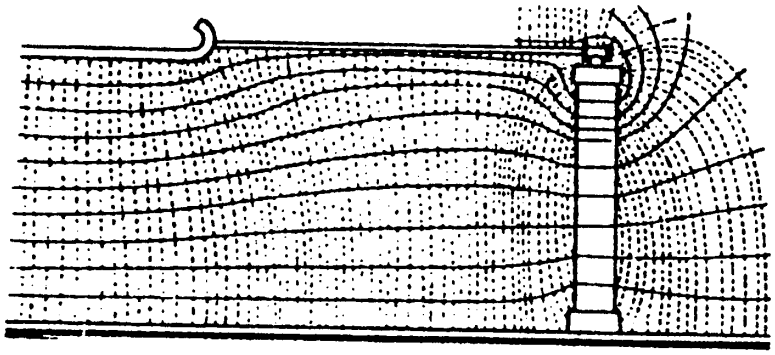
۵-۲- پیدا کردن میدان الکتریکی به‌وسیلهٔ اندازه‌گیری و آزمایش

هدف از تعیین میدان الکتریکی، یافتن خطوط میدان و خطوط هم‌پتانسیل (یعنی شکل میدان) است. برای پیدا کردن شکل میدان، روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از این روش‌ها، اندازه‌گیری مستقیم می‌باشد. مشکل این روش در آن است که اگر دستگاه اندازه‌گیری بزرگ و یا مصرف آن زیاد باشد، شکل میدان تغییر می‌کند (عبور جریان از یک دستگاه اندازه‌گیری ولتاژ، باعث تغییر پتانسیل میدان می‌شود). همچنین در میدان فشار قوی ممکن است تخلیهٔ جزئی وجود داشته باشد که این تخلیه باعث پراکنده شدن بار الکتریکی در فضا می‌شود ؛ به‌نحوی که شکل میدان متأثّر از این بارها خواهد بود. با تغییر ولتاژ و تغییر شدّت تخلیهٔ الکتریکی، شکل میدان نیز تغییر خواهد نمود. در ادامه، چند روش تعیین میدان به‌وسیلهٔ اندازه‌گیری را به‌طور خلاصه شرح می‌دهیم.

۵-۲-۱- تعیین جهت میدان با روش پرِ کاه

این روش به این صورت است که از وسط پرِ کاه، نخی را عبور داده و دو سر این نخ را به دست دو نفر که از الکترودها فاصله دارند می‌دهند. سپس پر کاه را در مکان‌های مختلفی از میدان قرار می‌دهند. با توجّه به آن‌که عدد دی‌الکتریک پر کاه، بزرگ‌تر از محیط می‌باشد، از طرف میدان بر آن نیرویی وارد می‌شود؛ در نتیجه پر کاه در هر نقطه‌ای در جهت خطوط میدان قرار می‌گیرد.

به این ترتیب خطوط میدان را می‌توان به‌آسانی برای ولتاژهای مستقیم و متناوب به‌دست آورد. برای پیدا کردن خطوط هم‌پتانسیل نیز، کافی است تا خطوط عمود بر خطوط میدان را بیابیم. این روش را می‌توان در شکل (۵-۱) مشاهده کرد.



شکل (۵-۱): ترسیم میدان به روش پرکاه برای یک مقرهٔ اتّکایی با شین متّصل به آن

۵-۲-۲- تعیین پتانسیل میدان با روش جبرانی[1]

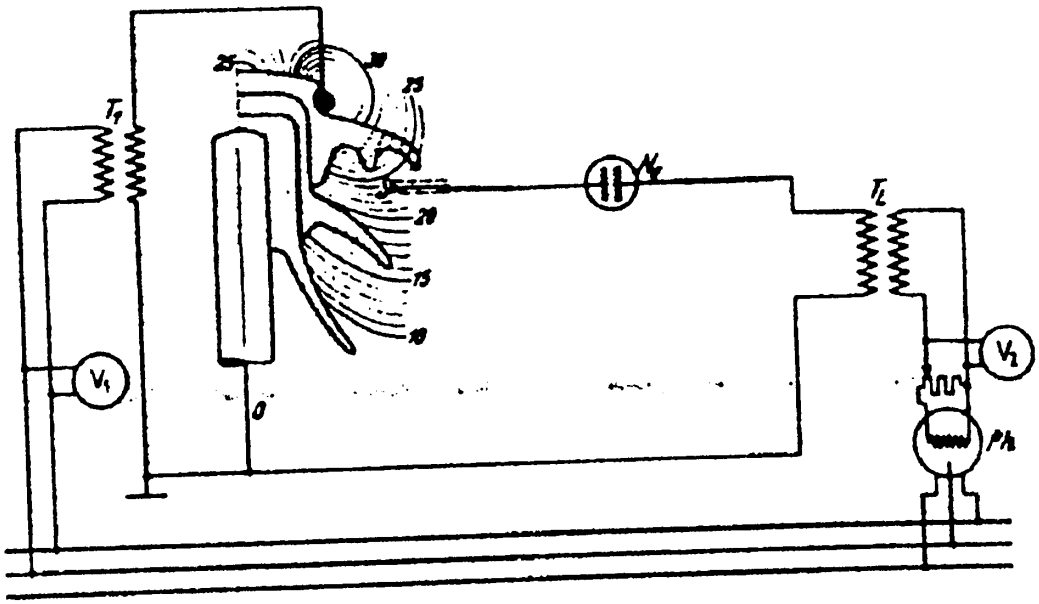
یکی دیگر از روش‌های تعیین میدان به‌وسیلهٔ اندازه‌گیری، اندازه‌گیری مستقیم پتانسیل می‌باشد که امکان انجام آن در ولتاژ فشار قوی نیز وجود دارد. اساس این اندازه‌گیری بدین صورت است که برای تعیین پتانسیل هر نقطه، یک پروب[2] در آنجا قرار می‌دهند و آن را به کمک سیم رابط به یک دستگاه صفرسنج ولتاژ متّصل می‌کنند. این دستگاه بین یک پروب و یک منبع ولتاژ با قابلیت تنظیم قرار می‌گیرد. هنگامی که ولتاژ منبع با ولتاژ نقطهٔ مورد نظر برابر باشد، هیچ ولتاژی در دو سر دستگاه صفرسنج قرار نمی‌گیرد و این دستگاه عدد صفر را نشان می‌دهد (به‌عنوان صفرسنج ولتاژ، می‌توان از لامپ نئون یا فازمتر استفاده کرد). پتانسیل منبع را نیز می‌توان با یک ولت‌متر مشخّص کرد (شکل ۵-۲ را ببینید).

نکاتی که در این روش باید مورد توجّه قرار گیرند عبارتند از:

الف) پروب و سیم رابط آن باید هم‌پتانسیل باشند؛ به‌گونه‌ای که باعث تغییر شکل میدان هم‌پتانسیل نشوند؛

ب) ابعاد پروب باید به‌گونه‌ای باشد تا جریان لازم برای تحریک دستگاه صفرسنج بتواند از آن عبور کند؛

1- Compensation Method *2- Probe*



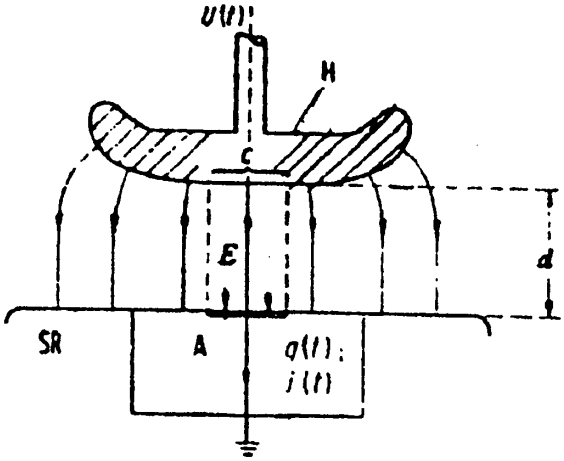
شکل (۵-۲): اندازه‌گیری تقسیم ولتاژ روی یک مقره

ج) این روش، تنها در ولتاژ متناوب قابل انجام است. در این ولتاژ، جریان از طریق ظرفیت بین پروب و الکترودهای فشارقوی عبور می‌کند؛

د) نکتهٔ دیگر این‌که به دلیل وجود ظرفیت، مقاومت و عدم یکنواختی بین آن‌ها، ممکن است ولتاژ در طول عایق، هم‌فاز با ولتاژ الکترود نباشد و دستگاه صفرسنج به‌درستی عمل ننماید. برای رفع این عیب باید از دستگاه تنظیم ولتاژ و فاز استفاده کرد.

۵-۲-۳- تعیین شدّت میدان با استفاده از القای بار الکتریکی روی الکترود

در این روش، همانند شکل (۵-۳) از یک الکترود کوچک (A) که در وسط یک الکترود بزرگ (SR) نصب شده و از طریق یک وسیلهٔ اندازه‌گیری جریان به زمین متّصل است، استفاده می‌شود. همچنین الکترود بزرگ مستقیماً به زمین وصل می‌شود. خطوط میدان الکترود فشار قوی (H)، به محیط اطراف، الکترود کوچک و الکترود بزرگ منتهی می‌شود؛ زیرا در فاصلهٔ نسبتاً دور از الکترود فشار قوی، میدان الکتریکی به‌صورت یکنواخت می‌باشد و چون لبه‌های الکترودهای کوچک و بزرگ، تیز نمی‌باشند بنابراین، با استفاده از القای بار الکتریکی، مقدار بار الکتریکی روی سطح الکترود کوچک برابر است با:



شکل (۵-۳): اندازه‌گیری شدّت میدان الکتریکی

$$q_A = \int_A E.\varepsilon_{\circ}\, dA \qquad (۱-۵)$$

در صورتی که شدّت میدان در ناحیهٔ انتگرال‌گیری (سطح الکترود کوچک) یکنواخت باشد، بار این سطح برابر $q=AE\varepsilon_{\circ}$ می‌شود. حال اگر شدّت میدان الکتریکی به‌صورت $E(t)=E_{\circ}\ \mathrm{Sin}\omega t$ با زمان تغییر نماید، جریانی از سیم رابط بین الکترود کوچک و زمین عبور می‌کند که می‌توان به‌وسیلهٔ اندازه‌گیری این جریان و معلوم بودن ω، شدّت میدان الکتریکی را نیز تعیین کرد.

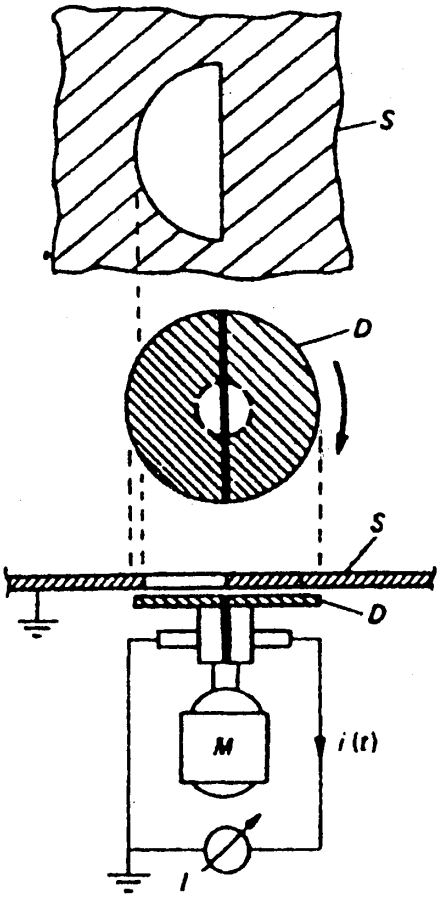
$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_{\circ} A\omega E_{\circ} \cos(\omega t) \qquad (۲-۵)$$

در صورتی‌که شدّت میدان الکتریکی ثابت باشد، چون جریانی روی سطح الکترود کوچک به‌وجود نمی‌آید، نمی‌توان شدّت میدان را مشخّص نمود. در این حالت، ممکن است در مقابل الکترود کوچک، یک صفحهٔ دوّاری (که دارای یک یا چند سوراخ است)، قرار دهیم که به‌طور متناوب با حرکت دورانی خود، باعث تغییر سطحی از الکترود کوچک که مقابل سوراخ قرار گرفته شود. بدین ترتیب، با تغییر پارامتر سطح، بار القا شده روی سطح الکترودِ کوچک، تغییر کرده، جریان به‌وجود می‌آید. مقدار این جریان برابر است با:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_{\circ} E \frac{dA}{dt} \qquad (۳-۵)$$

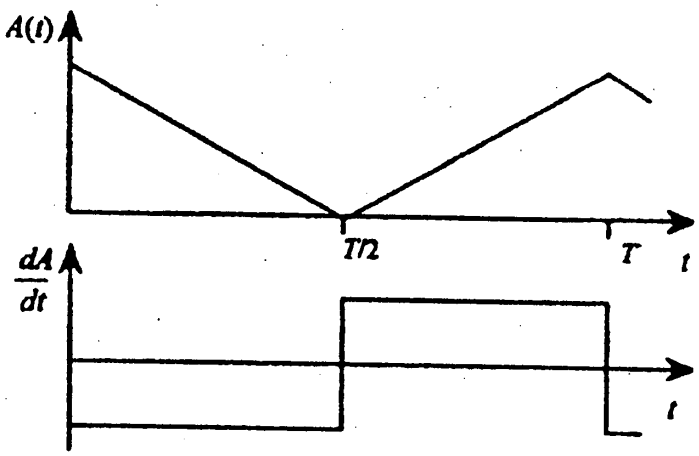
همچنین ممکن است صفحهٔ سوراخ‌دار، ثابت باشد و الکترود کوچک (که از دو نیم

دایره تشکیل شده است)، با کمک یک موتور دوران کند. هریک از این دو نیم دایره شبیه یک ماشین جریان مستقیم به تیغه‌ای از یک الکترود وصل است و روی این الکترود، دو جاروبک می‌لغزند. ساختمان این دستگاه که "آسیای میدان"[۱] نامیده می‌شود، در شکل (۵-۴) نمایش داده شده است. با چرخش الکترود، آن قسمت از سطح الکترود که مقابل سوراخ D قرار گرفته، تغییر می‌نماید. هنگامی که نیم‌دایرهٔ دوّار، کاملاً در مقابل سوراخ D قرار گرفت، سطح مقابل سوراخ و در نتیجه ظرفیت الکتریکی به حدّاکثر خود می‌رسد (شکل ۵-۵ را ببینید). بار القا شده روی الکترودِ کوچک نیز، متناسب با همین ظرفیت می‌باشد. در هر نیم پریود، جهت جریان وارد شده به نیم صفحهٔ دوّار، تغییر می‌کند ؛ امّا به کمک تیغه کلکتور و جاروبک



شکل (۵-۴): آسیای میدان برای اندازه‌گیری شدّت میدان دائم

1- *Field mill*



شکل (۵-۵): تغییرات سطح الکترود کوچک دوّار در آسیای میدان

جهت جریان عبوری از دستگاه اندازه‌گیری تغییر نمی‌کند و در نتیجه متوسّط جریان گذرنده صفر نخواهد بود. بنابراین، می‌توان نوشت:

$$i(t) = V.\frac{dC}{dt} = E\varepsilon.\frac{dA}{dt} \qquad (۴-۵)$$

در نتیجه، جریان متوسّط برابر است با،

$$I = \frac{۱}{T}\int_o^T i(t)dt = \frac{E\ \varepsilon.}{T}\int_o^T \frac{dA}{dt}.dt \qquad (۵-۵)$$

و،

$$I = ۲\times AEn\varepsilon. \qquad (۶-۵)$$

در این رابطه،

$n = \frac{۱}{T}$: سرعت حرکت دورانی نیم صفحه‌های دوّار،

V: ولتاژ الکترود فشار قوی است.

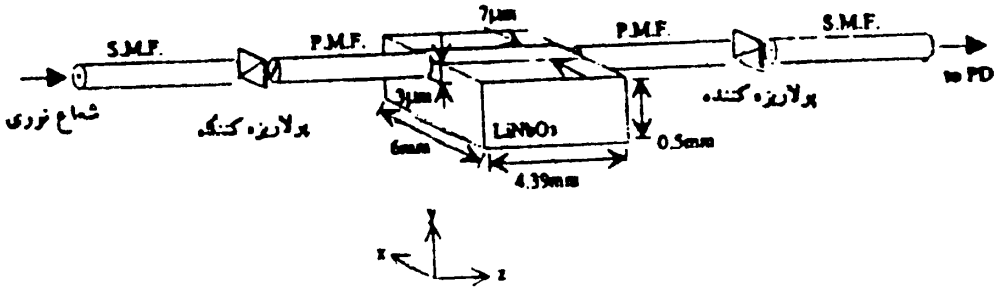
روش دیگر برای تعیین شدّت میدان الکتریکی، استفاده از یک کرهٔ کوچک متّصل به یک میلهٔ عایق می‌باشد که در صورت لزوم، همراه میله می‌چرخد. سطح خارجی کره به شش قسمت تقسیم شده و هر دو قسمت روبه‌روی هم، از طریق یک جفت سیم که از درون لولهٔ عایق عبور کرده است و یک جفت حلقه‌های لغزان به خارج وصل می‌باشند. ولتاژ القا شده در هر یک از دو جفت صفحهٔ مقابل هم، متناسب با شدّت میدان الکتریکی و در جهت عمود بر آن می‌باشد. اگر کره در میدان

متناوب قرار گیرد، نیازی به دوران ندارد؛ امّا در میدان دائم برای این‌که از صفحات، جریان الکتریکی عبور کند، باید بچرخد.

۵-۲-۴- اندازه‌گیری شدّت میدان با عبور نور از کریستال

در این روش از یک کریستال مانند $LiNbO_3$ و یا $CaCo_3$ استفاده می‌شود که در مقابل مسیر پرتوی نور قرار می‌گیرد. نور به هنگام ورود به این کریستال، به دو نور پلاریزهٔ خطّی که صفحهٔ پلاریزاسیون آن‌ها بر هم عمود است، تقسیم می‌شود. از آنجا که سرعت سیر نور در این نوع کریستال‌ها با شدّت میدان الکتریکی تغییر می‌کند، می‌توان با اعمال شدّت میدان الکتریکی به صورت عمود بر یکی از صفحات پلاریزاسیون، سرعت یکی از دو نور را تغییر داد. در نتیجه دو نور با اختلاف فاز از کریستال خارج می‌شوند. با تعیین این اختلاف فاز، می‌توان شدّت میدان الکتریکی را اندازه‌گیری کرد. برای این منظور از پروب‌های کوچک استفاده می‌شود که دو ورقه[1] در دو طرف آن وجود دارد. ورقهٔ اوّل، نور را به‌شدّت پلاریزه می‌کند و ورقهٔ دوم، دو نور پلاریزه شده را با هم جمع می‌نماید (شکل ۵-۶ را ببینید).

کوچکی پروب و عدم وجود هادی، کم‌ترین تغییر را در شکل میدان موجب می‌شود؛ امّا از آنجا که اندازه‌گیری اختلاف فاز، کار مشکلی است؛ بنابراین، توان



شکل (۵-۶): نمودار کلّی اندازه‌گیری میدان الکتریکی، با کمک عبور نور از کریستال

1- Memberane

خروجی را از یک دیود نوری اندازه می‌گیرند. هر چه این دو نور، اختلاف فاز بیشتری نسبت به هم داشته باشند، توان خروجی دیود نوری کم‌تر می‌باشد. به‌عنوان مثال، برای دو نور e_x در راستای محور x و e_y در راستای محور y داریم:

$$e_x = A\sin(\omega t) \qquad \text{در راستای محور x} \qquad (۷-۵)$$

$$e_y = A\sin(\omega t + \Gamma) \qquad \text{در راستای محور y} \qquad (۸-۵)$$

در نتیجه، توان خروجی دیود مناسب است با:

$$P_{out} = \frac{۱}{۲} P_{in} \left(۱ + \cos \Gamma \right) \qquad (۹-۵)$$

که Γ اختلاف فاز دو نور است و داریم:

$$\Gamma = \Gamma_o + \alpha E \qquad (۱۰-۵)$$

که Γ_o اختلاف فاز دو نور در حالتی است که شدّت میدان برابر صفر باشد.

این روش امکان اندازه‌گیری شدّت میدان الکتریکی دائم و متناوب تا فرکانس‌های بسیار بالا را ممکن می‌سازد.

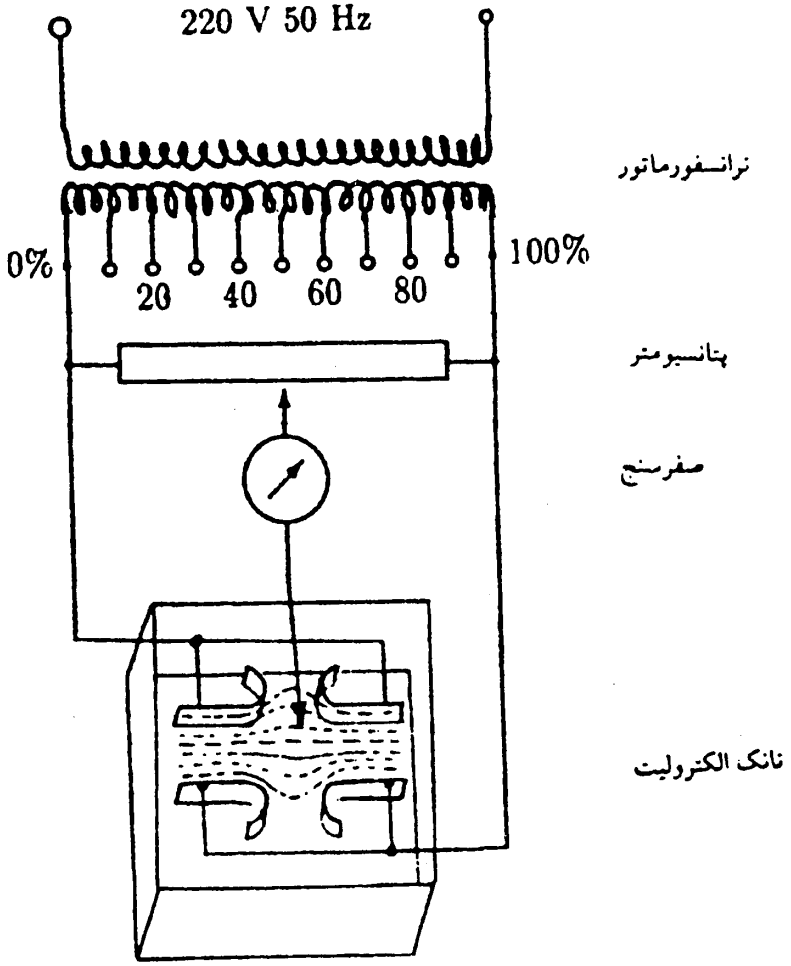
۵-۲-۵- تعیین شدّت میدان با روش‌های غیرمستقیم

از جمله روش‌های غیرمستقیم برای تعیین شدّت میدان الکتریکی، "روش آنالوگ"[۱] است. آنالوگ یا شبیه‌سازی به‌معنای مدل‌سازی یک کمّیت یا سیستم فیزیکی به‌جای کمّیت دیگر می‌باشد (البته در صورتی که معادلات هردو میدان یکی باشند). مثلاً به‌جای تعیین میدان الکتریکی، یک میدان دیگر مثلاً حرارتی با شکل و شرایط حدّی برابر ایجاد کنیم و به‌جای پتانسیل، درجه حرارت را اندازه بگیریم.

بدین منظور برای تعیین شدّت میدان الکتریکیِ یک عایق با عدد دی الکتریک ε می‌توان از یک مایع الکترولیت با قابلیت هدایت الکتریکی σ استفاده نمود. در این دو حالت، شکل الکترودها مشابه است. این دستگاه را یک "تانک الکترولیت"[۲] می‌نامند که در شکل (۵-۷) نشان داده شده است. این دستگاه از دو الکترود،

1- *Analog Method*

2- *Electrolyte Tank*

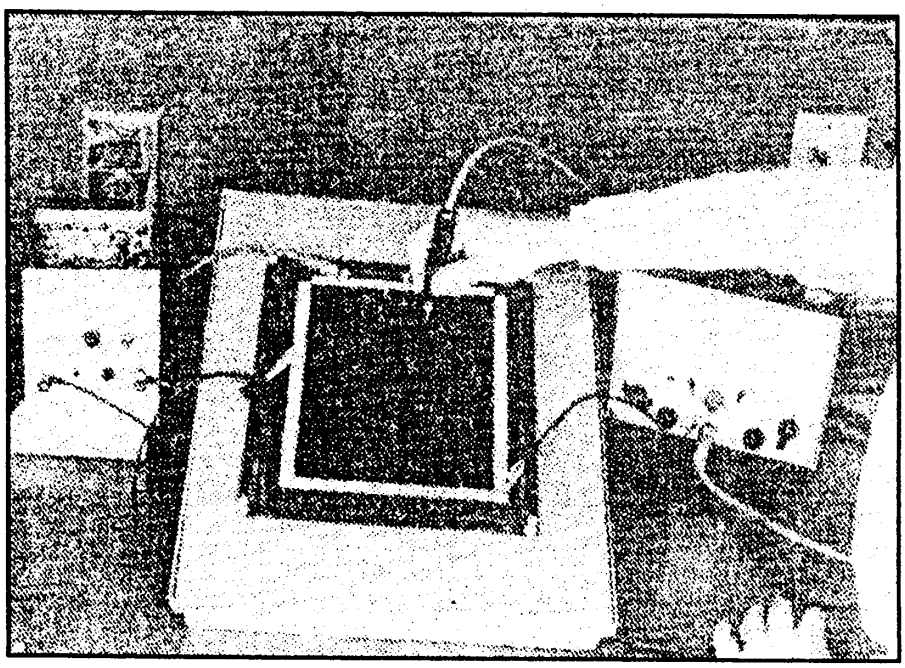


شکل (۵-۷): تانک الکترولیت و مدار آن برای شبیه‌سازی میدان

ترانسفورماتور (به‌عنوان منبع تغذیه)، پتانسیومتر برای انتخاب رنج‌های مختلف ولتاژ، و صفرسنج (که می‌تواند ولت‌متر یا اسیلوسکوپ باشد)، یک الکترولیت با قابلیّت هدایت σ، و پروب تشکیل شده است. به منظور جلوگیری از تجمّع بار الکتریکی در اطراف الکترودها، از ولتاژ متناوب استفاده می‌کنند. همچنین مقداری آب مقطر با قابلیّت هدایت الکتریکی کم در داخل تانک می‌ریزند. با جابه‌جایی پروب (سوزن) درون الکترولیت (معمولاً در روی سطح آن)، نقاطی را که دستگاه صفرسنج مشخّص می‌کند به‌عنوان نقاط هم‌پتانسیل با درصد ولتاژ (پتانسیل) معلوم ترانس انتخاب می‌نمایند.

البته گاهی به جای تانک الکترولیت برای سهولت از ورقه‌های کاغذ نیمه‌هادی

استفاده می‌شود. کاغذ کربن یک کاغذ معمولی است که خمیر آن از سلولز تهیه می‌شود؛ با این تفاوت که در خمیر آن، مقداری گرد گرافیت ریخته می‌شود و در نتیجه کاغذ به اندازهٔ محدودی قابلیّت هدایت الکتریکی پیدا می‌کند. شکل و نوع الکترودها در این کاغذ با رنگ نقره (لاک همراه با پودر نقره)، که یک لاک هادی می‌باشد به‌دست می‌آید و سپس پتانسیل مشخّصی را به کمک سیم رابط به آن می‌دهند. سایر عملیات، برای یافتن نقاط هم‌پتانسیل مشابه تانک الکترولیت می‌باشد (شکل ۵-۸ را ببینید). در صورتی‌که میدان دارای بیش از دو الکترود باشد، هر الکترود را به یک سر خروجی ترانسفورماتور تغذیه متّصل می‌کنند.



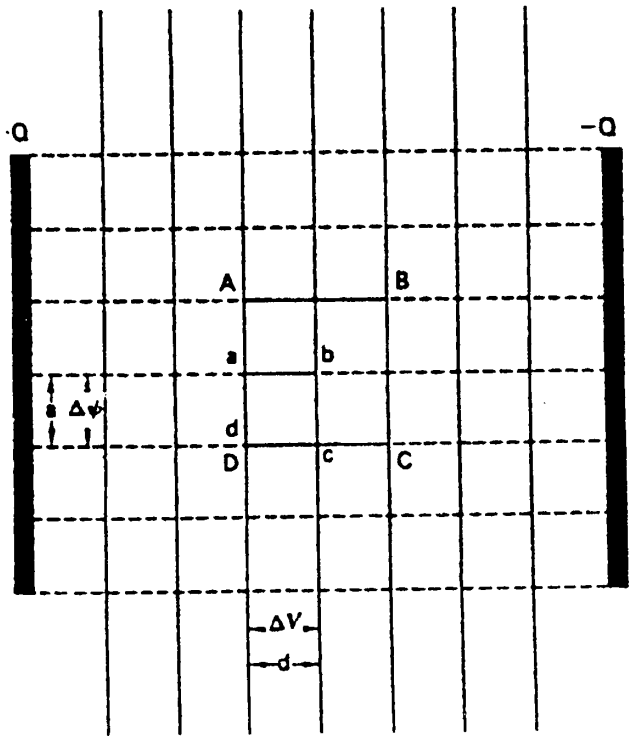
شکل (۵-۸): کاغذ کربن و رسم شکل الکترودها روی آن

۵-۳- پیدا کردن میدان الکتریکی به روش ترسیمی

با توجّه به پیشرفت‌های گسترده‌ای که امروزه در زمینهٔ رایانه رخ داده است، شاید بحث کردن دربارهٔ ترسیم میدان با دست کار بیهوده‌ای باشد، امّا گاهی ممکن است که در وارد کردن داده‌ها به برنامهٔ کامپیوتری دچار اشتباه شویم. همچنین ممکن است

در ساختمان دستگاه‌ها و ماشین‌های فشارقوی، قطب‌هایی با شکل‌های پیچیده پدید آید که به‌دست آوردن شکل میدان الکتریکی آن‌ها، از طریق محاسبات ریاضی مُیسّر نباشد. بنابراین، تمرین در ترسیم میدان الکتریکی با دست این قابلیّت و تجربه را در اختیار ما قرار می‌دهد که ذهنیتی کلّی دربارهٔ شکل میدان به‌دست آوریم. در این روش، اساس کار بدین صورت است که ابتدا سعی می‌کنیم خطوط هم‌پتانسیل میدان را به موازات سطح قطب‌های میدان رسم نماییم. سپس خطوط میدان را عمود بر خطوط هم‌پتانسیل و الکترودها به‌گونه‌ای رسم می‌کنیم که نسبت طول و عرض چهار گوشه‌هایی که بدین ترتیب به‌دست می‌آید و بین دو خطّ میدان مجاور هم قرار می‌گیرد، ثابت باشد. این روش، هم وقت‌گیر و هم از دقّت لازم برخوردار نیست.

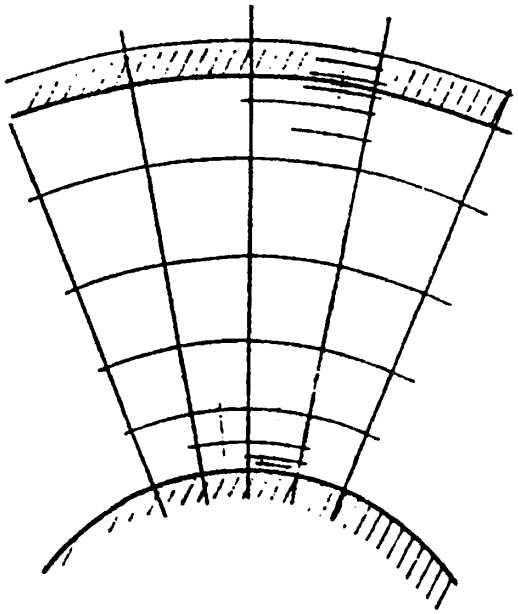
برای بررسی این روش ابتدا یک میدان یکنواخت ساده را در دستگاه مختصات دکارتی در نظر می‌گیریم، الکترودها دو صفحهٔ موازی هم هستند که از اثر گوشه‌های آن صرف‌نظر می‌نماییم (شکل ۵-۹ را ببینید). برای شروع، چند خطّ هم‌پتانسیل را با اختلاف سطح مساوی به موازات الکترودها (الکترودها نیز خطّ هم‌پتانسیل



شکل (۵-۹): میدان الکتریکی یکنواخت در محورهای مختصات دکارتی

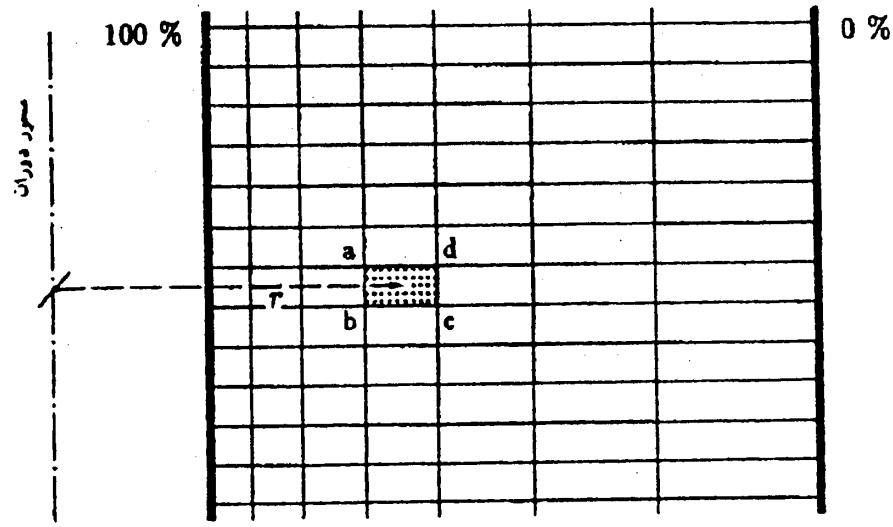
می‌باشند) رسم می‌کنیم. سپس خطوط میدان را عمود بر خطوط هم‌پتانسیل و الکترودها رسم می‌نماییم. نسبت طول و عرض چهارگوشه‌هایی (مربّع یا مستطیل) که بدین ترتیب به‌دست می‌آید باید ثابت باشد (ثابت $=\frac{a}{d}$).

حالت دیگری که بررسی می‌کنیم، میدان غیریکنواخت بین دو استوانه هم مرکز است (شکل ۵-۱۰ را ببینید). در این حالت خطوط پتانسیل، دایره‌های هم مرکز می‌باشند و خطوط میدان به‌صورت شعاعی، عمود بر خطوط هم‌پتانسیل و سطح الکترود می‌باشند. همچنین نسبت طول و عرض چهارگوشه‌های حاصل، با افزایش r تغییر می‌کند (مقدار $\frac{r}{d}$ ثابت است). با رسم خطوط میدان و خطوط هم‌پتانسیل، چهارگوشه‌هایی ایجاد می‌شود که اگر تعداد رسم این خطوط، افزایش یابد، این چهارگوشه‌ها به مستطیل نزدیک‌تر می‌شود. نسبت طول و عرض چنین چهارگوشه‌هایی در صفحهٔ Z=cte برابر می‌ماند. این موضوع در حالتی است که محور دوران بر صفحهٔ کاغذ، عمود باشد. در حقیقت، در رسم میدان دو بعدی، شکل میدان در صفحهٔ φ=cte رسم می‌شود. در این وضعیت، شدّت میدان، با تغییر φ تغییر نمی‌کند. در این‌حالت، نسبت طول و عرض مستطیل‌های حاصل شده



شکل (۵-۱۰): تکّه‌ای از میدان الکتریکی بین دو استوانه، در مختصات استوانه‌ای و در صفحهٔ ثابت=Z

از رسم خطوط میدان و خطوط هم‌پتانسیل، بستگی به شعاع دارد. برای درک این موضوع، شکل (۵-۱۱) را ببینید.

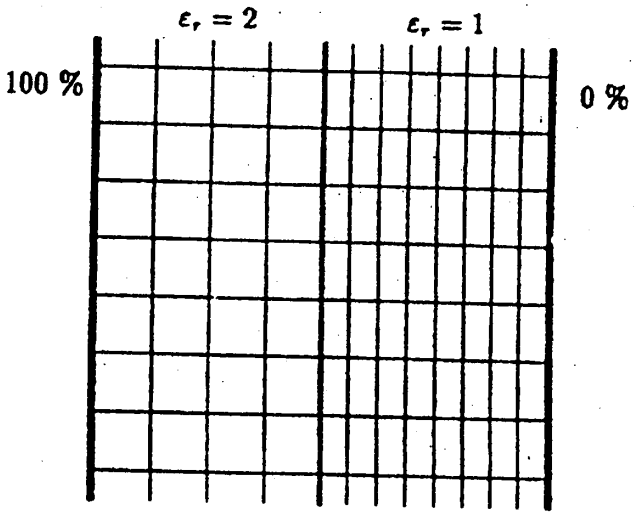


شکل (۵-۱۱): تکّه‌ای از میدان الکتریکی بین دو استوانه، در مختصات استوانه‌ای و در صفحهٔ φ=cte

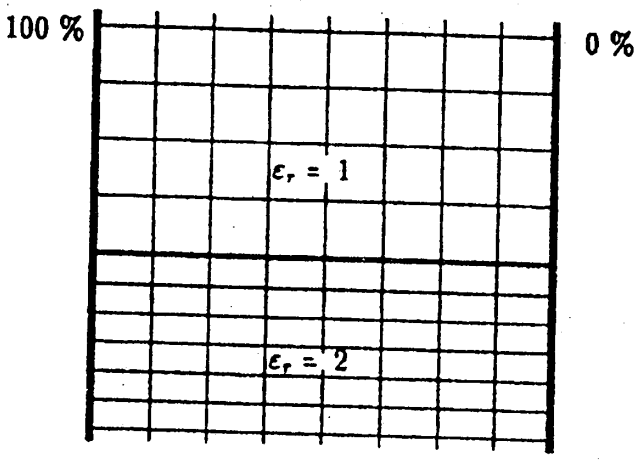
۵-۳-۱- میدان الکتریکی با موادّ عایقی مختلف

میدان‌هایی که تا به حال بررسی شدند دارای عایق یکسانی در ناحیهٔ میدان خود بودند؛ حال ممکن است در میدان، موادّ عایقی مختلفی وجود داشته باشد. شکل (۵-۱۲) یک میدان با دو مادّهٔ عایقی ε_1 و ε_2 را نشان می‌دهد که فصل مشترک آن‌ها یک سطح هم‌پتانسیل است. در این حالت، برای این‌که اختلاف سطح پتانسیلِ خطوط هم‌پتانسیل مجاور، برابر باشد. فاصلهٔ بین این خطوط در مادّه با ضریب دی‌الکتریکِ کوچک‌تر، کم‌تر، و در مادّه با ضریب دی‌الکتریکِ بزرگ‌تر، بیشتر است.

حال اگر فصل مشترک دو عایق، یک خطّ میدان باشد، فاصلهٔ خطوط هم‌پتانسیل از هم برابر می‌شود، ولی برای این‌که شار عبوری از خطوط میدان مجاور هم، برابر باشد، باید فاصلهٔ خطوط میدان در مادّه با ضریب دی‌الکتریکِ بزرگ‌تر، کم‌تر باشد. در شکل (۵-۱۳)، دو عایق با شرایط $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ با خطوط میدان و هم‌پتانسیل رسم شده است.



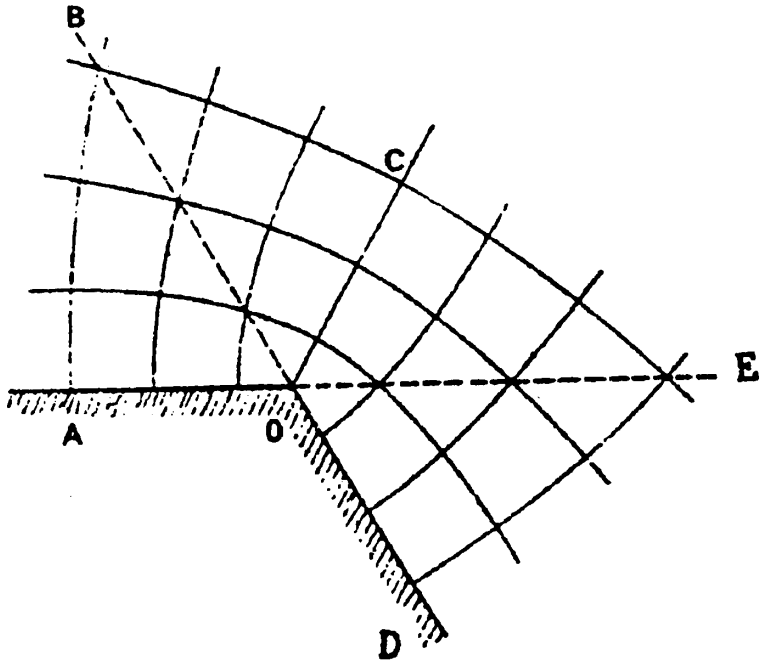
شکل (۵-۱۲): میدان با دو عایق ε_1 و ε_2
(سطح تماس دو عایق در راستای خطوط هم‌پتانسیل است)



شکل (۵-۱۳): میدان با دو عایق ε_1 و ε_2
(سطح تماس دو عایق در راستای خطوط میدان است)

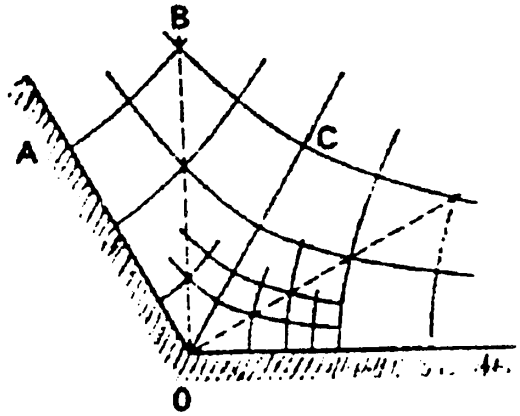
۵-۳-۲- ترسیم میدان در گوشه‌ها

برای ترسیم میدان در گوشه‌ها می‌توان از خطوط نیمساز و تقارن استفاده کرد. برای مثال فرض کنید که الکترود به صورت دو نیم‌خط باشد که زاویه‌ای بزرگ‌تر از



شکل (۵-۱۴): میدان در اطراف یک گوشهٔ بزرگ‌تر از °۱۸۰

°۱۸۰ داشته باشد (شکل ۵-۱۴ را ببینید). نیمساز این زاویه یعنی، خطّ OC خطّ تقارن است که آن نیز، یک خطّ میدان می‌باشد. بالعکس، اگر OC خطّ هم‌پتانسیل باشد، خطوط AO و DO خطوط میدان هستند. این مطلب به ما کمک می‌کند تا شکل میدان را ترسیم کنیم. برای گوشه‌های با زاویه، کم‌تر از °۱۸۰ (مطابق شکل ۵-۱۵) نیز این مطلب صادق است.



شکل (۵-۱۵): میدان در اطراف یک گوشهٔ کوچک‌تر از °۱۸۰

۵-۴- محاسبهٔ میدان الکتریکی با استفاده از روش‌های عددی

محاسبهٔ میدان‌های ساکن با استفاده از روش‌های نظری تنها برای میدان‌های همگن میسّر است و به کمک روابط دقیق ریاضی نمی‌توان محاسبهٔ میدان‌های الکتریکی ناهمگن را که دارای اشکال هندسی غیرمتقارن و پیچیده هستند، انجام داد. با اختراع رایانه و پیشرفت روزافزون آن، استفاده از روش‌های عددی برای محاسبهٔ چنین میدان‌هایی به روش‌های پیشین برتری یافت. روش‌های عددی معمول برای محاسبهٔ میدان عبارتند از:

- روش تفاضل محدود[۱]
- روش اجزاء محدود[۲]
- روش بارهای فرضی[۳]

هر یک از این روش‌ها دارای محاسن و معایبی هستند که در ادامه به بیان و معرّفی آن‌ها می‌پردازیم:

۵-۴-۱- روش تفاضل محدود (FDM)

این روش، آسان‌ترین و سریع‌ترین روش برای محاسبهٔ عددی میدان الکتریکی می‌باشد. برای بررسی این روش، ابتدا یک ناحیه از میدان دو بعدی را در صفحهٔ مختصات X-Y که دارای شرایط مرزی مشخّص روی خطوط مرزی ناحیهٔ مورد نظر است، در نظر می‌گیریم. این میدان از دو معادلهٔ لاپلاس و پواسن تبعیت می‌کند. اگر میدان فاقد فضای باردار الکتریکی باشد آنگاه معادلهٔ لاپلاس زیر صادق است:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \qquad (۵-۱۱)$$

1- *Finite Difference Method (FDM)*

2- *Finite Elements Method (FEM)* 3- *Charge Simulation Method (CSM)*

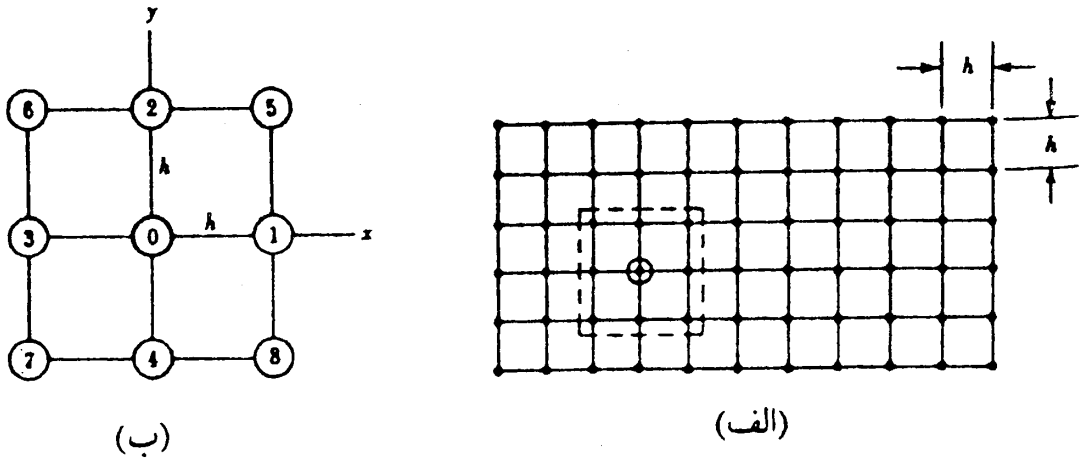
و اگر میدان دارای فضای باردار الکتریکی باشد، آن‌گاه معادلهٔ پواسن زیر را داریم:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho(x,y)}{\varepsilon} \qquad (۱۲-۵)$$

در این روش، معادلات دیفرانسیل مذکور را به معادلات خطّی ساده‌ای تبدیل می‌کنیم. حلّ این معادلات، به منزلهٔ تعیین میدان پتانسیل می‌باشد و چون در ناحیهٔ مورد نظر، پتانسیل، کمّیت پیوسته می‌باشد؛ بنابراین، ابتدا با استفاده از گسسته‌سازی و تقسیم ناحیهٔ مورد نظر به شبکه‌های منظمی (همچون مربّع یا مثلّث) سعی می‌کنیم تا گره‌های حاصله (نقاط ناشی از تلاقی خطوط عمودی و افقی شبکه) بر روی کمیات معیّن میدان قرار گیرند (مانند شکل ۵-۱۶).

در شکل (۵-۱۶-ب) فرض می‌کنیم که نقاط ۱، ۲، ۳، و ۴ مشخّص باشد و هدف، یافتن پتانسیل مجهول نقطهٔ صفر می‌باشد. چون پتانسیل در داخل میدان پیوسته است، بنابراین، می‌توان مقدار آن را با بسط سری تیلور حول هر نقطهٔ (x,y) از میدان به‌صورت زیر به‌دست آورد.

$$V(x,y) = V(x_0,y_0) + [(x-x_0)V_x(x_0,y_0) + (y-y_0)V_y(x_0,y_0)] + \frac{1}{2}[(x-x_0)^2 V_{xx}(x_0,y_0) + 2(x-x_0)(y-y_0)V_{xy}(x_0,y_0) + (y-y_0)^2 V_{yy}(x_0,y_0)] \qquad (۱۳-۵)$$



شکل (۵-۱۶): الف) شبکهٔ منظّم مربّعی؛ ب) قسمتی از شبکه با نمایش گره‌ها

اکنون با استفاده از رابطهٔ (۵-۱۳) پتانسیل نقاط معلوم (۱، ۲، ۳، و ۴) را می‌نویسیم:

$$V_1 = V(x_0, y_0) + h\, V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h^2 V_{xx}(x_0, y_0)$$
$$V_2 = V(x_0, y_0) + h\, V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h^2 V_{yy}(x_0, y_0)$$
$$V_3 = V(x_0, y_0) - h\, V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h^2 V_{xx}(x_0, y_0)$$
$$V_4 = V(x_0, y_0) - h\, V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h^2 V_{yy}(x_0, y_0)$$

از جمع چهار رابطهٔ اخیر می‌توان نوشت:

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 4V(x_0, y_0) + h^2 \left[V_{xx}(x_0, y_0) + V_{yy}(x_0, y_0)\right] \quad (۵-۱۴)$$

از رابطهٔ (۵-۱۴)، دو معادله به‌دست می‌آید که اساس کار و محاسبات ما در این روش است:

الف) اگر میدان، فاقد فضای باردار الکتریکی باشد آن‌گاه،

$$V(x_0, y_0) = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (۵-۱۵)$$

ب) اگر میدان دارای فضای باردار الکتریکی باشد آن‌گاه،

$$V(x_0, y_0) = \frac{1}{4}\left[V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + h^2 \frac{\rho(x_0, y_0)}{\varepsilon}\right] \quad (۵-۱۶)$$

هر چه اضلاع شبکه، کوچک باشند، تعداد نقاط و بالطبع، تعداد مجهول‌ها نیز افزایش یافته و در نتیجه بسط سری تیلور، نتیجهٔ دقیق‌تری می‌دهد. با استفاده از بسط سری تیلور می‌توان نشان داد که پتانسیل نقطهٔ مجهول صفر (V_0) از رابطهٔ $V_0 = \frac{1}{4}(V_5+V_6+V_7+V_8)$ (که به رابطهٔ وتری معروف است) به‌دست می‌آید.

یکی از فنون حلّ میدان در مواقعی که تعداد نقاط (مجهول‌ها) زیاد باشد، استفاده از روش تکراری می‌باشد. در این روش، ابتدا پتانسیل تمام نقاط مجهول شبکه به‌طور معقول تخمین زده می‌شود. سپس یکی از این نقاط را انتخاب نموده و با استفاده از یکی از دو رابطهٔ بیان شدهٔ پتانسیل آن را مجدّداً به‌دست می‌آوریم.

$$V_0 = \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{4} V_i \qquad\qquad V_0 = \frac{1}{4}\sum_{i=5}^{8} V_i$$

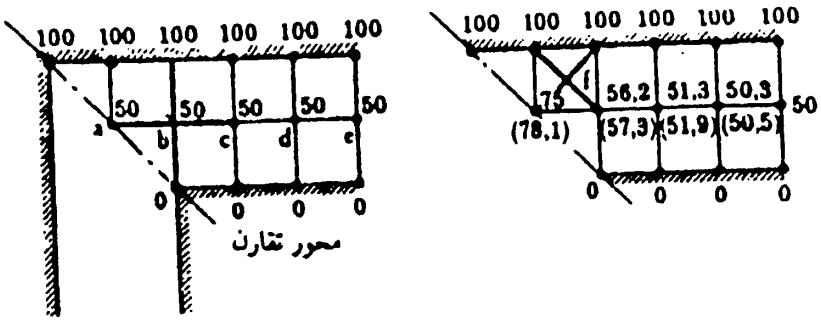
همین کار را برای پتانسیل دیگر نقاط مجهول که مقدار اوّلیه آن‌ها را تخمین زده‌ایم انجام می‌دهیم. این روش را تا چند مرتبه انجام می‌دهیم تا به جواب‌های صحیح نزدیک شویم. در این روش، معمولاً پس از چند مرحله تکرار، جواب‌ها به همگرایی می‌رسند.

مثال (۵-۱): میدان الکتریکی دو بعدی شکل (۵-۱۷) را تعیین کنید.

ابتدا میدان را به چهار گوشه‌هایی تقسیم می‌کنیم و با کمک تقارن، تنها نیمی از میدان را محاسبه می‌کنیم. سپس (همانطور که در بالا گفته شد)، برای پتانسیل نقاط مجهول d,c,b,a مقادیر معقولی از ولتاژ را تخمین می‌زنیم.

پتانسیل نقطهٔ a را $V_a = \frac{۱}{۴}(۱۰۰ + ۱۰۰ + ۱۰۰ + ۰) = ۷۵V$ و پتانسیل نقاط دیگر را $V_b = V_c = V_d = ۵۰V$ انتخاب می‌کنیم. در نتیجه، ولتاژهای تکرار اوّل و تکرار نهایی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

ولتاژهای تکرار نهایی	ولتاژهای تکرار اوّل
$V_a = ۷۸/۸۶۶$	$V_a = ۷۸/۱$
$V_b = ۵۷/۷۳۲$	$V_b = ۵۷/۳$
$V_c = ۵۱/۰۶۲$	$V_c = ۵۱/۹$
$V_d = ۵۰/۵۱۵$	$V_d = ۵۰/۵$



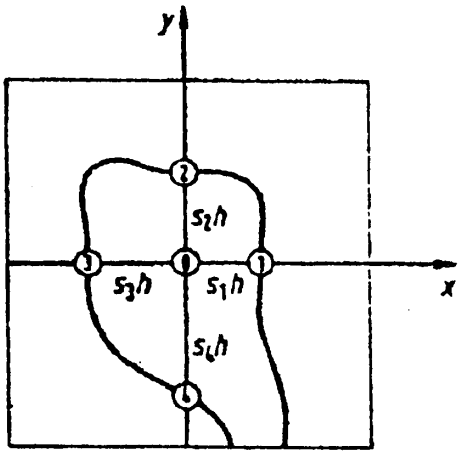
شکل (۵-۱۷): میدان یک گوشه

۵-۴-۱-۱- تقسیم میدان با شبکهٔ غیریکنواخت

گاهی تقسیم میدان به چهارگوشه‌های یکنواخت، ممکن نیست. برای مثال ممکن

است الکترودها دقیقاً روی کره‌ها قرار نگیرند و یا این‌که شبکه دارای ناحیه‌های منظم نباشد؛ به‌گونه‌ای که فاصلهٔ کره‌ها تا نقطهٔ مجهول برابر نباشد (شکل ۵-۱۸ را ببینید). در این حالت، ولتاژ نقطهٔ صفر را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد.

$$V_{\circ} = \frac{\left(\frac{V_1}{S_1} + \frac{V_3}{S_3}\right) / (S_1 + S_3)}{\frac{1}{S_1 S_3} + \frac{1}{S_2 S_4}} + \frac{\left(\frac{V_2}{S_2} + \frac{V_4}{S_4}\right) / (S_2 + S_4)}{\frac{1}{S_1 S_3} + \frac{1}{S_2 S_4}} \qquad (۱۷-۵)$$

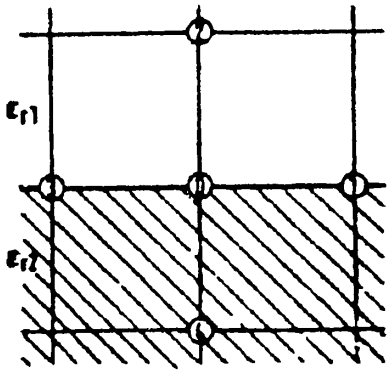


شکل (۵-۱۸): شبکه غیریکنواخت

۵-۴-۱-۲- موادّ مختلف در عایق

اگر ناحیه میدان، شامل موادّ مختلف عایقی با ضرایب دی‌الکتریک متفاوت باشد (مطابق با شکل ۵-۱۹). آنگاه ولتاژ نقطهٔ صفر را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$V_{\circ} = \frac{1}{4}\left[V_1 + V_3 + \frac{2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}\left(\varepsilon_1 V_2 + \varepsilon_2 V_4\right)\right] \qquad (۱۸-۵)$$

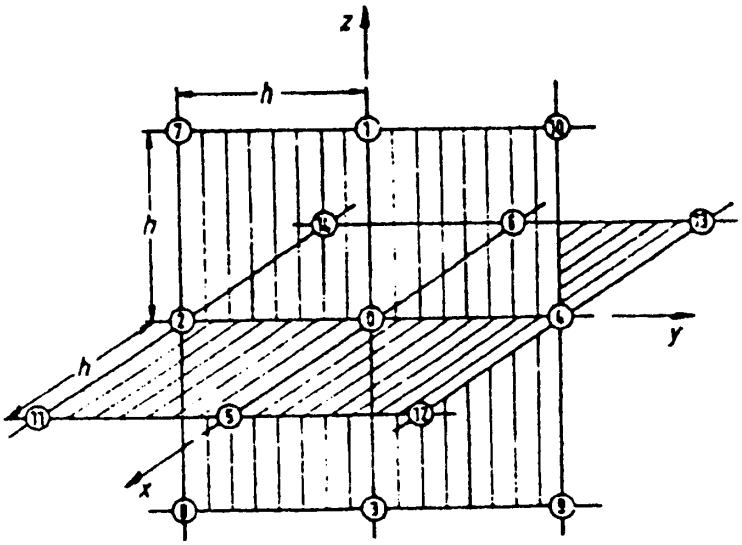


شکل (۵-۱۹): میدان با دو عایق مختلف

۵-۴-۱-۳- میدان سه بعدی

اگر میدان سه بعدی باشد (همانند آنچه برای میدان دو بعدی انجام دادیم)، با نوشتن بسط سری تیلور برای سه محور x، y و z به روابط زیر می‌رسیم (شکل ۵-۲۰ را ببینید):

$$V_{\circ} = \frac{۱}{۶}\sum_{i=۱}^{۶} V_i \qquad V_{\circ} = \frac{۱}{۸}\sum_{i=۷}^{۱۴} V_i$$



شکل (۵-۲۰): میدان سه بعدی

۵-۴-۱-۴- میدان دوّار

میدان‌های دوّار در میدان‌های مختصات استوانه‌ای، میدان‌های دوبعدی هستند، یعنی شکل میدان روی یک صفحه قابل نمایش است. با نوشتن بسط سری تیلور برای محورهای مختصات استوانه‌ای و برای محاسبهٔ ولتاژ نقطهٔ صفر (مطابق با شکل ۵-۲۱) داریم:

$$V_{\circ} = \frac{1}{\frac{2S}{S_1 S_3} + \frac{2S + S_4 - S_2}{S_2 S_4}} \left[\frac{2S}{S_1 + S_3} \left(\frac{V_1}{S_1} + \frac{V_3}{S_3} \right) + \right.$$

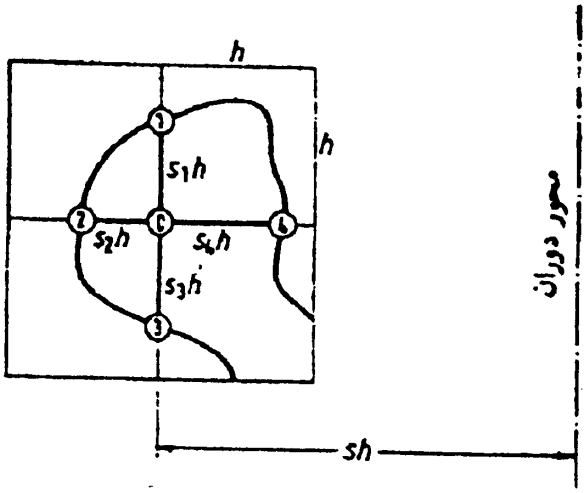
$$\left. + \frac{1}{S_2 + S_4} \left((2S + S_4) \frac{V_2}{S_2} + (2S - S_2) \frac{V_4}{S_4} \right) \right] \qquad (۱۹-۵)$$

اگر $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = 1$ باشد، شبکه، یکنواخت است. در نتیجه،

$$V_{\circ} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^{4} V_i + \frac{V_2 - V_4}{8S}$$

و اگر نقطهٔ صفر روی محور دوران باشد، می‌توان از رابطهٔ زیر استفاده کرد:

$$V_{\circ} = \frac{1}{6} \left(V_1 + 4V_2 + V_3 \right)$$



شکل (۵-۲۱): شبکهٔ غیریکنواخت در میدان دوّار

۵-۴-۲- روش اجزای محدود (FEM)

در سال‌های اخیر، این روش گسترش چشمگیری داشته است. در این روش، همانند روش تفاضل محدود، الکترود مورد نظر را به شبکه‌ای از اشکال منظّم تقسیم می‌کنیم. برای میدان‌های دو بعدی، شبکه‌ای از مثلّث‌ها و برای میدان‌های سه‌بعدی، شبکه‌ای از هرم‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ امّا برخلاف روش تفاضل محدود (که این تقسیم‌بندی یکنواخت بود)، در روش اجزای محدود، این شبکه بر حسب این‌که در کدام قسمت، تغییرات پتانسیل بیشتر باشد، تغییر می‌کند. در هر قسمت که تغییرات پتانسیل، زیاد باشد، شبکه به مثلّث‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود و در هر مکانی که تغییرات پتانسیل، کم باشد، اندازهٔ مثلّث‌ها، بزرگ‌تر انتخاب می‌شود. برای مثال، شکل (۵-۲۲) قسمتی از یک کلید قطع‌کننده در یک پست گازی را نشان می‌دهد که تقسیم‌بندی آن به کمک یک روش خودکار تعیین شده است.

اساس این روش بر این اصل استوار است که استقرار بارهای روی الکترودها، به ترتیبی هستند که انرژی ذخیره شده در میدان یکنواخت بین الکترودها به حدّاقل برسد. اگر V رابطهٔ پتانسیل را بیان کند، آن‌گاه انرژی ذخیره شده در میدان (W_E) طبق رابطهٔ زیر خواهد بود.

$$W_E = \frac{1}{2}\int_v \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2(r)\,dv \qquad (۲۰-۵)$$

$$W_E = \frac{1}{2}\int_v \varepsilon_0 \varepsilon_r |\nabla V|^2\,dv \qquad (۲۱-۵)$$

در این رابطه،

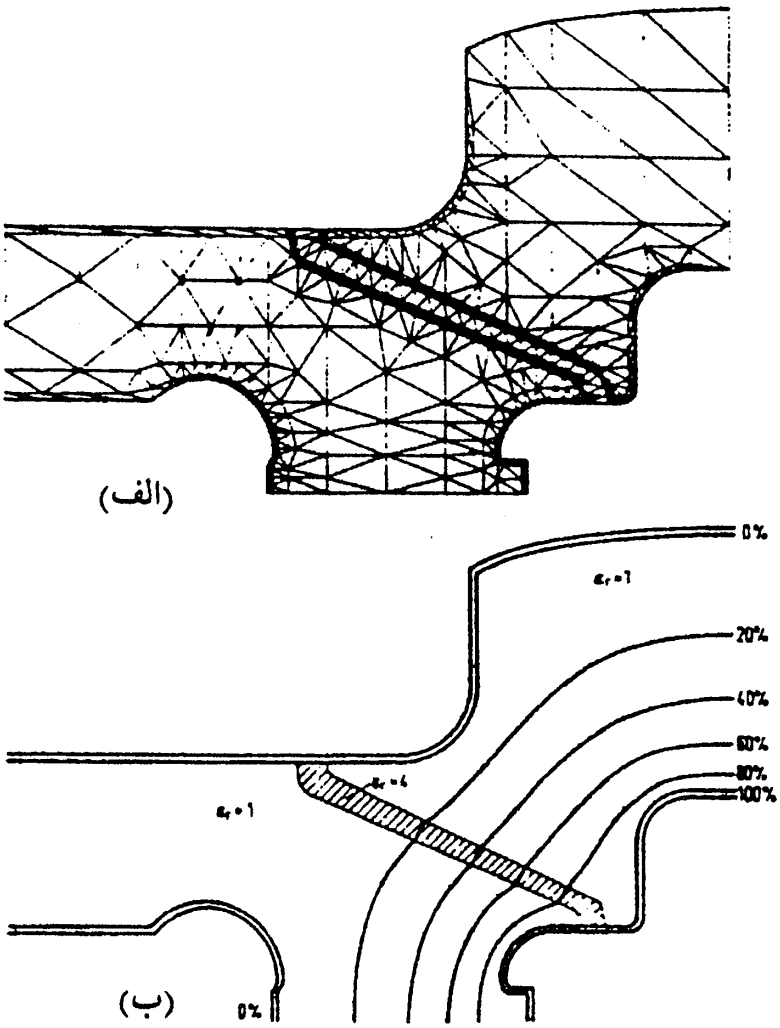
ε_0: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا (خلاء)،

ε_r: ضریب نفوذپذیری مغناطیسی جسم عایق،

$E(r)$: شدّت میدان در مختصات استوانه‌ای،

dv: اِلمان حجم در میدان (هرم‌های موجود در شبکه) است.

اگر میدان را در جهت عمود بر صفحهٔ ثابت فرض کنیم، آن‌گاه رابطهٔ (۵-۲۰) به شکل زیر در می آید:



شکل (۵-۲۲): قسمتی از یک کلید قطع‌کننده در یک پست گازی
(الف) شبکه بندی مثلّثی (ب) سطوح هم‌پتانسیل

$$W_E = \frac{۱}{۲}\int_A \varepsilon_۰ \varepsilon_r \mid \nabla V \mid^۲ dA \qquad (۵-۲۲)$$

در این رابطه، dA، المان سطح در میدان (مثلّث‌های موجود در شبکه) است.

از نظر ریاضی رابطهٔ لاپلاس، با اصلِ حدّاقل شدن انرژی هم‌ارز هستند. یعنی اگر توزیع پتانسیل به طریقی باشد که انرژی به حدّاقل برسد، آن‌گاه در رابطهٔ لاپلاس نیز صادق است. به‌عبارت دیگر، اگر توزیع پتانسیل به طریقی باشد که در رابطهٔ لاپلاس صدق کند، آن‌گاه انرژی آن به حدّاقل رسیده است. حال با فرض این‌که V تابعی ساده

و با ضرایب نامعیّن باشد، می‌توان W را به‌طور تقریبی به‌دست آورد و شرط حدّاقل شدن را بر حسب پتانسیل برقرار ساخت. برای این منظور فرض می‌کنیم جزء مثلّثی شکل به‌صورت شکل (۵-۲۳)باشد.

اگر پتانسیل گوشه‌های مثلّث و مختصات آن‌هامعلوم باشد و رابطهٔ خطّی V بر حسب x و y را بر حسب ضرایب نامعیّن a و b و c بنویسیم، آنگاه مطابق با شکل (۵-۲۳)، معادلات زیر را خواهیم داشت:

$$P_۱ : (۱ , ۱) , V=۱۱$$
$$P_۲ : (۳ , ۱) , V=۱۳$$
$$P_۳ : (۲ , ۳) , V=۱۶$$
$$V = a.x + b.y + c \qquad (۵-۲۳)$$

بنابراین، می توان نوشت :

$$V = ۱x + ۲y + ۸ \qquad (۵-۲۴)$$

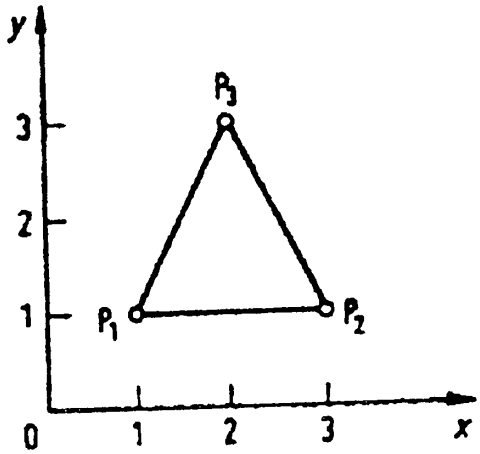
در حالت کلّی نیز، V تابعی خطّی از مقادیر مرزی و مختصات رئوس مثلّث است.

$$V(x ,y) = V = \sum_{i=۱}^{۳} V_i \alpha_i(x ,y) \qquad (۵-۲۵)$$

که در این رابطه،

α_i: رابطهٔ خطّی بر حسب x و y،

V_i: پتانسیل نقاط مرزی است.



شکل (۵-۲۳): مثلّث فرضی شبکه

با داشتن رابطهٔ V می‌توانیم انتگرال انرژی را بر حسب پتانسیل نقاط به‌دست آورده، آن را حدّاقل کنیم. بدین ترتیب پتانسیل نقاط مختلف به‌دست می‌آید.

توجّه به این نکته لازم است که در این روش نیز مانند روش تفاضل محدود، در دست داشتن بالاتر پتانسیل نقاط مرزی الزامی است. نکتهٔ دوم آن است که هر چه درجهٔ معادلهٔ V بالاتر باشد، دقّت محاسبات مسلماً بیشتر خواهد بود. در شکل (۵-۲۴) دو حالت برای یک مثلّث فرض شده است. در حالت اوّل، V به کمک چندجمله‌ای درجهٔ اوّل و در حالت دوم به کمک چندجمله‌ای درجه دوم تقریب زده شده است. در حالت دوم، مسلّماً تعداد نقاط مرزی بیشتر خواهد بود.

$V=a.x+b.y+c$ (ب)

$V=a.x^2+b.y^2+c.x+d.y+e.xy+f$ (الف)

شکل (۵-۲۴): تقسیم میدان و تشکیل چندجمله‌ای در یک جزء میدان با دو حالت تقریب V (الف) درجه اوّل (ب) درجه دوم

۵-۴-۳- روش بارهای فرضی (CSM)

این روش، بر این اساس استوار است که بارهای الکتریکی سطحی روی الکترودها یا فصل مشترک دو عایق، توسّط یک مجموعه از بارهای الکتریکی فرضی که خارج از حوزهٔ میدان یا روی مرز قرار دارند، جانشین می‌شود. به همین علّت به این روش، "روش مولدهای جانشین" نیز می‌گویند. مقادیر این بارهای فرضی باید به‌گونه‌ای باشد که شرایط مرزی را برقرار نمایند. مثلاً برای سطح پتانسیل V_B باید جمع آثار پتانسیل تمام بارهای فرضی برابر با V_B باشد.

$$V_B = \sum_{j=1}^{n} P_j \, Q_j \qquad (۵-۲۶)$$

در این رابطه،

P_j: ضریب بار jام،

Q_j: بار فرضی jام،

n : تعداد بارهای فرضی است.

در این روش، محل بارهای الکتریکی به دلخواه انتخاب می شود و مقدار آن‌ها مجهول است. سپس با نوشتن معادلهٔ (۵-۲۷)، برای شرایط مرزی می‌توانیم یک دستگاه nمعادله و nمجهول تشکیل دهیم و بدین ترتیب بارهای Q_jرا به‌دست می‌آوریم.

$$\mathbf{P.Q} = \mathbf{V_B} \qquad (۵\text{-}۲۷)$$

در این رابطه،

$\mathbf{P}$: ماتریس (n×n) ضرایب بارها (P_{ij}ضریب بار jام برای نقطهٔ با پتانسیل معلوم iام)،

$\mathbf{Q}$: ماتریس (n×۱) بارهای فرضی (Q_j بار فرضی jام)،

$\mathbf{V_B}$: ماتریس (n×۱) پتانسیل نقاط معلوم (V_i پتانسیل نقطهٔ معلوم iام) است.

در این روش، تعداد نقاط مفروض برای سطح پتانسیل معلوم مرزی باید برابر با تعداد بارهای فرضی باشد. با داشتن بارهای Q_jمی‌توانیم مقدار تقریبی پتانسیل و اندازهٔ میدان را برای هر نقطه از مختصات، توسّط روابط (۵-۲۸) و (۵-۲۹) به‌دست آوریم.

$$V(x,y,z) = \sum_{j=1}^{n} P_j(x,y,z)\, Q_j \qquad (۵\text{-}۲۸)$$

$$\vec{E}(x,y,z) = -\sum_{j=1}^{n} \left[\nabla P_j(x,y,z)\right] Q_j \qquad (۵\text{-}۲۹)$$

این روش مخصوصاً برای اشکال متقارنی مانند کره می‌تواند بخوبی مورد استفاده قرار گیرد. ضرایب P_{ij}برای هر مسأله تفاوت دارد و به شکل الکترود و توزیع بارها بستگی دارد. امّا در حالت کلّی داریم:

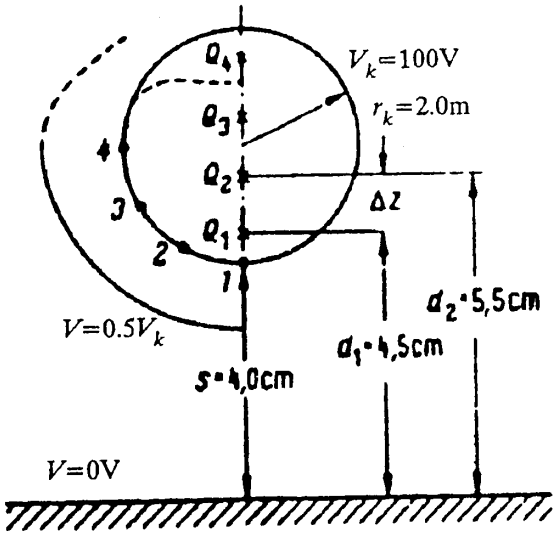
$$V_{ij} = \frac{Q_j}{4\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2}\right) \qquad (۵\text{-}۳۰)$$

در این رابطه،

V_{ij} : ولتاژ ناشی از بار jام در نقطهٔ iام،

P_1: فاصلهٔ نقطهٔ iام از بار Q_j،

P: نقطهٔ فاصله تا صفحه $V=0$ است



شکل (۵-۲۵): کرهٔ پتانسیل V_k=۱۰۰ و الکترود صفحه‌ای با پتانسیل V=۰

به همین ترتیب ضریب بارهای $Q_۱$ تا $Q_۴$ تعیین می‌شوند و در نهایت ماتریس **P** به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} ۱/۶۸۹۱ & ۰/۵۰۴۶ & ۰/۲۷۹۳ & ۰/۱۷۸۶ \\ ۰/۷۹۶۷ & ۰/۴۷۶۷ & ۰/۲۸۳۷ & ۰/۱۸۸۸ \\ ۰/۴۰۵۵ & ۰/۴۱۴۱ & ۰/۳۱۵۰ & ۰/۲۲۴۳ \\ ۰/۲۷۵۴ & ۰/۳۵۹۰ & ۰/۳۶۵۰ & ۰/۲۹۳۷ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_۱ \\ Q_۲ \\ Q_۳ \\ Q_۴ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ۱۰۰ \\ ۱۰۰ \\ ۱۰۰ \\ ۱۰۰ \end{bmatrix} \qquad (۳۲-۵)$$

با حلّ این دستگاه معادله خواهیم داشت:

$Q_۱ = -۰/۴۹۲$ pAs $\qquad Q_۲ = ۶۹/۱۵۷$ pAs[1]

$Q_۳ = ۳۷۴/۸۲۹$ pAs $\qquad Q_۴ = -۲۲۵/۵۵۹$ pAs

حال با استفاده از روابط زیر می‌توانیم پتانسیل و شدّت میدان را در هر نقطه به‌دست آوریم.

$$V = \sum_{j=۱}^{۴} P_{ij}\, Q_j \qquad (۳۳-۵)$$

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} \qquad (۳۴-۵)$$

$$E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \qquad (۳۵-۵)$$

1- *Pico Amper Seconds (pAs)* $\quad ۱pico = ۱۰^{-۱۲}$

با کمک رابطهٔ V می‌توان پتانسیل هر نقطهٔ $(r_i\ ,\ z_i)$ را محاسبه کرد. در این مثال، به‌علّت تعداد اندک بارهای الکتریکی انتخاب شدهٔ بالاتر از $z=۶/۷cm$، خطّ محیطی از تصویر کرهٔ روی صفحهٔ کاغذ فاصله می‌گیرد که در شکل (۵-۲۵) با نقطه‌چین نشان داده شده است. مقدار حدّاکثر شدّت میدان در نقطهٔ s رخ می‌دهد که مقدار آن برابر است با:

$$E_{max}=-\sum_{j=۱}^{۴} Q_j \left[\left(d_j-S\right)^{-۲} + \left(d_j+S\right)^{-۲} \right] /(۴\pi\varepsilon)=۶۷/۳۹\ \ V/cm$$

و ضریب بهره عبارت است از:

$$\eta=\frac{V}{E_{max}\,S}=\frac{۱۰۰}{۶۷/۳۹\times ۴}=۳۷/۱\ \%$$

۵-۵- پیدا کردن میدان الکتریکی با روش نگاشت کانفورم

تبدیل یا نگاشت کانفورم یکی از روش‌های حلّ میدان‌های الکتریکی است که به کمک آن می‌توان بعضی از میدان‌های دو بعدی را محاسبه نمود. آشنایی با این روش باعث گسترش دید در زمینهٔ میدان‌های فشار قوی می‌گردد.

تبدیل کانفورم با کمک یک تابع مختلط تحلیلی انجام می‌پذیرد و با کمک این تابع برای هر نقطه از صفحهٔ مختلط Z با مختصات (x,y)، یک یا چند نقطه در صفحهٔ مختلط W با مختصات (u,v) یافت می‌شود. رابطهٔ بین نقاط در صفحهٔ Z و نقاط در صفحهٔ W توسّط تابع مختلط تحلیلی $W=f(Z)$ تعیین می‌گردد که به‌نام تابع تبدیل خوانده می‌شود و به‌شکل کلّی زیر است:

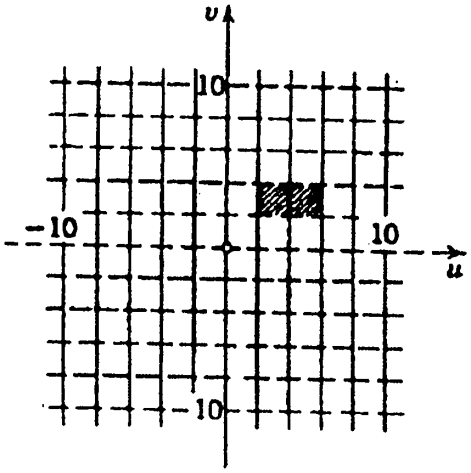
$$W = f(z) = u(x,y) + j\ v(x,y)$$

تبدیل کانفورم دارای شرایط و مشخصات زیر است:

الف) نگاشت توسّط یک تابع مختلط تحلیلی انجام می‌گیرد.

ب) ابتدا باید توابع مختلف را تبدیل کرد و سپس دریافت که هر تابع، مربوط به کدام شکل معیّن از الکترودها است. به‌عبارت دیگر، با داشتن الکترودها نمی‌توان تابع تبدیل را یافت؛ بلکه با حلّ هر تابعی الکترود مربوط به آن (اگر وجود داشته باشد) مشخّص می‌شود.

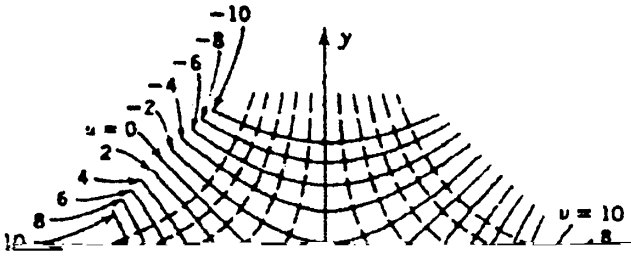
ج) تبدیل کانفورم فقط در میدان‌های ده بعدی قابل استفاده و دارای این

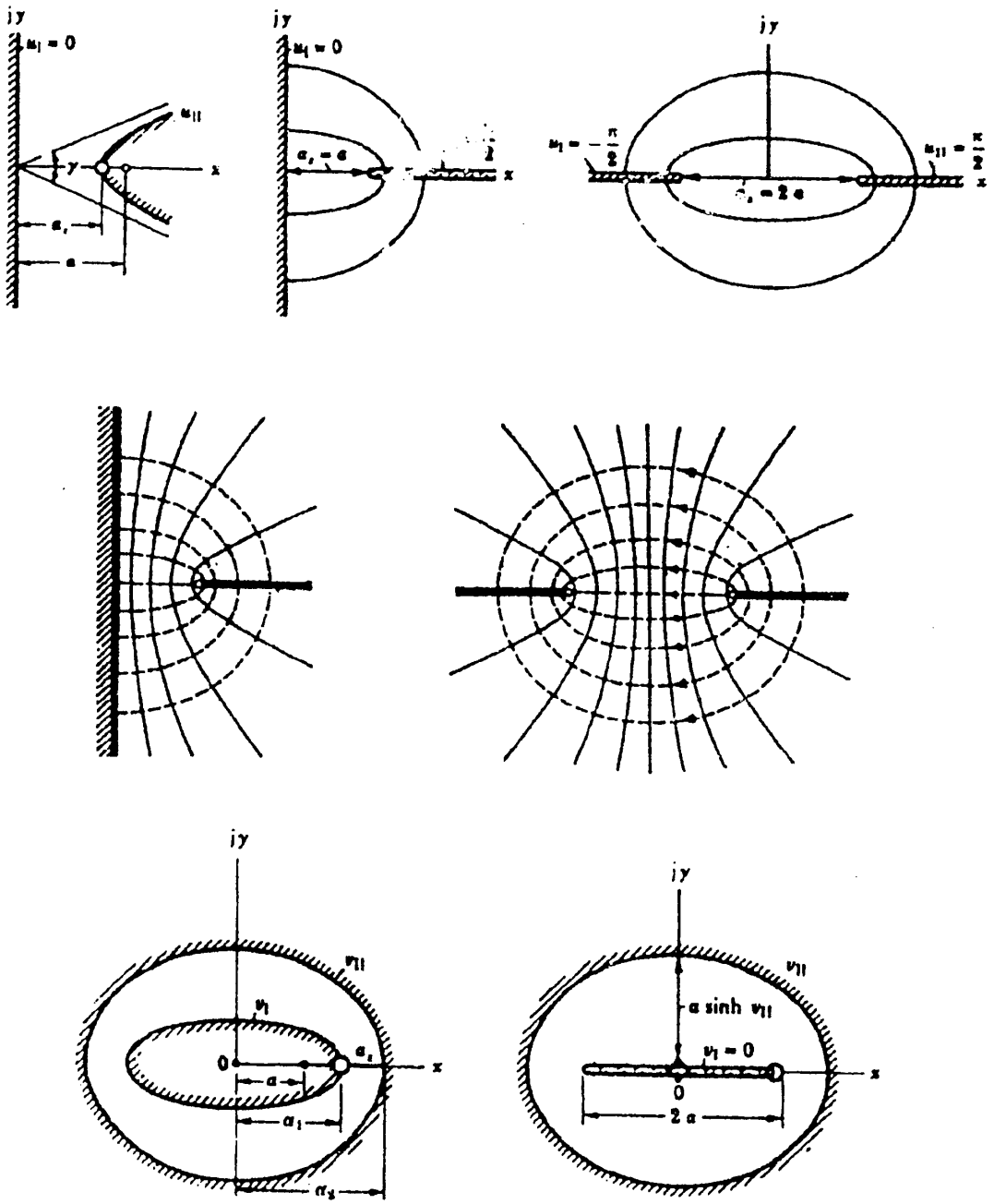


شکل (۵-۲۶): خطوط میدان و هم‌پتانسیل در صفحهٔ u-v

دو مقدار Z به‌دست می‌آید. نکتهٔ دیگر آن‌که خطوط $u=cte$ و $v=cte$ در صفحهٔ W بر یکدیگر عمود هستند. در نتیجه، در شکل (۵-۲۷) نیز خطوط بر یکدیگر عمود هستند؛ یعنی اگر خطوط $u=cte$ مبین خطوط هم‌پتانسیل باشند، در این‌صورت $v=cte$ خطوط نیرو خواهند بود.

حال فرض کنیم می‌خواهیم میدان الکتریکی در ناحیه بین دوالکترود هذلولی شکل را که مطابق شکل (۵-۲۸) می‌باشد، به‌دست آوریم. در این شکل، الکترود





شکل (۵-۳۱): خطوط میدان در الکترودهای مختلف با نگاشت Z=a.sinW

و خطّ $v=\pi$ از صفحهٔ W، در صفحهٔ Z با روابط زیر مشخّص می‌شود.

$$x = \frac{a}{\pi}\left(u + 1 - e^{u}\right)$$

$$y = a$$

در مورد تصویر $y=a$ ذکر این نکته لازم است که این عبارت، معرّف نیم‌خطّی به

موازات محور xها با فاصلهٔ $+a$ از آن می‌باشد که فقط شامل مقادیر منفی x می‌باشد؛ چرا که به ازای هر مقدار از u، مقدار x، صفر یا منفی است. در نهایت، تصویر خطّ $u=0$ از صفحهٔ W در صفحهٔ Z با روابط زیر تعریف می‌شود:

$$x = \frac{a}{\pi}(1 + \cos v)$$

$$y = \frac{a}{\pi}(v + \sin v)$$

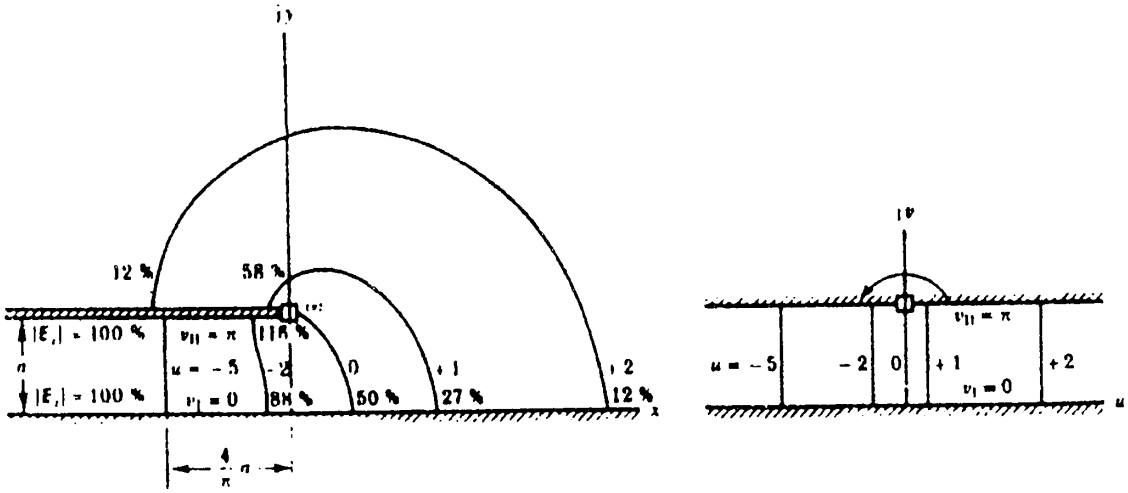
در شکل (۵-۳۲) خطوط $u=cte$ به ازای مقادیر u برابر ۵-، ۲-، ۰، ۱ و ۲ رسم شده‌اند که خطوط $v=\pi$ و $v=0$ به‌عنوان الکترود می‌باشند. برای مقادیر u بزرگ و منفی می‌توان نوشت:

$$x \cong \frac{a}{\pi}(u + 1)$$

$$y \cong \frac{a}{\pi} v$$

پس به ازای $u=cte$، مقدار x ثابت بوده و به‌شکل خطّی موازی محور y خواهد بود. همچنین به ازای $v=cte$، خطّی به موازات محور x را خواهیم داشت. در این قسمت، میدان یکنواخت خواهد بود.

در صورتی‌که بخواهیم میدان الکتریکی بین دو نیم صفحه را مطابق شکل (۵-۳۳) به‌دست آوریم، می‌توان مقادیر منفی v را نیز منظور نمود.



شکل (۵-۳۲): خطوط میدان با الکترودهای $v=0$ و $v=\pi$

فصل ششم
مقره‌های فشار قوی

۶-۱- مقدّمه

برای اتّصال هادی‌های خطوط انتقال به دکل‌ها، که دارای ولتاژهای زیادی نسبت به بدنهٔ دکل و نسبت به یکدیگراند، از مقره‌های فشار قوی استفاده می‌شود. این مقره‌ها بر حسب ولتاژ مورد استفاده و شرایط محیطی، شکل خاصّی به خود می‌گیرند و عمدتاً دارای دو وظیفهٔ مهم می‌باشند:

اوّلاً، وظیفه مکانیکی (استقامت مکانیکی) آن‌هاست؛ به‌طوری که باید دارای استقامت مکانیکی مناسبی بوده و قادر باشند بارها و نیروهای مکانیکی را تحت بدترین شرایط (از قبیل برف و باد، باران و وقتی که ضخامت یخ و برف تشکیل شده روی سیم‌ها در حدّاکثر مقدار خود باشد) به خوبی تحمّل کنند. همچنین باید تحمّل وزن هادی‌های خطوط سیستم‌های انتقال و توزیع برای نگهداری سیم‌های هوایی روی پایه‌ها و دکل‌ها را داشته باشند.

ثانیاً، وظیفه الکتریکی (استقامت الکتریکی) آن‌هاست؛ به‌طوری که باید دارای خواصّ عایقی مناسب باشند تا بتوانند از نظر الکتریکی، هادی‌های دارای ولتاژ را به خوبی از دکل و از یکدیگر جدا کنند. همچنین، علاوه بر تحمّل ولتاژ کار خط، باید در مقابل اضافه ولتاژهای ضربه‌ای ناشی از رعد و برق و قطع و وصل کلیدها و غیره به خوبی مقاومت کنند. به‌عبارت دیگر، استقامت الکتریکی آن‌ها باید در حدّی باشد که در بدترین شرایط، یعنی در حضور رطوبت، باران، آلودگی و بروز صاعقه با

ولتاژهای بالا، دچار شکست الکتریکی نشود. در ضمن باید جریان نشتی مقره‌ها (که ممکن است در اثر تخلیهٔ کرونا، تلفات دی‌الکتریکی یا عایقی موادّ داخلی مقره، و جریان نشتی سطحی مقره به‌وجود آید)، حتّی‌الامکان ناچیز باشد. شکست الکتریکی مقره ممکن است به دلیل تخلیهٔ الکتریکی در هوای اطراف مقره، تخلیهٔ الکتریکی سطحی از طریق گرد و غبار و آلودگی‌های روی سطح مقره و یا تخلیهٔ الکتریکی از داخل خود مقره صورت پذیرد که در حالت اخیر، منجر به خرابی مقره می‌گردد. اغراق نیست اگر بگوییم که ضریب اطمینان سیستم‌های قدرت، به ضریب اطمینان مقره‌ها و کیفیّت آن‌ها بستگی دارد. از آن جا که [illegible]

از موادّ پلیمری) ساخته می‌شوند. جنس مقره‌هایی که در فضاهای سربسته[1] مانند داخل تابلوها و در داخل اتاق‌های ایستگاه‌های برق فشار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً از جنس اپوکسی‌رزین[2] (ترکیبی از اکسیژن و پلاستیک) است. در این بخش مختصراً به جنس مقره‌ها می‌پردازیم.

۶-۲-۱- مقره‌های چینی

مقره‌های چینی از سه مادّهٔ مختلف تشکیل شده است:

۱- کائولین (خاک چینی) $Al_2O_3 . 2 SiO_2 . 2H_2O$ به‌مقدار ۴۰ تا ۵۰ درصد،

۲- سیلیکات آلومینیوم پتاسیم (فِلداسپات) $K_2O . Al_2O_3 . 6 SiO_2$ به‌مقدار ۲۵ تا ۳۰ درصد،

۳- پودر کوارتز SiO_2 به‌مقدار حدّاکثر ۲۵ درصد.

این سه نوع مادّه، به‌ترتیب برای بالا بردن استقامت حرارتی، الکتریکی و مکانیکی به کار می‌روند. به‌عبارت دیگر، خواصّ الکتریکی، مکانیکی و حرارتی چینی بستگی به درصد فراوانی این سه جزء دارد. هر چه فلداسپات بیشتر باشد، استقامت الکتریکی آن زیادتر است و هر چه مقدار کوارتز بیشتر شود، استقامت مکانیکی آن بیشتر شده و با افزایش کائولین، استقامت حرارتی آن بیشتر می‌شود.

برای تهیه مقرهٔ چینی، موادّ فوق را با کمی آب خالص مخلوط می‌کنند تا به‌صورت گِل و خمیر درآید. سپس این گِل را در قالب‌های معیّنی شکل داده و در کوره حرارت می‌دهند تا پخته شود و رطوبت آن نیز گرفته شود. البتّه قبل از قالب‌گیری، درصد رطوبت گل را پایین آورده و تحت خلاء پرس می‌نمایند. پس از پخته شدن در کوره، آن را سرد می‌کنند. سرد کردن آن به‌طور ناگهانی انجام نمی‌شود و ملایم صورت می‌گیرد تا ترکی در آن ایجاد نشود. پس از این مرحله، یک لایه لعاب شیشه‌ای بر روی آن می‌ریزند تا سطح آن کاملاً صاف و صیقلی و برّاق شده و خالی

1- Indoor

2- Epoxy resin

از وجود حباب‌ها و ترک‌های مویین گردد. لعاب شیشه‌ای علاوه بر افزایش استقامت مکانیکی مقره، قدرت چسبندگی گرد و غبار و نفوذ گرد و غبار و رطوبت را کاهش می‌دهد. همچنین باعث ایجاد یک سطح کاملاً صاف و موجب افزایش مقاومت سطحی مقره می‌گردد.

درجه حرارت پختن در کوره نیز، در تعیین استقامت الکتریکی و مکانیکی مقرهٔ چینی مؤثّر است. هر چه درجه حرارت کوره بالاتر باشد، حباب‌های هوا در مقره کم‌تر به‌وجود می‌آید و استقامت الکتریکی آن زیاد می‌شود؛ امّا در عوض، عایق خیلی ترد و شکننده می‌شود. هر چه درجه حرارت پختن در کوره کم‌تر شود، استقامت مکانیکی مقره بیشتر می‌شود ولی حفره‌های بیشتری در آن باقی می‌ماند و استقامت الکتریکی آن کاهش می‌یابد. معمولاً درجه حرارت پخت در کوره را بین ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتیگراد حفظ می‌کنند. استقامت الکتریکی چینی بین ۱۲۰kV/cm تا ۲۸۰kV/cm می‌باشد. استقامت مکانیکی چینی در برابر نیروی فشاری به‌مقدار ۶۹۰MNt/m^2 (در مقاطع بزرگ‌تر ۲۷۵MNt/m^2) و در برابر نیروی کششی به‌مقدار ۴۸MNt/m^2 (در مقاطع بزرگ‌تر ۲۰MNt/m^2) و در برابر نیروی خمشی برابر ۹۵MNt/m^2 می‌باشد. از خواصّ بسیار مهمّ چینی می‌توان به آسان شکل گرفتن و استقامت در برابر موادّ شیمیایی و تغییرات جوّی اشاره کرد.

۶-۲-۲- مقره‌های شیشه‌ای

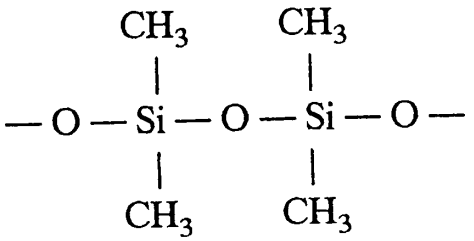
معمولاً شیشه را در درجه حرارت‌های بالا با مخلوطی از موادّ مختلف از جمله آهک و پودر کوارتز ذوب کرده، سپس به‌طور ناگهانی آن را سرد، می‌کنند و قالب‌ریزی می‌نمایند. این عمل باعث سفت شدن شیشه[1] می‌شود. بدین ترتیب مقرهٔ شیشه‌ای با استقامت مکانیکی خیلی زیاد به‌دست می‌آید که در مقابل لب پریدگی از چینی مقاوم‌تر است؛ استقامت مکانیکی فشاری آن حدود ۱/۵ برابر چینی، و استقامت مکانیکی کششی آن تقریباً ۲ برابر چینی، و استقامت مکانیکی آن

1- Toughening Glass

در این نوع خمش، تقریباً مشابه با چینی (کمی کم‌تر) است. همچنین استقامت

در نتیجه، تغییر شکل نسبی آن در اثر تغییر درجه حرارت، خیلی کم می‌باشد. همچنین در مقره‌های شیشه‌ای قبل از بروز ترک، کاملاً خرد می‌شوند و از این‌رو، از روی زمین به راحتی می‌توان مقرهٔ معیوب را تشخیص داد. بر خلاف مقره‌های چینی، در موقع ساخت مقره‌های

شده‌اند، سیلیکون‌رابر[۱] و EPDM[۲] است. سیلیکون‌رابر، یک نوع لاستیک با ترکیبات مختلف و با مقاومت حرارتی بالا و انعطاف‌پذیری عالی و مقاوم در برابر شرایط مختلف جوّی و آلودگی است. سیلیکون‌ها از خانوادهٔ ترکیب‌های ارگانو-سیلیکون هستند که بر اساس زنجیره‌های مولکولی متوالی اتم‌های سیلیکون و اکسیژن تشکیل یافته‌اند. ساختار شیمیایی سیلیکون به‌صورت زیر است:



ولکانیزاسیون[۳] سیلیکون‌رابر، در درجه حرارت ۱۸۰ الی ۲۰۰ درجه سانتیگراد انجام می‌شود. همچنین درجه حرارت اشتعال این مادّه، ۴۰۰ درجه سانتیگراد است و در موقع سوختن، بر خلاف سایر پلیمرها، کربن از خود به‌جای نمی‌گذارد و سوخته شدهٔ آن نیز عایق است. خاصیت آب‌گریزی[۴] نیز، از جمله خواصّ سیلیکون‌رابر است که آن را از سایر موادّ عایقی متمایز ساخته است. به‌همین دلیل است که در شرایط محیط‌های آلوده، جریان نشتی در سطح مقره‌های سیلیکون‌رابر، خیلی کم‌تر از مقره‌های چینی، شیشه و حتّی EPDM است. بنابراین، در مناطق بسیار آلوده، روی این نوع مقره‌ها، قوس الکتریکی برقرار نمی‌شود. به‌علاوه،

1- Silicon Rubber

۲- این مادّه از نظر ساختمان شیمیایی، حاوی سه مونومر اتیلن(E)، پروپیلن(P) و دین(D) است.

۳- ولکانیزاسیون به‌معنای تشکیل پل‌های سولفیدی به‌صورت اتّصالات عرضی بین زنجیره‌های مولکول‌های آلی است که موجب سخت‌تر و محکم‌تر شدن پیوند در پلیمرها می‌شود. این عمل در حرارت زیاد انجام می‌شود.

4- Hydrophobicity آب‌گریزی: خاصیتی است که آب روی مقره پخش نمی‌شود، بلکه به‌صورت قطرهٔ آب، متمرکز در یک قسمت می‌ماند.

خاصیت آب‌گریزی سیلیکون‌رابر برخلاف سایر پلیمرها، همیشه پایدار است.

۶-۲-۴- مقره‌های رزینی

مقره‌های رزینی به‌طور عمده از ترکیبات بی‌سِفنل‌آ و اِپی‌کلروهیدرین ساخته می‌شوند. ترکیب اکسیژن با پلاستیک‌های ذکر شده به‌صورت پُلی‌ادیسون انجام می‌شود؛ یعنی همراه با ترکیب، مولکول‌های بزرگ تولید می‌شود. برای سخت‌تر شدن ترکیب مذکور، معمولاً موادّ اضافی مانند کوارتز نیز اضافه می‌شود تا در نهایت، به‌وسیلهٔ حرارت دادن و ریخته‌گری، مقرهٔ رزینی ساخته شود. این نوع مقره‌ها به‌دلیل نداشتن مقاومت در برابر اشعهٔ ماوراءبنفش خورشید، قابل استفاده در فضای آزاد نیستند و فقط در فضاهای داخلی و داخل تابلوها استفاده می‌شوند.

۶-۳- شکست الکتریکی در مقره‌ها

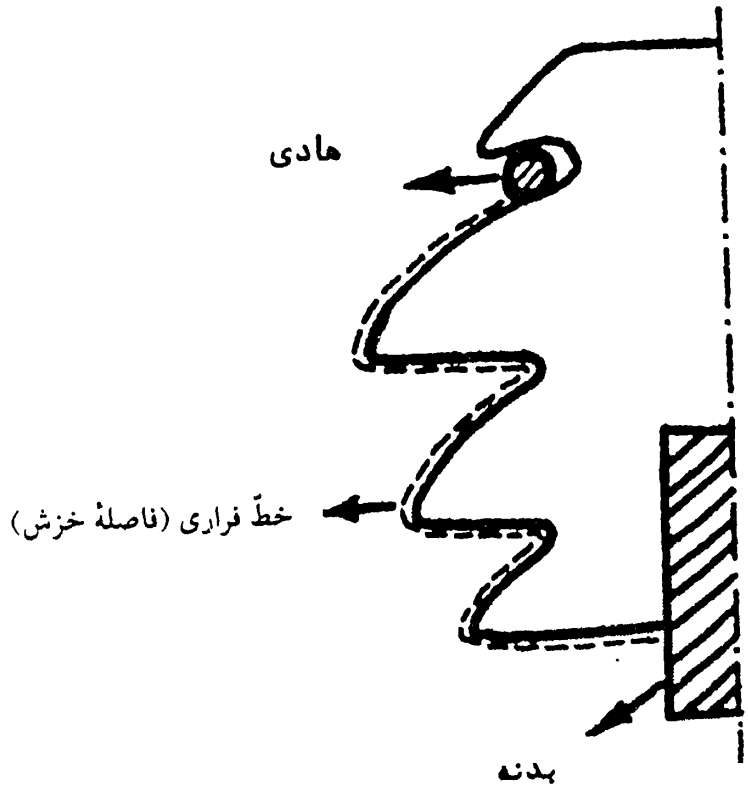
شکست الکتریکی بر روی مقره‌ها ممکن است به‌طور عمده به دو علّت صورت پذیرد. یکی تشکیل جرقّه از داخل مقره و دیگری تشکیل جرقّهٔ سطحی؛ که مورد اوّل به‌سبب آن‌که مقره به دلیل سوراخ شدن، خاصیت عایقی خود را از دست می‌دهد، از اهمّیت بیشتری برخوردار است. تخلیهٔ نوع دوم هم ممکن است به سه صورت مختلف انجام پذیرد.

۶-۳-۱- تخلیهٔ بین هادی و بدنه از طریق هدایت سطحی عایق

این نوع تخلیه در شرایطی که مقره (ایزولاتور) به‌علّت کثیف بودن، آلودگی و مرطوب بودن، خاصیت عایقی کم‌تری دارد ممکن است به‌وقوع بپیوندد. در این حالت، کوتاه‌ترین مسیر روی سطح مقره، که هادی را به بدنه مربوط می‌سازد، "خطّ فراری" (فاصلهٔ خزش) یا "مسیر جریان خزشی"[1] نامیده می‌شود (شکل ۶-۱ را ببینید). در اثر افزایش میزان رطوبت، آلودگی و رسانایی روی سطح مقره، جریان

1- Creepage Distance

نشتی روی سطح مقره در این مسیر افزایش می‌یابد و منجر به بروز جرقهٔ سطحی می‌شود.



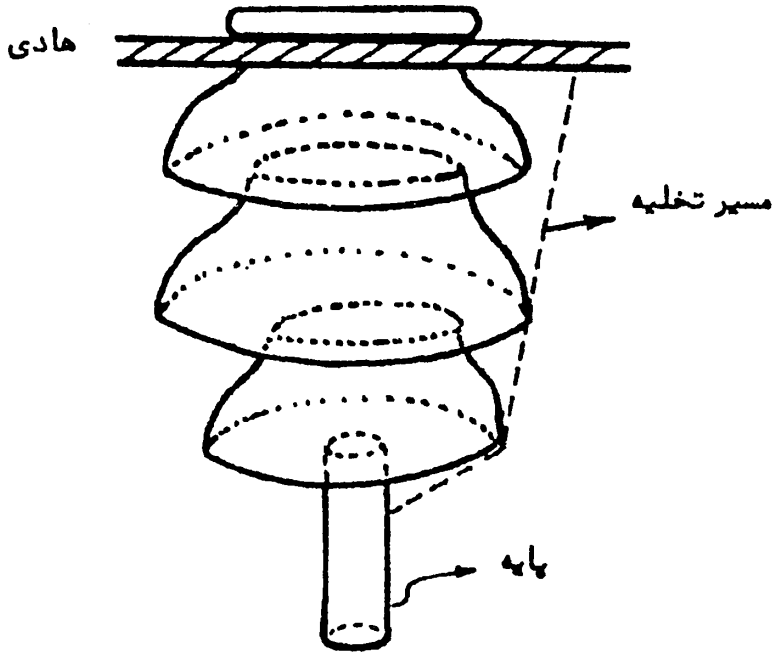
شکل (۶-۱): تخلیه از طریق هدایت سطحی

۶-۳-۲- تخلیه در اثر افزایش ناگهانی ولتاژ بین هادی و بدنه در هوای خشک

هنگامی‌که سطح مقره خشک و نسبتاً تمیز باشد، این نوع تخلیه رخ می‌دهد که معمولاً از طریق کوتاه‌ترین مسیر بین هادی خط و پایهٔ مقره انجام می‌گیرد (شکل ۶-۲ را ببینید).

۶-۳-۳- تخلیه در اثر افزایش ناگهانی ولتاژ بین هادی و بدنه در هوای مرطوب

هنگامی که سطح مقره مرطوب باشد، این نوع تخلیه رخ می‌دهد (شکل ۶-۳ را ببینید). مسیر برقرای جریان در این نوع تخلیه، مجموع کم‌ترین فواصل از لبهٔ چترها تا روی سطح چتر پایینی، و آخرین لبه تا پایهٔ مقره می‌باشد.



شکل (۶-۲): تخلیه روی مقرهٔ خشک و تمیز

می‌کند. لازم به‌ذکر است که پاره‌ای از این نکات طرّاحی (در رسیدن به طرح مناسب)، از جهات مختلف ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند. بدیهی است در چنین شرایطی، حالت بهینهٔ طرّاحی مورد توجّه قرار می‌گیرد. پاره‌ای از نکات مهمّی که باید در مورد انتخاب نوع مقره در نظر گرفته شود، به شرح زیر است:

الف) باید سطح مقره صاف باشد تا حتّی‌الامکان از نشستن و تشکیل گرد و غبار و آلودگی‌های موجود در هوا (که باعث کاهش ایزولاسیون سطحی و بالطبع افزایش جریان نشتی و افزایش احتمال وقوع تخلیهٔ سطحی می‌گردد)، جلوگیری شود. این امر در مناطقی با هوای بسیار آلوده، مستلزم کاربرد مقره‌های با شیارهای کم عمق‌تر می‌باشد.

ب) به منظور کاهش جریان نشتی و کاهش احتمال وقوع تخلیه، باید حتّی‌الامکان طول مسیر جریان خزشی بیشتر شود. این امر مستلزم ایجاد شیارها و فرورفتگی‌های عمیق روی سطح زیرین مقره‌ها می‌باشد؛ زیرا نباید ابعاد مقره، خیلی بزرگ شود.

ج) باید شکل مقره چنان طرّاحی گردد که آب باران روی سطح آن باقی نماند و حتّی‌الامکان سریع خشک شود. این امر، به‌طور عمده به طرّاحی مقره‌های چتری شکل منجر شده است که از خواصّ مطلوب آن این است که معمولاً بخش زیرین آن در شرایط بارانی (اگر باد نباشد) خشک باقی می‌ماند. همچنین باران به‌سادگی از روی چترهای شیب‌دار پایین می‌ریزد و آلودگی‌های سطح را نیز شستشو می‌دهد. شیب چترها را طوری انتخاب می‌کنند که روی سطوح هم‌پتانسیل قرار گیرند و در صورت تشکیل رسانایی (ناشی از آلودگی روی سطح چترها) جریان نشتی سطح خیلی زیاد نشود.

د) باید [illegible]

۶-۵- مقره‌های خطوط هوایی

درصد بسیار زیادی از مقره‌های مورد استفاده، از نوع مقره‌های خطوط هوایی می‌باشد. از این نوع مقره‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- مقره‌های سوزنی
۲- مقره‌های آویزان بشقابی
۳- مقره‌های کششی
۴- مقره‌های مهار
۵- مقرهای آویزان استوانه‌ای
۶- مقره‌های مخصوص
۷- مقره‌های چرخی

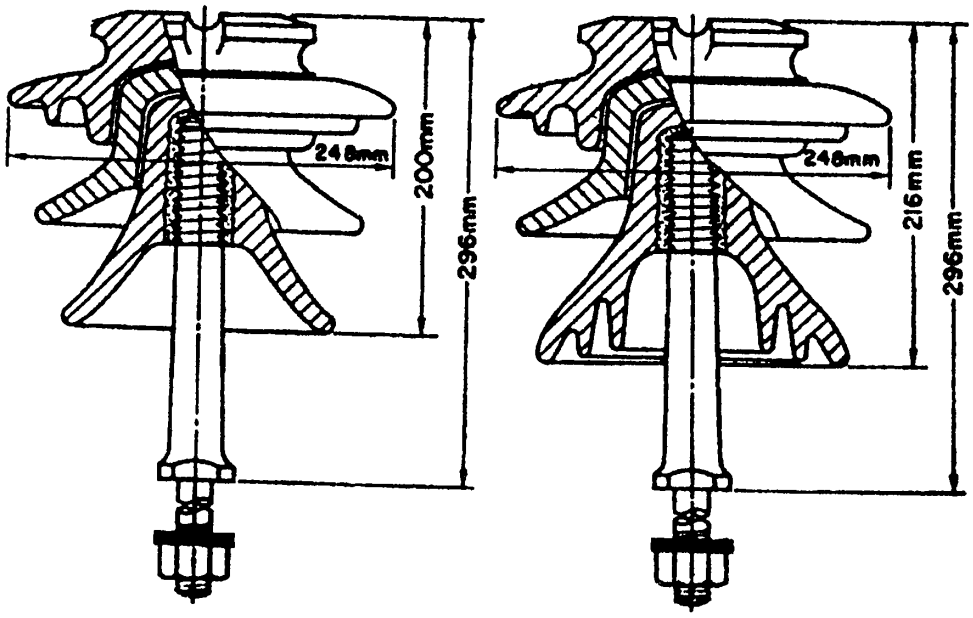
۶-۵-۱- مقره‌های سوزنی[1]

همان‌طور که از نام این مقره‌ها بر می‌آید مقره توسّط یک سوزن یا میخ فولادی گالوانیزه به پایه بسته می‌شود. معمولاً این نوع مقره‌ها از جنس چینی می‌باشند. نحوهٔ استفاده از این مقره طوری است که معمولاً تحت تأثیر نیروی فشاری قرار می‌گیرد؛ ولی چنان‌چه به‌صورت معکوس به بازوهای پایه‌ها بسته شود، تحت تأثیر نیروی کشش قرار خواهد گرفت. طبق استانداردهای مختلف، تماس مستقیم بین چینی و فلز سخت سوزن مقره چندان مناسب نخواهد بود و باید توسّط یک انگشتانهٔ فلزی از جنس نرم‌تر از هم جدا شوند. برای این منظور، معمولاً از فلز سرب استفاده می‌شود. این مقره‌ها را می‌توان با افزایش طبقات عایق برای ولتاژهای بالاتر به‌کار برد؛ امّا معمولاً برای ولتاژهای توزیع ساخته می‌شوند. کاربرد این نوع مقره‌ها،معمولاً به ولتاژهای زیر ۵۰kV محدود می‌شود؛ زیرا در ولتاژهای بالاتر، هزینهٔ آن غیراقتصادی بوده و با افزایش ولتاژ، ازدیاد قیمتی نشان می‌دهد که تقریباً متناسب با V^x است به‌طوری که x عددی بزرگ‌تر از ۲ می‌باشد. در این نوع مقره،

1- Pin Type Insulators

ضخامت چینی واقع بین سوزن و هادی باید به‌قدری باشد که در صورت افزایش ولتاژ غیرمعمولی، تخلیهٔ سطحی از روی عایق، زودتر از شکست الکتریکی در داخل آن صورت پذیرد. نسبت ولتاژ لازم برای تخلیهٔ الکتریکی سطحی به ولتاژ کار مقره را ضریب اطمینان می‌نامند که برای ولتاژهای کم‌تر، مقدار بیشتری دارا می‌باشد. شکل (۶-۴) دو نوع مقرهٔ سوزنی را نشان می‌دهد. پایهٔ فولادی مقره در قسمت رزوه، از پوشش سُربی است و مانند یک پیچ، به داخل شیارهای رزوه شدهٔ مقره، پیچانده شده، به‌طوری که محکم می‌ایستد. این پایهٔ فولادی در قسمت پایین نیز دارای رِزوه و مهره می‌باشد که برای بستن مقره روی کراس‌آرم (که یک نبشی از جنس فولاد گالوانیزه یا موادّ کامپوزیت است) استفاده می‌شود. کراس‌آرم توسّط پیچ دیگری به پایه‌های بتونی بسته می‌شود.

هنگامی که سطح مقره، مرطوب باشد، بخصوص در صورتی‌که روی سطح مقره آلودگی زیاد نیز ایجاد شده باشد، سطح بالایی چترهای مقره عملاً خاصیت عایقی خود را از دست داده، حتّی ممکن است هدایت خیلی زیادی از خود نشان دهند. در این صورت مسیری که در آن تخلیهٔ الکتریکی بین هادی و سوزن صورت می‌گیرد، عبارت است از: مجموع کوتاه‌ترین فواصل موجود بین لبهٔ هر چتر، با نزدیکترین

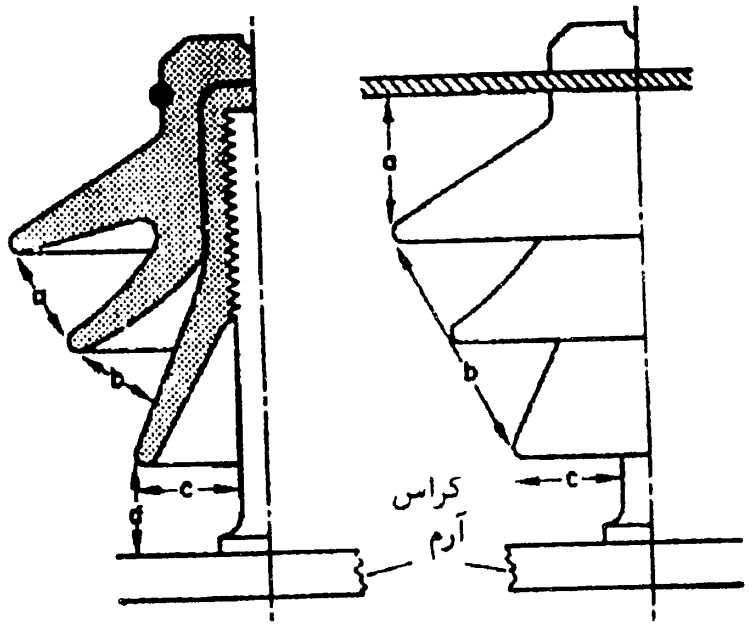


شکل (۶-۴): دو نوع مقرهٔ سوزنی

نقطهٔ روی چتر پایین‌تر به اضافهٔ کوتاه‌ترین فاصلهٔ موجود بین لبه چتر پایینی و سوزن مقره که در شکل (۶-۵-الف) با جمع a + b + c نشان داده شده است. همچنین در حالت خشک بودن مقره، مسیر جرقّه، کوتاه‌ترین فاصله از هادی تا پایهٔ فلزی مقره است. در مقره‌های خشک و تمیز، چینی نقش عایقی خود را حفظ کرده و بنابراین، مسیر جرقّه از کوتاهترین فاصلهٔ هوایی بین هادی و سوزن مقره تشکیل می‌شود که این مسیر، به‌صورت حاصل جمع a + b + c در شکل (۶-۵-ب) نشان داده شده است. مسیر جرقّهٔ هوای خشک مقره، بزرگ‌تر از مسیر جرقّهٔ هوای مرطوب است. به این منظور، ضریب اطمینان مقره را به‌صورت زیر تعریف می‌کنند:

$$\text{ضریب اطمینان مقره} = \frac{\text{ولتاژ لازم برای جرقهٔ سطحی}}{\text{ولتاژ نامی مقره}}$$

در شبکه‌های ۲۰kV، ضریب اطمینان هوای خشک مقره‌های سوزنی برابر ۶ و برای هوای مرطوب به‌مقدار ۴ است. همچنین در شبکه‌های ۱۱kV، این ضریب در هوای خشک برابر ۸/۲ و برای هوای مرطوب به‌مقدار ۵ می‌باشد. استقامت مقره و سوزن آن، از نظر مکانیکی باید چنان باشد که تحمّل نیروهای مکانیکی را در شرایط سخت با ضریب اطمینان کافی داشته باشد. در مورد پایه‌های انتهایی که تحت



(ب): مقرهٔ سوزنی در حالت خشک (الف): مقرهٔ سوزنی در حالت تر

شکل (۶-۵): مسیر جرقّه در حالت تر و خشک

نیروی کشش یک طرفه قرار دارند، مقره باید استقامت کافی در مقابل نیروی خمشی را داشته باشد؛ در غیر این صورت بهتر است از مقره‌های کششی استفاده شود.

۶-۵-۲- مقره‌های آویزان بشقابی[۱]

همان‌طور که گفته شد، در ولتاژهای بالاتر از ۵۰kV که در سیستم‌های انتقال و فوق‌توزیع بکار می‌رود، استفاده از مقره‌های سوزنی به‌علّت نیاز به ضخامت زیادتر و پیچیده شدن ساختمان یک پارچهٔ مقره و گران‌تر بودن و غیراقتصادی شدن آن‌ها، امکان‌پذیر نیست. از طرف دیگر برای ولتاژهای بالا، اندازهٔ آن‌ها بیش از حدّ بزرگ می‌شود. این نکات موجب گرایش توجّه متخصّصان به‌مقره‌های آویزان برای خطوط انتقال با ولتاژ بالا شده است. همان‌طور که از نام این مقره‌ها مشخّص است، هادی خطّ انتقال توسّط مقره، زیر بازوهای دکل به‌صورت آویزان قرار می‌گیرد. در خطوط انتقال، دو نوع مقرهٔ آویزان مورد استفاده قرار می‌گیرند که عبارتند از: مقره‌های آویزان بشقابی و مقره‌های آویزان استوانه‌ای.

در مقره‌های آویزان بشقابی چندین مقرهٔ بشقابی به‌صورت یک زنجیره (مطابق شکل ۶-۶۷) به هم متّصل می‌شوند و زنجیرهٔ فوق، به کراس آرم خطوط انتقال و

فوق‌توزیع آویزان می‌شود. هادی خط به‌وسیلهٔ کلمپ فلزی (آویزی) به [illegible]

فولادی هر مقره در داخل حفرهٔ کلاهک مقرهٔ پایینی قرار گرفته است و با قرار دادن گیرهٔ اطمینان (اشپیل[۱]) به داخل حفرهٔ کلاهک از سوراخ ریز مقابل آن، اتّصال پین به کلاهک محکم می‌شود. دو مقره ضمن اتّصال محکم به یکدیگر در محلّ اتّصال به‌صورت لولا، نسبت به‌هم حرکت آزاد دارند. قطر بشقاب‌های این نوع مقره‌ها معمولاً بین ۱۵۰ تا ۳۶۰ میلیمتر و یا حتّی بیشتر می‌باشد و استقامت مکانیکی آن‌ها هم معمولاً بین ۴۰ تا ۳۰۰ کیلونیوتن می‌باشد.

نوع دیگری از مقره‌های بشقابی، مطابق شکل (۶-۸) می‌باشد. این نوع مقره برای اوّلین بار توسّط آقای "هیولت"[۲] ساخته شد. در هر واحد این مقره، دو حفرهٔ U مانند در خلاف جهت یکدیگر قرار دارند که در دو صفحهٔ عمود بر هم قرار می‌گیرند. بست‌های U شکل از فلز سخت، واحدهای این نوع مقره را به هم مربوط می‌سازند (شکل ۶-۸ را ببینید). این بست‌ها چنان قرار می‌گیرند که مانند حلقه‌های زنجیر به هم قفل شده و از نظر الکتریکی توسّط چینی یا شیشه از یکدیگر ایزوله می‌شوند.

مزایای استفاده از مقره‌های بشقابی را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود :

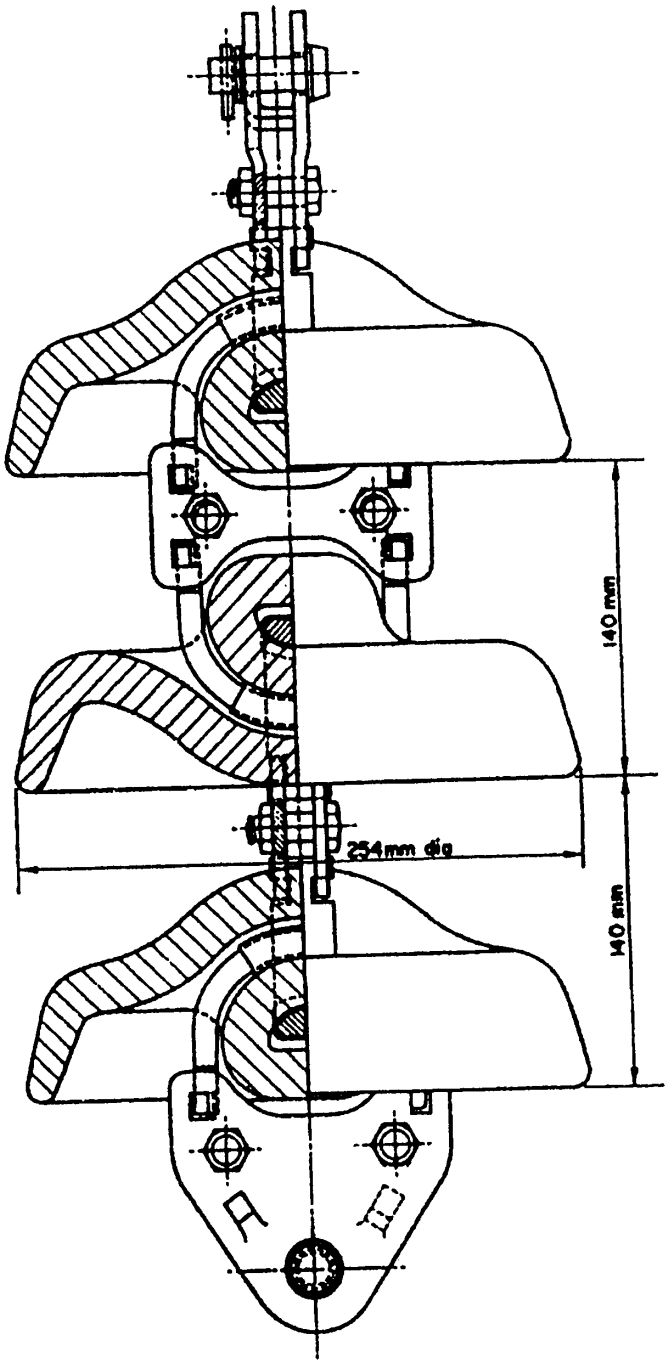
۱- چون هر واحد مقرهٔ بشقابی برای یک ولتاژ نامی پایینی (در حدود ۱۱kV) طرّاحی می‌شود، از این‌رو، متناسب با ولتاژ خط می‌توان به تعداد دلخواه از این بشقاب‌ها را به هم متّصل کرد تا یک زنجیرهٔ آن بتواند ولتاژ خط را تحمّل کند.

۲- اگر هر کدام از بشقاب‌های یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان، معیوب یا صدمه ببینند فقط لازم است همان بشقاب معیوب عوض شود. این کار به سادگی انجام می‌شود و نیازی به تعویض کلّ زنجیره نمی‌باشد (اقتصادی بودن مقره).

۳- چون زنجیرهٔ مقره به کراس آرم دکل، آویزان است و می‌تواند به‌صورت آزادانه حرکت کند، نیروی ناشی از باد یا وزن سیم به محور مقره وارد می‌شود و بنابراین، حدّاقل فشار مکانیکی بر مقره‌های آویزان اعمال می‌گردد. (تنش‌های مکانیکی کم‌تری به مقره وارد می‌شود).

۴- اگر به دلیلی بخواهند ولتاژ نامی خط را افزایش دهند، به راحتی می‌توان با اضافه نمودن چند بشقاب دیگر، قدرت عایقی مناسب را به‌دست آورد و نیازی به تعویض زنجیرهٔ مقره نیست (قابلیّت انعطاف در افزایش ولتاژ خط).

1- Split Pin *2- Hewlett*



شکل (۶-۸): مقرهٔ هیولت

۵- چون هادی خط به زنجیرهٔ آویزان است و پایین‌تر از بازوی کراس آرم دکل خطّ انتقال قرار می‌گیرد، در نتیجه هنگام برخورد صاعقه به خط، صاعقه، ابتدا به بازوی کراس آرم برخورد می‌کند که تا حدود زیادی از زنجیره محافظت می‌کند.

۶- اگر بار مکانیکی خط زیاد شود (مثلاً در اسپن‌های بلند، هنگام عبور خطوط انتقال از روی رودخانه‌ها، درّه‌ها و اتوبان‌ها)، می‌توان از دو یا چند زنجیرهٔ مقرهٔ

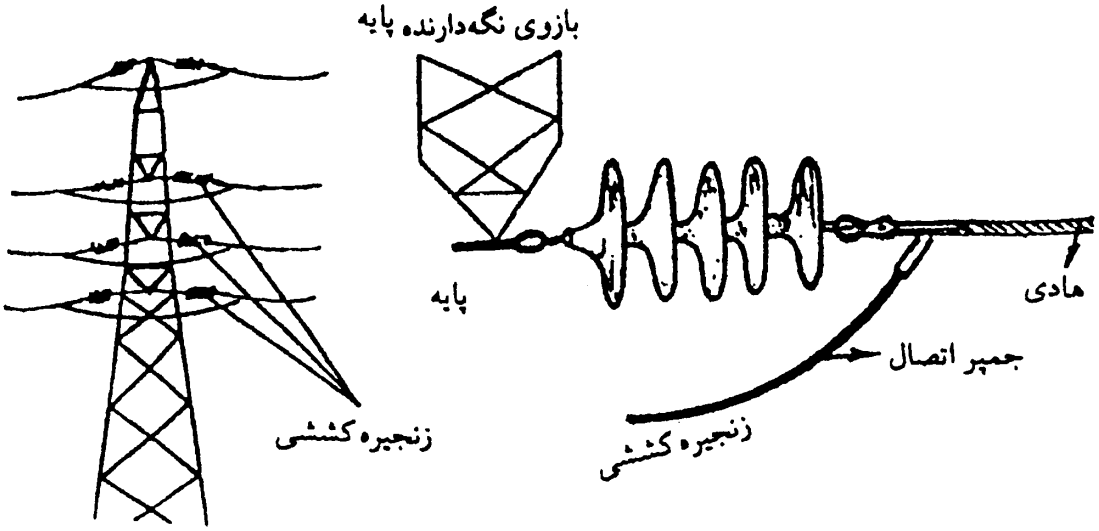
آویزی موازی یا بیشتر استفاده کرد.

به‌طور تقریبی می‌توان رابطهٔ زیر را برای تعیین تعداد بشقاب‌های یک زنجیره مورد استفاده قرار داد.

$$N = \frac{\text{ولتاژ خطی خطّ انتقال}}{۱۶/۷} + ۱ \qquad (۶-۱)$$

۶-۵-۳- مقره‌های کششی[1]

مقره‌های کششی در جاهایی که نیروی کششی افقی زیادی به مقره وارد می‌شود، استفاده می‌گردد. از این مقره‌ها در پایه‌های ابتدایی و انتهایی خطوط انتقال و توزیع، و در پایه‌هایی که مسیر خط از حالت مستقیم خارج شده و یا نسبت به افق زاویه پیدا می‌کنند، استفاده می‌شود. مقره‌های مذکور، همان مقره‌های بشقابی هستند که به‌صورت افقی نصب می‌شوند و باید نیروی کششی خط را در پایه‌ها تحمّل کنند و چون نیروی زیادتری را باید تحمّل نمایند، فقط استقامت مکانیکی آن‌ها نسبت به مقره‌های آویزان بیشتر است. شکل (۶-۹) این نوع مقره‌ها را نشان می‌دهد.



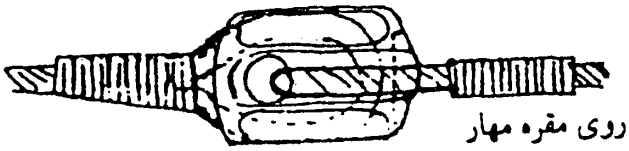
شکل (۶-۹): مقرهٔ کششی

1- *Tension Insulators*

۶-۵-۴- مقرهٔ مهار[1]

در خطوط توزیع، برای پایه‌های واقع در ابتدا و انتهای خط، و یا برای پایه‌های قرارگرفته در زاویه و به‌منظور خنثی کردن نیروی کششی که از یک طرف به پایه وارد می‌شود، از سیم فولادی مهار استفاده می‌شود. این سیم مهار از یک طرف به سر تیر محکم می‌شود و از طرف دیگر به میلهٔ مهار و صفحهٔ مهار در عمق ۲ متری داخل زمین محکم می‌گردد. برای ایمنی و حفاظت بیشتر (که اگر احتمالاً سیم مهار در بالا از طریق میلگرد تیر بتنی برق‌دار گردید، سیم مهار در نزدیکی زمین برق‌دار نشود)، در وسط سیم مهار از مقرهٔ مهار استفاده می‌شود و سیم‌های مهار از دو طرف به مقرهٔ مهار متّصل می‌شوند. این مقره به گونه‌ای است که اگر شکسته شود سیم مهار رها نمی‌شود و البتّه باید تحمّل نیروی کششی سیم مهار را داشته باشند. شکل (۶-۱۰) این نوع مقره‌ها را نشان می‌دهد. این مقره به‌صورت یک شش وجهی استوانه‌ای می‌باشد که دارای دو سوراخ عمود بر هم است. سیمِ مهار از طرف بالا به سوراخ پایینی وارد و از وجه مقابل به روی همان سیم برگشته و پیچانده می‌شود تا محکم گردد. سیم مهارِ طرف پایین نیز به‌طور مشابه، روی سوراخ بالایی وارد و خارج می‌شود. بدین ترتیب، ضخامت بین دو سوراخ، سیم‌های بالایی و پایینی مهار را از هم ایزوله می‌کند.

مقره مهار از روبرو و از جلو



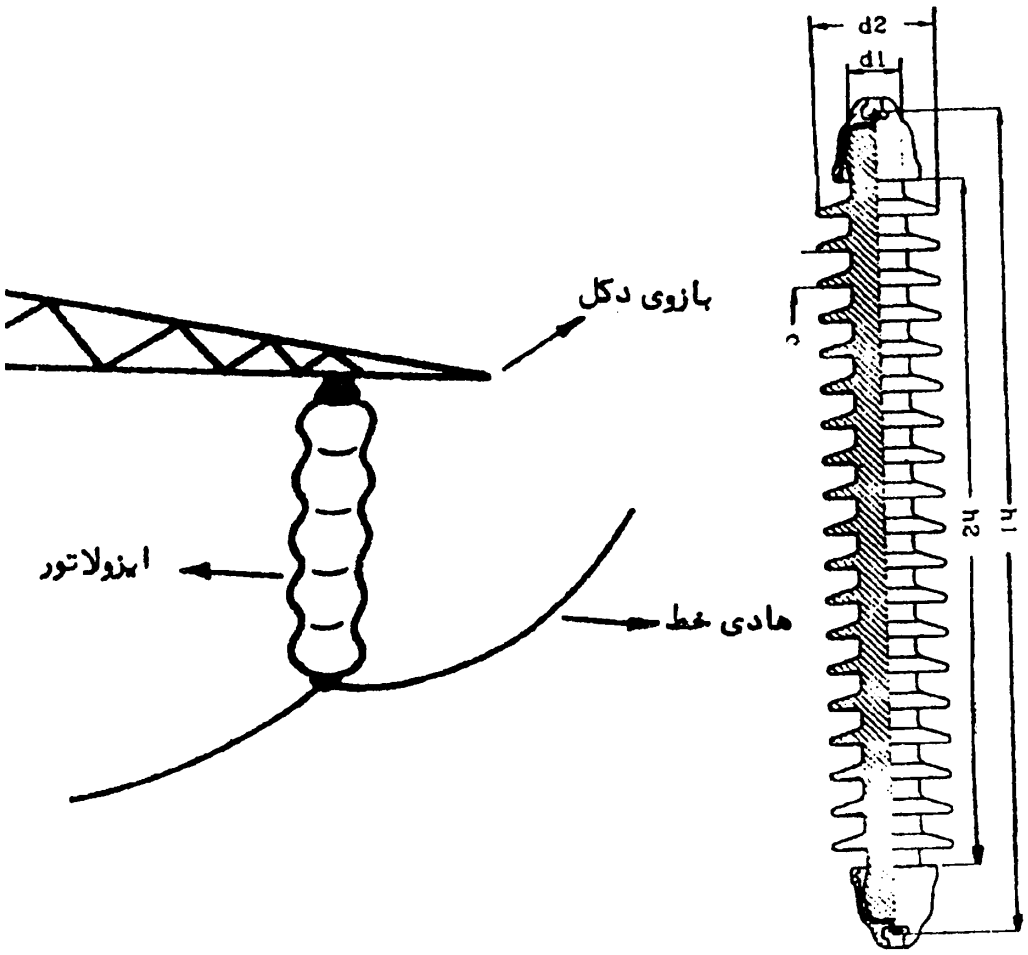
نحوه اتصال دو طرف سیم مهار روی مقره مهار

شکل (۶-۱۰): مقرهٔ مهار

1- *Stay Insulator*

۶-۵-۵- مقره‌های آویزان استوانه‌ای[1]

این مقره‌ها به‌صورت یک زنجیرهٔ استوانه‌ای و به‌شکل یکپارچه از جنس چینی یا اخیراً از موادّ ترکیبی[2] (که استقامت مکانیکی بسیار بالایی داشته و آب روی سطح آن‌ها پخش نمی‌شود و برای مناطق صحرایی مناسب است)، ساخته می‌شوند. در این نوع مقره‌ها به دو طرف انتهایی آن‌ها دو کلاهک فلزی با سیمان مخصوص یا چسب اتّصال داده می‌شود. در شکل (۶-۱۱) مقرهٔ استوانه‌ای نشان داده شده است. قطر استوانهٔ عایق، متناسب با قطر مکانیکی مورد نیاز انتخاب می‌شود. این مقره‌ها در مقایسه با مقره‌های آویزان بشقابی، از وزن بسیار کم‌تری برخوردارند (وزن مقره‌های آویزان در یک زنجیره، بیشتر به‌سبب وزن کلاهک‌های فلزی آن است)؛ از



شکل (۶-۱۱): مقرهٔ استوانه‌ای

1- Long-Rod Insulators
2- Composite Material

این‌رو، از نظر اقتصادی ارزان‌ترند. البتّه نقطه ضعف اصلی آن‌ها در نوع چینی، این است که امکان خراب شدن کامل مقره در اثر یک قوس الکتریکی یا ضربهٔ مکانیکی بیرونی بر آن وجود دارد؛ در صورتی‌که در مقره‌های بشقابی تمام زنجیره از بین نمی‌رود. در زنجیره‌های بشقابی اگر یک مقره دچار ترک شود، تا مدّت زیادی بقیهٔ مقره‌ها می‌توانند ولتاژ خط را تحمّل کنند و همچنین بار مکانیکی خط را نگه دارند. لازم به‌ذکر است که در ولتاژهای بالا می‌توان دو یا سه مقرهٔ استوانه‌ای را به هم متّصل کرده و به‌صورت یک زنجیره مورد استفاده قرار داد.

نوع ساخته شدهٔ این نوع مقره‌ها، از موادّ ترکیبی[۱] یا اصطلاحاً سیلیکونی[۲] دارای خاصیت آب‌گریزی[۳] بوده و آب و آلودگی روی سطح مقره پخش نمی‌شود؛ بلکه این آلودگی و رطوبت در یک نقطهٔ سطح باقی می‌ماند. در نتیجه، با توجّه به آن‌که تمام سطح، مرطوب نمی‌شود، بنابراین، می‌توان مسیر خزشی آن را کوتاه کرد. جریان نشتی این نوع مقره‌ها خیلی کم است و در مناطقی با آلودگی‌های زیاد، روی سطح آن‌ها جرقّه زده نمی‌شود و نیازی به تمیز کردن هم ندارند. این مقره‌ها ضمن داشتن استقامت مکانیکی بالا، از وزن بسیار کمی نیز برخوردارند.

۶-۵-۶- مقره‌های چرخی[۴]

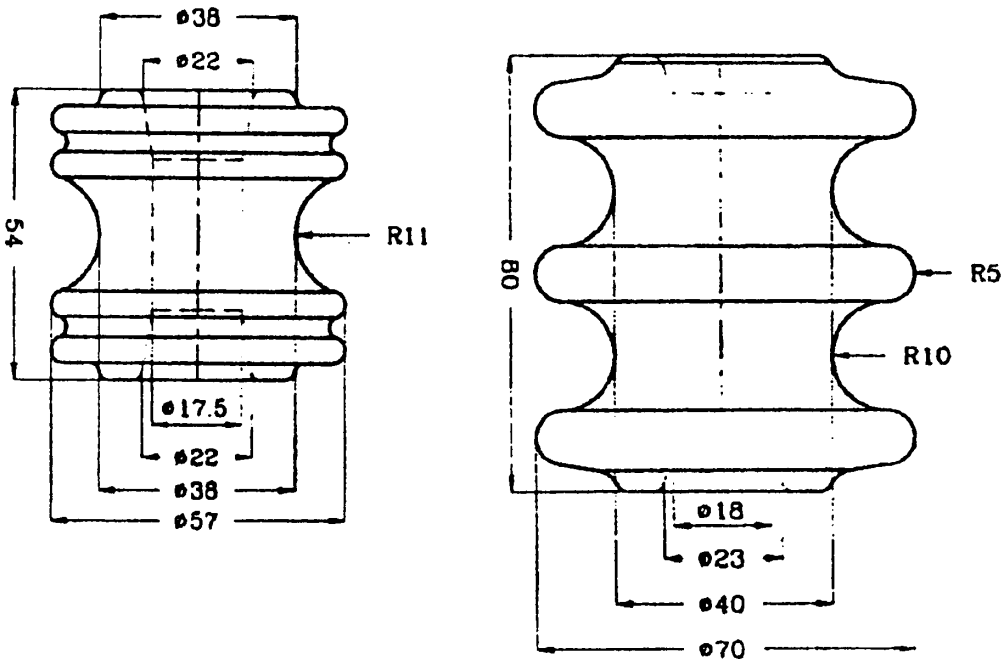
از این نوع مقره‌ها در خطوط توزیع فشار ضعیف ۴۰۰V استفاده می‌شود. این مقره‌ها توسّط یک تسمهٔ فلزی U شکل به‌نام "اتریه" به پایهٔ خطوط توزیع هوایی بسته می‌شوند و سیم هوایی شبکه، روی شیار چرخی مانند مقره قرار می‌گیرد و از آن به‌عنوان مقرهٔ کششی نیز استفاده می‌شود. مقره‌های چرخی در دو نوع یک شیاری و دو شیاری استفاده می‌شود که در شکل (۶-۱۲) قابل مشاهده می‌باشد. در وسط مقره، سوراخی وجود دارد که از این محل، پین فولادی از محلّ سوراخ وارد شده و با اشپیل از دو طرف بالا و پایین به اتریه بسته می‌شود. اتریه نیز توسّط پیچ به پایهٔ بتونی شبکهٔ توزیع هوایی ۴۰۰ بسته می‌شود.

1- *Composite*

2- *Silicone Rubber*

3- *Hydrophobicity*

4- *Spool Insulators*

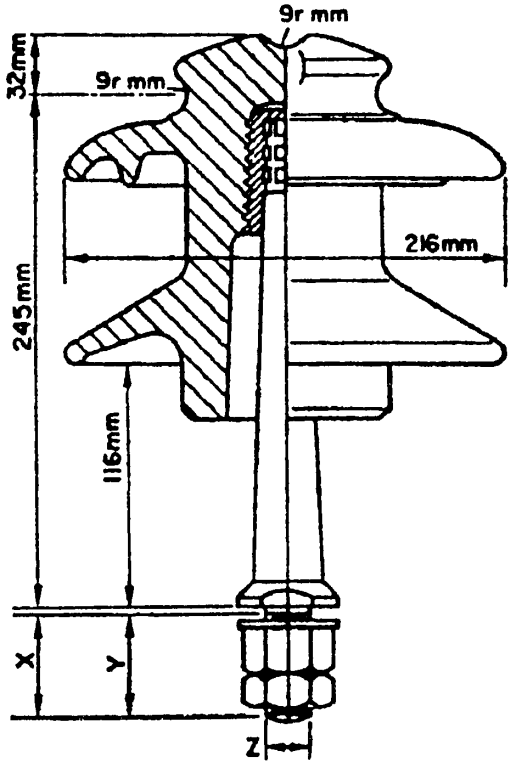


شکل (۶-۱۲): انواع مقره‌های چرخی

۶-۵-۷- مقره‌های مخصوص

در شرایط خاص محیط، مثلاً هنگامی که آلودگی ناشی از دود، موادّ شیمیایی و یا نمک روی سطح مقره‌ها بیش از حدّ معمول باشد، ممکن است استفاده از مقره‌هایی با مشخّصات ویژه الزامی است. بعلاوه، چنان‌چه مثلاً در محیطی رعد و برق زیاد باشد، برای جلوگیری از سوراخ شدن مقره‌ها در مقابل ازدیاد ولتاژهای ناشی از رعد و برق، باید از مقره‌هایی با ضخامت بیشتر استفاده شود. همچنین در محیط‌های با آب و هوای مدیترانه‌ای که از طرفی دارای رطوبت نسبی زیاداند و از طرفی به دلیل تراکم نسبتاً زیاد مردم، دارای آلودگی‌های ناشی از تأسیسات صنعتی می‌باشند، بهتر است از مقره‌های مقاوم در مقابل مه[1] و یا آلودگی‌ها استفاده شود. این مقره‌ها باید دارای مسیر سطحی طولانی‌تری بوده، شیب چترهای مقره آن‌چنان باشند که در اثر باران، سطح مقره به خوبی تمیز شود. شکل (۶-۱۳) یکی از انواع سوزنی این

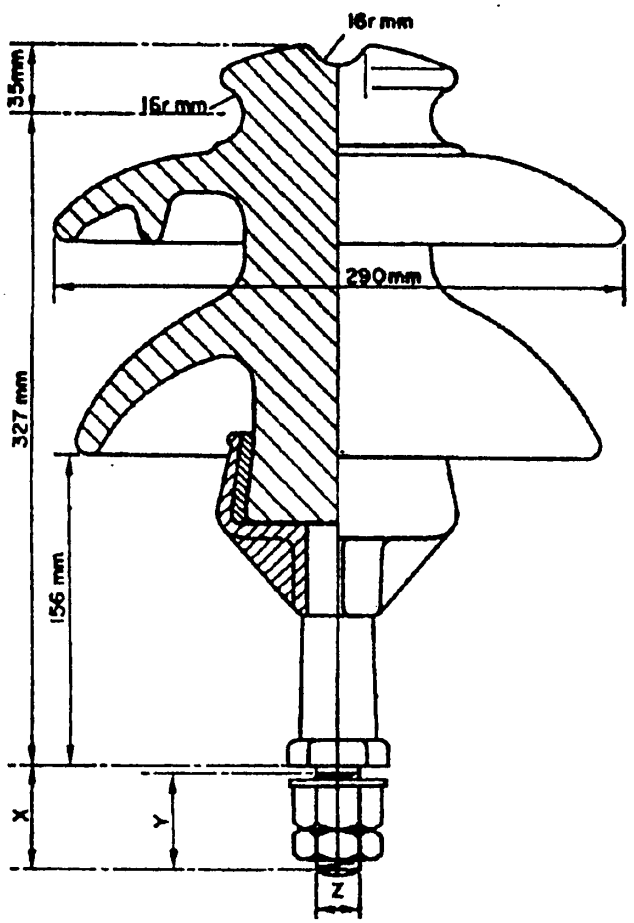
1- *Anti-Fog*



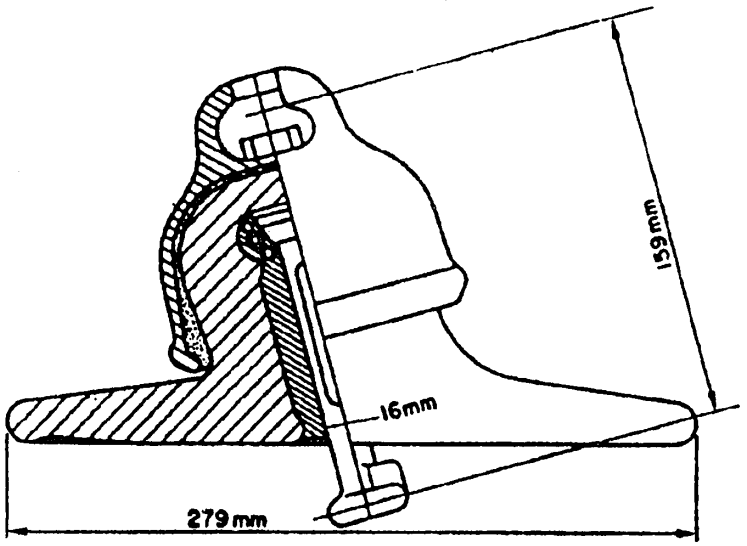
شکل (۶-۱۳): مقرهٔ سوزنی مقاوم در مقابل مه و آلودگی

مقره‌ها را نشان می‌دهد.

چنان‌چه هدف، محافظت در مقابل سوراخ شدن مقره در اثر ازدیاد ولتاژ ناگهانی باشد، می‌توان از مقره‌هایی استفاده کرد که فاصلهٔ بین هادی و سوزن در آن‌ها زیاد باشد. شکل (۶-۱۴) یکی از انواع مقره‌های سوزنی را که بدین منظور طرح شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، سوزن قسمت پایین مقره به جای این‌که در داخل مقره باشد، توسّط کلاهکی به قسمت برآمدهٔ پایین مقره وصل شده است که در نتیجه، باعث افزایش استقامت مقره در مقابل سوراخ شدن (ناشی از ازدیاد ولتاژ) می‌شود. از انواع دیگر مقره‌های مخصوص، مقره‌های بشقابی ضدّ آلودگی است که بشقاب‌های هر واحد، دارای انحراف ناچیزی نسبت به افق بوده و واحدهای متوالی، آن چنان به هم مرتبط می‌شوند که به‌صورت یک در میان به چپ و راست انحراف داشته باشند. این موضوع، باعث افزایش طول خطّ فراری می‌گردد (شکل ۶-۱۵ را ببینید). در نقاطی که رطوبت هوا قبل از ریزش باران، بسیار زیاد و آلودگی هم زیاد باشد، ممکن است رطوبت سبب افزایش شدید هدایت بر

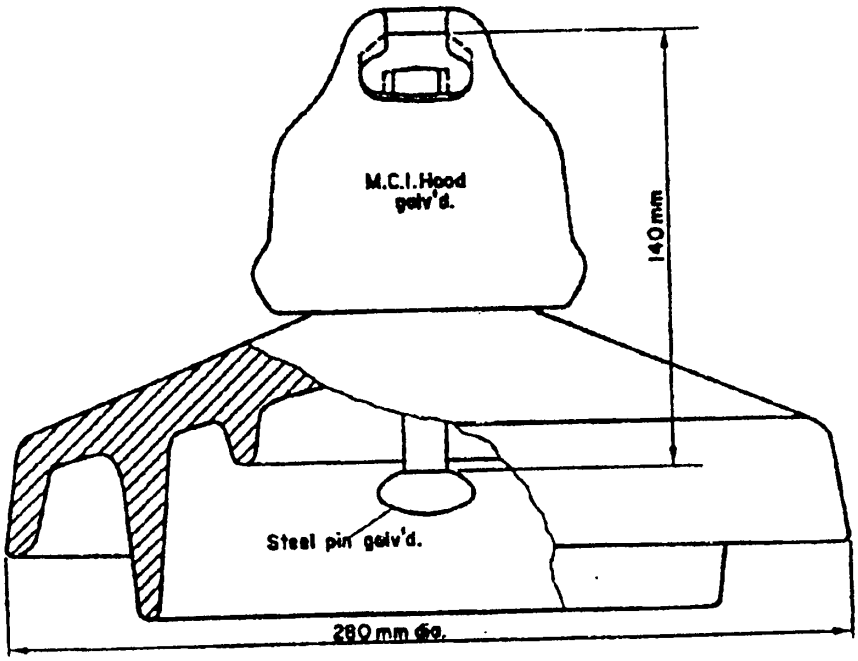


شکل (۶-۱۴): مقرهٔ سوزنی توپر با تحمّل ولتاژ زیاد در مقابل جرقّه



شکل (۶-۱۵): مقرهٔ آویزی بشقابی دارای انحراف نسبت به محور

روی سطح ایزولاسیون شود؛ به‌طوری که احتمال شکست الکتریکی روی سطح مقره قبل از ریزش باران و شستشوی مقره خیلی زیاد است. تحت چنین شرایط جوّی، بهتر است از مقره‌های با فرورفتگی‌های عمیق‌تر استفاده شود (شکل ۶-۱۶ را ببینید).

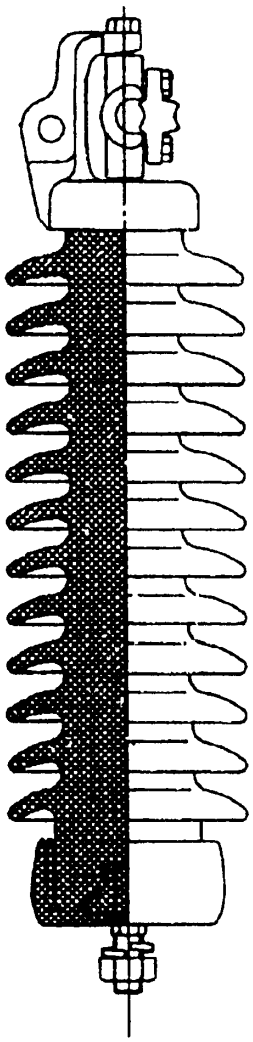


شکل (۶-۱۶): مقرهٔ بشقابی با فرورفتگی‌های عمیق

۶-۶- مقره‌های اتّکایی (مقره‌های نوع ایستگاه[۱])

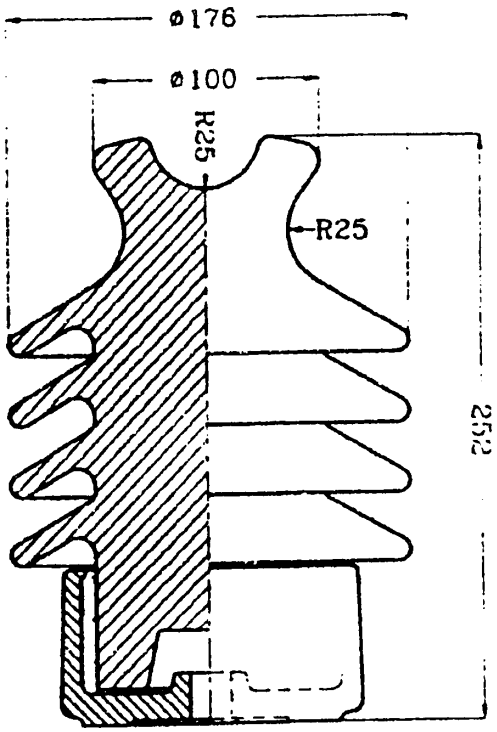
این نوع مقره‌ها به‌صورت استوانه‌ای بلند می‌باشند که دارای فرورفتگی‌ها و برآمدگی‌هایی روی سطح استوانه هستند و از نظر ساخت می‌توانند به دو صورت تو خالی و تو پر ساخته شوند. نوع توپر آن دارای استقامت مکانیکی و نیز استقامت الکتریکی بیشتری در مقابل سوراخ شدن است. امروزه مقره‌های نوع ایستگاه بیشتر به‌صورت توپر ساخته می‌شوند. مقره‌های نوع ایستگاه مانند مقره‌های سوزنی می‌توانند در خطوط انتقال مورد استفاده قرار گیرند (شکل ۶-۱۷ را ببینید) و یا

1- Post Insulators



شکل (۶-۱۷): مقرهٔ نوع ایستگاه مخصوص خطوط انتقال

برای ایستگاه‌های برق فشار قوی بکار روند (شکل ۶-۱۸ را مشاهده کنید). لازم به‌ذکر است که برای تاسیساتی که مقره باید نیروی مکانیکی بیشتری را تحمّل کند، از نوع توخالی آن که قطر بزرگ‌تری دارد، استفاده می‌شود؛ زیرا نوع توپر آن فقط با یک قطر معیّن و محدودی قابل ساخت است. البتّه برای افزایش استقامت الکتریکی نوع توخالی آن، سوراخ داخل مقره را پس از پر کردن با گاز خشک ازت، می‌پوشانند. این مقره‌ها به‌صورت افقی یا عمودی نصب می‌شوند. در ایستگاه‌های فشار قوی، این مقره‌ها برای نگهداری شین‌های فشار قوی روی فونداسیون‌های بتونی استفاده می‌شوند و شین فشار قوی روی شیار بالایی مقره بسته می‌شود. از این مقره‌ها همچنین در تابلوهای فشار قوی استفاده می‌شود. شمش‌های فشار قوی داخل تابلو

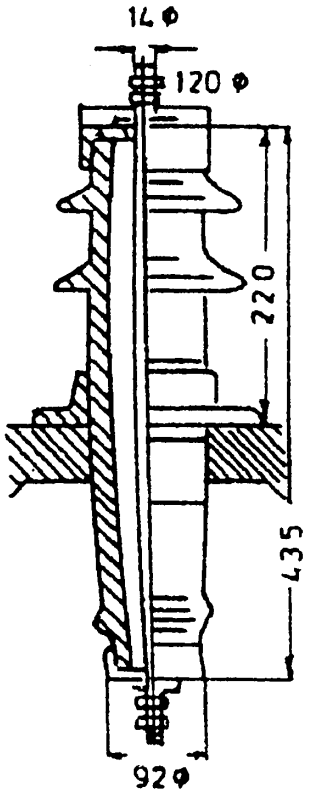


شکل (۶-۱۸): مقرهٔ نوع ایستگاه مخصوص ایستگاه‌های برق فشار قوی

از مقابل آن‌ها عبور می‌کند و به مقره بسته می‌شود و یا شمش‌ها روی مقره قرار می‌گیرند. مقره‌های اتّکایی در داخل تابلوها، معمولاً از جنس رزین می‌باشند؛ ولی مقره‌های اتّکایی که در هوای آزاد نصب می‌شوند، از جنس چینی هستند.

۶-۷- مقره‌های عبوری (بوشینگ‌ها)

کاربرد این نوع مقره‌ها برای سرهای خروجی و ورودی دستگاه‌های فشار قوی، و برای جلوگیری از ایجاد جرقّه بین خطّ عبوری و بدنهٔ دستگاه است (مانند بوشینگ ترانسفورماتورها). این مقره‌ها به‌صورت لایه‌های استوانه‌ای به‌کار می‌روند. با توجّه به محیط مورد استفاده، شکل مقره‌های عبوری متفاوت است. یک نمونه از این نوع مقره‌ها در شکل (۶-۱۹) نشان داده شده است. ساده‌ترین آن‌ها استوانه‌های در هم است. معمولاً فضای داخل این استوانه‌های عایق، توسّط گازها یا مایع‌های عایقی پر می‌شود. در ترانسفورماتورها، بوشینگ‌ها حاوی روغن هستند و ارتفاع آن‌ها



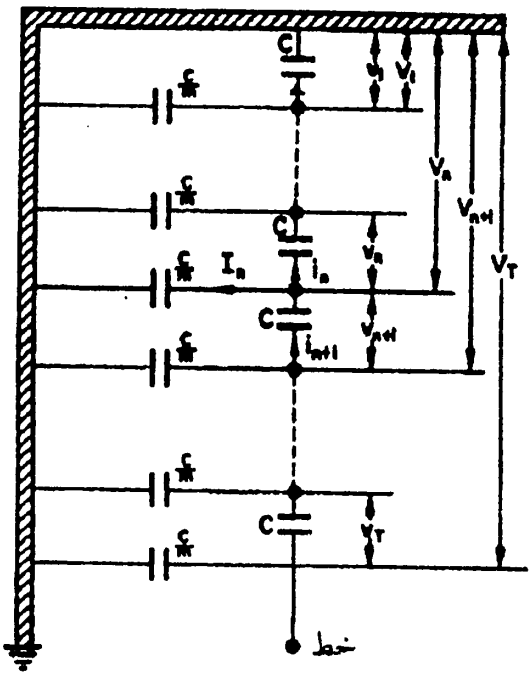
شکل (۶-۱۹): مقرهٔ عبوری

بر حسب میزان ولتاژ و ارتفاع از زمین متفاوت است.

به‌منظور جلوگیری از ازدیاد حرارت در بوشینگ‌ها، از فیبرهای عایقی در سر بوشینگ‌ها استفاده می‌شود؛ زیرا فیبر، هدایت حرارتی بهتری نسبت به چینی دارد.

۶-۸- توزیع پتانسیل روی یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان

چنان‌چه یک زنجیرهٔ مقره متشکّل از اجزای یکنواخت، به اندازهٔ کافی از بدنهٔ دکل دور باشد، به‌طوری که ظرفیت خازنی بین قسمت‌های فلزی دکل و قسمت‌های فلزی کلاهک و پین مقره در مقایسه با ظرفیت خازنی موجود بین کلاهک و پین هر واحد مقره بسیار کوچک باشد، اختلاف پتانسیل اعمال شده در طول زنجیره، به‌طور مساوی بین بشقاب‌های (واحدهای) مقره تقسیم خواهد شد. البتّه در عمل، به‌سبب نزدیکی نسبی زنجیرهٔ مقره به هادی خط، بازوهای دکل و بدنهٔ دکل، این شرایط برآورده نمی‌شود و ظرفیت‌های خازنی اضافی مزبور، اثرات مهمّی روی توزیع ولتاژ در طول زنجیره خواهند داشت. نتیجه آن‌که نزدیکترین بشقاب‌ها به هادی خط: به



شکل (۶-۲۰): مدل الکتریکی توزیع ولتاژ روی یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان

$$j\omega c V_{n+1} = j\omega c V_n + j\omega \frac{c}{m} \sum_{k=1}^{n} V_k \qquad (۶-۸)$$

پس،

$$V_{n+1} = V_n + \frac{\sum_{k=1}^{n} V_k}{m} \qquad (۶-۹)$$

در نهایت، توزیع ولتاژ روی بشقاب‌ها به‌صورت زیر خواهد بود.

$$V_2 = V_1 + \frac{V_1}{m} = \left(1 + \frac{1}{m}\right) V_1 \qquad (۶-۱۰)$$

$$V_3 = V_2 + \frac{V_1 + V_2}{m}$$

با جایگذاری از معادلهٔ (۶-۱۰) داریم:

$$V_3 = \left[1 + \frac{1}{m}\right] V_1 + \frac{V_1 + \left[1 + \frac{1}{m}\right] V_1}{m} = V_1 \left[1 + \frac{3}{m} + \frac{1}{m^2}\right] \qquad (۶-۱۱)$$

همچنین،

$$V_4 = V_3 + \frac{V_1 + V_2 + V_3}{m} = V_1 \left[1 + \frac{6}{m} + \frac{5}{m^2} + \frac{1}{m^3}\right] \qquad (۶-۱۲)$$

$$V_5 = V_1 \left[1 + \frac{10}{m} + \frac{15}{m^2} + \frac{7}{m^3} + \frac{1}{m^4} \right] \qquad (۱۳-۶)$$

کلّ ولتاژ دو سر زنجیرهٔ V_T، همان ولتاژ فازی خطّ انتقال است که برابر است با،

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots \qquad (۱۴-۶)$$

با استفاده از رابطهٔ اخیر، ولتاژ تمام بشقاب‌ها بر حسب ولتاژ واحد بشقابی اوّل V_1 (متّصل به دکل) به دست می‌آید. با داشتن ولتاژ فازی خطّ انتقال به‌صورت فازی، یعنی (V_T)، می‌توان از رابطهٔ (۶-۱۴) مقدار ولتاژ V_1 را به دست آورد و سپس به ترتیب ولتاژ سایر بشقاب‌ها (V_2 و V_3 و ...) را محاسبه کرد. همان‌گونه که از این روابط مشاهده می‌شود، هر چه از طرف دکل به طرف هادی خطّ انتقال نزدیک می‌شویم، ولتاژ دو سر بشقاب‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین، معمولاً بیشترین ولتاژ روی بشقاب پایینی (متّصل به هادی خط) و کم‌ترین آن روی بشقاب متّصل به دکل خواهد بود. به‌علّت عدم توزیع یکسان ولتاژ بین بشقاب‌ها، از بشقاب‌های بالایی متّصل به دکل به اندازهٔ بشقاب‌های پایینی نزدیک به هادی خطّ انتقال استفاده نمی‌شود؛ زیرا ممکن است ولتاژ بشقاب‌های پایینی، نزدیک به ولتاژ نامی آن‌ها، و ولتاژ بشقاب‌های بالایی، خیلی کم‌تر از ولتاژ نامی آن‌ها باشد. حتّی در مواردی مجبوریم به‌علّت این عدم توزیع یکنواخت ولتاژ روی بشقاب‌ها، تعداد بشقاب‌های یک زنجیره را افزایش دهیم تا ولتاژ نامی دو سر بشقاب‌های پایینی، از حدّ مجاز بیشتر نشود. به‌سبب غیر یکنواختی توزیع ولتاژ روی بشقاب‌های پایینی ممکن است افت ولتاژ به اندازهٔ ولتاژ لازم برای وقوع کرونا باشد (ولتاژ ۲۰ تا ۲۵kV برای هر مقره برای وقوع کرونا کافی است) که موجب ایجاد نویزهای رادیویی می‌شود. غیر یکنواختی توزیع ولتاژ روی بشقاب‌های یک زنجیرهٔ مقره، باعث پایین آمدن بازدهٔ زنجیرهٔ مقره می‌گردد.

مثال (۶-۱): یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان دارای سه بشقاب است که هر کدام دارای ولتاژ نامی ۱۱kV می‌باشد. نسبت ظرفیت خازنی متقابل هر بشقاب به ظرفیت

باید حدّاکثر باشد اگر این مقرهٔ پایینی را با شمارهٔ ۳ نشان دهیم آن‌گاه،

$$V_۳ = ۱۱\ \text{kV}$$

$$V_۲ = V_۱\left(۱+\frac{۱}{m}\right) = V_۱\left(۱+\frac{۱}{۱۰}\right) = ۱/۱V_۱$$

$$V_۳ = V_۱\left(۱+\frac{۳}{m}+\frac{۱}{m^۲}\right) = V_۱\left(۱+\frac{۳}{۱۰}+\frac{۱}{۱۰۰}\right) = ۱/۳۱V_۱$$

$$۱۱ = ۱/۳۱V_۱ \Rightarrow V_۱ = ۸/۳۹\ \text{kV}$$

$$V_۲ = ۱/۱ \times ۸/۳۹ = ۹/۲۳\ \text{kV}$$

در نتیجه، حدّاکثر ولتاژ نامی دو سر زنجیره و بازدهٔ آن به‌مقدار زیر است:

$$V_T = V_۱ + V_۲ + V_۳ = ۸/۳۹ + ۹/۲۳ + ۱۱ = ۲۸/۶۲\ \text{kV}$$

$$\eta = \frac{V_T}{n \times V_n} = \frac{۲۸/۶۲}{۳ \times ۱۱} = ۰/۸۶۷ \Rightarrow \%\eta = ۸۶/۷\%$$

مثال (۶-۲): یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان ۴ بشقابی در یک خطّ انتقال با ولتاژ فازی ۷۶kV استفاده شده است. اختلاف پتانسیل دو سر هر یک از واحدهای بشقابی زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان و بازدهٔ زنجیره را، در صورتی‌که نسبت ظرفیت بین هر مقره و زمین ۵ باشد، به‌دست آورید.

حل: در این مثال داریم:

$$n = ۴$$

$$V_T = ۷۶\ \text{kV}$$

$$V_T = V_۱ + V_۲ + V_۳ + V_۴ = V_۱ + ۱/۲ V_۱ + ۱/۶۴ V_۱ + ۲/۴۰۸ V_۱ = ۷۶ \text{kV}$$

در نتیجه،

$$V_۱ = ۱۲/۱۶ \text{ kV}$$
$$V_۲ = ۱/۲ \times ۱۲/۱۶ = ۱۴/۶ \text{ kV}$$
$$V_۳ = ۱/۶۴ \times ۱۲/۱۶ = ۱۹/۹۵ \text{ kV}$$
$$V_۴ = ۲/۴۰۸ \times ۱۲/۱۶ = ۲۹/۲۹ \text{ kV}$$

بازدهٔ زنجیره برابر است با،

$$\eta = \frac{V_T}{n\, V_n} = \frac{۷۶}{۴ \times ۲۹/۲۹} = ۰/۶۵ = ۶۵\%$$

مثال (۶-۳): با فرض $m = ۱۰$، مثال (۶-۲) را تکرار کنید.

حل: با توجّه به مثال قبل می‌توان نوشت:

$$V_۲ = V_۱ \left(۱ + \frac{۱}{۱۰} \right) = ۱/۱ V_۱$$
$$V_۳ = V_۱ \left(۱ + \frac{۳}{۱۰} + \frac{۱}{۱۰۰} \right) = ۱/۳۱ V_۱$$
$$V_۴ = V_۱ \left(۱ + \frac{۶}{۱۰} + \frac{۵}{۱۰۰} + \frac{۱}{۱۰۰۰} \right) = ۱/۶۵۱ V_۱$$
$$V_T = (۱ + ۱/۱ + ۱/۳۱ + ۱/۶۵۱)\, V_۱ = ۵/۰۶۱\, V_۱ = ۷۶ \text{ kV}$$

در نتیجه،

$$V_۱ = ۱۵/۰۱ \text{ kV}$$
$$V_۲ = ۱/۱ \times ۱۵/۰۱ = ۱۶/۵۲ \text{ kV}$$
$$V_۳ = ۱/۳۱ \times ۱۵/۰۱ = ۱۹/۶۷ \text{ kV}$$
$$V_۴ = ۱/۶۵۱ \times ۱۵/۰۱ = ۲۴/۸ \text{ kV}$$

بازدهٔ زنجیره برابر است با،

$$\eta = \frac{V_T}{n\, V_n} = \frac{۷۶}{۴ \times ۲۴/۸} = ۰/۷۶۶ = ۷۶/۶\,\%$$

اصلاح و یکنواخت شود. در غیر این‌صورت به تعداد زیادی بشقاب در یک زنجیره نیاز است و بازدهٔ زنجیره پایین خواهد آمد.

۶-۹- روش‌های متعادل کردن توزیع پتانسیل در زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان

تا کنون روش‌های مختلفی برای متعادل نمودن پتانسیل روی یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان ارائه شده است که عبارتند از:

۱- افزایش مقدار m،

۲- درجه‌بندی کاپاسیتانس بشقاب‌های مقره،

۳- کاربرد حفاظ استاتیکی یا حلقهٔ محافظ،

۴- لعاب هادی.

۶-۹-۱- افزایش مقدار m

همان‌گونه که از مثال (۶-۳) هم مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار m ، توزیع پتانسیل روی مقره‌ها یکنواخت‌تر می‌گردد و بازدهٔ زنجیره افزایش می‌یابد؛ به‌طوری که اگر m بی‌نهایت شود، ولتاژ تمام واحدها برابر شده و به‌عبارت دیگر، بازده، ۱۰۰٪ خواهد شد.

در حقیقت، برای افزایش مقدار m باید ظرفیت خازنی ناخواسته بین کلاهک فلزی و دکل متّصل به زمین کم شود ($C'=C/m$=ظرفیت‌های ناخواسته). برای کم کردن مقدار C'، باید فاصلهٔ بازوی صلیبی (کراس آرم) را از دکل خط بیشتر کرد؛ یعنی طول بازوی صلیبی کراس آرم، افزایش یابد. این کار از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست؛ زیرا با افزایش بیش از حدّ طول بازوی صلیبی، به دکل با استقامت مکانیکی بیشتر و فونداسیون قوی‌تری برای پایه‌ها نیاز است. معمولاً با طول موجود در بازوهای صلیبی دکل‌ها، مقدار m حدّاکثر برابر ۱۰ می‌شود. البتّه طرح استفاده از کلاهک‌های عایقی به‌جای کلاهک‌های فلزی (به منظور افزایش m)، به دلیل مشکلات عملی آن (چسباندن به بشقاب‌ها و غیره)، امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۶-۹-۲- درجه‌بندی کاپاسیتانس واحدهای مقره

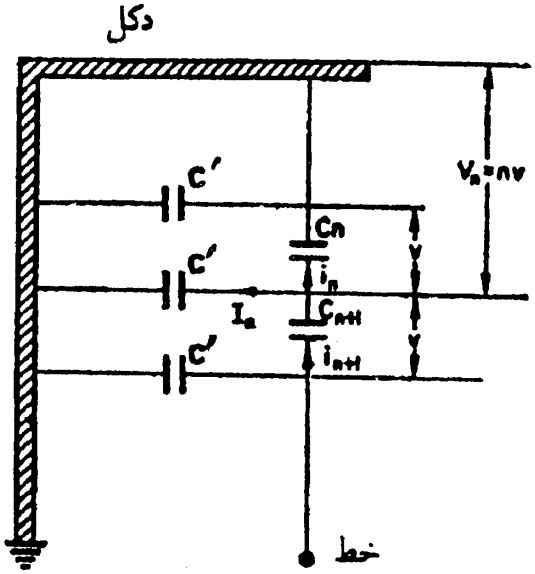
اگر بتوان ظرفیت خازنی بشقاب‌ها را افزایش داد، به‌گونه‌ای که بشقاب‌های پایینی نزدیک به هادی خط، بیشترین ظرفیت خازنی و بشقاب‌های نزدیک به دکل فلزی خطّ انتقال، کم‌ترین ظرفیت خازنی را داشته باشند، این موضوع باعث افزایش ولتاژ بشقاب‌های نزدیک دکل و کاهش ولتاژ بشقاب‌های نزدیک به هادی خط خواهد شد. با درجه‌بندی صحیح و مناسب ظرفیت‌ها می‌توان ولتاژ مساوی روی تمام بشقاب‌های یک زنجیره به‌وجود آورد. اگر بخواهیم روی تمام بشقاب‌های زنجیره، ولتاژ یکسان و مساوی V به‌وجود آید، باید ظرفیت آن‌ها را متغیّر بگیریم. مثلاً، با فرض ظرفیت‌های C_1 و C_2 و ... برای بشقاب‌ها و ظرفیت خازنی C' برای ظرفیت بین کلاهک فلزی هر مقره با دکل فلزی خواهیم داشت (شکل ۶-۲۱ را ببینید):

$$i_{n+1} = i_n + I_n \qquad (۶-۱۵)$$

$$i_{n+1} = j\omega C_{n+1} V \qquad (۶-۱۶)$$

$$i_n = j\omega C_n V \qquad (۶-۱۷)$$

$$I_n = j\omega C' (V + V + V + \ldots + V) = j\omega C' n V \qquad (۶-۱۸)$$



شکل (۶-۲۱): مدل الکتریکی درجه‌بندی کاپاسیتانس در یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان

با جایگذاری در رابطهٔ (۶-۱۵) داریم:

$$j\omega C_{n+1}V = j\omega C_n V + j\omega C' nV \qquad (۶-۱۹)$$

و در نتیجه خواهیم داشت :

$$C_{n+1} = C_n + nC' \qquad n \geq 1 \qquad (۶-۲۰)$$

پس ظرفیت هر بشقاب، باید بر اساس رابطهٔ (۶-۲۰) باشد تا ولتاژها به‌طور یکنواخت توزیع شود.

مثال (۶-۵): برای یک زنجیرهٔ ۴ بشقابی داریم:

$$C_2 = C_1 + C'$$

و نیز $C' = \frac{C_1}{m}$ است آن‌گاه $C_1 = mC'$ و در نتیجه:

$$C_2 = mC' + C' = (m+1)C' \qquad (۶-۲۱)$$

$$C_3 = C_2 + 2C' = (m+1)C' + 2C' = (m+3)C' \qquad (۶-۲۲)$$

$$C_4 = C_3 + 3C' = (m+3)C' + 3C' = (m+6)C' \qquad (۶-۲۳)$$

البتّه درجه‌بندی ظرفیت‌ها تا این حدّ عملی نیست؛ زیرا در این صورت باید بشقاب‌های با ظرفیت‌های متفاوت و غیر استاندارد ساخته شود و در هر زنجیره باید بشقاب‌های متفاوتی به‌کار رود. در عمل، با استفاده از بشقاب‌های یک اندازه برای تمام زنجیره و فقط با انتخاب یک یا دو بشقاب آخر متّصل به هادی خط با ظرفیت خازنی بزرگ‌تر (مثلاً با سطوح فلزی کلاهک بزرگ‌تر)، حدود ۲۰٪ بازدهٔ زنجیره را افزایش می‌دهند و تا حدّ نسبتاً خوبی توزیع ولتاژ را یکنواخت‌تر می‌کنند. این روش، فقط در خطوط با ولتاژهای خیلی بالا (یعنی بالاتر از ۷۰۰kV) استفاده می‌شود.

۶-۹-۳- کاربرد حفاظ استاتیکی[1] یا حلقهٔ محافظ[2]

در این روش، یک الکترود فلزی به‌صورت یک شاخک فلزی برای ولتاژهای تا ۱۱۰kV (شکل ۶-۲۲-الف را ببینید) و یا یک الکترود فلزی به‌صورت یک حلقهٔ

1- Static Shielding 2- Guard Ring

مدوّر برای ولتاژهای بالاتر از ۱۱۰kV (شکل ۶-۲۲-ب را ببینید) به بشقاب پایینی که به هادی خط متّصل شده است و دارای همان ولتاژ فازی هادی خط است، متّصل می‌کنند. این حفاظ در شکل (۶-۲۳) به‌صورت ظرفیت‌های خازنی بین هادی خط و قسمت‌های فلزی (کلاهک و پین) مقره‌ها مدل شده است.

این الکترودهای فلزی، علاوه بر این‌که باعث یکنواخت‌تر شدن توزیع ولتاژ روی واحدهای بشقابی مقره‌های آویزان می‌شوند، می‌توانند عمل حفاظت مقره‌ها را در برابر بروز جرقّه‌های سطحی روی آن‌ها (در اثر اضافه ولتاژهای زیاد و ناگهانی، ناشی از صاعقه) به عهده گیرند. در این رابطه، یک شاخک فلزی دیگر نیز، در بالای زنجیرهٔ متّصل به دکل نصب می‌کنند. فاصلهٔ بین این دو شاخک به حدّی تنظیم می‌گردد که در صورت بروز اضافه ولتاژ، ولتاژ شکست بین دو شاخک، کم‌تر از ولتاژ جرقّهٔ سطحی مقره باشد تا قبل از بروز جرقّهٔ سطحی روی مقره، بین دو شاخه جرقّه زده شود. در این حالت با برقراری قوس الکتریکی بین دو الکترود، اضافه ولتاژ تخلیه می‌شود و بدین ترتیب از مقره‌ها محافظت می‌شود. البتّه این کار باعث اتّصال کوتاه شدن خط هم می‌شود. لازم به‌ذکر است که در خطوط باندل، اثر خازنی مقره‌ها نسبت به هادی‌های خط به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

با قرار دادن حلقهٔ محافظ یا الکترود محافظ، ظرفیت خازنی بین کلاهک‌های فلزی و هادی خطّ انتقال که قبلاً به‌علّت کوچک بودن از آن‌ها صرف‌نظر می‌کردیم، به‌مقدار قابل توجّهی افزایش می‌یابد و منجر به متعادل شدن ولتاژ بشقاب‌ها می‌شود. هر چه به هادی خط نزدیکتر می‌شویم، اثر این ظرفیت‌ها زیادتر می‌گردد؛ زیرا فاصلهٔ کلاهک‌ها تا هادی خط کم می‌شود.

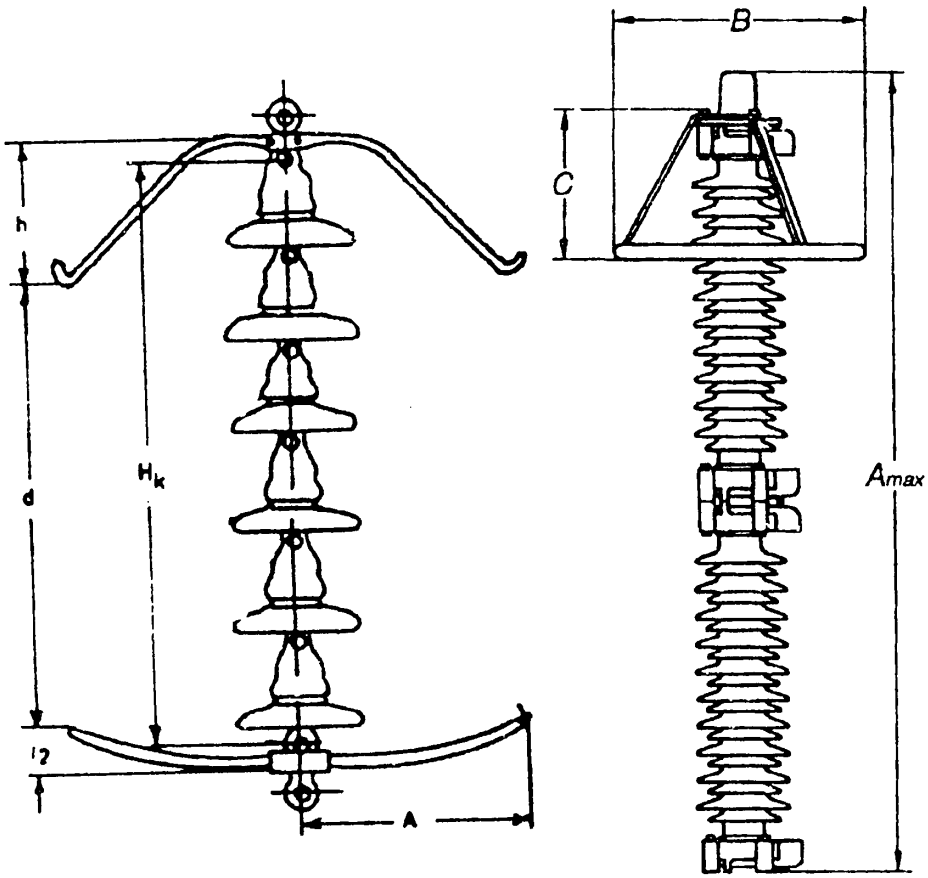
اگر بخواهیم ولتاژ یکسان V را روی تمام بشقاب‌ها داشته باشیم، با توجّه به مدل الکتریکی شکل (۶-۲۳) داریم:

C = ظرفیت خازنی هر بشقاب،

C/m = ظرفیت خازنی بین هر کلاهک و دکل،

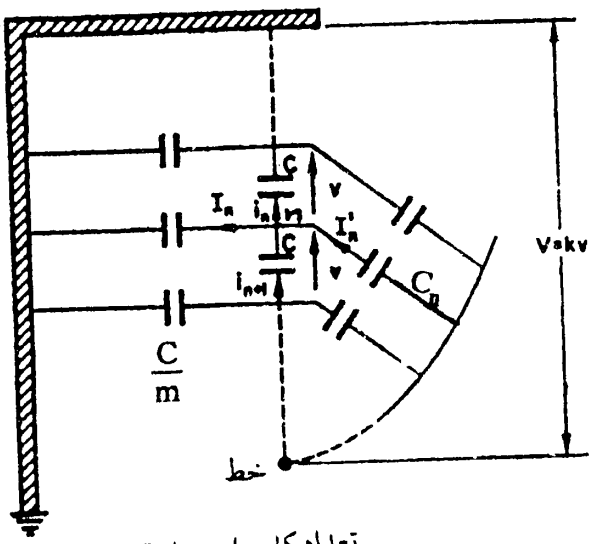
C_1، C_2، و ... = ظرفیت خازنی بین کلاهک‌ها و هادی خط (شاخک فلزی) است.

اگر تعداد k مقرهٔ بشقابی در یک زنجیرهٔ موجود باشد، آن‌گاه برای نقطهٔ n، تعداد



(الف) (ب)

شکل (۶-۲۲): دو نوع از سپر سازی مقره



تعداد کل واحدها=K

شکل (۶-۲۳): مدل الکتریکی سپرسازی زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان
با استفاده از شاخک یا حلقهٔ مدوّر فلزی

n مقرهٔ بشقابی از دکل قرار گرفته است. قانون KCL در نقطهٔ n برابر است با:

$$i_{n+1} + I_n' = i_n + I_n \qquad (۲۴-۶)$$

چون ولتاژهای مساوی V را برای دو بشقاب با ظرفیت‌های مساوی C می‌خواهیم، بنابراین، باید داشته باشیم:

$$i_n = i_{n+1} \qquad (۲۵-۶)$$

در نتیجه، $I_n = I_n'$ خواهد بود. پس داریم:

$$I_n = j\omega \frac{C}{m} n V \qquad (۲۶-۶)$$

$$I_n' = j\omega C_n (k-n) V \qquad (۲۷-۶)$$

$$I_n = I_n' \Rightarrow j\omega \frac{C}{m} n V = j\omega C_n (k-n) V \qquad (۲۸-۶)$$

با حذف $j\omega V$ از طرفین رابطهٔ (۶-۲۸) داریم:

$$\frac{C}{m} n = C_n (k-n)$$

در نتیجه،

$$C_n = \frac{nC}{m(k-n)} \qquad (۲۹-۶)$$

C_n مقدار ظرفیت خازنی لازم بین حلقهٔ محافظ واحد بشقاب n ام (واحد n از بالا) برای یک زنجیره با تعداد k بشقاب است.

مثال (۶-۶): برای یک زنجیرهٔ مقرهٔ آویزان با ۴ بشقاب داریم:

$$C_۱ = \frac{C}{m(۴-۱)} = \frac{C}{۳m} \quad , \quad C_۲ = \frac{۲C}{m(۴-۲)} = \frac{C}{m}$$

$$C_۳ = \frac{۳C}{m(۴-۳)} = \frac{۳C}{m} \quad , \quad C_۴ = \frac{۴C}{m(۴-۴)} = \infty$$

البته، عملاً نمی‌توان حلقهٔ محافظ یا الکترود شاخه‌ای را طوری تنظیم کرد که تمام C_n های مورد نیاز به‌مقدار مطلوب به‌دست آید؛ ولی به‌طور کلّی استفاده از این روش، بازدهٔ زنجیرهٔ مقره را افزایش می‌دهد. مثلاً برای یک زنجیرهٔ ۱۴ بشقابی، ولتاژ روی بشقاب پایینی متّصل به هادی خط در حالت بدون سپر ۱۸/۳٪ و در حالت با

محافظ، ۱۱/۸٪ کلّ ولتاژ خط بوده است.

هر چه تعداد واحدهای بشقابی زنجیرهٔ مقره کم‌تر باشد، توزیع پتانسیل یکنواخت‌تر است. در حالت مرطوب بودن مقره‌ها، توزیع یکنواخت‌تری ایجاد می‌شود؛ زیرا در حالت مرطوب، ظرفیت متقابل مقره‌ها افزایش می‌یابد، ولی ظرفیت بین کلاهک فلزی و دکل ثابت می‌ماند. بنابراین، در این حالت، مقدار m زیاد شده و توزیع پتانسیل، یکنواخت‌تر می‌شود.

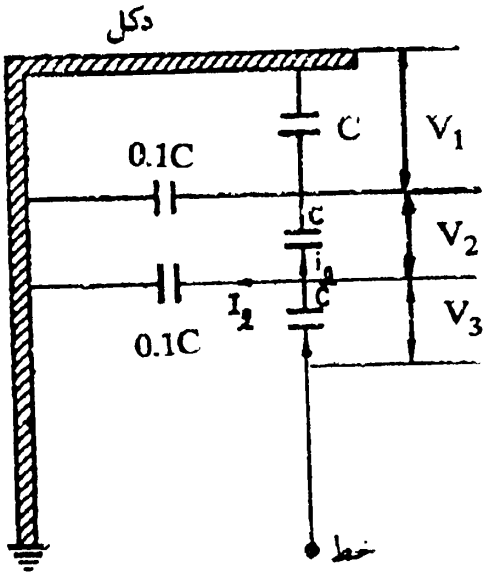
مثال (۶-۷): یک خطّ ۳۳kV روی یک زنجیره از مقرهٔ آویزان که شامل سه واحد بشقابی مشابه است، نگه داشته شده است (شکل ۶-۲۴ را ببینید). ظرفیت متقابل دو سر بشقاب‌ها، ۱۰ برابر ظرفیت بین هر بشقاب با بدنهٔ زمین شدهٔ پایهٔ خط است. ولتاژ دو سر هر مقره و بازدهٔ زنجیرهٔ مقره را محاسبه کنید.

حل: در این مثال داریم:

$$m = ۱۰$$

$$V_{L\text{-}L} = ۳۳\ \text{kV} \quad \Rightarrow \quad V_T = \frac{۳۳}{\sqrt{۳}} = ۱۹/۰۵\ \text{kV}$$

$$V_۲ = V_۱\left(۱+\frac{۱}{m}\right) = V_۱\left(۱+\frac{۱}{۱۰}\right) = ۱/۱V_۱$$



شکل (۶-۲۴): مدل الکتریکی ظرفیت خازنی مقره‌ها مربوط به مثال (۶-۷)

$$V_۳ = V_۱ \left(۱ + \frac{۳}{m} + \frac{۱}{m^۲} \right) = ۱/۳۱ V_۱$$

$$V_T = V_۱ + V_۲ + V_۳ = V_۱ + ۱/۱ V_۱ + ۱/۳۱ V_۱ = ۱۹/۰۵ \text{ kV}$$

در نتیجه،

$$V_۱ = ۵/۵۸ \text{ kV}$$

$$V_۲ = ۶/۱۵ \text{ kV}$$

$$V_۳ = ۷/۳۲ \text{ kV}$$

بازدهٔ زنجیره برابر است با،

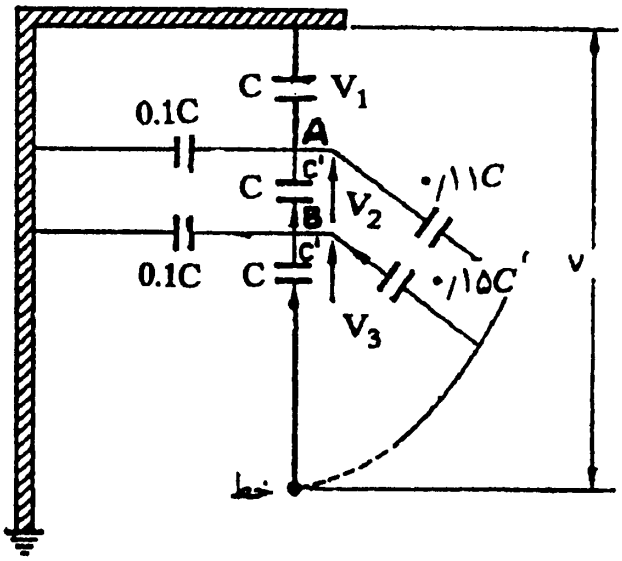
$$\eta = \frac{V_T}{n\, V_n} = \frac{۱۹/۰۵}{۳ \times ۷/۳۲} = ۰/۸۶۷ = ۸۶/۷\%$$

مثال (۶-۸): اثر اضافه کردن حلقهٔ محافظ برای یک زنجیرهٔ ۳ بشقابی ارائه شده در مثال (۶-۷)، در مدار معادل شکل (۶-۲۵) نشان داده شده است. توزیع ولتاژ روی زنجیرهٔ مقره و بازدهٔ آن را محاسبه کنید.

حل:

با اعمال قانون kcl در نقطهٔ A داریم:

$$j\omega C V_۲ + j\, ۰/۱۱ \omega C (V_۲ + V_۳) = j\omega C V_۱ + j\, ۰/۱ \omega C V_۱$$



شکل (۶-۲۵): مدل الکتریکی ظرفیت خازنی مقره‌ها با سپرسازی مقره‌ها مربوط به مثال (۶-۸)

و با اعمال قانون kcl در نقطهٔ B داریم:

$$j\omega C V_۳ + j\,۰/۱۵\omega C V_۳ = j\omega C V_۲ + j\,۰/۱\omega C(V_۱ + V_۲)$$

همچنین ولتاژ فازی خط برابر است با:

$$۱۹/۰۵ = V_۱ + V_۲ + V_۳$$

در نتیجه،

$$۱/۱V_۱ - ۱/۱۱V_۲ - ۰/۱۱V_۳ = ۰$$
$$۰/۱V_۱ + ۱/۱V_۲ - ۱/۱۵V_۳ = ۰$$
$$V_۱ + V_۲ + V_۳ = ۱۹/۰۵$$

پس از حلّ سه معادلهٔ فوق، نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$V_۱ = ۶/۷۱\ \text{kV}$$
$$V_۲ = ۶/۳۳\ \text{kV}$$
$$V_۳ = ۶/۰۱\ \text{kV}$$

بازدهٔ زنجیره برابر است با:

$$\eta = \frac{V_T}{n\,V_n} = \frac{۱۹/۰۵}{۳\times ۶/۷۱} = ۰/۹۴۶ = ۹۴/۶\,\%$$

که نسبت به‌مقدار قبل، بازده در حدود ۷/۹٪ افزایش یافته است.

۶-۹-۴- لعاب هادی

چنان‌چه هر کدام از کاپاسیتانس‌های واحدهای مقرهٔ یک زنجیر را بتوان با یک

بتواند خاصیت خود را در زمان طولانی حفظ نماید امری بسیار مشکل است.

در یک نوع از مقره‌های سوزنی، با پوشاندن سر مقره با یک لایهٔ هادی مانند گرافیت، توزیع پتانسیل را روی سطح آن، یکنواخت می‌کنند؛ ولی به مرور زمان، این لایه از بین می‌رود و خاصیت هادی بودن خط را از دست می‌دهد. این کار مانند موازی کردن یک مقاومت بزرگ با مقره است. لایه‌های گرافیت به‌علّت خاصیت رسانایی خود، باعث کاهش مقاومت سطحی قسمت بالای مقره شده، افت ولتاژ در آن قسمت را کاهش می‌دهد؛ بنابراین، ولتاژ قسمت‌های پایین مقره، افزایش یافته و توزیع ولتاژ در سطح مقره، متعادل می‌شود. متعادل شدن ولتاژ روی سطح این نوع مقره‌های سوزنی، باعث جلوگیری از بروز کرونا در سطح مقره و جلوگیری از بروز پارازیت‌های رادیویی ناشی از کرونا روی گیرنده‌های رادیویی و تلویزیونی ساختمان‌های مسکونی و تجاری مجاور خطوط توزیع شهری می‌شود. به این نوع مقره‌های سوزنی که در خطوط توزیع شهری استفاده می‌شوند، اصطلاحاً "مقره‌های سوزنی آزاد از پارازیت رادیویی"[1] نیز گفته می‌شود.

۶-۱۰- آزمایش مقره‌های خطوط هوایی

به‌طور کلّی، سه دسته آزمایش بر روی مقره‌ها انجام می‌گیرد:

۱- **آزمایش‌های نوعی**[2]: این آزمایش‌ها فقط روی سه عدد مقره انجام می‌گیرد و صرفاً به‌دلیل بررسی مشخّصات الکتریکی یک مقره است که اساساً به شکل مقره و جنس و ابعاد آن، و به‌طور کلّی به طرّاحی مقره بستگی دارد. این آزمایش‌ها را فقط برای یک بار و به‌منظور تأیید صحّت طرّاحی مقره‌ها و مقایسهٔ نتایج حاصل با مقادیر تعیین شده توسّط استانداردها انجام می‌دهند. به این آزمایش‌ها، "آزمایش‌های تخلیه" یا "آزمایش‌های جرقّه"[3] نیز می‌گویند.

1- *Radio Freed*

2- *Type Tests*

3- *Flashing Tests*

۲- آزمایش‌های نمونه[1]: این آزمایش‌ها روی تعدادی از مقره‌ها که به‌صورت کاملاً اتّفاقی انتخاب می‌شوند، انجام می‌گیرد. این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی مشخّصات مقره‌ها و کیفیّت موادّ مورد استفاده در آن‌ها انجام می‌شود. در حقیقت، این آزمایش‌ها معیاری برای پذیریش کیفیّت مقره‌های تولیدی یک تولید کننده است.

۳- آزمایش‌های سری[2]: این آزمایش‌ها روی تک تک تمام مقره‌های تولید شده در خطّ تولید انجام می‌گیرد. هدف از این مجموعه آزمایش‌ها، خارج شدن مقره‌هایی است که احتمالاً در جریان ساختن آن‌ها اشکالی به‌وجود آمده است. بدین طریق مقره‌های معیوب از خطّ تولید خارج می‌شوند.

۶-۱۰-۱- آزمایش‌های نوعی بر طبق استاندارد بین‌المللی IEC

گروه اوّل آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های زیر است:

۱- آزمایش استقامت در برابر ولتاژ ضربه‌ای صاعقه در هوای خشک: این آزمایش در دو حالت انجام می‌شود:

الف) با موج ضربه‌ای مقاوم[3]: حدّاکثر دامنهٔ موج ضربه‌ای استاندارد برای امواج صاعقه که باعث ایجاد جرقّه روی سطح مقره نمی‌شود، توسّط استاندارد IEC مشخّص شده است. البتّه این مقدار برای شرایط جوّی استاندارد داده می‌شود. شرایط جوّی استاندارد برای آزمایش‌های استاندارد دما $T=۲۰°C$ ، فشار $P=۷۶۰mmHg$ و رطوبت $۱۱gr\ water/m^۳$ است. حال اگر شرایط آزمایش از نظر فشار، درجه حرارت و میزان رطوبت، متفاوت با شرایط استاندارد باشد، در آن‌صورت، باید مقدار دامنهٔ ولتاژ آزمایش را تصحیح کرد. در این آزمایش، ۱۵ بار موج ضربه‌ای استاندارد ($۱/۲\mu sec/۵۰\mu sec$) به مقره و به دفعات متوالی اعمال

1- *Sample Tests*

2- *Routine Tests*

3- *Withstand Impulse Voltage*

می‌شود. فاصلهٔ زمانی بین هر بار باید به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا اثر قبلی از بین برود. دامنهٔ موج ضربه‌ای، همان مقدار مشخّص شده در استاندارد با ضریب تصحیح مربوط به آن است. اگر طی این آزمایش، در هیچ دفعه‌ای جرقّهٔ سطحی روی مقره زده نشود، یا تعداد دفعات جرقّهٔ سطحی کم‌تر از ۲ بار باشد و سطح مقره‌ها آسیب کلّی نبیند، از این آزمایش پاسخ مثبت دریافت کرده‌ایم. البتّه اثر جزئی جرقّه روی سطح مقره (مثل خش انداختن) مجاز است.

ب) با موج ضربه‌ای با احتمال ۵۰٪ جرقّهٔ سطحی: دامنهٔ موج ضربه‌ای استاندارد که با احتمال ۵۰٪ روی سطح مقره جرقّه زده می‌شود در استاندارد مشخّص شده است. حال برای یک مقرهٔ مورد آزمایش، یک موج ضربه‌ای استاندارد با دامنهٔ U_k نزدیک به سطح تقریبی دامنه، ولتاژ جرقّه ۵۰٪ انتخاب می‌شود. همچنین یک دامنهٔ متغیّر ولتاژ ΔU که تقریباً ۳٪ از ولتاژ U_k است، انتخاب می‌گردد. اکنون یک موج ضربه‌ای استاندارد با دامنهٔ U_k به مقره اعمال می‌شود. اگر این موج سبب بروز جرقّهٔ سطحی روی مقره نگردید، باید دامنهٔ موج ضربه‌ای بعدی به‌مقدار $U_k+\Delta U_k$ انتخاب شود که چنان‌چه باعث بروز جرقّهٔ سطحی گردید، دامنهٔ موج ضربه‌ای بعدی باید $U_k-\Delta U_k$ انتخاب شود. این روند تا حدود ۳۰ بار تکرار می‌شود. با توجّه به این‌که ممکن است U_k اوّلیه، خیلی کوچک یا خیلی بزرگ انتخاب شده باشد، ۱ تا ۳ آزمایش اوّل را جزء ۳۰ بار محسوب نمی‌کنند.

اگر هر ولتاژ U_v در این آزمایش n_v بار تکرار شده باشد، ولتاژ جرقّهٔ سطحی ۵۰٪ از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{30} \qquad (30-6)$$

مقره به شرطی به این آزمایش، پاسخ مثبت می‌دهد که ولتاژ ۵۰٪ به‌دست آمده از رابطهٔ اخیر، از ۱/۰۴ برابر ولتاژ جرقّه مقاوم آن کم‌تر نباشد و مقره‌ها در اثر جرقّه‌های سطحی روی آن‌ها آسیب کلّی نبینند.

۲- آزمایش استقامت در برابر ولتاژ ضربه‌ای سویچینگ در هوای مرطوب:

موج ضربه‌ای برای مدل کردن سویچینگ، یک موج ضربه‌ای ۲۵۰μsec/۲۵۰۰μsec است که با موج ضربه‌ای صاعقه متفاوت است و زمان رسیدن به‌مقدار پیک و نیم موج پشت آن، خیلی بیشتر از موج ضربه‌ای صاعقه است.

در این حالت، مقرهٔ تحت آزمایش، زیر بارش باران مصنوعی قرار می‌گیرد. شدّت بارش باران باید حدّاقل بین ۱mm/min تا ۲mm/min باشد و به‌صورت مورّب با زاویهٔ °۴۵ درجه بارش نماید. درجه حرارت محیط هم باید بین ۱۵°C- تا ۱۵°C باشد و مقاومت مخصوص آن در ۲۰°C باید ۱۵ Ω-m ± ۱۰۰ باشد.

قبل از شروع آزمایش، مقره باید به مدّت ۱۵ دقیقه تحت بارش این باران قرار گیرد. البتّه این زمان می‌تواند کم‌تر هم باشد؛ مخصوصاً زمانی که آزمایش‌های متوالی انجام می‌شود. در اینجا نیز این آزمایش در دو حالت مختلف می‌تواند انجام گیرد:

الف) با موج ضربه‌ای با احتمال ۵۰٪ جرقّهٔ سطحی: طریقهٔ آزمایش، مانند حالت هوای خشک است (با موج ضربه‌ای صاعقه) ولی دامنهٔ موج ضربه‌ای ۵۰٪ به‌دست آمده از رابطه، نباید کم‌تر از ۱/۰۸۵ برابر دامنهٔ موج ضربه‌ای مقاوم تعیین شده در استاندارد، برای موج ضربه‌ای سویچینگ مقاوم در هوای مرطوب باشد. البتّه مقادیر داده شده در استاندارد، مربوط به شرایط جوّی استاندارد است که برای شرایط آزمایشگاهی باید با ضرایب تصحیح، اصلاح شود.

ب) با موج ضربه‌ای مقاوم: این آزمایش نیز، با دامنهٔ موج ضربه‌ای مقاوم تعیین شده در استاندارد، به‌تعداد ۱۵ بار تکرار می‌شود و اگر تعداد دفعاتی که جرقّهٔ سطحی روی مقره زده می‌شود، بیشتر از ۲ بار نباشد، این آزمایش جواب مثبت داده است. در این آزمایش نیز، نباید سطح مقره‌ها آسیب کلّی ببیند (اثرهای جزئی روی سطح مقره قابل پذیرش است).

۳- آزمایش استقامت در برابر ولتاژ با فرکانس صنعتی در هوای مرطوب[۱]: در

1- Wet Power Frequency Test

این حالت نیز، مقرهٔ تحت آزمایش، در شرایط باران مصنوعی، مانند حالت قبل، قرار می‌گیرد. متناسب با شرایط جوّی محیط آزمایش از نظر فشار و درجه حرارت، مقدار ولتاژ قابل تحمّل مقره را بر اساس مقدار تعیین شدهٔ آن در استانداردها و با استفاده از ضرایب تصحیح به‌دست می‌آوریم. یک ولتاژ در حدود ۷۵٪ ولتاژ مذکور را به مقره اعمال می‌کنیم، سپس، به‌تدریج و به‌آرامی ولتاژ مذکور را با شیبی در حدود ۲٪ بر ثانیه، افزایش می‌دهیم تا به‌مقدار ۱۰۰٪ فوق برسد. در نهایت، این ولتاژ را در حدود یک دقیقه روی مقره نگه می‌داریم. طی این آزمایش، نباید هیچ‌گونه جرقّهٔ سطحی یا سوراخ شدن مقره اتّفاق بیفتد. در این آزمایش می‌توان افزایش ولتاژ را هنوز هم ادامه دهیم تا جرقّهٔ سطحی حاصل شود. این آزمایش را ۵ بار تکرار می‌کنیم و مقدار متوسّط ولتاژهای جرقّهٔ سطحی را به‌عنوان ولتاژ جرقّهٔ هوای مرطوب در ولتاژ سینوسی با فرکانس‌های صنعتی تعیین می‌کنیم. فرکانس موج سینوسی باید بین ۱۵Hz تا ۱۰۰Hz باشد.

۶-۱۰-۲- آزمایش‌های روی مقره‌های نمونه، طبق استاندارد IEC

قبل از پرداختن به آزمایش‌هایی که روی مقره‌های نمونه انجام می‌گیرد، ساختمان مقره‌ها را بیان می‌کنیم که آن به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱- نوع A: مقره‌هایی که طول یا ضخامت کوتاهترین مسیر موجود در داخل آن‌ها (برای سوراخ شدن داخل بدنهٔ مقره)، حدّاقل برابر با نصف طول کوتاهترین مسیر جرقّه در هوای روی سطح مقره است.

۲- نوع B: مقره‌هایی که ضخامت کوتاهترین قسمت داخل آن‌ها (برای مسیر سوراخ شدن داخل مقره)، کم‌تر از نصف طول کوتاه‌ترین مسیر جرقّه روی سطح مقره در هوا است.

برای مجموعه‌ای از مقره‌های یک تولید کنندهٔ مقره، تعدادی مقره به‌صورت کاملاً اتّفاقی و تصادفی توسّط خریدار از بین محمولهٔ آماده شده، انتخاب می‌شود. سپس تعدادی آزمایش بر روی نمونه‌های انتخابی انجام می‌گردد. در صورتی‌که نتایج

آزمایش‌ها مثبت باشند، کیفیّت آن‌ها از طرف خریدار تأیید می‌شود. تعداد نمونه‌های انتخابی بر اساس استاندارد به‌صورت زیر است:

با فرض آن‌که P تعداد مقره‌های انتخابی به‌عنوان نمونه و n تعداد کلّ مقره‌ها باشد آن‌گاه،

۱) اگر $n<۵۰۰$ باشد، P با توافق طرفین تعیین می‌شود؛

۲) اگر $۵۰۰<n<۲۰۰۰۰$ باشد، $P=۴+\frac{۱/۵n}{۱۰۰۰}$ است؛

۳) اگر $n>۲۰۰۰۰$ باشد، $P=۱۹+\frac{۰/۷۵n}{۱۰۰۰}$ است.

آزمایش‌هایی که روی مقره‌های نمونهٔ انتخاب شده انجام می‌گیرند، عبارتند از:

۱- بررسی سیستم قفل و بست،

۲- کنترل مقدار وزن مقره‌ها و ابعاد قسمت‌های مختلف آن‌ها،

۳- آزمایش سیکل حرارتی،

۴- آزمایش حدّاکثر تحمّل بار الکترومکانیکی (فقط روی مقره‌های نوع B)،

۵- آزمایش حدّاکثر تحمّل بار مکانیکی،

۶- آزمایش شوک حرارتی (فقط برای مقره‌های شیشه‌ای)،

۷- آزمایش تحمّل ولتاژ در برابر سوراخ شدن (فقط برای مقره‌های نوع B)،

۸- آزمایش تخلخل (وجود حفره) (فقط بر روی مقره‌های چینی)،

۹- آزمایش میزان گالوانیزه بودن قسمت‌های فلزی مقره.

مقره‌های نمونهٔ انتخاب شده را طبق استاندارد IEC به دو گروه تقسیم می‌کنند: گروه اوّل، شامل $\frac{۲}{۳}$ تعداد مقره‌های انتخاب شده و گروه دوم، شامل $\frac{۱}{۳}$ تعداد مقره‌های انتخاب شده است.

بر اساس نوع A یا B مقره‌ها و نوع بشقابی یا اتّکایی آن‌ها، آزمایش‌های نمونهٔ فوق، تعدادی روی گروه اوّل، تعدادی روی گروه دوم، و تعدادی برای هر دو گروه انجام می‌شود (جدول ۶-۱ را ببینید).

مقره‌هایی که روی آن‌ها آزمایش‌های نمونه صورت می‌گیرد، نباید در سیستم بهره‌برداری، از آن‌ها استفاده شود.

جدول (۶-۱): شماره آزمایش‌های انجام شده روی مقره‌های اتّکایی و بشقابی

	مقره‌های بشقابی		مقره‌های اتّکایی	
	نوع A	نوع B	نوع A	نوع B
گروه اوّل	۲،۳،۵،۸	۵،۸ یا ۴، ۲،۳	۲،۳،۵،۸	۲،۳،۵،۸
گروه دوم	۱،۲،۳،۶،۹	۱،۲،۳،۶،۷،۹	۲،۳،۶،۹	۲،۳،۶،۷،۹

شرح آزمایش‌ها

۱- بررسی سیستم قفل و بست

در اینجا چند آزمایش مختلف برای اطمینان از مکانیزم قفل و بست انجام می‌گیرد:

الف) با اتّصال بشقاب‌ها به همدیگر و تشکیل یک یا چند زنجیره، حرکت‌های افقی، شبیه به حرکت‌هایی که در حالت سرویس ممکن است پیدا شود به آن‌ها داده می‌شود که اتّصال زنجیره‌ها نباید باز شود؛

ب) اشپیل تمام بشقاب‌ها در موقعیت قفل قرار داده می‌شود و به‌وسیلهٔ یک دستگاه که نیروی کششی وارد می‌کند، بار کششی برای حرکت کردن اشپیل هر بشقاب اعمال می‌شود. برای هر بشقاب، این عمل ۳ بار تکرار می‌شود. مقدار این نیرو طبق استاندارد، باید بین ۵۰N تا ۵۰۰N باشد؛

ج) اشپیل هر مقره با نیروی کششی حدّاکثر (یعنی ۵۰۰N)، کشیده می‌شود. اشپیل‌ها در اثر این نیرو نباید از محلّ قفل به‌طور کامل خارج شوند.

۲- کنترل وزن و ابعاد مقره[1]

این کنترل ابعاد عبارت است از:

الف) اندازه‌گیری وزن مقره‌های نمونه و متوسّط‌گیری به‌عنوان وزن مقره،

ب) اندازه‌گیری قطر خارجی مقره با وسایل دقیق،

1- Verification of Dimensions

ج) اندازه‌گیری ارتفاع مقره، از بالاترین تا پایین‌ترین نقطه،

د) اندازه‌گیری فاصلهٔ خزش مقره[۱]،

ه) کنترل قطر حفرهٔ کلاهک و قطر پین فلزی مقره با اشل‌های استاندارد (اشل‌هایی که باید داخل حفره بروند یا از قطر پین بگذرند و اشل‌هایی که نباید بگذرند).

۳- آزمایش سیکل حرارتی[۲]

در این آزمایش، دو مخزن آب سرد و گرم تهیه می‌شود. درجه حرارت مخزن آب گرم باید ۷۰°C بیشتر از درجه حرارت مخزن آب سرد باشد و به‌وسیلهٔ یک سیستم خودکار، درجه حرارت مخزن‌ها ثابت نگه داشته شوند. مقره‌های نمونه به مدّت T دقیقه در مخزن آب گرم قرار داده می‌شوند که،

m=جرم مقره بر حسب kg $\quad T=۱۵+۰/۷m \quad$ مقرهٔ نوع A

$T=۱۵$ دقیقه $\quad$ مقرهٔ نوع B

بعد از طی زمان فوق، سریعاً و بدون هیچ تأخیری (حدّاکثر تأخیر ۳۰sec) و برای مدّت زمان T دقیقه نیز در مخزن آب سرد غوطه‌ور می‌شوند. این دورهٔ گرما و سرما ۳ بار تکرار می‌شود.

برای مقره‌های اتکایی به‌جای مخزن آب سرد، باید آن را بعد از خارج کردن از مخزن آب گرم (برای مدّت ۱۵ دقیقه در مخزن آب گرم قرار گرفته است)، به مدّت ۱۵ دقیقه در معرض باران مصنوعی با شدّت ۳mm/min قرار دهیم و این دوره را ۳ بار تکرار کنیم.

شرط پذیرش این آزمایش این است که در پایان، هیچ‌یک از مقره‌های نمونه ترک خوردگی پیدا نکرده باشند.

۴- آزمایش تحمّل بار الکترومکانیکی[۳]

در این آزمایش، همزمان با اعمال ولتاژ با فرکانس صنعتی به مقره، یک بار

1- *Creepage Distance*

2- *Temperature Cycle Test*

3- *Electromechanical Failing Load Test*

مکانیکی کششی نیز، به مقره اعمال می‌شود تا اگر تخلیهٔ الکتریکی داخلی (در اثر تخلیه‌های موضعی) درون مقره اتّفاق افتد، در اثر نیروی کششی اعمال شده به‌صورت عیب مکانیکی (مثلاً ترک خوردن مقره) مشخّص شود. ولتاژ اعمالی به مقره، همان ولتاژ مقاوم با فرکانس صنعتی در هوای مرطوب است. چون در مقره‌های شیشه‌ای، تخلیهٔ موضعی داخل مقره کاملاً پیدا است، بنابراین، این آزمایش برای مقره‌های شیشه‌ای انجام نمی‌شود.

۵- آزمایش حدّاکثر تحمّل بار مکانیکی[۱]

در این آزمایش، مقره‌های نمونه، تک تک و به نوبت در داخل دستگاه مخصوص اعمال نیروی کششی قرار گرفته و نیروی کششی اعمالی به آن‌ها از صفر به‌طور سریع به‌مقدار ۷۵٪ حدّاکثر تحمّل بار مکانیکی نامی مقره افزایش داده می‌شود. سپس به‌آرامی در یک مدّت زمان معیّن بین ۱۵ تا ۴۵ ثانیه، بار کششی اعمالی را به ۱۰۰٪ حدّاکثر بار مکانیکی نامی مقره می‌رسانیم. سرعت این افزایش به‌مقدار ۳۵٪ حدّاکثر بار مکانیکی نامی در هر دقیقه است. در این آزمایش، مقره باید بتواند بار مکانیکی کششی اعمال شده را تحمّل کند و دچار شکست مکانیکی و ترک خوردگی نشود. با افزایش بار مکانیکی تا حدّ شکست مقره، می‌توانیم به نتیجهٔ حدّاکثر بار مکانیکی لازم برای شکست مقره دست یابیم. لازم به‌ذکر است که برای مقره‌های اتّکایی (سوزنی)، بار مکانیکی خمشی به‌جای بار کششی اعمال می‌شود.

۶- آزمایش شوک حرارتی (فقط برای مقره‌های شیشه‌ای)

[illegible] آن [illegible] مخزن آب که درجه حرارت آن حداقل ۵۰°C دارد، مهیّا

شکستگی شوند.

۷- آزمایش تحمّل ولتاژ در برابر سوراخ شدن مقره[۱]

این آزمایش می‌تواند با یک موج ولتاژ سینوسی با فرکانس صنعتی و یا با یک موج ضربه‌ای انجام گیرد. البتّه، معمولاً این آزمایش با فرکانس صنعتی انجام می‌شود. مقره‌های نمونه در این آزمایش کاملاً خشک و تمیز می‌شوند و در داخل یک محفظهٔ روغن شناور می‌گردند. روغن، باید عاری از رطوبت و ناخالصی باشد تا استقامت الکتریکی بالایی داشته باشد. اگر محفظهٔ روغن، فلزی باشد، باید ابعاد آن خیلی بزرگ باشد تا جرقّه بین قسمت فلزی مقره و بدنهٔ محفظهٔ روغن زده نشود. ولتاژ با فرکانس صنعتی بین قسمت‌های فلزی مقره اعمال می‌شود. همچنین روغن به این منظور استفاده می‌شود که استقامت الکتریکی خیلی بالاتری نسبت به هوا دارد و از بروز جرقّهٔ سطحی روی مقره (در اثر اعمال ولتاژ بالا)، جلوگیری می‌کند. برای آزمایش، ولتاژ اعمالی را سریعاً به‌مقدار حدّاکثر ولتاژ نامی قابل تحمّل مقره می‌رسانیم که این مقدار در استانداردها مشخّص شده است. بر اثر اعمال این ولتاژ، نباید در مقره شکست الکتریکی و سوراخ شدن به‌وجود آید. اگر میزان استقامت مقرهٔ مورد نظر زیاد باشد، باید ولتاژ را آن‌قدر افزایش داد تا مقره سوراخ شود.

۸- آزمایش تخلخل[۲] (فقط برای مقره‌های چینی)

در این آزمایش، قطعات شکسته شدهٔ یک مقرهٔ چینی در یک محلول الکل ۱٪ که مقداری جوهر قرمز نیز به آن اضافه شده است (یک گرم جوهر قرمز در صد گرم الکل) و تحت فشار $15MN/m^2$ برای چندین ساعت (حدود ۲۴ ساعت) قرار داده می‌شوند. سپس قطعات، بیرون آورده شده و تمیز و خشک می‌شوند و دوباره شکسته شده و به قطعات کوچک‌تری تبدیل می‌شوند. در سطوح شکسته شده نباید هیچ اثری از نفوذ الکل مشاهد شود.

1- *Puncture Test*

2- *Porosity Test*

این آزمایش برای لعاب[۱] مقره است (برای اطمینان از عدم وجود ترک‌های مویین در لعاب مقره). بنابراین، می‌توان مقره را قبل از آزمایش وزن کرد؛ سپس برای ۲۴ ساعت در آب تحت فشار قرار داد و مجدداً وزن نمود. اگر افزایش وزن داشته باشد، نشان دهندهٔ نفوذ آب در خلل و فرج سطح مقره است.

۹- آزمایش میزان گالوانیزاسیون قسمت‌های فلزی[۲]

در این آزمایش، اوّلاً وضعیت ظاهری پوشش سطحی روی قسمت‌های فلزی مقره‌های نمونه از نظر یکنواختی و هموار بودن، بررسی می‌شود. همچنین به‌وسیلهٔ دستگاهی مخصوص، جرم فلز (روی[۳]) روی سطوح فلزی در واحد سطح تعیین می‌گردد. دستگاه مذکور، می‌تواند ضخامت فلز روی را نیز در یک نقطه اندازه‌گیری کند. برای این منظور، ده نقطه به‌طور تصادفی روی کلاهک و ده نقطه بر روی پین انتخاب می‌شوند و ضخامت فلز روی در آن نقاط تعیین شده و متوسّط‌گیری می‌شوند. سپس با داشتن جرم حجمی روی، مقدار جرم فلز روی در واحد سطح مشخّص می‌شود. در هر مقرهٔ نمونه، جرم روی در واحد سطح نباید کم‌تر از $500 gr/m^2$ باشد و برای تمام نمونه‌ها نباید به‌طور متوسّط از مقدار $600 gr/m^2$ کم‌تر باشد.

۶-۱۰-۳- آزمایش‌های سری مقره‌ها

این آزمایش‌ها به تک‌تک مقره‌ها در خطّ تولید اعمال می‌شود که شامل آزمایش‌های زیر هستند:

۱- بررسی وضعیت ظاهری مقره‌ها از نظر شکل، ابعاد، و رنگ ظاهری آن‌ها،

۲- آزمایش‌های مکانیکی:

برای مقره‌های نوع A: یک زنجیره از مقره‌ها به مدّت یک دقیقه تحت یک بار

1- *Glaze*

2- *Galvanizing Test*

3- *Zinc*

کششی معادل ۶۰٪ حدّاکثر تحمّل بار مکانیکی قرار می‌گیرند؛

برای مقره‌های نوع B: یک زنجیره از مقره‌ها برای مدّت ۱۰ ثانیه تحت یک بار کششی معادل ۴۰٪ حدّاکثر تحمّل بار مکانیکی قرار می‌گیرند.

در این آزمایش، مقره‌هایی که دچار شکست و ترک خوردگی می‌شوند، از خطّ تولید خارج می‌گردند.

۳- آزمایش الکتریکی: در این آزمایش، به مقره‌های بشقابی یا مقره‌های اتّکایی(سوزنی)، یک ولتاژ سینوسی با فرکانس صنعتی اعمال می‌شود. دامنهٔ ولتاژ باید به حدّی باشد که هر چند ثانیه یک بار، جرقّهٔ سطحی روی مقره زده شود. زمان اعمال ولتاژ باید حدّاقل ۵ دقیقه باشد. اگر مقره‌ها دچار سوراخ شدگی شوند، از خطّ تولید خارج می‌گردند.

۶-۱۱- شناسایی مقره‌ها

روی سطح خارجی مقره، نام تولید کننده، علامت تجارتی تولید کننده و سال تولید آن نوشته می‌شود. همچنین حدّاکثر قدرت مکانیکی مقره نیز، روی مقره‌های بشقابی نوشته می‌شود. مثلاً مقرهٔ U۳۰۰، یک مقرهٔ ۳۰۰کیلونیوتنی است.

فصل هفتم

کرونا[1]

۷-۱- مقدّمه

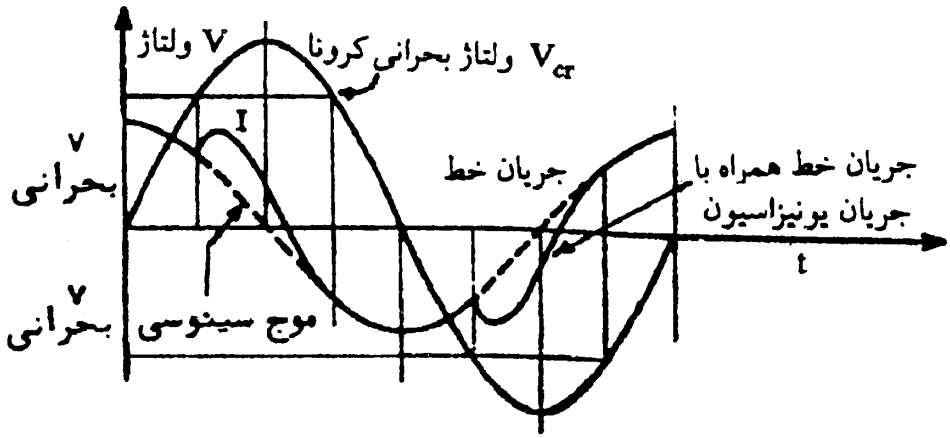
در این فصل با پدیدهٔ کرونا، که بر اثر عوامل طبیعی و غیر طبیعی و بیشتر در اطراف خطوط فشار قوی رخ می‌دهد، آشنا می‌شویم. این پدیده با توجّه به عوامل و شرایط محیطی و ساختمانی، به‌صورت‌های مرئی و نامرئی ظاهر می‌شود.

کرونا که هاله‌ای نورانی است در اطراف هادی‌های فشار قوی می‌تواند به چند رنگ مختلف دیده شود (بنفش کم‌رنگ، بنفش پررنگ، آبی و ...). شکل (۷-۱) کرونای ایجاد شده در یک جداکننده (سکسیونر) را نشان می‌دهد. تشکیل کرونا در اطراف هادی‌ها و یا وسایل فشار قوی، متناظر با تلف نمودن مقداری انرژی است که معمولاً مقدار آن خیلی زیاد نیست؛ زیرا پدیدهٔ کرونا همراه با نور و حرارت است. البتّه شناخت عوامل مؤثّر بر تلفات کرونا، خود دارای اهمیّت ویژه‌ای است که در این فصل آن‌ها را بررسی می‌کنیم. همچنین، قصد داریم تا با شناخت و بررسی عوامل مؤثّر بر این پدیده، از بروز آن در نواحی و مناطق مختلف جلوگیری کرده، مقدار تلفات ناشی از آن را کاهش دهیم. البتّه باید ذکر نمود که این پدیده، علاوه بر این که دارای معایبی است، مزایایی را نیز به‌همراه دارد که در انتهای این فصل به آن‌ها اشاره شده است.

1- Corona

بود. همچنین اگر فاصلهٔ بین سیم‌ها کوچک‌تر از قطر هر سیم باشد، ممکن است قبل از تشکیل هالهٔ بنفش رنگ، جرقّهٔ بین سیم‌ها زده شود. تشکیل هالهٔ بنفش رنگ به این دلیل است که میدان غیریکنواخت بین دو هادی، روی سطح هادی‌ها خیلی قوی‌تر است و اگر به حدّ میدان شکست هوا برسد، هوای اطراف سطح هادی، یونیزه شده و هادی می‌شود و یک جریان یونیزاسیون در فضای اطراف سطح هادی جاری می‌شود. این پدیده که کرونا نام دارد، همراه با تولید نور و حرارت بوده و مقداری تلفات ایجاد می‌کند که به تلفات کرونا معروف است. شکل موج جریان یونیزاسیون یک جریان غیرسینوسی است؛ در نتیجه، یک ولتاژ غیرسینوسی هم تولید می‌شود. این موج غیرسینوسی به‌علّت داشتن هارمونیک‌های بالا، باعث ایجاد تداخل رادیویی و اغتشاش در مدارهای مخابراتی مجاور آن می‌شود. این سیگنال‌ها و اغتشاشات ناخواسته، می‌تواند بر دریافت سیگنال‌های اصلی و دلخواه، اثر نامطلوب بگذارد و پارازیت در امواج مخابراتی ایجاد کند.

شکل (۷-۲)، منحنی ولتاژ و جریان خازنی خط را نشان می‌دهد. هنگامی که ولتاژ سینوسی به حدّ بحرانی کرونا برسد، از آن نقطه به بعد، تا زمانی‌که ولتاژ خط، بیش از ولتاژ حدّ بحرانی باشد، به جریان خط، علاوه بر جریان بار، جریان یونیزاسیون ناشی از کرونا نیز افزوده می‌شود. این موضوع باعث غیرسینوسی شدن شکل موج جریان می‌گردد. فرکانس جریان‌های کرونا، حدود چندین کیلوهرتز می‌باشد.



شکل (۷-۲): منحنی ولتاژ و جریان خازنی خط

۷-۳- محاسبهٔ ولتاژ کرونا

یک هادی استوانه‌ای به طول l، بار Q، و شعاع r را مطابق با شکل (۷-۳) در نظر بگیرید. قبلاً شدّت میدان الکتریکی در فاصلهٔ x از مرکز هادی را به‌صورت زیر داشتیم؛

$$E(x) = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l x} \qquad (۱-۷)$$

حال اگر دو هادی استوانه‌ای به شعاع‌های مساوی r و به فاصلهٔ d (فاصلهٔ بین دو مرکز استوانه‌ای هادی $d>>r$) که یکی بار $+Q$ و دیگری بار $-Q$ را حمل کند داشته باشیم، یک میدان الکتریکی غیریکنواخت بین آن‌ها تشکیل می‌شود (شکل ۷-۴ را ببینید). در این حالت، حدّاکثر شدّت میدان روی خطّ واصل بین دو محور استوانه‌ها (که کم‌ترین فاصلهٔ بین دو استوانه است) اتّفاق می‌افتد.

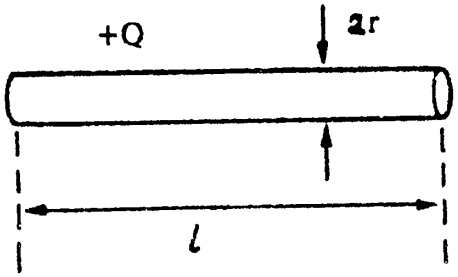
شدّت میدان الکتریکی در روی محور دو استوانه و در نقطه‌ای به فاصلهٔ x از مرکز یکی از آن‌ها، از جمع برداری شدّت میدان الکتریکی ایجاد شده در اثر هر یک از استوانه‌ها به‌دست می‌آید؛ یعنی:

$$E_{۱} = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l x}$$

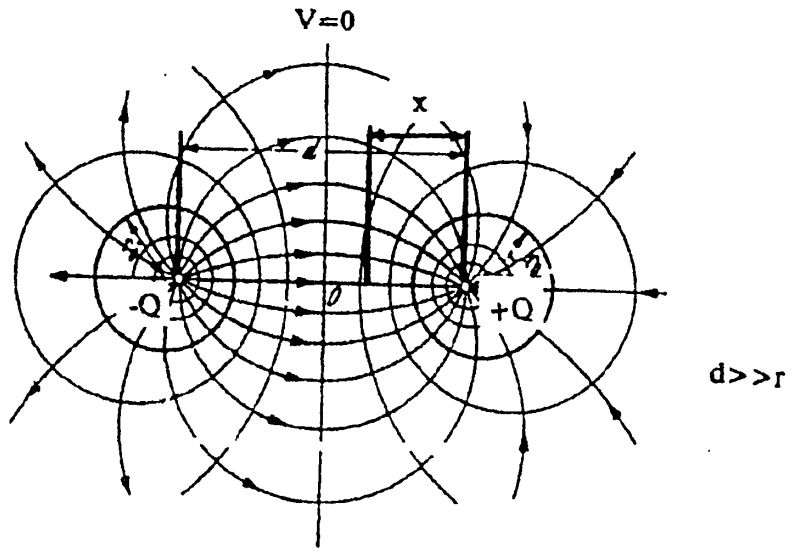
$$E_{۲} = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l (d-x)}$$

در نتیجه، با جمع این دو میدان، خواهیم داشت:

$$E(x) = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l x} + \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l (d-x)} = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l}\left(\frac{۱}{x} + \frac{۱}{d-x}\right)$$



شکل (۷-۳): هادی استوانه‌ای برای تعیین ولتاژ کرونا



شکل (۷-۴): شدّت میدان در دو سیم با پتانسیل‌های مختلف

$$E(x) = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l}\left[\frac{d}{x(d-x)}\right] \qquad (۷-۲)$$

اکنون یک صفحه در وسط محور بین دو مرکز استوانه‌ها به‌عنوان صفحهٔ مبنا با پتانسیل صفر در نظر می‌گیریم تا ولتاژ سایر نقاط میدان را نسبت به آن بسنجیم. برای محاسبهٔ ولتاژ نقطهٔ x نسبت به صفحهٔ مبنا، خواهیم داشت:

$$\int_{\circ}^{V_x} dV_x = \int_{x}^{\frac{d}{۲}} \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l}\left(\frac{۱}{x} + \frac{۱}{d-x}\right)dx$$

$$V(x) = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l}\left(\ln\frac{x}{d-x} \Big|_{x}^{d/۲}\right)$$

$$V(x) = \frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l}\ln\frac{d-x}{x} \qquad (۷-۳)$$

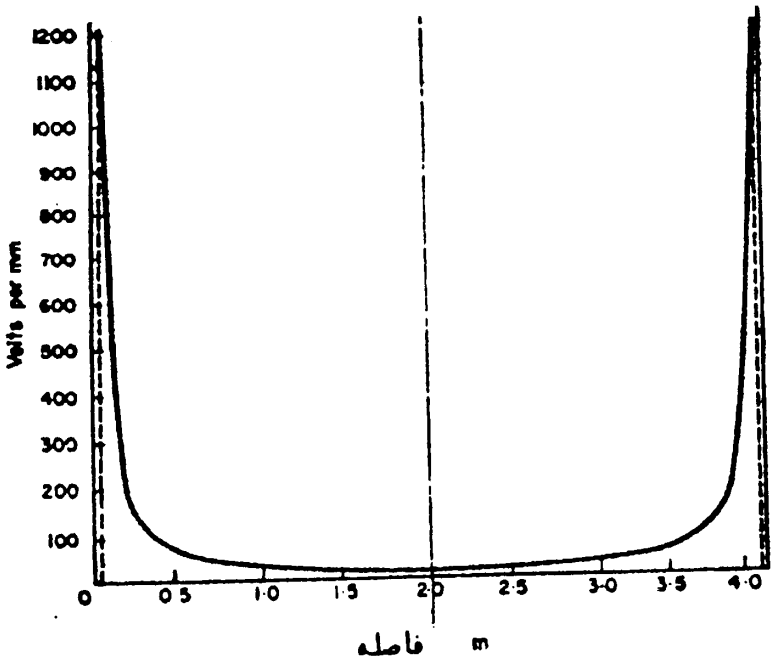
در نهایت داریم:

$$\frac{Q}{۲\pi\varepsilon_{\circ} l} = \frac{V(x)}{\ln\frac{d-x}{x}}$$

اکنون با قرار دادن رابطهٔ اخیر در رابطهٔ (۷-۲) خواهیم داشت:

$$E(x) = \frac{V(x)}{\ln\frac{d-x}{x}}\,\frac{d}{x(d-x)} \qquad (۷-۴)$$

نحوهٔ تغییرات این شدّت میدان در شکل (۷-۵) نشان داده شده است. همان‌گونه که



شکل (۷-۵): نحوهٔ تغییرات شدّت میدان بین دو هادی

مشخّص است، در سطح هادی($x=r$)، حدّاکثر شدّت میدان ایجاد می‌شود که برابر است با:

$$E_r = E_{max} = \frac{V_r}{\ln\frac{d-r}{r}} \frac{d}{r(d-r)} \qquad (۷-۵)$$

چون $d>>r$ است، در نتیجه $d-r \cong d$ بوده و بنابراین،

$$E_r = E_{max} = \frac{V_r}{\ln\frac{d}{r}} \frac{1}{r} \qquad (۷-۶)$$

در شرایط هوای معمولی کنار سطح دریا، در شرایط جوّی استاندارد و بدون آلودگی، شدّت میدان لازم برای یونیزاسیون هوا روی سطح هادی صاف و صیقلی، حدود ۳۰kV/cm است. حال اگر E_r (شدّت میدان حدّاکثر بین دو هادی خطّ انتقال) به این مقدار برسد، روی سطح هادی، کرونا یعنی یونیزاسیون هوای اطراف سطح هادی اتّفاق می‌افتد. ولتاژ لازم برای ایجاد شدّت میدان از رابطهٔ (۷-۶) به‌دست می‌آید و به آن، ولتاژ بحرانی شروع کرونا می‌گویند. با توجّه به آنکه این کرونا فقط روی سطح هادی اتّفاق می‌افتد، هالهٔ بنفش رنگ آن قابل رؤیت نیست و فقط صدای جرقّهٔ آن همراه با بوی گاز ازن قابل تشخیص است که به آن، "کرونای نامرئی" گفته می‌شود و

ولتاژ لازم برای ایجاد آن را "ولتاژ بحرانی شکست"[۱] (V_d) می‌گویند.

اگر شدّت میدان لازم برای شروع یونیزاسیون مؤثّر هوا را E_c بنامیم، آن‌گاه،

$$V_d = E_c \cdot r \cdot \ln\frac{d}{r}$$

در این رابطه، d فاصلهٔ هادی‌ها و r شعاع هادی می‌باشد.

اگر E_c=۳۰kV/cm باشد آن‌گاه،

$$V_d = ۳۰ \times r \cdot \ln\frac{d}{r} \qquad (۷-۷)$$

البتّه این مقدار، حدّاکثر ولتاژ V_d نسبت به صفحهٔ خنثی است. برای یک خطّ دو سیمهٔ تک فاز، حدّاکثر ولتاژ خط، باید دو برابر مقدار مذکور باشد تا کرونای غیرمرئی اتّفاق بیفتد و مقدار مؤثّر آن، $\frac{۱}{\sqrt{۲}}$ برابر می‌شود.

مثال (۷-۱): یک خطّ انتقال تک فاز دو سیمه مفروض است که قطر هادی‌های خط، ۲۰ میلیمتر و فاصلهٔ بین آن‌ها ۴ متر می‌باشد. همچنین شدّت میدان بحرانی یونیزاسیون مؤثّر هوا در شرایط معمولی ۳۰kV/cm می‌باشد و خطّ انتقال هم در شرایط معمولی قرار گرفته است. در این حالت، ولتاژ خطّ انتقال باید چقدر باشد تا کرونای غیرمرئی اتّفاق بیفتد.

حل: با توجّه به اطّلاعات خط، داریم:

$$۲r = ۲۰ \text{ mm} \Rightarrow r = ۱\text{cm}$$

$$V_d = ۳۰ \times ۱ \times \ln\frac{۴ \times ۱۰۰}{۱} = ۱۷۹/۷۵ \text{ kV}$$

این ولتاژ، بیانگر دامنهٔ حدّاکثر ولتاژ هر هادی نسبت به صفحهٔ خنثی می‌باشد. برای این خطّ تک‌فاز دو سیمه، ولتاژ مؤثّر خط برای شروع کرونای غیرمرئی برابر است با:

$$V_d = \frac{۲ \times ۱۷۹/۷۵}{\sqrt{۲}} = ۲۵۴/۲\text{kV}$$

به این ولتاژ، ولتاژ شروع کرونای غیرمرئی (یا ولتاژ بحرانی شکست) می‌گویند.

شدّت میدان بحرانی شکست هوا، متناسب با فشار بوده و با عکس درجه حرارت متناسب است؛ و مقدار آن در دمای t=۲۰°C، فشار P=۷۶۰mmHg، و

1- Disruptive Critical Voltage

رطوبت $۱۱gr/m^۳$ ، ۳۰kV/cm است. در ولتاژ سینوسی AC مقدار مؤثّر آن $\frac{۳۰}{\sqrt{۲}}$=۲۱/۲۱kV/cm می‌شود.

با در نظر گرفتن چگالی هوا در هر شرایط دیگری، با در نظر گرفتن فشار و درجه حرارت معیّن می‌توان میدان بحرانی شکست هوا را به‌دست آورد. طبق قانون گازها برای یک گاز داریم:

$$P_۱V_۱ = N_۱RT_۱$$

$$P_۲V_۲ = N_۲RT_۲$$

که در این رابطه، P فشار گاز، T دمای گاز، V حجم گاز، N تعداد مولکول‌های گاز، و R ثابت عمومی گازها می‌باشد. چون حجم همواره ثابت است، ولی فشار و دمای هوا تغییر می‌کند، پس:

$$P_۱V = N_۱RT_۱$$

$$P_۲V = N_۲RT_۲$$

در نتیجه، چگالی نسبی هوا برابر است با،

$$\delta = \frac{N_۲}{N_۱} = \frac{P_۲}{P_۱} \cdot \frac{T_۱}{T_۲} \qquad (۸-۷)$$

در فشار و دمای متفاوت، چگالی مولکولی هوا تغییر کرده و در نتیجه، شدّت میدان لازم برای شکست آن تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال اگر فشار $P_۱$=۷۶۰mmHg و درجه حرارت برابر $T_۱$=۲۰°C باشد، آنگاه خواهیم داشت:

$$\delta = \frac{P_۲}{۷۶۰} \times \frac{۲۹۳}{T_۲} = \frac{۰/۳۸۶P}{t+۲۷۳} \qquad (۹-۷)$$

برای سطوح ناصاف نیز شدّت میدان الکتریکی در نقاط نوک تیز تشدید می‌شود. بنابراین، نسبت به سطوح صاف، شدّت میدان در نقاط نوک تیز با ولتاژ کم‌تری به حدّ شدّت میدان شکست هوا می‌رسد. ازاین‌رو، میدان بحرانی لازم برای سطح هادی که منجر به بروز کرونا در نقاط نوک تیز هادی می‌شوند، باز هم کاهش می‌یابد. توسّط ضریب ناهمواری سطح $m_۰$، این کاهش ولتاژ اعمال می‌شود. در نتیجه، برای میدان بحرانی شکست داریم:

$$E_{c\ eff} = ۲۱/۲۱ \times m_۰\ \delta \ \ \text{kV/cm} \qquad (۱۰-۷)$$

که مقدار $m_\circ$ برای سطوح مختلف به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

برای سطوح کاملاً هموار و صیقلی $m_\circ = ۱$

برای سطوح کثیف $m_\circ = ۰/۹۳ - ۰/۹۸$

برای هادی‌های چند رشته‌ای $m_\circ = ۰/۸۵ - ۰/۹$

همچنین ولتاژ مؤثّر کرونای نامرئی برای یک هادی نسبت به صفحهٔ خنثی برابر است با:

$$V_{d\ eff} = ۲۱/۲۱ \times m_\circ\, r\, \delta \ln\frac{d}{r} \quad \text{kV} \qquad (۱۱-۷)$$

حال اگر ولتاژ خط به‌مقدار بحرانی ولتاژ شکست مذکور برسد، یونیزاسیون هوای روی سطح هادی شروع می‌شود؛ ولی کرونا قابل رؤیت نخواهد بود.

۷-۳-۱- ولتاژ بحرانی کرونای قابل‌رؤیت[۱]

تجربه نشان داده است که اگر شدّت میدان الکتریکی در فاصلهٔ $r + ۰/۳\sqrt{r}$ از مرکز هادی به حدّ شدّت میدان شکست هوا برسد، و در حقیقت حجم هوا در فاصلهٔ $۰/۳\sqrt{r}$ روی سطح هادی یونیزه شود، کرونا قابل رؤیت خواهد بود. بنابراین، لازم است شدّت میدان روی سطح هادی، بیشتر از شدّت میدان شکست هوا باشد و این نیاز به ولتاژ بالاتری خواهد داشت که ولتاژ لازم را ولتاژ کرونای قابل رؤیت می‌نامند. طبق رابطهٔ تجربی پیک[۲]، برای مشاهدهٔ کرونا، شدّت میدان روی سطح هادی باید به‌مقدار $E = E_c\delta(۱ + \frac{۰/۳}{\sqrt{r\delta}})$ رسیده باشد. در نتیجه، ولتاژ کرونای قابل رؤیت با احتساب ضریب ناصافی سطح m_v، برابر است با:

$$V_v = E_c\, m_v\, (r\delta + ۰/۳ \times \sqrt{r\delta}) \ln\frac{d}{r}$$

با احتساب $E_c = ۳۰\,\text{kV/cm}$، می‌توان نوشت:

$$V_v = ۳۰\, m_v\, (r\delta + ۰/۳ \times \sqrt{r\delta}) \ln\frac{d}{r}$$

آن‌گاه ولتاژ بحرانی مؤثّر کرونای مرئی برابر است با:

$$V_{v\ eff} = ۲۱/۲۱\, m_v\, (\delta r + ۰/۳ \times \sqrt{\delta r}) \ln\frac{d}{r} \quad \text{kV}$$

1- Visual Critical Voltage *2- Peek Formula*

در نتیجه،

$$V_{v\,eff} = ۲۱/۲۱\, m_v\, \delta r \left(۱ + \frac{۰/۳}{\sqrt{\delta r}}\right) \ln\frac{d}{r} \quad \text{kV} \qquad (۱۲-۷)$$

مقدار m_v، بیانگر ضریب ناهمواری سطح است که برای هادی‌های چند رشته‌ای و برای کرونای موضعی[1] در نقاط برجسته تقریباً برابر $m_v = ۰/۷۲$ می‌باشد. همچنین مقدار این ضریب برای هادی‌های چند رشته‌ای و برای کرونای کلّی[2] در همهٔ نقاط، معمولاً برابر $m_v = ۰/۸۲$ است.

مثال (۷-۲): برای مثال (۷-۱)، ولتاژ کرونای مرئی را محاسبه کنید.

حل: از مثال قبل داشتیم،

$r = ۱\text{cm} \qquad d = ۴\text{m} = ۴۰۰\text{cm}$

ولتاژ کرونا نسبت به صفحهٔ خنثی برابر است با،

$$V_{v\,eff} = ۲۱/۲۱ \times ۱\,(۱+۰/۳\sqrt{۱})\ln\frac{۴۰۰}{۱} = ۱۶۵/۲\ \text{kV}$$

و در نتیجه، ولتاژ خط به خطّ کرونا را به‌مقدار زیر خواهیم داشت:

$$V_v = ۲ \times ۱۶۵/۲ = ۳۳۰/۴\ \text{kV}$$

۷-۴- کرونا در خطوط انتقال سه فاز

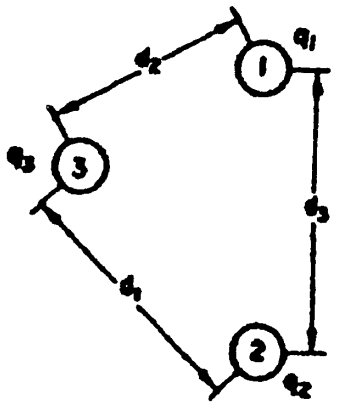
در یک سیستم سه فاز (مطابق با شکل ۷-۶)، که شعاع هر هادی r و فاصلهٔ بین هادی‌ها، $d_۱$، $d_۲$ و $d_۳$ باشد و ولتاژ فازی (ولتاژ هر هادی نسبت به نقطهٔ خنثی با پتانسیل صفر) V_n باشد، حدّاکثر شدّت میدان روی سطح هر هادی مشابه با خطّ تک فاز دو سیمه به‌صورت زیر خواهد بود:

$$E_{max} = \frac{V}{r\ln\frac{d}{r}}$$

d فاصلهٔ متوسّط هندسی بین فازها می‌باشد.

1- Local Corona

2- General Corona



شکل (۷-۶): یک سیستم انتقال سه فاز

اگر $d_۱=d_۲=d_۳$ باشد آن‌گاه:

$$d = d_۱ = d_۲ = d_۳$$

اگر $d_۱\neq d_۲\neq d_۳$ باشد آن‌گاه در صورت ترانسپوز شدن هادی‌ها خواهیم داشت:

$$d = \sqrt[۳]{d_۱ d_۲ d_۳} \qquad (۱۳-۷)$$

در این حالت، ولتاژ مؤثّر بحرانی شکست (کرونای نامرئی) برابر است با:

$$V_{d\,eff} = ۲۱/۲۱\, m_{\circ}\, \delta r \ln\frac{d}{r}$$

همچنین ولتاژ مؤثّر بحرانی کرونای مرئی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{v\,eff} = ۲۱/۲۱\, m_v\, \delta r \left(۱ + \frac{۰/۳}{\sqrt{\delta r}}\right) \ln\frac{d}{r}$$

مثال (۷-۳): ولتاژ بحرانی شکست و ولتاژ بحرانی کرونای مرئی (هم کرونای موضعی و هم کرونای کلّی) را برای یک خطّ سه فاز ۲۲۰kV که قطر هادی‌ها ۲۲/۲۶mm و در رئوس یک مثلّث متساوی‌الاضلاع به ضلع ۶m قرار گرفته باشند در درجه حرارت ۲۵°C و فشار ۷۳۰mmHg محاسبه کنید. ضریب ناصافی سطح را ۰/۸۴ و برای کرونای موضعی قابل رؤیت ۰/۷۲ و برای کرونای کلّی قابل رؤیت ۰/۸۲ در نظر بگیرید.

حل:

$$r = \frac{۲۲/۲۶}{۲} = ۱۱/۱۳\text{mm} = ۱/۱۱۳\text{cm}$$

$d = ۶m = ۶۰۰cm$ ، $m_۰ = ۰/۸۴$ ، $t = ۲۵°C$ ، $P = ۷۳۰\ mmHg$

$$\delta = \frac{۰/۳۸۶ \times ۷۳۰}{۲۵+۲۷۳} = ۰/۹۴۵$$

$$V_{d\ eff} = ۲۱/۲۱ \times ۰/۸۴ \times ۰/۹۴۵ \times ۱/۱۱۳ \times \ln \frac{۶۰۰}{۱/۱۱۳} = ۱۱۷/۸۷kV$$

برای کرونای مرضعی با $m=۰/۷۲$ داریم:

$$V_{v\ eff} = ۲۱/۲۱ \times ۰/۷۲ \times ۰/۹۴۵ \times ۱/۱۱۳ \times \left(۱ + \frac{۰/۳}{\sqrt{۰/۹۴۵ \times ۱/۱۱۳}}\right) \ln \frac{۶۰۰}{۱/۱۱۳}$$

$V_{v\ eff} = ۱۳۰/۵۸\ kV$ ولتاژ فازی

$V_{v\ L\text{-}L} = \sqrt{۳} \times ۱۳۰/۵۸ = ۲۲۶/۱۷\ kV$ ولتاژ خط به خط

همچنین برای کرونای مرئی کلّی با $m=۰/۸۲$، خواهیم داشت:

$V_v = \frac{۱۳۰/۵۸}{۰/۷۲} \times ۰/۸۲ = ۱۴۸/۷۱\ kV$ ولتاژ فازی

$V_{v\ L\text{-}L} = \sqrt{۳} \times ۱۴۸/۷۱ = ۲۵۷/۵۸\ kV$ ولتاژ خط به خط

۷-۵- عوامل مؤثر بر کرونا

عوامل مؤثّر بر کرونا را به دو دستهٔ کلّی تقسیم می‌کنند:

۷-۵-۱- شرایط جوّی

در شرایط جوّی مختلف، شدّت میدان بحرانی برای شکست هوا متفاوت است و باعث تغییر ولتاژ کرونا در شرایط مختلف می‌شود. عوامل مؤثّر را می‌توان، چگالی هوا، میزان رطوبت، باران، طوفان و بروز صاعقه‌های شدید (که باعث ازدیاد تعداد ذرّات باردار حول خط می‌شود و شدّت میدان بحرانی را کم می‌کند) نام برد.

۷-۵-۲- شرایط هادی‌ها

عواملی که مربوط به وضعیت هادی‌ها و فاصلهٔ بین آن‌هاست و روی ولتاژ کرونا اثر می‌گذارند، عبارت است از:

الف) شعاع هادی‌ها و نسبت $\frac{d}{r}$

هرچه شعاع هادی بزرگ‌تر شود در صورتی که $d>>r$ باشد، شدّت میدان روی سطح آن کم‌تر می‌شود و غیریکنواختی میدان نیز همین‌طور می‌شود و در نتیجه، اثر کرونا کم‌تر و کرونا در ولتاژ بالاتری اتّفاق می‌افتد. وقتی هم که کرونا قشری از هوای اطراف هادی را یونیزه می‌کند، در حقیقت، آن قشر، به وضعیت هادی تبدیل می‌شود و مانند این است که شعاع هادی افزایش یافته است. در نتیجه، روی سطح جدید به شعاع r'، شدّت میدان الکتریکی کاهش می‌یابد و موجب جلوگیری از گسترش هالهٔ کرونا می‌شود. در واقع کرونا، عاملی برای تضعیف شدّت میدان می‌شود.

اگر نسبت $\frac{d}{r}$ خیلی کم باشد، ممکن است قبل از بروز کرونا، جرقّهٔ کامل بین دو هادی زده شود و اتّصال کوتاه به‌وجود آید. اگر $\frac{d}{r}<e$ باشد، آن‌گاه با افزایش مقدار r ، مقدار $\ln(d/r)$ بیشتر از میزان افزایش مقدار r، کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش شدّت میدان الکتریکی می‌شود و قبل از بروز کرونا جرقّه رخ می‌دهد. در عمل اگر $\frac{d}{r}<۱۵$ باشد، جرقّهٔ کامل قبل از کرونا رخ می‌دهد، ولی چون این نسبت همیشه برای خطوط هوایی بزرگ‌تر از ۱۵ می‌باشد، جرقّه در این شرایط رخ نمی‌دهد. همچنین اگر $\frac{d}{r}>e$ باشد با افزایش مقدار r، شدّت میدان کاهش یافته و کرونا قبل از بروز جرقّه رخ می‌دهد.

ب) نوع سطح هادی از نظر صیقلی بودن سطح

هر چقدر سطح هادی‌ها ناصاف باشد در نقاط نوک تیز، شدّت میدان قوی‌تری به‌وجود می‌آید و کرونا در آن نقاط با ولتاژ کم‌تری اتّفاق می‌افتد. هادی‌های چند رشته‌ای مانند یک سطح ناهموار عمل می‌کنند و در نقاط نوک تیز آن‌ها، کرونا با ولتاژ کم‌تری اتّفاق می‌افتد. میزان آلودگی هوا نیز بر روی ناهمواری سطح مؤثر است. درجهٔ ناهمواری سطح را با پارامتر m_0 مشخّص می‌کنند. ضریب ناهمواری سطح را به‌صورت حاصلضرب دو ضریب m_1 و m_2 در نظر می‌گیرند.

$$m_0 = m_1 \times m_2 \qquad (۱۴-۷)$$

m_1 ضریب ناهمواری سطح و m_2 ضریب شرایط آب و هوایی می‌باشد. لازم به‌ذکر است که هرچه آلودگی هوا بیشتر شود، مقدار m_2 کم‌تر می‌شود.

در ضمن، هادی‌های چند رشته‌ای نسبت به هادی‌های یکپارچه، شعاع مؤثّر کم‌تری دارند و در نتیجه شدّت میدان برای هادی‌های چند رشته‌ای بیشتر از هادی‌های یکپارچه با همان شعاع است و بالطبع، اثر کرونا تشدید می‌یابد.

ج) گروهی بودن هادی‌ها (خطوط باندل)

برای خطوط گروهی و باندل که هر فاز شامل چند هادی است، به‌جای شعاع هادی r، باید از شعاع متوسّط هندسی برای هر فاز استفاده کرد. برای خطوط باندل، اگر فاصلهٔ بین هادی‌های باندل در یک فاز برابر D و شعاع هر یک از هادی‌های باندل در یک فاز r_0 باشد، برای شعاع مؤثّر متوسّط هندسی هر فاز r خواهیم داشت:

$$r = \sqrt{r_0 D}$$ برای خطوط با هادی دوتایی (۱۵-۷)

$$r = \sqrt[3]{r_0 D^2}$$ برای خطوط با هادی سه‌تایی (۱۶-۷)

$$r = \sqrt[4]{\sqrt{2}\, r_0 D^3}$$ برای خطوط با هادی چهارتایی (۱۷-۷)

بنابراین، اگر به‌جای یک هادی در هر فاز، از چند هادی به‌صورت گروه باندل دوتایی، سه‌تایی، و یا چهارتایی استفاده شود، به‌طوری که مجموع سطح مقطع هادی‌های یک گروه برابر سطح مقطع یک هادی بزرگ‌تر در هر فاز باشد، به دلیل این‌که شعاع مؤثّر متوسّط هندسی هر فاز در خطوط باندل افزایش می‌یابد، بنابراین، ظرفیت حمل جریان در آن‌ها بیشتر می‌شود. همچنین شدّت میدان الکتریکی روی سطح هادی‌های گروهی (باندل) کم‌تر شده، ولتاژ بحرانی شکست در خطوط باندل بالاتر می‌رود. به‌عنوان مثال، برای یک خطّ با باندل دوتایی، خواهیم داشت:

$$E_{max} = \frac{V\left(1 + \frac{2r_0}{D}\right)}{2r_0 \ln \frac{d}{\sqrt{r_0 D}}} \qquad (۱۸-۷)$$

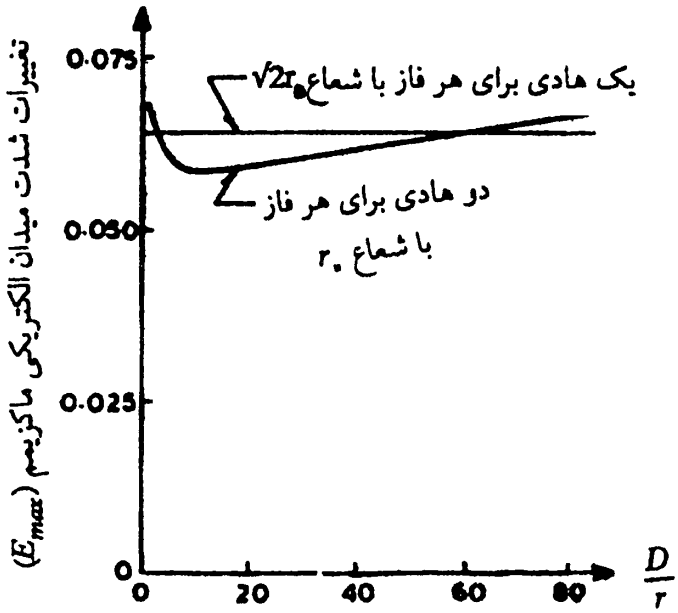
با افزایش فاصلهٔ هادی‌های باندل در یک فاز (D)، حدّاکثر شدّت میدان روی سطح هادی‌ها (E_{max}) کاهش می‌یابد؛ ولی اگر D از یک حدّی زیادتر شود، E_{max} افزایش می‌یابد (شکل ۷-۷ را ببینید). در طرّاحی خطوط انتقال باندل، فاصلهٔ بین هادی‌های باندل (D) به‌مقدار بهینه (D_{opt}) که E_{max} کم‌ترین مقدار را دارد، تنظیم می‌شود. مقدار D_{opt} از مشتق‌گیری تابع E_{max} نسبت به متغیّر D و مساوی صفر قرار دادن آن به‌دست می‌آید. در این رابطه، از اثر زمین و اثرات متقابل فازها روی تغییر شکل میدان صرف‌نظر شده است. همچنین باندل کردن، اثر قابل توجّهی در کاهش اندوکتانس خطوط دارد.

اگر از یک هادی به شعاع r و با سطح مقطع معادل باندل دوتایی استفاده کنیم، داریم:

$$\pi r^{۲} = ۲\pi r_{۰}^{۲} \quad \Rightarrow \quad r = \sqrt{۲}\, r_{۰}$$

در نتیجه،

$$E_{max} = \frac{V}{\sqrt{۲}\, r_{۰} \ln \frac{d}{\sqrt{۲}\, r_{۰}}} \qquad (۱۹-۷)$$



شکل (۷-۷): اثر تغییرات D/r روی شدّت میدان الکتریکی حدّاکثر برای یک خطّ انتقال با d/r=۷۰۰

با مقایسهٔ این رابطه با رابطهٔ (۷-۱۶) ملاحظه می‌شود که در باندل دوتایی، شدّت میدان روی سطح هادی کم‌تر بوده، ولتاژ کرونا افزایش می‌یابد (زیرا، $D>>r_0$ و $\sqrt{2}>2$ است).

د) گرم شدن سطح هادی‌ها

با عبور جریان از هادی، دمای سیم بالا می‌رود و شبنم‌های ریز تشکیل شده روی سطح هادی‌ها که در شرایط مه و مرطوب تشکیل می‌شوند، تبخیر می‌شود و در نتیجه، ناهمواری سطح، کاهش می‌یابد و ولتاژ کرونا افزایش می‌یابد.

۷-۶- تلفات کرونا

ذرّات باردار تولید شده که در مکان تخلیهٔ الکتریکی اطراف هادی حرکت می‌کنند، به‌وسیلهٔ پدیدهٔ کرونا حاصل می‌شوند؛ به‌سبب آن‌که آن‌ها به‌وسیلهٔ میدان الکتریکی به‌حرکت درمی‌آیند. انرژی مورد نیاز توسّط بارها در جابه‌جایی که با میدان الکتریکی تغذیه می‌شود، توسّط ولتاژ درخواستی هادی و جابه‌جایی جریان در سراسر هادی تأمین می‌گردد. به‌عبارت دیگر، در اطراف هادی، اتلاف انرژی داریم. به منظور تأمین انرژی مورد نیاز خطّ انتقال، و با توجّه به این‌که انرژی اضافی مورد نیاز در اطراف هادی به‌صورت جرقّه‌های کرونا ذخیره می‌شود؛ در نتیجه، باید انرژی منبع به‌مقدار انرژی انتقالی مورد نیاز و انرژی نهفته در تخلیه‌های جزئی (جرقّه‌های کرونا)، در اطراف هادی باشد. این اتلاف قدرت اضافی همان "اتلاف کرونا" است.

در نتیجه، می‌توان گفت که تشکیل کرونا متناظر با تلف نمودن مقداری انرژی است؛ امّا مقدار آن معمولاً نسبت به تلفات اهمی، خیلی زیاد نیست؛ بنابراین، تأثیر چندانی روی تنظیم ولتاژ خط ندارد. محاسبهٔ مقدار شدّت جریان کرونا، به‌علّت این‌که نمی‌توان مقدار دقیق بار الکتریکی فضای اطراف حوزهٔ کرونا را محاسبه نمود، کاری مشکل است. از این رو، معمولاً از روابط تجربی که از نتایج آزمایش‌ها به‌دست آمده‌اند، برای محاسبهٔ تلفات کرونا استفاده می‌شود. اوّلین و مهم‌ترین رابطهٔ تجربی

برای تعیین تلفات کرونا، به‌وسیلهٔ یک مهندس آمریکایی به‌نام "پیک"[1] پیشنهاد شده است. این رابطه به‌صورت زیر می‌باشد:

$$P_c = \frac{۲۴۴}{\delta}(f+۲۵)\sqrt{\frac{r}{d}}\left(V_{ph}-V_d\right)^{۲}\times ۱۰^{-۵} \qquad \text{kW/km/phase}$$

(۲۰-۷)

در این رابطه،

d = فاصلهٔ بین هادی‌ها به cm،

r = شعاع هادی خط به cm،

δ = چگالی نسبی هوا،

f = فرکانس سیستم به Hz،

V_{ph} = ولتاژ فازی مؤثّر خطّ انتقال به kV،

V_d = ولتاژ بحرانی شکست؛ که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_d = ۲۱/۲۱ m_{\circ}\, \delta\, r \ln\frac{d}{r} \qquad \text{kV}$$

و چگالی نسبی هوا از رابطه:

$$\delta = \frac{۰/۳۸۶P}{۲۷۳+t_{\circ}}$$

در این رابطه، P فشار هوا به mmHg و $t_{\circ}$ دمای محیط به °C است. لازم به‌ذکر است که رابطهٔ پیک در شرایط زیر صادق است:

۱- فرکانس باید بین ۲۵ تا ۱۲۰ هرتز باشد؛

۲- شعاع هادی باید بزرگ‌تر از ۰/۲۵cm باشد؛

۳- این رابطه برای شرایط هوای صاف صحیح است و نباید رطوبت به‌طور غیرعادی پایین باشد؛

۴- باید نسبت $\frac{V_{ph}}{V_d} > ۱/۸$ برقرار باشد. اگر این نسبت کم‌تر از ۱/۸ باشد، آنگاه فرمول تجربی ارائه شده توسّط پترسون[2] نتیجهٔ دقیق‌تری می‌دهد.

$$P_c = \frac{۲۱\times ۱۰^{-۶} f V_{ph}^{۲}}{\left(\log_{۱۰}\frac{d}{r}\right)^{۲}}\times F \qquad \text{kW/km/phase} \qquad (۲۱-۷)$$

1- Peek

2- Peterson

V_{ph} = ولتاژ فازی خط بر حسب kV،

f = فرکانس سیستم بر حسب Hz،

d = فاصلهٔ متوسّط هندسی بین فازها بر حسب cm،

r = شعاع هادی بر حسب cm،

F = ضریبی است که به نسبت $\frac{V_{ph}}{V_d}$ بستگی دارد و طبق جدول (۷-۱) تعیین می‌شود.

جدول (۷-۱): تعیین مقدار ضریب F برای رابطهٔ پترسون

V_{ph}/V_d	۰/۶	۰/۸	۱/۰	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸	۲/۰
F	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۳	۱/۰	۳/۵	۶/۰

البتّه تلفات کرونای مقره‌ها را می‌توان از همان رابطهٔ پیک محاسبه نمود.

مثال (۷-۴): در یک سیستم سه فاز ۲۲۰kV با فرکانس ۵۰Hz، خطوط با شعاع هادی ۱/۲cm در رئوس مثلث متساوی‌الاضلاع به طول ۲m قرار گرفته‌اند. تلفات کرونا در هر کیلومتر از طول خط را در شرایط نسبتاً مناسب $m_۰ = ۰/۹۶$، درجهٔ حرارت هوا ۲۰°C و فشار هوا ۷۲۲mmHg محاسبه کنید.

حل: طبق رابطهٔ پیک داریم:

$$P_c = \frac{۲۴۴}{\delta}(f + ۲۵)\sqrt{\frac{r}{d}}\left(V_{ph} - V_d\right)^۲ \times ۱۰^{-۵} \qquad \text{kW/km/phase}$$

$$f = ۵۰\text{Hz},\ r = ۱/۲\text{cm},\ d = ۲\text{m},\ P = ۷۲۲\ \text{mmHg},\ t = ۲۰°\text{C}$$

در نتیجه، با جایگذاری مقادیر خواهیم داشت:

$$V_{ph} = \frac{۲۲۰}{\sqrt{۳}} = ۱۲۷\ \text{kV}$$

$$\delta = \frac{۰/۳۸۶\,P}{۲۷۳+t} = \frac{۰/۳۸۶ \times ۷۲۲}{۲۷۳+۲۰} = ۰/۹۵۱$$

$$V_d = ۲۱/۲۱\, m_۰ \delta r \ln\frac{d}{r} = ۲۱/۲۱ \times ۰/۹۶ \times ۰/۹۵۱ \times ۱/۲ \times \ln\frac{۲۰۰}{۱/۲} = ۱۱۸/۸۸\ \text{kV}$$

$$P_{c\,1\phi} = \frac{۲۴۴}{۰/۹۵۱}(۵۰+۲۵)\sqrt{\frac{۱/۲}{۲۰۰}}\,(۱۲۷-۱۱۸/۸۸)^{۲}\times ۱۰^{-۵}$$
$$= ۰/۹۸۳\ \text{kW/km/phase}$$

$$P_{c۳\phi} = ۳\times ۰/۹۸۳ = ۲/۹۴۸\ \text{kW/km/۳ phase}$$

با استفاده از رابطهٔ پترسون داریم:

$$P_c = \frac{۲۱\times ۱۰^{-۶}\times ۵۰\times ۱۲۷^{۲}}{(\log_{۱۰}\frac{۲۰۰}{۱/۲})^{۲}}\times ۰/۰۵۹ = ۰/۲۰۲\ \text{kW/km/۳phase}$$

$$P_{c۳\phi} = ۳\times ۰/۲۰۲ = ۰/۶۰۶\ \text{kW/km}$$

قابل ذکر است که برای سیم‌های با اندازهٔ خیلی کوچک رابطه‌های زیر، خیلی نزدیک به حقیقت است.

$$P_c = \frac{۲۴۴}{\delta}(f+۲۵)\sqrt{\frac{۰/۹۳}{d^{۲}}+\frac{r+۰/۰۱۶}{d}}\,(V_{ph}-V_d)^{۲}\times ۱۰^{-۵}\ \text{kW/km/phase} \qquad (۲۲-۷)$$

که در این رابطه، r شعاع هادی و d فاصلهٔ متوسّط هندسی بین فازهاست. همچنین داریم:

$$V_d = ۱۲۳ m_d \delta r\left\{۱+\frac{۰/۱۸۸}{۱+۱۴۸۵r^{۲}\sqrt{\delta r}}\right\}\log\frac{d}{r}\quad \text{kV/phase} \qquad (۲۳-۷)$$

۷-۶-۱- شکل تقریبی رابطهٔ پترسون برای تلفات کرونا

رابطهٔ پترسون ارائه شده در معادلهٔ (۷-۲۱)، برای استفاده در هادی‌های گروهی (باندل)، خیلی مفید نیست؛ بنابراین، شکل تقریبی رابطهٔ (۷-۲۱) را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$P_c = a\left\{۰/۴۵\left[\frac{V_{ph}}{V_d}\right]^{۳}-۰/۴\left[\frac{V_{ph}}{V_d}\right]^{۲}\right\}\quad ۰/۹\le\frac{V_{ph}}{V_d}\le ۱/۴\ \text{برای} \qquad (۲۴-۷)$$

$$P_C = a\left\{۱۰/۱\left[\frac{V_{ph}}{V_d}\right]^{۲}-۱۳/۸۲\left[\frac{V_{ph}}{V_d}\right]^{۲}\right\}\quad ۱/۴\le\frac{V_{ph}}{V_d}\le ۲/۴\ \text{برای} \qquad (۲۵-۷)$$

در این رابطه،

$$a = \frac{۳۳/۷ \times ۱۰^{-۶} f V_d^{۲}}{\log \frac{d}{r}} \quad \text{kW/mile/phase} \qquad (۲۶-۷)$$

برای هادی‌های صاف می‌توان نوشت:

$$V_d = ۱۲۳/۴ m_d r \delta^{\frac{۲}{۳}} \log \left(\frac{d}{r}\right) \qquad (۲۷-۷)$$

همچنین برای هادی‌های رشته‌ای با ۶ رشتهٔ خارجی داریم:

$$V_d = ۱۲۳/۴ m_d r \delta^{\frac{۲}{۳}} \left[\frac{\log \left\{\frac{d}{r} + ۰/۶۷۷\right\}}{۱/۳۷}\right] \qquad (۲۸-۷)$$

و برای هادی‌های رشته‌ای با ۱۲ رشتهٔ خارجی یا بیشتر داریم:

$$V_d = ۱۲۳/۴ m_d r \delta^{\frac{۲}{۳}} \left[\frac{\log \left\{\frac{d}{C r_۱} + (n_s - ۱) \log \frac{۲d}{\phi - ۲C r_۱}\right\}}{\frac{۱}{C r_۱} + \frac{n_s - ۱}{d - ۲C r_۱}}\right] \qquad (۲۹-۷)$$

که در این رابطه، m_d ضریب ناصافی است و برابر است با،

$m_d =$ ۰/۶۷ تا ۰/۷۴ برای هادی‌های غیرقابل شستشو[۱]

$m_d =$ ۰/۹۴۵ برای هادی هوایی

$m_d =$ ۰/۸۷ تا ۰/۹ برای هدف‌های طرّاحی عمومی

همچنین ضریب ثابت C به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = \frac{۱ - \sin\left(\frac{\pi}{۲} + \frac{\pi}{n_s}\right)}{\left(\frac{\pi}{۲} + \frac{\pi}{n_s}\right)} \qquad (۳۰-۷)$$

$n_s =$ تعداد رشته‌ها در لایهٔ خارجی،

$r_۱ =$ شعاع رشته‌های انفرادی از هادی برحسب اینچ،

$d_۰ =$ قطر مجموع هادی‌های رشته‌ای برحسب اینچ است.

با استفاده از روابط مناسب V_d برای هادی‌های مختلف، می‌توان به‌وسیلهٔ روابط (۲۴-۷) و (۲۵-۷)، تلفات کرونا را برای هادی‌های باندل، به‌شکل مطلوبی

1- Unwashable Conductors

محاسبه نمود.

۷-۷- عوامل مؤثّر بر تلفات کرونا

عوامل مؤثّر بر تلفات کرونا عبارتند از:

۱- عوامل مربوط به فرسودگی خطوط،

۲- عوامل الکتریکی،

۳- عوامل جوّی،

۴- عوامل مربوط به هادی‌ها.

۷-۷-۱- عوامل مربوط به فرسودگی خطوط

در خطوط انتقالی که جدیداً احداث می‌شوند، تلفات کرونا در چند ماه اوّل به‌طور غیرعادی زیاد است و به‌تدریج کاهش می‌یابد تا به یک مقدار دائمی می‌رسد. علّت این امر، آن است که در مراحل کشیدن هادی‌ها، معمولاً هادی‌ها روی سطح زمین کشیده می‌شود و سطح آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای صدمه می‌بیند. بنابراین، بعد از کلیدزنی خط و برق‌دار شدن آن، اساساً کرونا روی نقاط زبر و برجستهٔ به‌وجود آمده، تشکیل می‌شود؛ ولی به‌تدریج در اثر گاز ازن تولید شده به‌وسیلهٔ کرونا، نقاط برجسته شدیداً اکسیده می‌شوند و به‌تدریج از بین می‌روند و در نتیجه، هادی هموارتر می‌شود. بنابراین، فرسودگی هادی‌های خط که تحت ولتاژاند، شرایط مساعدی را از نقطه نظر کرونا ایجاد می‌کنند.

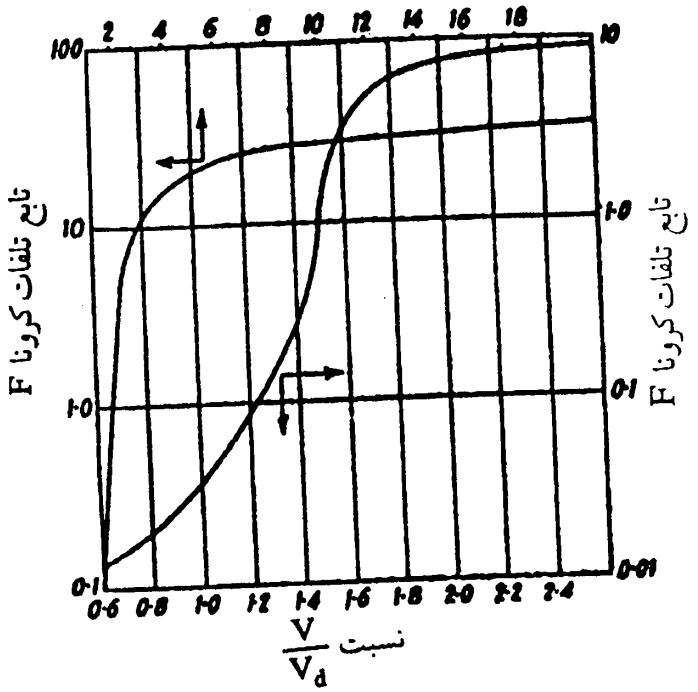
۷-۷-۲- عوامل الکتریکی مؤثّر بر تلفات کرونا

الف) فرکانس و شکل موج منبع تغذیه: تلفات کرونا مستقیماً به فرکانس بستگی دارد. هارمونیک‌های فرکانس بالا (هارمونیک سوم به بالا)، همیشه در جریان انتقالی توسّط خطوط فشار قوی وجود دارد. هارمونیک‌های فرکانس بالا، جریان کرونا و تلفات را به طور قابل توجّهی افزایش می‌دهند. بنابراین، شکل موج ولتاژ تغذیه نیز، اثر مشابهی روی تلفات کرونا دارد.

ب) شدّت میدان اطراف هادی: تلفات کرونا به‌مقدار ولتاژ و یا شدّت میدان الکتریکی اطراف هادی بستگی دارد که در شکل (۷-۸) نشان داده شده است.

بر اساس شکل (۷-۸)، تلفات کرونا در قسمت زانویی و قبل از آن، به‌تدریج زیاد می‌شود؛ امّا بعد از خمیدگی، تلفات کرونا به‌سرعت افزایش می‌یابد. تحت شرایط هوای صاف، خمیدگی منحنی تلفات کرونا در اطراف نقطهٔ ولتاژ شکست بحرانی اتّفاق می‌افتد. مقدار ولتاژ شکست بحرانی را می‌توان توسّط رابطهٔ زیر تعیین نمود:

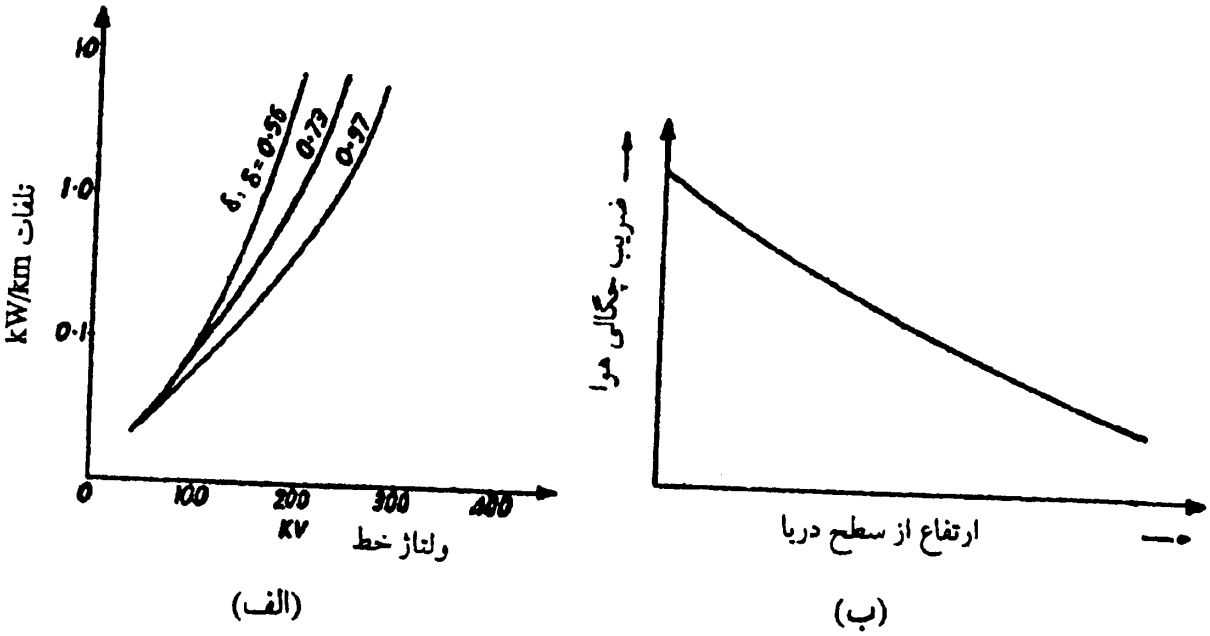
$$V_d = ۲۱/۲۱\, m.\ \delta\, r\ \ln\frac{d}{r}$$



شکل (۷-۸): تغییرات تلفات کرونا، در اطراف یک هادی

۷-۷-۳- عوامل جوّی مؤثّر بر تلفات کرونا

الف) چگالی هوا: اثر چگالی هوا در شکل‌های (۷-۹-الف) و (۷-۹-ب) نشان داده شده است. تلفات کرونا در یک خطّ انتقال عبوری از نواحی با ارتفاع زیاد، خیلی بیشتر از تلفات در یک خطّ عبوری از سطح هموار می‌باشد؛ زیرا مقدار δ در ارتفاع‌های بلند، کاهش می‌یابد.



شکل (۷-۹): اثر تغییرات چگالی هوا و تلفات کرونا؛ الف) تغییر تلفات بر حسب ولتاژ خط در چگالی‌های مختلف هوا، ب) تغییر چگالی هوا بر حسب ارتفاع از سطح دریا

ب) وضع بارش، گرد و خاک، بارش برف، تگرگ، و ...: در شرایط جوّی بارانی و مه، وقتی که ذرّات آب برای مدّتی روی سطح هادی به‌صورت قطرات می‌نشینند، نقاط برجسته‌ای روی سطح تشکیل می‌شود که باعث ایجاد ناهمواری شده، شدّت میدان در آن نقاط تشدید می‌شود؛ بنابراین، در شروع بارندگی که قسمت‌هایی از هادی خشک است این قطرات موجب ناهمواری زیاد سطح و بالا رفتن تلفات کرونا می‌شود. ولی بعد از مرطوب شدن تمام سطح، قطرات آب، سریعاً روی هادی می‌لغزند و جریان می‌یابند و فقط ناهمواری‌ها روی قسمت پایینی سطح هادی که قطرات به زمین می‌افتند، وجود دارد. بنابراین، بیشترین تلفات کرونا طی ریزش نم نم باران مشاهده می‌شود. شدّت باران و ابعاد قطرات، اثر زیادی روی مقدار تلفات می‌گذارند. این اثرات مخصوصاً برای هادی‌های با قطر بزرگ‌تر، نسبت به هادی‌های با قطر کوچک، بیشتر خواهد بود؛ زیرا در هادی‌های با قطر کوچک، شعاع قطرات باران ممکن است خیلی کوچک نباشند که بتوانند روی سطح بنشینند. ذرّات گرد و غبار هم مشابه با دلایل ارائه شده در مورد قطرات باران، می‌تواند باعث ایجاد تلفات

کرونا شوند.

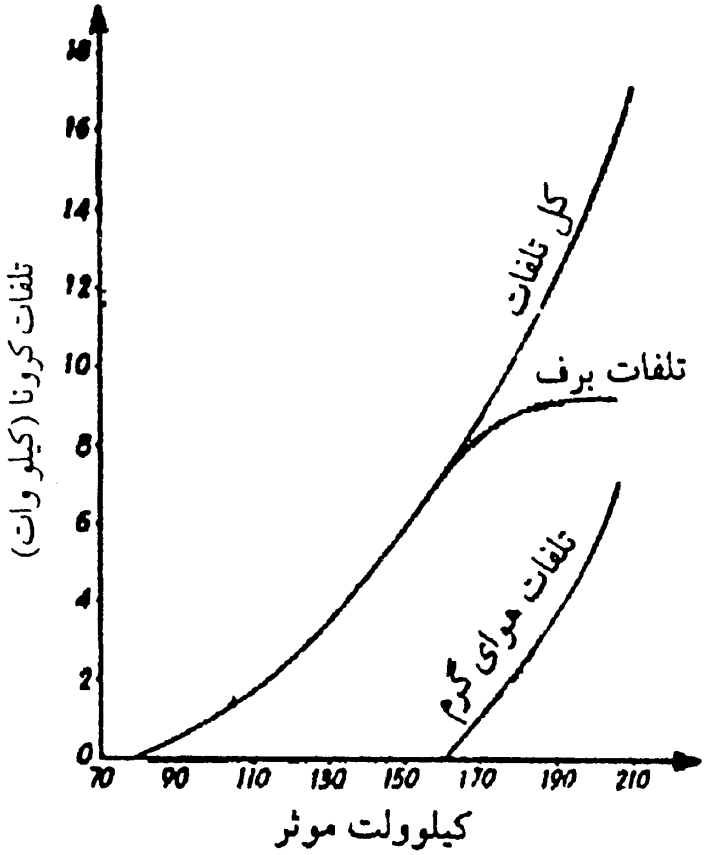
۷-۷-۴- عوامل مربوط به هادی

الف) قطر هادی: با افزایش قطر هادی، شدّت میدان الکتریکی در سطح هادی کاهش می‌یابد که منجر به کاهش تلفات کرونا می‌شود. البتّه اثر ناصافی سطح هادی، نسبت به قطر هادی، تأثیر بیشتری در افزایش شدّت میدان دارد. بنابراین، احتمال افزایش تلفات کرونا با افزایش اندازهٔ هادی، مستقیماً با شرایط سطحی هادی مرتبط است.

ب) تعداد هادی‌های در هر فاز: با افزایش تعداد هادی‌های هر فاز (خطوط باندل)، شدّت میدان الکتریکی روی هر سیم، کاهش می‌یابد. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که با افزایش هادی‌های هر فاز، سطح مقطع جانبی هادی‌ها نسبت به استفاده از یک هادی (با همان سطح مقطع سیم)، بیشتر می‌شود. بنابراین، چگالی بار سطحی و در نتیجه، شدّت میدان روی سطح هادی، کاهش می‌یابد. بالطبع، کرونا و تلفات آن به‌مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

ج) شرایط سطحی هادی‌ها: هادی‌ها در شرایط جوّی، بدون پوشش هستند و در نتیجه، سطح هادی، خاک و آلودگی را روی خود نگه می‌دارد. ناهمواری‌های سطح هادی، دلیل اصلی زود رسیدن به ولتاژ شکست بحرانی خواهند بود. با ایجاد تخلیه‌های الکتریکی در هوا (که یک گازی ترکیبی از O_2 و N_2 است)، گازی به‌نام ازن (O_3) و اکسیدهای نیتروژن تولید می‌شود. این گازها، عناصری بی‌ثباتند و به‌راحتی قادر به اکسیداسیون عناصر هستند و اکسیژن از سطح هادی جدا می‌کنند. در مراحل اکسیداسیون هادی، ازن، اصلی‌ترین عامل است که از تخلیهٔ الکتریکی کرونا ناشی می‌شود. با انجام تخلیهٔ جزئی کرونا و اکسیداسیون، ناهمواری‌های تیز روی سطح، به‌تدریج صاف شده و ناپدید می‌شوند تا این که سطح هموار شده و تلفات کرونا کاهش یابد. کاهش تلفات کرونای ناشی از شرایط جوّی در شکل (۷-۱۰) نشان داده شده است.

د) گرمای هادی بر اثر جریان بار: گرم شدن هادی بر اثر جریان بار، اثر غیرمستقیمی در کاهش تلفات کرونا دارد. بدون چنین گرمایی، دمای هادی، کمی پایین‌تر از دمای هوای مجاورش خواهد بود. در غیاب گرمای هادی‌ها، قطرات کوچک شبنم روی سطح هادی در هوای مه‌آلود یا در زمان‌های رطوبت زیاد هوا، جمع خواهند شد که این موضوع، تلفات کرونا را افزایش خواهد داد (شکل ۷-۱۰ را ببینید). گرمای حاصل از جریان بار، از جمع شدن این قطرات شبنم روی سطح هادی ممانعت می‌کند. در زمان بارندگی، حرارت هادی تأثیری روی تلفات کرونا ندارد امّا بعد از بارش، این حرارت، خشک شدن سطح هادی را سرعت می‌بخشد. در صورتی‌که قطرات آب باقی‌ماندهٔ روی سطح، به‌سرعت کاهش یابد، تلفات کرونا هم کاهش می‌یابد.



شکل (۷-۱۰): تغییرات تلفات کرونا بر حسب ولتاژ هادی

۷-۸- روش عملی کاهش تلفات کرونا

تلفات کرونا بازده خطّ انتقال را کاهش می‌دهد. تلفات کرونای خیلی زیاد در شرایط بد آب و هوایی، باید به طریقی کاهش داده شوند. مطلوب‌ترین روش کاهش تلفات کرونا، افزایش قطر هادی‌ها برای کاهش ولتاژ بحرانی شکست (V_d) است؛ زیرا اثر آن از سایر عوامل دیگر، خیلی بیشتر است. معمولاً باید خطوط انتقال را طوری طرّاحی کرد که ولتاژ بحرانی شکست در شرایط جوّی عادی خط، ۱۰٪ بالاتر از ولتاژ نامی خط(ولتاژ فازی) باشد تا در هنگام شرایط بد جوّی، مقدار تلفات کرونا در حدّ پایین و رضایت‌بخش باشد. تلفات کرونا تحت شرایط خوب آب و هوایی نباید از ۰/۶kW/km بیشتر باشد.

اگر $m_0 = ۰/۸$ و $\delta = ۱$ و در خطوط انتقال با ولتاژ بالا، $\ln \frac{d}{r} = ۶$ باشد، در این صورت:

$$V_d = ۲۱/۲۱ \times ۰/۸ \times ۱ \times ۶ \times r \cong ۱۰۱ r$$

اگر $V_d = ۱/۱ V_{ph}$ باشد آن‌گاه،

$$۱/۱ \; V_{ph} = ۱۰۱ r \;\Rightarrow\; r \cong ۰/۰۱ \; V_{ph}$$

مثلاً برای یک خطّ انتقال ۴۰۰kV خواهیم داشت:

$$r = ۰/۰۱ \times \frac{۴۰۰}{\sqrt{۳}} = ۲/۳\text{cm} = ۲۳\text{mm} \Rightarrow \text{سطح مقطع هادی } A = ۱۶۷۵\text{mm}^۲$$

اگر خطّی به طور اقتصادی طرّاحی شده باشد، ولتاژ V_{ph} آن نزدیک به ولتاژ بحرانی شکست است؛ بنابراین، قطر هادی با این محاسبه برای ولتاژهای خیلی بالا، بسیار بزرگ است که چنین هادی‌هایی عملاً ساخته نمی‌شوند، زیرا نمی‌توانند قابلیّت انعطاف داشته باشند و در نتیجه، خیلی سنگین می‌شوند. در این حالت‌ها، بهترین راه حل برای کاهش تلفات کرونا استفاده از خطوط باندل است که در این روش، شعاع مؤثّر هر فاز را افزایش می‌دهد و در نتیجه، تلفات کرونا به‌مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

۷-۹- مزایا و معایب کرونا

مزیّت کرونا این است که هنگام بروز صاعقه‌های با ولتاژ بالا به خط، مانند یک شیر اطمینان عمل می‌کند و اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه به‌صورت تلفات کرونا از بین می‌رود. بنابراین، اغلب، ولتاژ خط را طوری طرّاحی می‌کنند که به ولتاژ بحرانی شکست نزدیک باشد.

از معایب کرونا، ایجاد تلفات روی خط، هر چند که مقدار آن کم و بی‌اهمّیت است، می‌باشد. همچنین در خطّ انتقال، یک جریان غیرسینوسی ایجاد می‌شود که باعث افت ولتاژ غیرسینوسی روی خط شده و در نتیجه، هارمونیک‌های سوّم و بالاتر با دامنهٔ بالا را تولید می‌کند که روی مدارهای مخابراتی نزدیک خط، پارازیت رادیویی ایجاد می‌کند.

تخلیه‌های الکتریکی کرونا، پرتوهایی را که در آوردن سیگنال‌های رادیویی در کانال‌های ارتباطی گیرنده‌های رادیو و تلویزیون مناسب‌اند، منتشر می‌کنند، این موضوع، به تداخل رادیویی معروف است. اساساً تخلیهٔ الکتریکی در فاصلهٔ هوای بین دو الکترود که ولتاژ این دو الکترود از حدّ مشخّصی تجاوز کرده باشد، به‌شکل واضحی نمایان می‌شود. تخلیه‌های الکتریکی منفی، کم‌تر برای امواج رادیویی مزاحم هستند. تداخل رادیویی فقط به عامل مسبب آن وابسته نیست و همچنین به نوع گیرندهٔ رادیویی و نوع گیرندهٔ موج (آنتن) بستگی دارد. تحقیقات به‌عمل آمده، اثرات زیر را در تداخل رادیویی بیان می‌کند:

۱- وقتی که ولتاژ به‌تدریج افزایش می‌یابد، قبل از آنکه در تلفات کرونا اثر محسوسی داشته باشد، در اغتشاشات میدان نمایان می‌شود. امّا پس از افزایش شدید ولتاژ، اغتشاشات میدان بسیار کم‌تر از تلفات کرونا، افزایش پیدا می‌کند؛

۲- اغتشاشات میدان با افزایش فاصلهٔ هادی‌ها کم می‌شود. همچنین نوسانات منتقل شده از اغتشاش میدان، در عملکرد سه فاز مستقل از نوع خط و ولتاژ آن است؛

۳- اندازهٔ میدان اغتشاشات، ارتباط معکوسی با میزان فرکانس در نقطهٔ تداخل امواج رادیویی دارد؛

۴- اغتشاشات میدان خیلی کم‌تر از تلفات کرونا، به شرایط سطحی و نوع هادی (تکی یا گروهی) وابسته می‌باشد. به‌علاوه، اغتشاشات میدان در یک هوای صاف و تمیز نسبت به یک هوای آلوده، پایین‌تر است.

تداخل امواج رادیویی بر حسب ولتاژ تداخل رادیویی (RIV[1]) به‌وسیلهٔ دستگاه اندازه‌گیری نویز رادیویی استودارت[2] اندازه‌گیری می‌شود. این مقدار اندازه‌گیری به‌وسیلهٔ رابطهٔ زیر مشخّص می‌گردد:

$$\frac{\text{مقدار اندازه‌گیری شده } RIV}{\text{پهنای باند در واحد KHz}} = \text{پهنای باند KHz}$$

محافظت در مقابل تداخل رادیویی به ناحیه‌ای که خط در آن ساخته شده است، وابسته می‌باشد. تداخل رادیویی یکی از موضوعات مهم، حتّی مهم‌تر از تلفات کرونا در تعیین کردن محدودیت‌های بهره‌برداری از یک خطّ انتقال می‌باشد. همچنین تداخل رادیویی در کرونای ایجاد شده، روی سطح مقره‌ها نیز، بروز می‌کند.

1- *Radio Influence Voltage*

2- *Stoddart*

فصل هشتم

تولید ولتاژهای فشار قوی

۸-۱- مقدّمه

اصولاً استقامت الکتریکی تجهیزات عایقی، باید خیلی بیشتر از ولتاژ نامی مورد استفادهٔ آن‌ها باشد. در واقع عایق‌ها باید از یک ضریب اطمینان بالایی برخوردار باشند تا در برابر اضافه ولتاژهای احتمالی، دچار شکست الکتریکی نشوند. این ضریب اطمینان را می‌توان به‌صورت زیر معرّفی کرد:

$$\text{ضریب اطمینان} = \frac{\text{ولتاژ شکست عایق}}{\text{ولتاژ نامی عایق}}$$

اضافه ولتاژهای مورد نظر به هنگام بروز اتّصال کوتاه در شبکه، سوئیچینگ و اصابت رعد و برق به‌وجود می‌آید. به این منظور باید ولتاژهای بالاتر از ولتاژهای نامی عایق‌ها، در آزمایشگاه‌های فشار قوی تولید شوند تا به‌وسیلهٔ آن‌ها بتوان تجهیزات عایقی مانند: کلیدهای فشار قوی، ترانسفورماتورها، کابل‌ها، بوشینگ‌ها، مقره‌ها و غیره را در برابر اضافه ولتاژها آزمایش نموده و ولتاژ شکست آن‌ها را تعیین نمود. با این آزمایش‌ها، طرّاحی و کیفیت تجهیزات الکتریکی و عایق‌ها مورد تأیید یا رد قرار می‌گیرند. در آزمایشگاه‌ها معمولاً سه نوع ولتاژ فشار قوی برای آزمایش‌های مختلف و انجام مطالعات تحقیقاتی برای بررسی رفتار عایق‌ها در برابر ولتاژهای فشار قوی مختلف تولید می‌شود:

۱- **ولتاژ فشار قوی DC**،

۲- **ولتاژ فشار قوی AC**: این ولتاژ معمولاً با فرکانس‌های کاربردی در صنعت

تولید می‌شود. البته برای کاربردهای خاصّی از جمله در آزمایش‌های ترانسفورماتورها (برای دیرتر به اشباع رفتن هسته)، ولتاژهای فشار قوی با فرکانس‌های بالا تولید می‌شود؛ ولی عموماً عایق‌ها را با ولتاژهای AC با فرکانس صنعتی آزمایش می‌کنند؛

۳- ولتاژ فشار قوی ضربه‌ای: موج ولتاژ ضربه‌ای صاعقه و موج ضربه‌ای ناشی از سوئیچینگ و اتّصال کوتاه، طبق مشخّصات مقرر شده در استانداردهای بین‌المللی تولید می‌شود. طبق این استانداردها توصیه می‌شود که تجهیزات مورد استفاده در ولتاژهای بالاتر از ۳۰۰kV، با ولتاژهای ضربه‌ای از نوع سوئیچینگ آزمایش شوند. اگر چه شکل موج ضربه‌ای سوئیچینگ در حالت‌های مختلف، متفاوت است ولی تجربه نشان داده است که پایین‌ترین استقامت الکتریکی در حالتی است که زمان رسیدن موج به مقدار حدّاکثر خود، بین ۱۰۰ تا ۳۰۰μsec باشد. از این‌رو، موج ضربه‌ای استاندارد سوئیچینگ، دارای زمان پیشانی ۲۵۰μsec و زمان پشت موج ۲۵۰۰μsec می‌باشد. مشخّصات مربوط به امواج ضربه در قسمت‌های بعدی توضیح داده خواهد شد.

۸-۲- کاربرد ولتاژ فشار قوی DC

از مهمترین کاربردهای ولتاژ فشار قوی DC، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- انجام کارهای تحقیقاتی و مطالعاتی روی عایق‌ها: برای مطالعهٔ رفتار عایق‌ها از ولتاژهای DC استفاده می‌کنند. اگر عایقی در برابر ولتاژهای فشار قوی DC، استقامت داشته باشد، آنگاه حتماً در برابر ولتاژهای فشار قوی AC نیز استقامت خواهد داشت.

۲- در فیزیک برای شتاب دهنده‌ها(مشابه شتاب دادن پروتون یا الکترون در تلویزیون): در میدان‌های الکتریکی قوی یکنواخت، به ذرّات الکتریکی نیروی زیادی وارد شده و شتاب می‌گیرند.

۳- در پزشکی برای تولید اشعه X.

۴- در صنایع برای فیلتر کردن دود خروجی نیروگاه‌های حرارتی و کارخانجات سیمان و پاشیدن رنگ: ذرّات آلوده در بین الکترودهای فلزی میدان الکتریکی به‌صورت ذرّات باردار درمی‌آیند و با سرعت به سمت الکترودهای مذکور جذب می‌شوند. این الکترودها در مسیر دودکش خروجی نصب می‌گردند و بدین وسیله، از

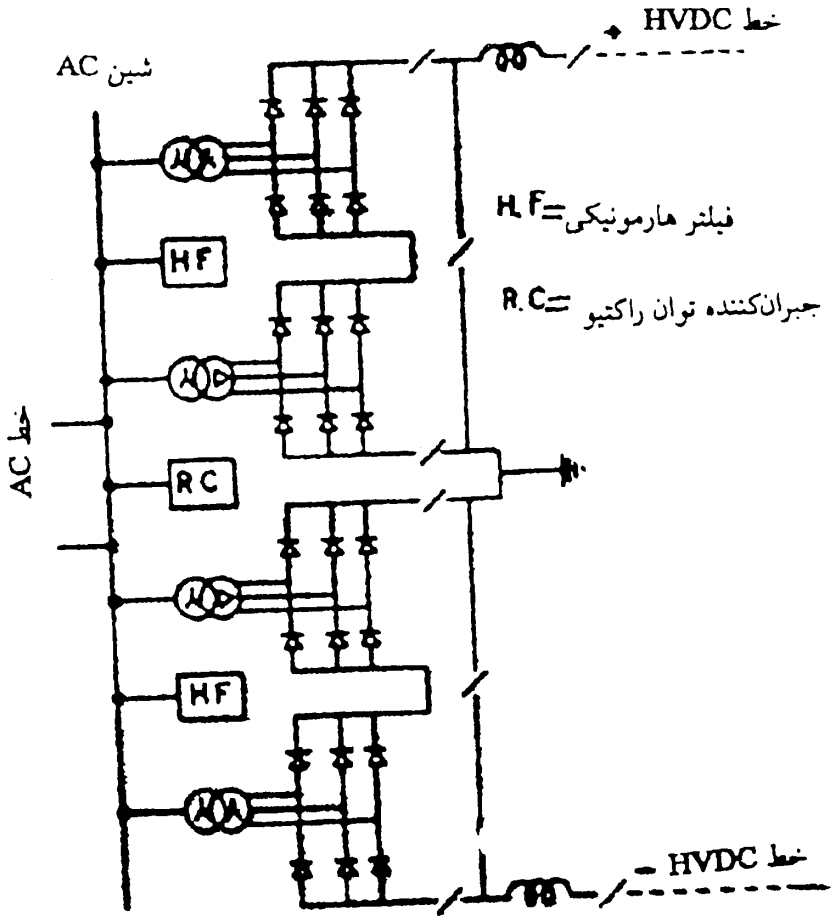
ورود ذرّات آلوده به هوای آزاد جلوگیری می‌شود. در رنگ‌آمیزی الکترواستاتیکی نیز ذرّات رنگ به‌صورت ذرّات باردار، با سرعت روی سطح مورد نظر پاشیده می‌شوند. از ویژگی‌های این نوع رنگ‌آمیزی، یکنواختی ضخامت رنگ در تمام نقاط سطوح و قابلیت تنظیم ضخامت رنگ روی سطح مورد نظر است.

۵- در مخابرات برای ایستگاه‌های پخش تلویزیونی.

۶- برای آزمایش کابل‌های فشار قوی AC با طول زیاد: اگر کابل‌های فشار قوی AC را بخواهیم با ولتاژهای بالای AC آزمایش کنیم، به علّت ظرفیت خازنی نسبتاً بالای کابل‌های با طول زیاد، جریان زیادی نیاز می‌باشد. همچنین تخلیه‌های مکرر در حفره‌های داخلی احتمالی، باعث کاهش درجهٔ عایقی آن‌ها می‌شود. بنابراین، آزمایش آن‌ها با ولتاژ DC مناسب‌تر است. اگر چه در این آزمایش‌ها از نظر شرایط کاری، کابلی که با ولتاژ AC کار می‌کند متفاوت می‌باشد، ولی اعتبار آن از دیدگاه تجربی پذیرفته می‌شود؛ زیرا هدف از این کار، بررسی توزیع شدّت میدان درون عایق می‌باشد.

۷- برای آزمایش تجهیزات مورد استفاده در خطوط انتقال HVDC: در خطوط انتقال HVDC، نیاز به جریان‌های خیلی زیادی است. از سال ۱۹۷۰ به بعد، تریستورهای فشار قوی با تحمّل ولتاژ بالاتری ساخته شده است که در یکسوکننده‌های خطوط مورد نظر به‌کار می‌رود. در سال ۱۹۷۲، تریستورهای تا قدرت ۷۰kW و در سال ۱۹۸۳ با قدرت ۱۰۰۰kw ساخته شده است. در خطوط انتقال HVDC، عموماً از یکسوکننده‌های ۱۲ پالس[1] استفاده می‌شود تا اعوجاج ولتاژ خروجی بسیار کم باشد. شکل کلّی این مدارها به‌صورت شکل (۸-۱) می‌باشد. مقدار راکتورهای سری در حدود ۰/۴ تا 1H می‌باشد که برای کاهش هارمونیک‌های ولتاژ و جریان و محدود کردن جریان یکسوکننده‌ها در هنگام وقوع اتّصال کوتاه در خطّ انتقال HVDC به‌کار می‌رود. این خطوط، معمولاً به‌صورت دو سیمی استفاده می‌شود که یکی از آن‌ها مثبت و دیگری منفی می‌باشد و اصطلاحاً به‌نام خطوط DC دوقطبی معروف است. در این روش، ولتاژ خط به خط، دو برابر ولتاژ خط به زمین است. تجهیزات عایقی خطوط مذکور، با ولتاژ DC آزمایش می‌شوند.

1- Pulse



شکل (۸-۱): سیستم یکسوساز در خطوط HVDC

۸-۲-۱- مزایای استفاده از خطوط HVDC

استفاده از خطوط HVDC مزایای زیر را به‌همراه خواهد داشت:

۱- در خطوط HVDC فقط به دو هادی نیاز است که یکی با ولتاژ مثبت نسبت به زمین و دیگری با ولتاژ منفی نسبت به زمین است؛ ولی در خطوط HVAC حدّاقل به سه هادی نیاز است. میزان قدرت و جریان انتقالی در خطوط AC و DC به‌شکل زیر تعیین می‌شوند:

$$P_{AC} = \sqrt{۳} V I_{AC} \cos \phi$$

$$I_{AC} = \frac{P_{AC}}{\sqrt{۳} V \cos \phi} \qquad (۱-۸)$$

$$P_{DC} = ۲ V I_{DC}$$

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{۲V} \qquad (۲-۸)$$

قابلیّت اعتماد در خطوط HVDC بیشتر از خطوط HVAC است؛ زیرا با وقوع خطا، در یکی از دو هادی خط، هنوز هم می‌توان قدرت انتقالی را بدون هیچ‌گونه مشکلی از طریق هادی دیگر منتقل نمود. همچنین خطّ HVDC نیاز به فضای کم‌تری نسبت به خطّ HVAC مشابه دارد و در نتیجه نیاز به پایه‌های کوچکتری است. بنابراین، هزینهٔ نصب خطوط هم کاهش می‌یابد.

۲- خطوط HVDC به عایق‌بندی کم‌تری نسبت به HVAC نیاز دارند، زیرا:

$$\text{حدّاکثر دامنهٔ ولتاژ هر سیم در سیستم AC} = \frac{\sqrt{۲}}{\sqrt{۳}} V_{L-L} = ۰/۸ V_{L-L} \qquad (۳-۸)$$

$$\text{حدّاکثر ولتاژ هر سیم در سیستم DC} = \frac{۱}{۲} V_{L-L} = ۰/۵ V_{L-L} \qquad (۴-۸)$$

بنابراین، تلفات کرونا و تداخل رادیویی در HVDC کم‌تر از HVAC است. به‌همین دلیل کابل‌های DC ارزان‌تر از کابل‌های AC می‌باشد.

۳- مسئلهٔ حفظ سنکرونیزم بین دو سیستم AC که به‌وسیلهٔ یک خطّ HVDC به هم متّصل شده‌اند، وجود ندارد. همچنین نیازی به یکسان بودن فرکانس‌های دو شبکهٔ AC که با خطّ DC متّصل شده‌اند، نمی‌باشد.

۴- قدرت انتقالی از یک خطّ DC را می‌توان به راحتی توسّط تریستورهای یکسوکنندهٔ آن کنترل نمود و در یک مقدار معیّن، ثابت نگه داشت.

۵- اگر در یکی از دو شبکهٔ AC که با یک خطّ DC به هم متّصل شده‌اند، اتّصال کوتاهی رخ دهد، جریان اتّصال کوتاه به شبکهٔ دیگر منتقل نمی‌شود؛ زیرا عموماً جریان اتصال کوتاه، یک جریان رأکتیو است که در سیستم DC، جریان راکتیو منتقل نمی‌شود ($\cos\phi = ۱$).

۶- تلفات خطوط HVDC کم‌تر از خطوط HVAC است؛ زیرا اوّلاً $R_{dc} < R_{ac}$ است. ثانیاً جریان راکتیو در خطوط DC وجود ندارد.

۷- در خطوط HVAC، قدرت انتقالی برابر $P = \frac{V_۱ V_۲}{X} \sin\delta$ است که به‌سبب حالت‌های گذرای موجود در این خطوط، باید زاویهٔ δ در شرایط عادی کم‌تر از ۳۰ درجه باشد. بنابراین، در خطوط AC با محدودیت‌هایی در طول خط و قدرت

انتقالی مواجه هستیم که برای رفع این مشکل، از خازن‌های سری استفاده می‌شود. امّا در خطوط HVDC محدودیت پایداری وجود نخواهد داشت.

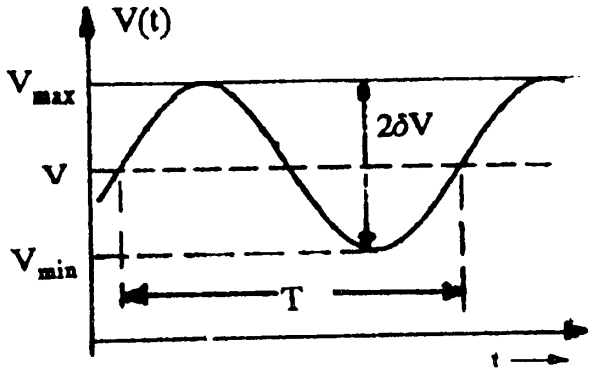
لازم به‌ذکر است که هزینهٔ خطوط HVDC ، به دلیل هزینهٔ بالای مبدل‌های AC/DC و DC/AC بسیار زیاد است، ولی برای خطوط طولانی بین ۶۰۰-۹۰۰km و قدرت‌های بیش از ۱۰۰۰MW، هزینه‌های خطوط DC کم‌تر از خطوط AC خواهد بود. این موضوع برای کابل‌های DC با ارقام کم‌تری مواجه است، به‌طوری که برای فاصله‌های بیش از ۵۰-۱۰۰km اقتصادی‌تر است. یک نمونه از خطّ HVDC، بین ایالت اورگان و لوس‌آنجلس در کشور آمریکا به‌طول ۱۳۷۰km و ولتاژ ۸۰۰kV به‌کار برده شده است که قدرت انتقالی آن، ۱۴۴۰MW می‌باشد.

۸-۳- تعریف ولتاژ DC

طبق استاندارد IEEE و IEC مقدار DC یک ولتاژ به‌صورت متوسّط آن تعریف می‌شود (شکل ۸-۲ را ببینید). بنابراین، برای یک ولتاژ متناوب $V(t)$ با دوره تناوب T، مقدار DC آن برابر است با:

$$\bar{V} = \frac{1}{T}\int_{0}^{T} V(t)\,dt \qquad (۸-۵)$$

اگر ولتاژ $V(t)$ به یک عایق اعمال گردد، مرتّباً مقدار آن حول مقدار متوسّط $\bar{V}$ نوسان می‌کند؛ یعنی این موج دارای یک اعوجاج با دامنهٔ δV است که:



شکل (۸-۲): نوسانات در ولتاژ DC

$$\delta V = \frac{V_{max} - V_{min}}{۲} \qquad (۶-۸)$$

ضریب اعوجاج موج $V(t)$ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{ضریب اعوجاج} = \frac{\delta V}{\bar{V}} \qquad (۷-۸)$$

برای ولتاژهای DC فشار قوی، ضریب اعوجاج نباید از مقدار ۵٪ بیشتر باشد.

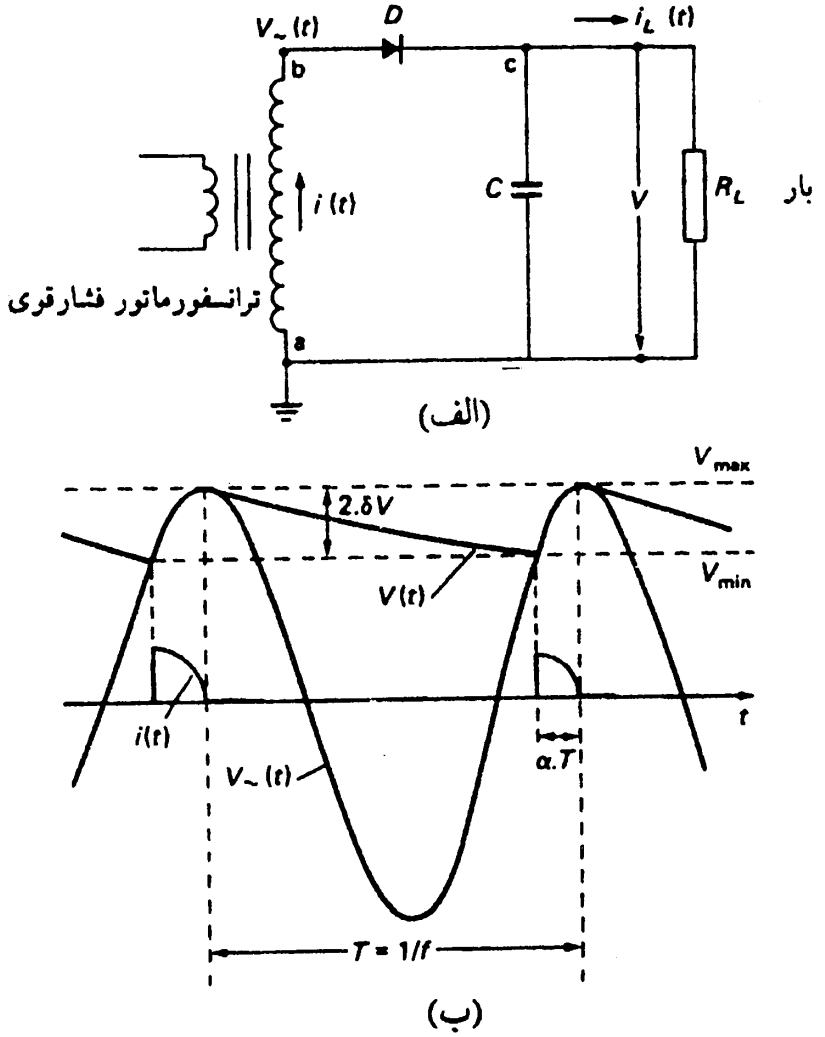
۸-۴- تولید ولتاژ فشار قوی DC

علاوه بر کاربردهای تحقیقاتی که برای این گونه ولتاژها ذکر شده است، از ولتاژهای DC در آزمایشگاه عایق‌های وسایل و تجهیزات فشار قوی به ویژه کابل‌ها و خازن‌ها استفاده می‌شود. چنان‌که بعداً خواهیم دید در تولید ولتاژهای ضربه‌ای فشار قوی هم از مولّدهای DC با ولتاژ زیاد استفاده می‌شود. یکی از روش‌های تولید ولتاژهای DC، استفاده از یکسوکننده‌های نیم‌موج یا تمام‌موج است. البته ولتاژ DC تولید شده توسّط یکسوکننده‌ها، همواره از مقدار حدّاکثر ولتاژ AC تغذیه کنندهٔ آن‌ها کم‌تر است. برای تولید ولتاژ DC بالاتر، از مدارهای چند برابرکنندهٔ ولتاژ DC استفاده می‌شود. در ادامه به تشریح تولید ولتاژهای فشار قوی DC خواهیم پرداخت.

۸-۴-۱- یکسوساز نیم‌موج

ولتاژهای فشار قوی DC عموماً از یکسوسازی ولتاژهای فشار قوی AC تولید می‌شوند. ساده‌ترین مدار یکسوساز، مدار یکسوساز نیم‌موج است که از یک دیود و خازن تشکیل شده است (مطابق با شکل ۸-۳-الف). اگر از راکتانس پراکندگی ترانسفورماتور و امپدانس داخلی دیود در طول هدایت آن صرف‌نظر کنیم، وقتی که دیود D هدایت می‌کند، خازن تا ولتاژ $+V_{max}$ از ولتاژ $V_{\sim}(t)$ ترانسفورماتور شارژ می‌شود. اگر مقاومت بار، بی‌نهایت باشد $(R_L \to \infty)$، ولتاژ DC که در دو سر خازن قرار می‌گیرد، در مقدار $+V_{max}$ ثابت می‌ماند. در این مدار، باید دیود D، تحمّل ولتاژ معکوس $۲V_{max}$ را داشته باشد.

اگر مدار از طریق R_L بارگیری شود، ولتاژ V ثابت نمی‌ماند و طی دورهٔ T، مقدار



شکل (۸-۳): یکسوکنندهٔ تک فاز نیم‌موج

الف) شکل مدار؛ ب) منحنی ولتاژها و جریان‌ها در بار R_L

بار Q به R_L منتقل می‌شود.

$$Q = \int_T i_L(t)\cdot dt = \int_T \frac{V(t)}{R_L}dt = I\cdot T = \frac{I}{f} \qquad (۸-۸)$$

که I مقدار متوسّط جریان DC (متوسّط جریان $i_L(t)$) و $V(t)$ ولتاژ DC دو سر بار که طبق شکل (۸-۳-ب) دارای اعوجاج است، می‌باشد. این مقدار بار Q طی مدّت زمان αT (که دیود D هدایت می‌کند) به بار منتقل می‌شود. پس:

$$Q = \int_{\alpha T} i(t)\cdot dt = \int_T i_L(t)\cdot dt \qquad (۸-۹)$$

جریان $i(t)$، جریان ثانویّهٔ ترانسفورماتور است. چون $\alpha T<T$ است، بنابراین، دامنهٔ

جریان $i(t)$ بزرگ‌تر از جریان $i_L(t)$ است. دامنهٔ اعوجاج δV را می‌توان دقیقاً در دورهٔ تخلیهٔ $T\text{-}\alpha T$ محاسبه نمود. برای مدار موجود و با صرف‌نظر کردن از افت ولتاژ دو سر ترانسفورماتور و دیود و با فرض $\alpha \cong ۰$ خواهیم داشت:

$$Q = ۲ \times \delta V \cdot C = I \cdot T \qquad (۱۰-۸)$$

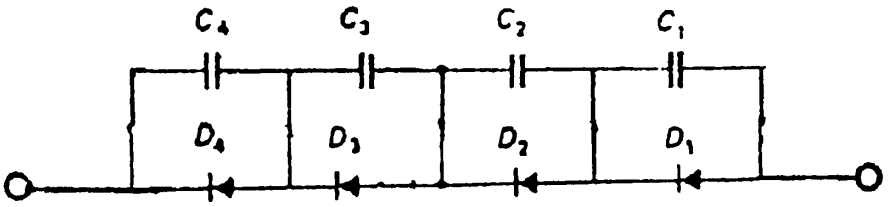
$$\delta V = \frac{I \cdot T}{۲C} = \frac{I}{۲fC} \qquad (۱۱-۸)$$

این رابطه، ارتباط بین ضریب اعوجاج، جریان بار و پارامترهای مدار (f و C) را نشان می‌دهد. حاصل‌ضرب $f.C$ در طرّاحی این مدار بسیار مهم است.

برای عایق‌ها، مقدار R_L خیلی زیاد است. به‌همین دلیل، مقدار I بسیار کم است ولی در مدار آزمایش، در صورتی که عایق دچار شکست الکتریکی شود مقدار R_L به سمت صفر می‌رود و جریان I خیلی زیاد خواهد شد، که برای جلوگیری از خطرات بعدی، باید سیستم اتوماتیک سریعاً مدار اوّلیهٔ ترانسفورماتور را قطع کند یا یک مقاومت خیلی بزرگی را سریعاً در ثانویّهٔ مدار ترانسفورماتور قرار دهد. همچنین دیود D باید بتواند این جریان زیاد را برای چند لحظه تحمّل کند.

مدار مذکور در محدوده‌های مگاولت هم ساخته شده است. در ضمن، دیود یکسوکننده D از نوع سیلیکونی است تا جریان‌های بالا را تحمّل کند. با توجّه به این‌که بیشترین ولتاژ قابل تحمّل به‌صورت معکوس برای هر دیود حدّاکثر ۲/۵kV است، بنابراین، برای تولید ولتاژهای فشار قوی بالا، چندین دیود را با هم سری می‌کنند. در این حالت، ممکن است به دلیل این‌که مشخّصات دیودها از نظر ساختمان کاملاً یکسان نیستند، در نتیجه، توزیع ولتاژ روی آن‌ها به‌طور یکنواخت صورت نمی‌گیرد و ممکن است روی یکی از دیودها، ولتاژ بیش از حدّ تحمّل آن واقع شده و از بین برود و بالطبع بقیهٔ دیودها هم از بین خواهند رفت. برای رفع این مشکل مطابق با شکل (۸-۴)، به موازات هر دیود، یک خازن که ظرفیت آن خیلی کم‌تر از خازن C مدار یکسوساز است، قرار می‌دهند.

یک نمونه از این یکسوساز که برای یک مدار مولّد ولتاژ DC، ۱/۲MV ساخته شده است، دارای دیودهایی است که طول مجموع آن‌ها ۱۲m است. عیب مدار یکسوکننده نیم‌موج این است که ممکن است ترانسفورماتور در اثر کشیدن جریان



شکل (۸-۴): رفع مشکل دیودها با موازی کردن خازن‌ها

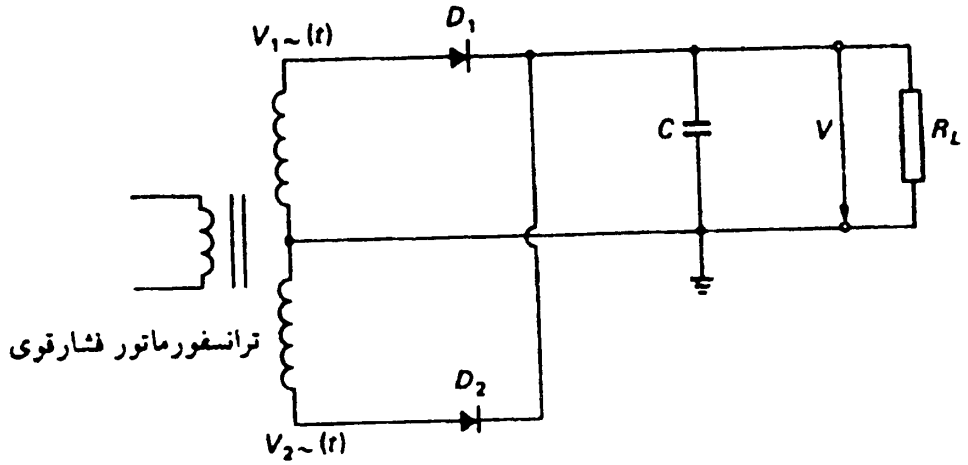
زیاد به حالت اشباع برسد (با توجّه به کوتاه بودن زمان روشن بودن دیود و انتقال بار Q از آن). برای غلبه بر این مشکل، می‌توان از مدار یکسوساز تمام‌موج استفاده نمود.

۸-۴-۲- یکسوساز تمام‌موج

مدار یکسوساز تمام‌موج مطابق شکل (۸-۵) است. در این مدار، دیودهای D_1 و D_2 هر کدام طی یک نیم‌سیکل، جریان را هدایت می‌کنند $(\frac{T}{2})$ و در نتیجه اعوجاج شکل موج، نسبت به روش یکسوساز نیم‌موج، نصف خواهد شد. در نتیجه، اعوجاج در این مدار برابر است با:

$$\delta V = \frac{I}{4fC} \qquad (۱۲-۸)$$

در صورتی که دامنهٔ ولتاژهای $V_1\sim(t)$ و $V_2\sim(t)$ دقیقاً مساوی هم نباشند، اعوجاج شکل موج، خیلی زیادتر خواهد شد. از این‌رو، عموماً از همان مدار یکسوساز نیم موج استفاده می‌شود.



شکل (۸-۵): مدار یکسوکنندهٔ تمام‌موج با خازن یکسوساز

۸-۴-۳- مدارهای چند برابر کنندهٔ ولتاژ DC

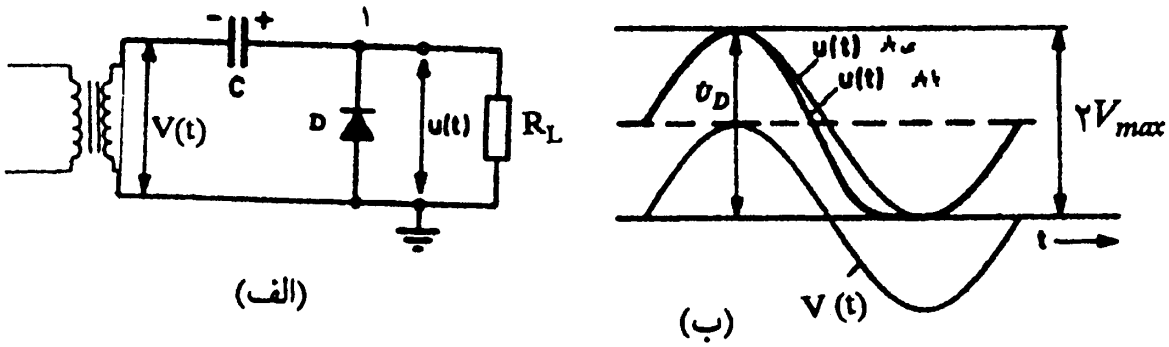
در مدار یکسوساز نیم‌موج و تمام‌موج، ولتاژ DC خروجی در بارگیری، کمی کم‌تر از مقدار حدّاکثر ولتاژ AC ترانسفورماتور است و از آن برای تولید ولتاژهای بالای DC حدّاکثر تا ۲۰۰kV استفاده می‌کنند. برای تولید ولتاژهای بالاتر از این مقدار، از چندبرابرکننده‌های ولتاژ استفاده می‌شود. اساس دستگاه‌های تولید فشار قوی DC با استفاده از چندبرابرکننده‌های ولتاژ، بر طبق مدار دوبرابرکنندهٔ ولتاژ ویلارد قرار دارد.

۸-۴-۳-۱- مدار ویلارد[1]

اساس این مدار مطابق شکل (۸-۶) می‌باشد. در نیم سیکل منفی، موج ولتاژ ثانویّهٔ ترانسفورماتور، خازن C را از طریق دیود D به‌مقدار V_{max} شارژ می‌کند.

$$V(t) = V_{max} \sin \omega t \qquad (۸-۱۳)$$

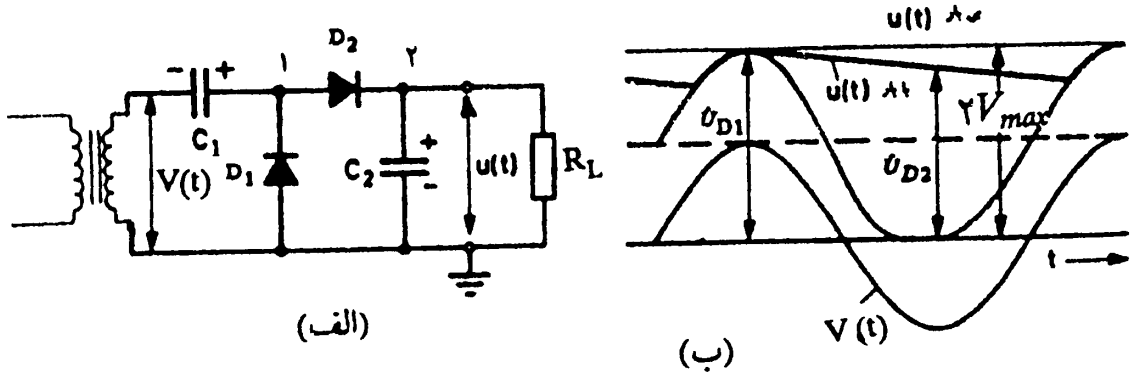
در نیم سیکل مثبت بعدی، موج ولتاژ $V(t)$ روی مقدار V_{max} قرار گرفته و ولتاژ نقطهٔ ۱ به دو برابر ولتاژ V_{max} خواهد رسید؛ ولی در نیم‌سیکل بعد از آن‌که دیود D دوباره جریان را هدایت می‌کند به صفر هم می‌رسد. بدین ترتیب یک دو برابر کنندهٔ ولتاژ به‌دست می‌آید که ولتاژ نقطهٔ ۱ ، موجی است که بین مقدار صفر تا $۲V_{max}$ تغییر



شکل (۸-۶): مدار ویلارد و تغییرات ولتاژ نقاط مشخّص

1- Villard

می‌کند. اگر مقاومت R_L بی‌نهایت باشد، در مقدار حدّاکثر منفی ولتاژ ثانویّهٔ ترانسفورماتور، ولتاژ خروجی به صفر می‌رسد و در غیر این‌صورت، زودتر به صفر می‌رسد. حال برای ثابت نگهداشتن ولتاژ دو سر بار یک یکسوکنندهٔ نیم‌موج در نقطهٔ ۱ قرار می‌دهیم. در حقیقت به جای ترانسفورماتور یکسوساز نیم‌موج، از یک مدار دو برابر کنندهٔ ولتاژ ویلارد استفاده می‌کنیم (مطابق با شکل ۸-۷). به این ترتیب، ولتاژ نقطهٔ ۲ به دو برابر مقدار V_{max} یعنی $۲V_{max}$ خواهد رسید. اگر بار R_L وجود نداشته باشد ($R_L=\infty$)، ولتاژ نقطهٔ ۲ ثابت و به‌مقدار $۲V_{max}$ خواهد بود. در این مدار، دیودهای $D_۱$ و $D_۲$ باید توانایی تحمّل ولتاژ معکوس $۲V_{max}$ را داشته باشد؛ زیرا ولتاژ نقطهٔ ۱ در زمانی به صفر می‌رسد، ولی ولتاژ نقطهٔ ۲ در $۲V_{max}$ ثابت خواهد ماند. این موضوع، برای دیود $D_۱$ هم صادق خواهد بود؛ زیرا با توجّه به زمین بودن پایین دیود، ولتاژ نقطهٔ ۱ تا $۲V_{max}$ هم خواهد رسید. اگر مقاومت بار R_L بی‌نهایت نباشد، ولتاژ خروجی دارای اعوجاج خواهد بود. همانند مدار یکسوساز نیم‌موج، اعوجاج برابر $\delta V=\frac{I}{۲fC_۲}$ می‌شود که I جریان DC بار است.



شکل (۸-۷): مدار ویلارد و نحوهٔ تغییرات ولتاژ نقاط ۱ و ۲ و ترانسفورماتور

۸-۴-۳-۲- مدار والتن[1]

در سال ۱۹۲۰، توسّط گراینا‌خر[2] مداری برای تولید ولتاژهای بالای DC ارائه شد،

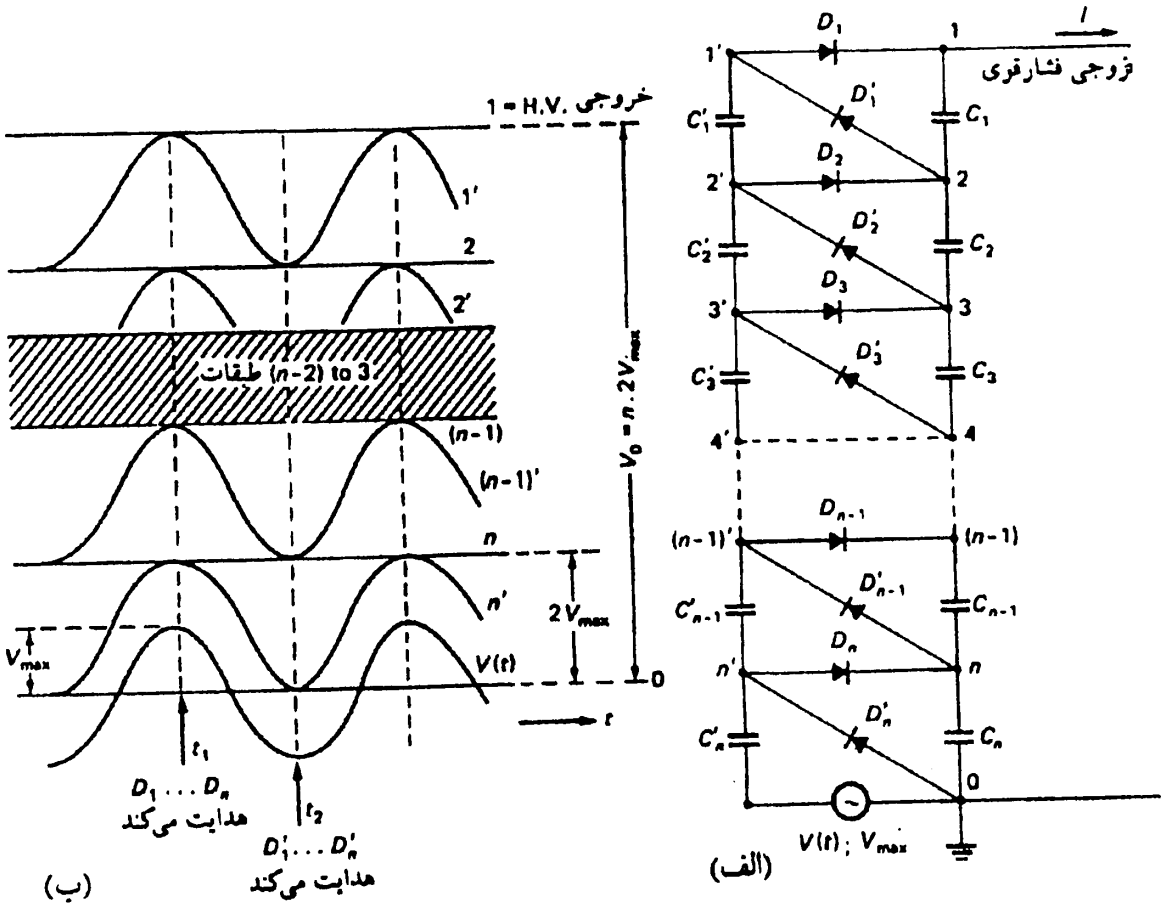
1- Walton
2- Greinacher

که در سال ۱۹۳۲، کوکرافت[1] و والتن آن را بهبود بخشیدند. این مدار که عملاً نوع گسترش یافته‌ای از مدار دو برابر کنندهٔ ولتاژ است در شکل (۸-۸-الف) نشان داده شده است که از آن می‌توان تا ولتاژهای ۴، ۶، ۸، ... و ۲n برابر را به‌دست آورد. چنان که از شکل (۸-۸) پیدا است، اوّلین پلّه مدار (قسمت $o\text{-}n\text{-}n'\text{-}V(t)$) همان مدار دو برابر کنندهٔ ولتاژ است. در این‌جا طرز کار مدار والتن را در دو حالت بی‌باری و بارداری بررسی می‌کنیم.

الف- حالت بی‌باری (حالتی که خروجی مدار باز و I=۰ است)

قسمت ($o\text{-}n'\text{-}V(t)$) عملاً یک دو برابر کنندهٔ ولتاژ است که در آن، با رسیدن $V(t)$ به $-V_{max}$ (در نیم سیکل دوم) خازن C_n' از طریق D_n' تا $+V_{max}$ شارژ می‌شود. اگر C_n تاکنون خالی باشد، با افزایش $V(t)$ دیود D_n هادی می‌شود و C_n شروع به شارژ می‌کند. با رسیدن $V(t)$ به $+V_{max}$ یعنی نیم سیکل سوّم، ولتاژ نقطهٔ n' تا $+۲V_{max}$ بالا می‌رود. از این لحظه به بعد، نقطهٔ n دارای پتانسیل ثابتی برابر $۲V_{max}$ خواهد بود. بنابراین، قسمت $n'\text{-}n\text{-}o$ نیز یک یکسوکنندهٔ نیم‌موج است که ولتاژ منبع آن، ولتاژ دو سر دیود D'_n می‌باشد. جریان شارژ خازن C_n توسّط $V(t)$ و از طریق خازن C'_n و دیود D_n تأمین می‌شود. در این حال، دیود D'_n قطع است. در دورهٔ بعدی، ولتاژ n' تا صفر تنزّل می‌کند؛ لیکن ولتاژ نقطهٔ n همچنان در $+۲V_{max}$ ثابت باقی مانده و در ضمن، خازن $C'_{n-۱}$ از طریق $D'_{n-۱}$ شارژ و ولتاژ آن به $+۲V_{max}$ می‌رسد. بنابراین، با نوسان بعدی $V(t)$ از $-V_{max}$ تا $+V_{max}$، دیود $D_{n-۱}$ نیز هادی شده و خازن $C_{n-۱}$ نسبت به C_n به‌مقدار $۲V_{max}$ شارژ می‌شود. در این حال نقطهٔ $(n\text{-}۱)$ نسبت به زمین دارای ولتاژی برابر $۴V_{max}$ است. در شکل (۸-۸-ب) پتانسیل‌های دائمی نقاط مختلف مدار در حالت بی‌باری نشان داده شده است. چنان‌چه از شکل مذکور مشخّص است، در حالت بی‌باری، پتانسیل نقاط

1- Cockroft



شکل (۸-۸): مدار چند برابر کنندهٔ والتن و تغییرات ولتاژ نقاط مختلف

($۱', ۲', \ldots, n'$) با نوسان $V(t)$، نوسان می‌کند؛ لیکن پتانسیل نقاط ($۱, ۲, \ldots, n$) نسبت به زمین ثابت می‌ماند. ولتاژ دو سر تمام خازن‌ها از نوع DC است و در هر پلّه برابر $۲V_{max}$ می‌باشد؛ البته به‌جز خازن C'_n که ولتاژ دو سر آن V_{max} است. در نتیجه، ولتاژ فشار قوی خروجی از این مدار به‌مقدار حدّاکثر $۲nV_{max}$ خواهد رسید.

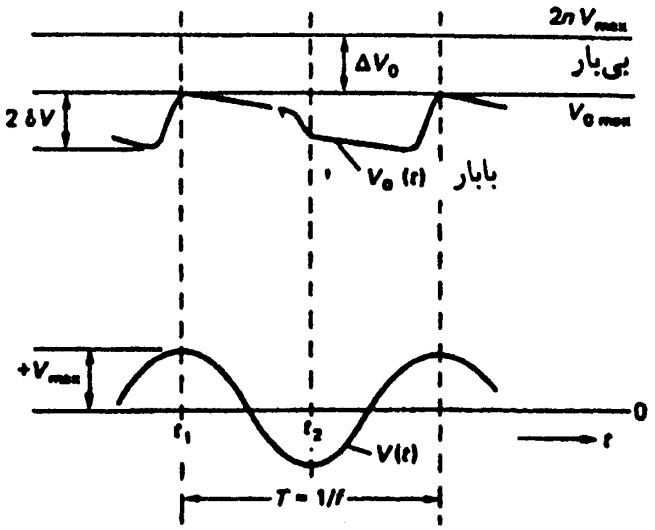
هر کدام از دیودهای $D_۱$ ، $D'_۱$ ، $D_۲$ ، $D'_۲$ ، ... ، D_n و D'_n باید تحمّل ولتاژ معکوس $۲V_{max}$ را داشته باشند. بنابراین، با اتّصال چند پلّه مطابق روش فوق، می‌توان ولتاژهای بسیار زیادی به‌دست آورد. البته تعداد پلّه‌ها تا حدّ زیادی بسته به جریان بار، محدود می‌شود. این محدودیت حتّی با فرض ایده‌آل بودن دیودها، خازن‌ها و منبع تغذیهٔ AC وجود دارد و باید با محاسبه، تعیین شود. ولتاژ ورودی می‌تواند غیرسینوسی باشد و هر شکل موج متقارن با پیک‌های مثبت و منفی برابر را

می‌توان مورد استفاده قرار داد. به‌همین جهت در بسیاری موارد، از فرکانس‌های بالا استفاده می‌شود که آن را در حالت بارداری توضیح خواهیم داد.

ب- حالت بارداری $I>0$

در هنگامی که مولّد، باری را با جریان I تغذیه می‌کند، هرگز ولتاژ خروجی به $2nV_{max}$ نخواهد رسید. علاوه بر این، ولتاژ خروجی دارای اعوجاج نیز خواهد بود. بنابر این لازم است دو کمیّت افت ولتاژ ΔV_0 و دامنهٔ اعوجاج $2\delta V$ را مورد بررسی قرار دهیم. شکل (۸-۹) شمای ولتاژ خروجی و مقادیر ΔV_0 و $2\delta V$ را نشان می‌دهد.

در این شکل، زمان‌های t_1 و t_2 همان زمان‌های t_1 و t_2 در شکل (۸-۸-ب) هستند. ولتاژ خروجی $V_0(t)$ در لحظهٔ t_1، مقدار $+V_{max}$ (حدّاکثر مقدار خود) را دارد. در این لحظه، دیودهای D_1 , ... , D_n قطع، و شارژ خازن‌های C_1 , ... , C_n متوقف می‌شود. از این پس تا لحظهٔ t_2، جریان I به‌طور پیوسته موجب دشارژ این خازن‌ها می‌شود. امّا اندکی قبل از لحظهٔ t_2، یک افت ولتاژ ناگهانی را مشاهده می‌کنیم. علّت این افت ولتاژ ناگهانی، آغاز دورهٔ هدایت دیودهای D'_1 , ... , D'_n است که در خلال آن، خازن‌های C'_1 , ... , C'_n شارژ می‌شوند. برای محاسبهٔ



شکل (۸-۹): افت ولتاژ و اعوجاج در مدار والتن

اعوجاج ولتاژ ($2\delta V$) اگر مقدار بار منتقل شده به بار مصرفی در هر دوره را با q نشان دهیم از آنجا که I مقدار بار عبوری در واحد زمان و f تعداد دوره‌ها در واحد زمان است، پس:

$$q=\frac{I}{f}=I\cdot T \qquad (۱۴-۸)$$

این مقدار بار از خازن‌های C_1 , ... , C_n تأمین می‌شود. اگر در طی دورهٔ تناوب T ، دیودهای D'_1 , ... , D'_n قطع بوده و باری به‌خازن‌های C'_1 , ... , C'_n منتقل نمی‌شد، پیک تا پیک اعوجاج در رابطهٔ زیر به‌دست می‌آمد:

$$2\times\delta V=IT\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\cdots\cdots+\frac{1}{C_n}\right)=IT\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{C_i}\right)$$

امّا عملاً اندکی قبل از لحظهٔ t_2، دیودهای D'_1 , ... , D'_n هادی می‌شوند و هر کدام بار q را به‌خازن‌های C'_1 , ... , C'_n انتقال می‌دهند. با این مقدار بار، خازن‌های C'_1 , ... , C'_n به ترتیب با خازن‌های C_1 , ... , C_n هم پتانسیل می‌شوند. هر بار عبوری q از هر یک از دیودهای D'_1 , ... , D'_n همهٔ خازن‌های بین نقطهٔ اتّصال با دیود مربوطه و زمین را به اندازهٔ q تخلیه می‌کند. بنابراین، مقدار اعوجاج عبارت خواهد بود از:

$$\delta V=\frac{I}{2f}\left(\frac{1}{C_1}+\frac{2}{C_2}+\cdots\cdots+\frac{n}{C_n}\right) \qquad (۱۵-۸)$$

برای توضیح رابطهٔ فوق، مقدار پیک تا پیک اعوجاج در خازن C_1 برابر است با:

$$2\times\delta V_1=\frac{I}{fC_1}$$

در همین حال خازن C_2 مقدار بار q را به بار مصرفی و همین مقدار را به خازن C'_1 منتقل می‌کند. پس پیک تا پیک اعوجاج ولتاژ در نقطهٔ ۲ خواهد بود و برابر است با:

$$2\times\delta V_2=\frac{2I}{fC_2}$$

همین طور خازن C_3 مقدار بار q را به بار و خازن C'_2 و خازن C_2 منتقل می‌کند پس پیک تا پیک اعوجاج ولتاژ در نقطهٔ ۳ برابر است با:

$$2\times\delta V_3=\frac{3I}{fC_3}$$

و به‌طور کلّی خازن C_n باید جریان بار و شارژ خازن‌های پلّه‌های بالاتر را تأمین کند، پس در نقطهٔ n داریم:

$$۲ \times \delta V_n = \frac{nI}{fC}$$

بنابراین، پایین‌ترین خازن، بیشترین سهم را در مقدار ولتاژ اعوجاج خروجی دارد، پس منطقی به نظر می‌رسد که خازن‌های پایین‌تر را با ظرفیت بیشتر انتخاب کنیم؛ امّا از آنجا که در هنگام وقوع شکست الکتریکی در بار به خازن‌های کوچکتر، فشار زیادی وارد می‌شود، در عمل معمولاً خازن‌ها را با ظرفیت‌های مساوی به‌کار می‌گیرند. بنابراین:

$$C_۱ = C_۲ = C_۳ = \dots C_n \qquad (۱۶-۸)$$

در نتیجه رابطهٔ مقدار اعوجاج ولتاژ به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\delta V = \frac{I}{fC} \cdot \frac{n(n+۱)}{۴} \qquad (۱۷-۸)$$

در حالت بارداری، علاوه بر اعوجاج (δV)، افت ولتاژ $\Delta V_۰$ هم وجود دارد و برای محاسبهٔ افت ولتاژ از پلّه nام شروع می‌کنیم. برای سادگی، دیودها را ایده‌آل فرض می‌کنیم و از افت ولتاژ منبع تغذیهٔ AC نیز صرف‌نظر می‌کنیم. از آن‌چه در محاسبهٔ اعوجاج دیدیم، گرچه در لحظهٔ $t_۱$ خازن C'_n تا ولتاژ V_{max} شارژ می‌شود، امّا بر اثر جریان بار و افت ولتاژ روی خازن C'_n در اثر عبور بار q به تعداد n بار، ولتاژ خازن C_n به $۲V_{max}$ نمی‌رسد و حدّاکثر ولتاژ زیر را خواهد داشت.

$$(V_{C_n})_{max} = ۲V_{max} - \frac{nq}{C'_n} = ۲V_{max} - \Delta V_n \qquad (۱۸-۸)$$

زیرا که خازن C_n در خلال دورهٔ قبلی، بار (nq) را از دست داده و این مقدار بار باید توسّط خازن C'_n جایگزین شود. در لحظهٔ $t_۲$ که دیودهای $D'_۱$, ... , D'_n هادی می‌شوند، خازن C_n بار q را به هر یک از خازن‌های $C_۱$, $C'_۲$,... , $C'_{n-۲}$, $C'_{n-۱}$ منتقل می‌کند؛ بعلاوه در طول دورهٔ تناوب T ، همین مقدار بار q را به بار می‌دهد. بنابراین، خازن $C'_{n-۱}$ حدّاکثر تا ولتاژ زیر شارژ می‌شود.

$$(V_{C'_{n-۱}})_{max} = \left[۲V_{max} - \frac{nq}{C'_n}\right] - \frac{nq}{C_n} = \left[(V_{C_n})_{max} - \frac{nq}{C_n}\right]$$

مشابه وضعیت C_n ، حدّاکثر ولتاژ $C_{n-۱}$ برابر ولتاژ فوق منهای $\frac{(n-۱)q}{C'_{n-۱}}$ خواهد بود، به‌همین طریق می‌توان قاعدهٔ کلّی برای افت ولتاژ در خازن‌های $C_۱$, ... , C_n را

به‌دست آورد. اگر تمامی خازن‌ها را با ظرفیت یکسان در نظر بگیریم، یعنی

$$C_1 = C'_1 = C_2 = C'_2 = \ldots\ldots = C_n = C'_n = C \qquad (۱۹-۸)$$

آن‌گاه افت ولتاژ در پلّه‌های مختلف برابر خواهد بود با:

$$\Delta V_n = \left(\frac{q}{C}\right) n$$

$$\Delta V_{n-1} = \left(\frac{q}{C}\right) [2n + (n-1)]$$

$$\vdots \qquad \vdots$$

$$\Delta V_1 = \left(\frac{q}{C}\right) \left[2n + 2(n-1) + 2(n-2) + \cdots + (2\times 2) + 1\right]$$

با جمع n افت ولتاژ فوق و جایگزینی $q=\frac{I}{f}$ خواهیم داشت:

$$\Delta V_0 = \left(\frac{I}{fC}\right) \left[\frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6}\right] \qquad (۲۰-۸)$$

در اینجا هم پایین‌ترین خازن، بیشترین سهم را در مقدار افت ولتاژ ΔV_0 دارد، چون در افت ولتاژ همهٔ پلّه‌ها حضور دارد. از آنجا که ولتاژ دو سر C'_n نصف ولتاژ دو سر خازن‌های دیگر است، بنابراین، می‌توان ظرفیت آن را دو برابر انتخاب کرد و افت ولتاژ را به میزان $0/5\frac{nq}{C}$ کاهش داد. در این‌صورت، افت ولتاژ تمام پلّه‌ها به‌همین میزان کاهش می‌یابد و داریم:

$$\Delta V_0 = \left(\frac{I}{fC}\right) \left[\frac{2n^3}{3} - \frac{n}{6}\right] \qquad (۲۱-۸)$$

در حالی که تعداد پلّه‌ها $n \geq 4$ باشد، می‌توان از عبارت دوم رابطهٔ فوق نیز صرف‌نظر کرد و حدّاکثر ولتاژ خروجی را به‌صورت تقریبی زیر نشان داد.

$$V_{0max} = 2n V_{max} - \frac{I}{fC} \cdot \frac{2n^3}{3} \qquad (۲۲-۸)$$

چنان‌که از رابطهٔ اخیر مشخّص است، در یک فرکانس ثابت، دامنهٔ ولتاژ خروجی مدار و همچنین مقدار متوسّط DC آن $V_0 = (V_{0max} - \delta V)$ به‌طور خطّی با افزایش جریان بار I، کاهش می‌یابد. به ازای یک جریان بار مشخّص، با افزایش تعداد پلّه‌ها

ابتدا V_0 افزایش می‌یابد؛ امّا اگر تعداد پلّه‌ها (n) خیلی زیاد شود، V_0 به یک مقدار مطلوب می‌رسد و از آن پس کاهش می‌یابد. بنابراین، با مقادیر ثابت I، V_{max}، f و C، تعداد بهینهٔ پلّه‌ها[1] با مشتق‌گیری از رابطهٔ (۸-۲۲) به‌صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{dV_{0\,max}}{dn} = 0 \Rightarrow n_{opt} = \sqrt{\frac{V_{max} f C}{I}} \qquad (۸-۲۳)$$

مثال (۸-۱): برای یک ژنراتور DC و بار عایقی با مشخّصات زیر،

$I=500\,\text{mA}$ ، $V_{max}=100\,\text{kV}$, $f=500\,\text{Hz}$, $C=1\,\mu\text{F}$

آن‌گاه داریم:

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{100\times10^{3}\times500\times1\times10^{-6}}{500\times10^{-3}}} = 10$$

در نتیجه،

$$V_{0\,\max} = \frac{4}{3}\ \text{MV}$$

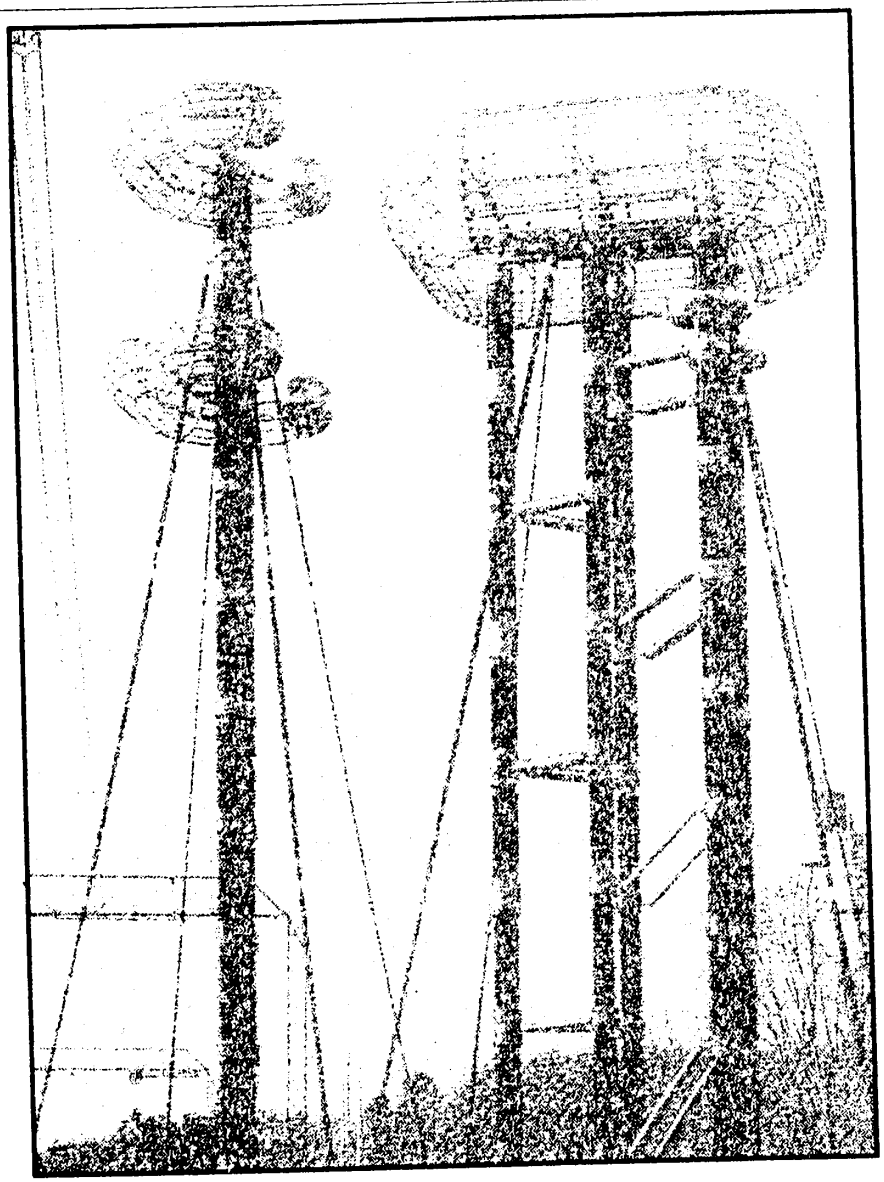
با افزایش فرکانس منبع (f) می‌توان قدرت خروجی $P_0 = IV_0$ را افزایش داد. این راه از روش افزایش ظرفیت خازن‌های C اقتصادی‌تر خواهد بود.

شکل (۸-۱۰) یک نمونهٔ واقعی از این نوع مولّدهای DC را نشان می‌دهد.

۸-۴-۳-۳- مدار چند برابرکنندهٔ ولتاژ آلیبون[2]

در مدار چند برابرکنندهٔ ولتاژ کوکرافت (والتن)، مقدار توان خروجی مدار محدود است. هنگامی‌که برای تولید ولتاژ فشار قوی به ترانسفورماتورهای زیادتری نیاز است، می‌توان با سری کردن مدارهای یکسوکننده‌ای که هر کدام، منبع تغذیهٔ AC جداگانه و مربوط به خود را دارند، استفاده کرد. شکل (۸-۱۱) یک نمونه از چنین مداری را که توسّط آلیبون ارائه شده، نشان می‌دهد. این مدار در مواردی که نیاز به ولتاژ خروجی بزرگتری بدون امکان تغییر سطح ولتاژ ترانسفورماتور ورودی باشد،

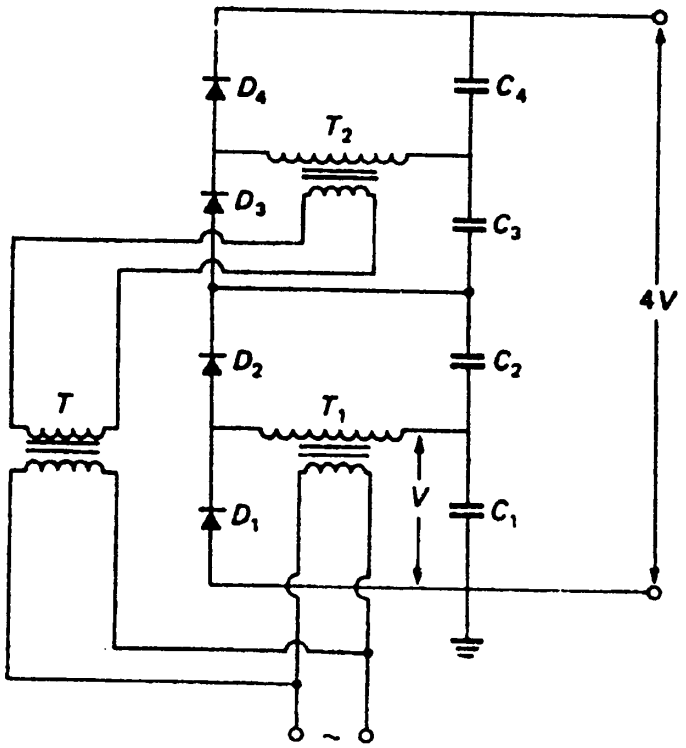
1- Optimal Step Number *2- Allibone*



شکل (۸-۱۰): نمونه واقعی یک مدار والتن برای تولید ولتاژ ۱۵۰۰kV

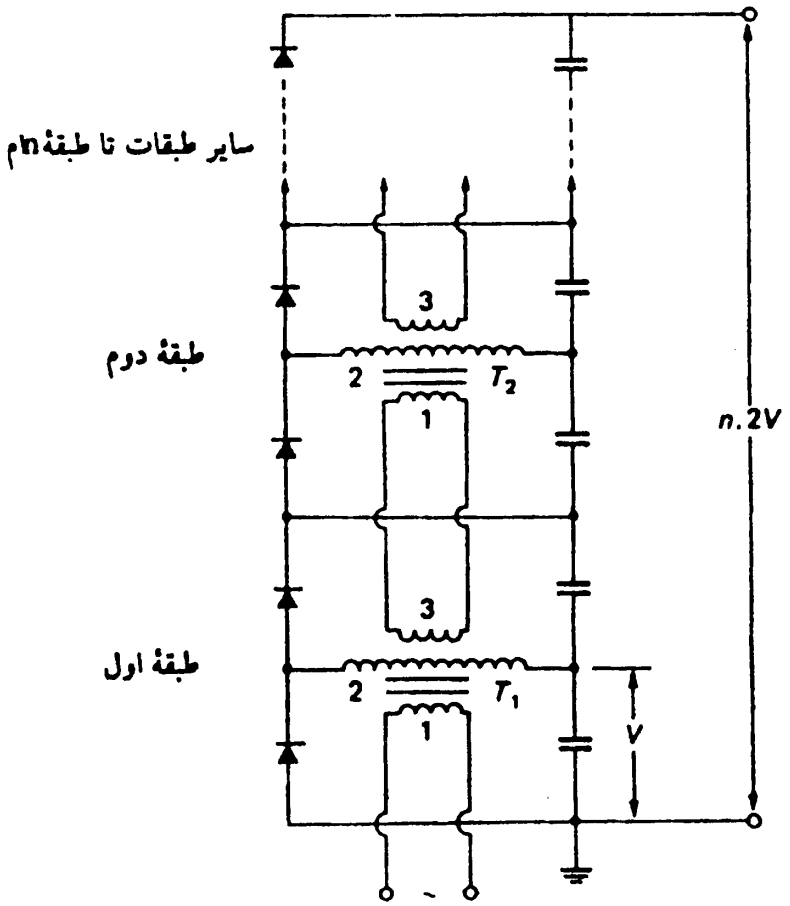
به‌کار می‌رود. دیودهای D_1 و D_2 و ترانسفورماتور T_1 همراه با خازن‌های C_1 و C_2، ولتاژ خروجی $2V_{max}$ را (مانند حالت قبل) به‌وجود می‌آورند. با تکرار این مدار به‌صورت سری یا زنجیره‌ای، ولتاژ خروجی به $4V_{max}$ می‌رسد. T یک ترانسفورماتور ایزوله‌کننده برای جداکردن $2V_{max}$ از زمین است. بنابراین، ترانسفورماتور T_2 در پتانسیل $2V_{max}$ نسبت به زمین قرار دارد. بدون استفاده از ترانسفورماتور ایزولاسیون، مسئلهٔ عایق‌بندی ترانسفورماتورهای پلّه‌های بعدی در برابر ولتاژ DC بسیار مشکل می‌شود.

با انتخاب مقادیر مساوی برای خازن‌ها، توزیع پتانسیل برای دیودها یکنواخت



شکل (۸-۱۱): مدار آلیبون برای تولید ولتاژ فشار قوی DC

خواهد بود. این مدار به علّت نیاز هر پلّه به یک ترانسفورماتور ایزولاسیون، برای تعداد بیش از دو پلّه اقتصادی نیست. بنابراین، در مدارهایی با تعداد پلّه‌های بیشتر، از ترانسفورماتورهای ویژه‌ای استفاده می‌شود. چنین مداری در شکل (۸-۱۲) نشان داده شده است. ترانسفورماتور هر پلّه از سه سیم‌پیچ اوّلیهٔ ۱ (فشار ضعیف)، ثانویّهٔ ۲ (فشار قوی) و سیم‌پیچ ثالثیّهٔ ۳ (فشار ضعیف) تشکیل می‌شود. از سیم‌پیچ سوّم هر پلّه برای تحریک اوّلیهٔ ترانسفورماتور پلّه بعدی استفاده می‌شود؛ بدین ترتیب عایق‌بندی مورد نیاز ولتاژ DC ، روی ترانسفورماتورهای پلّه‌های مختلف تقسیم می‌شود. این نکته روشن است که در این مدار، انرژی همهٔ پلّه‌ها باید از ترانسفورماتور پایینی تأمین شود. بنابراین، باز هم محدودیت تعداد پلّه‌ها وجود خواهد داشت؛ چرا که در این حالت، ترانسفورماتور اوّلی، کلّ بار ترانسفورماتورهای دیگر طبقات را به عهده داشته و امکان اشباع شدن آن بسیار زیاد است.



شکل (۸-۱۲): مدار اصلاح شدهٔ آلیبون

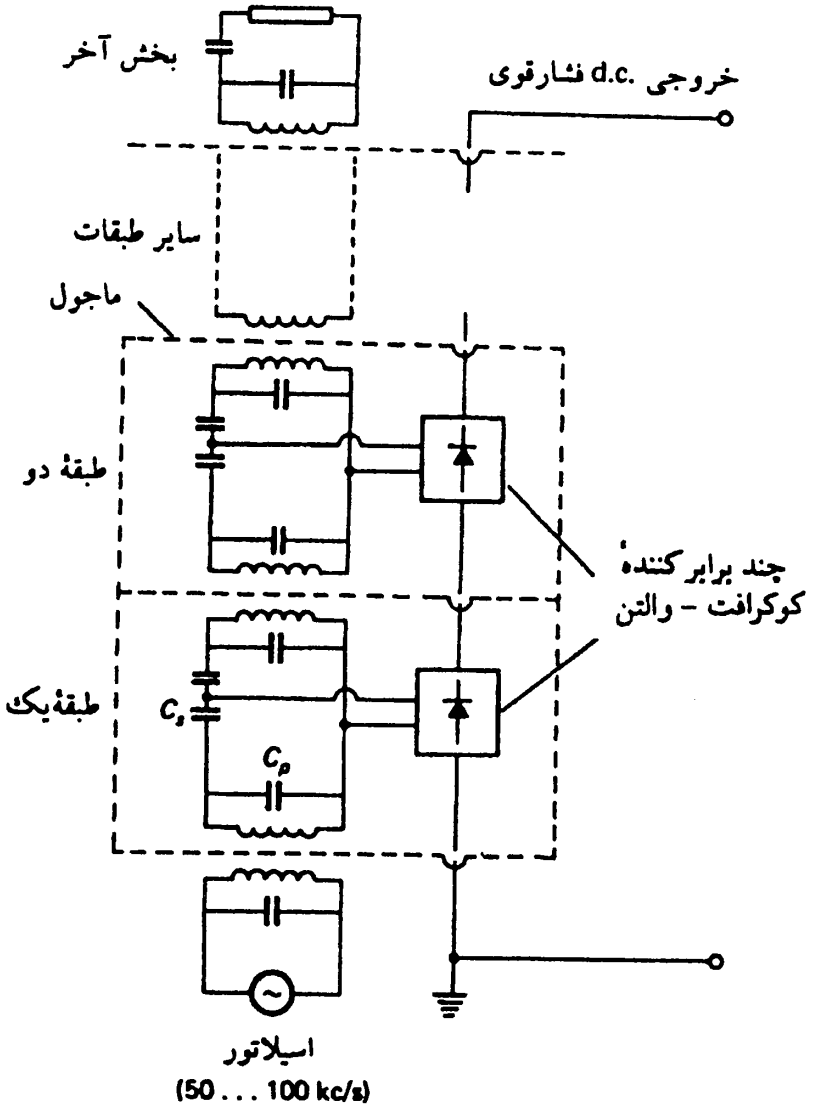
۸-۴-۳-۴- مدار انجترون[۱] و دلتاترون[۲]

مدار دیگری که در تولید ولتاژ فشار قوی DC به‌کار می‌رود، مدار انجترون است. طرح کلّی این مولّد در شکل (۸-۱۳) نشان داده شده است. اگر چه این ژنراتور، از نظر توان خروجی به حدود ۱MV و چند میلی‌آمپر محدود می‌شود، ولی ضریب ناهمواری بسیار کوچک، پایداری زیاد، تنظیم سریع و انرژی ذخیره شدهٔ کم آن، از مزیت‌های اساسی این مولّد می‌باشد.

ژنراتورها از اتّصال سری ترانسفورماتورها تشکیل می‌شوند. این ترانسفورماتورها با خازن‌های سری C_s تزویج شده‌اند تا این خازن‌ها در فرکانس‌های بالای منبع، بخش عمده‌ای از اندوکتانس پراکندگی ترانسفورماتورها را جبران کنند. به‌علاوه به موازات هر یک از سیم‌پیچ‌های اوّلیه و ثانویّه، خازن C_p متّصل می‌شود که

1- Engetron

2- Deltatron

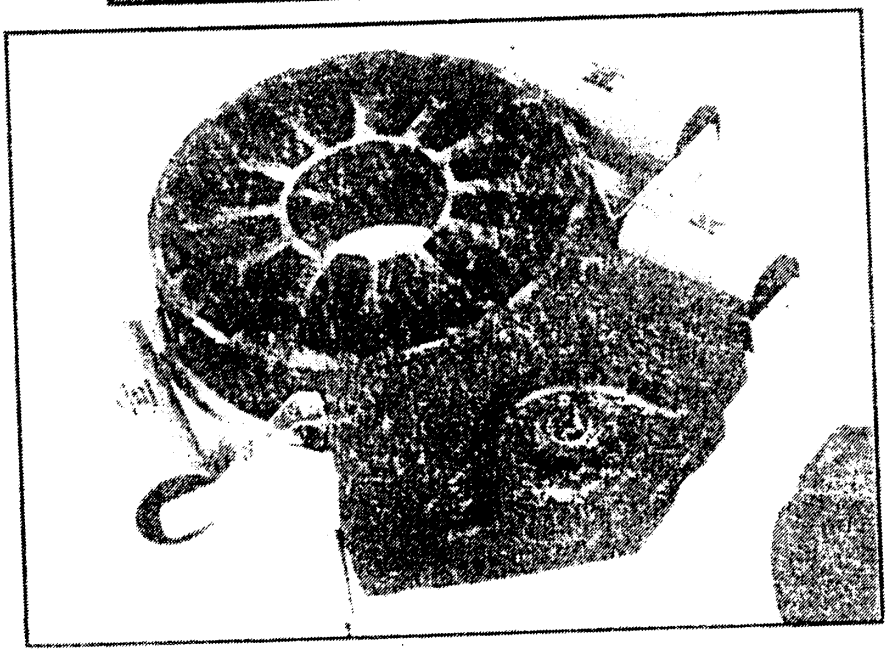


شکل (۸-۱۳): مدار انجترون و دلتاترون

جبران‌سازی جریان مغناطیس کنندگی را به عهده دارد. در انتهای زنجیرهٔ کامل ترانسفورماتورها، یک بار مقاومتی متّصل شده است. از این رو شبکه، مشابه خط خاتمه‌یافته‌ای است که در راستای آن، یک ولتاژ AC ، تقریباً ثابت می‌ماند و فقط دارای یک اختلاف فاز بین ورودی (منبع تغذیهٔ فرکانس بالا) و خروجی (خاتمه) است. بنابراین، ترانسفورماتورها برای افزایش ولتاژ AC به‌کار نرفته‌اند.

اکنون این امکان وجود دارد که به هر طبقه، یک مدار والتن متّصل شود و در هر طبقه با اعمال ولتاژ ورودی کوچک (در حدود چند کیلو ولت)، ولتاژهای خروجی بزرگی (در حدود چند ده کیلو ولت) حاصل شود. در آن‌صورت، خروجی مدارهای والتن که به‌صورت ولتاژ DC هستند،با هم سری می‌شوند. واحدهایی از این مدار، تا ۲۵

طبقه هم ساخته شده‌اند. لازم به‌ذکر است که فرکانس ورودی منبع هم، از ۵۰ تا ۱۰۰kHz قابل تغییر است. در شکل (۸-۱۴) دو نمونهٔ واقعی از مولّد انجترون نشان داده شده است.



شکل (۸-۱۴): دو نمونهٔ واقعی از مدار انجترون،
الف) مولّد ۱ مگاولت؛ ب) مولّد ۵۰ مگاولت؛

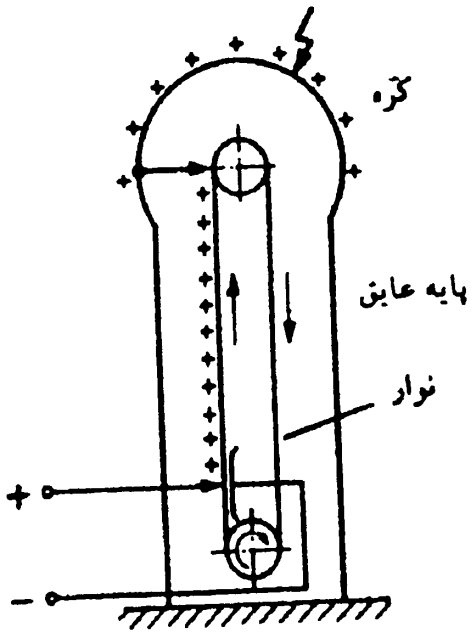
۸-۴-۴- مولّدهای الکترواستاتیک

مولّدهای الکترواستاتیکی، انرژی مکانیکی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. اصول کار مولّدهای الکترواستاتیکی بر مبنای روش انتقال بارهای الکتریکی است که با کمک آن‌ها می‌توان ولتاژهایی تا حدود ۵ مگاولت را در حالت بی‌باری به‌دست آورد. در این مولّدها بارهای الکتریکی در خلاف جهتی که میدان الکتریکی بر آن‌ها نیرو وارد می‌کند، رانده می‌شوند. برای این کار از انرژی مکانیکی استفاده می‌شود. یکی از انواع این مولّدها، مولّد واندوگراف[1] است که می‌تواند ولتاژهایی در حدود ۶MV را تولید کند و از آن در آزمایشگاه‌های فیریک هسته‌ای هم استفاده می‌شود. متأسّفانه این مولّدها در ولتاژهای بالا، قادر به تأمین جریان باری بیش از ۲۵۰mA نیستند و با افزایش این جریان، ولتاژ خروجی سریعاً افت می‌کند. به‌همین جهت از این نوع مولّدها در کارهای تحقیقاتی به‌ویژه در فیزیک هسته‌ای برای تأمین ولتاژ DC شتاب دهنده‌های ذرّات استفاده می‌شود.

۸-۴-۴-۱- مولّد واندوگراف

اساس این مولّد DC در شکل (۸-۱۵) نشان داده شده است. در این مدار، به‌وسیلهٔ یک منبع ولتاژ DC ، در اثر کرونای ایجاد شده در نوک یک سوزن، بار الکتریکی روی تسمهٔ دوّار عایق پاشیده می‌شود(ولتاژ منبع از ۱۰ تا ۱۰۰ کیلو ولت می‌باشد). این تسمه به‌وسیلهٔ یک موتور با سرعت v چرخانده می‌شود. در محور بالایی، این ذرّات باردار به‌وسیلهٔ یک میلهٔ نوک تیز جارو شده و به سطح الکترود فلزی کروی شکل منتقل می‌شوند. در اثر تجمع ذرّات باردار روی سطح الکترود، یک پتانسیل نسبت به زمین ایجاد می‌شود که با اضافه شدن ذرّات باردار، پتانسیل مذکور اضافه می‌شود.

1- Van de Graaff



شکل (۸-۱۵): ساختمان ژنراتور الکترواستاتیک واندوگراف

اگر ظرفیت خازنی بین الکترود فلزی کروی و زمین به‌مقدار C باشد و مقدار بار جمع شده روی سطح کره Q باشد، آن‌گاه پتانسیل ایجاد شده برابر است با:

$$V = \frac{Q}{C} \qquad (۲۴-۸)$$

اگر ژنراتور DC مذکور به یک مصرف‌کننده متّصل شود و جریان بار مصرفی، با بار جمع‌شده روی الکترود، در هر لحظه برابر باشد، آن‌گاه ولتاژ ثابت می‌ماند. در صورتی که تسمه با سرعت v m/s بچرخد و چگالی بار سطحی تسمه هم برابر σ clumb/m^2 باشد و پهنای تسمه هم برابر b باشد، در آن‌صورت، جریان شارژ بار الکتریکی توسّط تسمه به الکترود برابر است با:

$$I = \sigma\, b\, v \qquad (۲۵-۸)$$

همچنین مقدار بار جمع شده در مدّت زمان t ثانیه برابر است با:

$$Q = I \,.\, t \qquad (۲۶-۸)$$

الکترود فلزی باید به‌قدری بزرگ باشد که شدّت میدان الکتریکی روی سطح کره خیلی زیاد نشود و کرونا و تخلیهٔ الکتریکی جزئی اتّفاق نیفتد تا از افزایش ولتاژ

الکترود جلوگیری نکند. همچنین نیروی وارد بر تسمه‌ها باید به قدری باشد که باعث لرزش تسمه‌ها نگردد. بدین منظور، ابتدا نیروی وارد بر تسمه را محاسبه می‌کنیم.

$$dq = \sigma b \cdot dx$$

$$dF = E(x) \cdot dq = E(x)\ \sigma b \cdot dx$$

در نتیجه، نیروی وارد بر تسمه برابر است با:

$$F = \int_{\cdot}^{s} E(x)\, \sigma b \cdot dx = \sigma b \int_{\cdot}^{s} E(x)\, dx = \sigma b V$$

در این روابط، S طول تسمه و b ضخامت آن است. در صورتی که سرعت موتور برابر $v=\frac{dx}{dt}=cte$ باشد، آنگاه توان موتورها برابر خواهد بود با:

$$P = F \cdot v = \sigma b V v$$

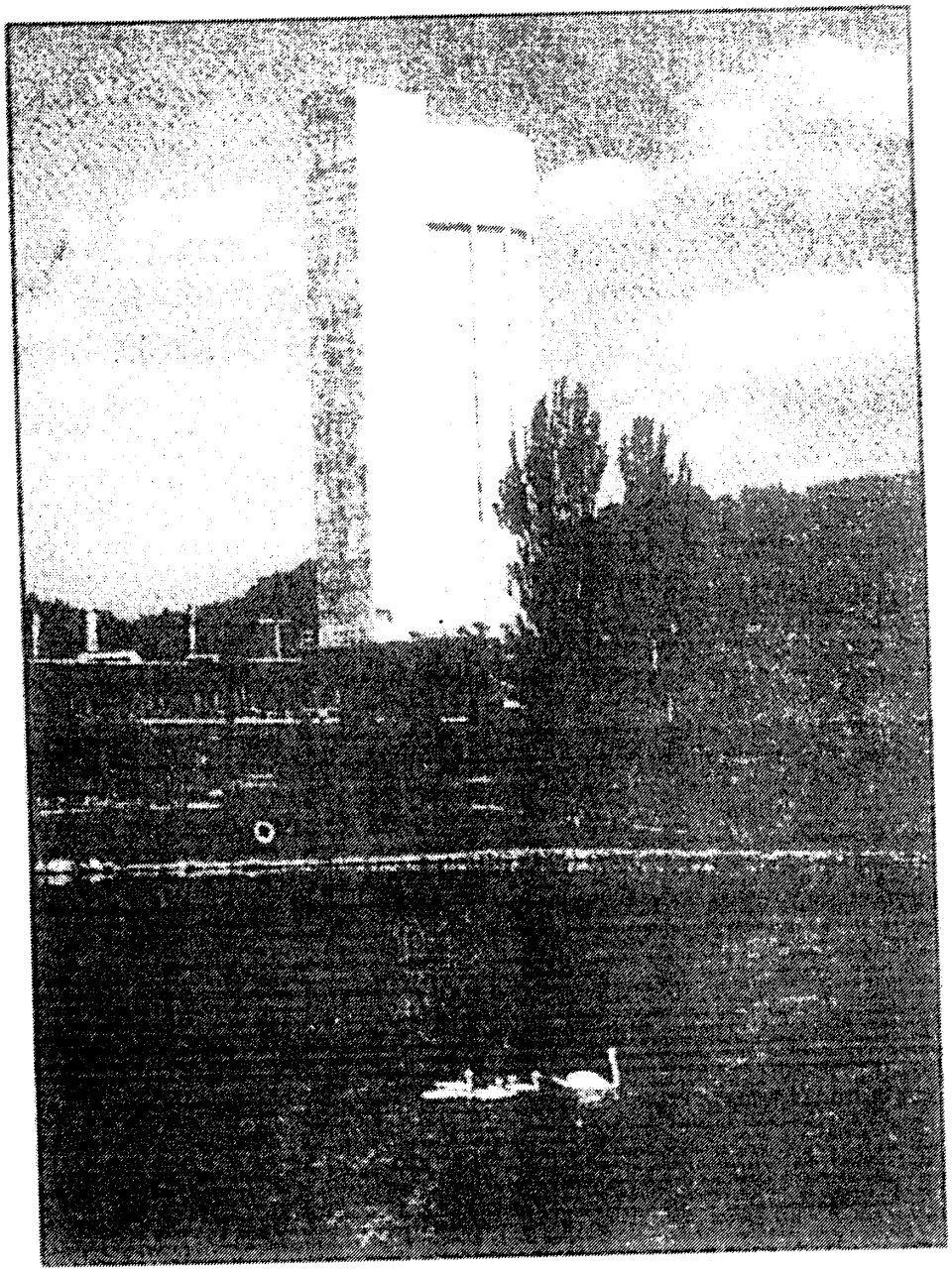
لازم به ذکر است که ولتاژ تولیدی این مولّدها بسیار زیاد است ولی قدرت خروجی آن‌ها بسیار کم می‌باشد و می‌توانند بارهای با جریان مورد نیاز خیلی کم را تغذیه کنند. اگر مقاومت بار متّصل به الکترود، برابر R باشد و ولتاژ الکترود کروی شکل مولّد، برابر V باشد، آنگاه جریان شارژ بار برابر است با:

$$I = \frac{V}{R} \qquad (۲۷-۸)$$

در شکل (۸-۱۶) یک نمونهٔ واقعی از مولّد واندوگراف نشان داده شده است.

۸-۵- تولید ولتاژ فشار قوی AC

برای آزمایش قدرت عایقی تجهیزات مورد استفاده در خطوط فشار قوی AC، لازم است تا در آزمایشگاه‌ها به‌وسیلهٔ ترانسفورماتورهای آزمایشگاهی، ولتاژهای فشار قوی AC را تولید نماییم. گرچه خطوط AC در سیستم‌های انتقال همیشه به‌صورت سه فاز هستند، ولی برای آزمایش عایق‌ها، ولتاژ فشار قوی AC به‌صورت تک‌فاز لازم است.



شکل (۸-۱۶): یک نمونهٔ واقعی از مولّد واندوگراف برای تولید ولتاژ ۲۵MV

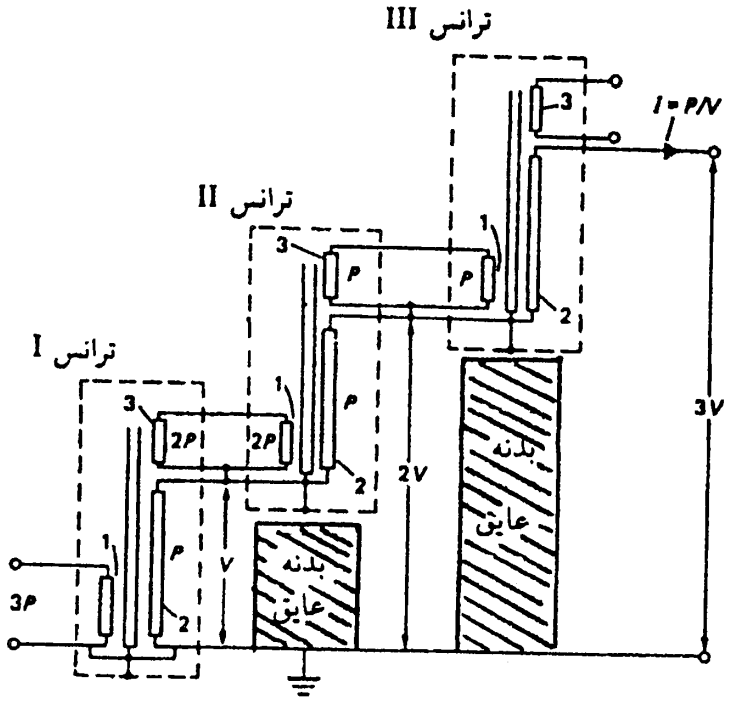
۸-۵-۱- ترانسفورماتورهای سری

برای تولید ولتاژهای تا حدود ۳۰۰kV از یک ترانسفورماتور افزایندهٔ ولتاژ تک‌فاز با امپدانس کم‌تر از ۵٪ استفاده می‌شود. با تنظیم ولتاژ فشار ضعیف متغیّر ورودی، ولتاژ فشار قوی دلخواه از خروجی آن به‌دست می‌آید. برای تولید ولتاژهای بالاتر از ۳۰۰kV، استفاده از یک ترانسفورماتور تک‌فاز به دلیل وزن زیاد، غیرقابل

حمل بودن، نصب مشکل و همچنین هزینهٔ عایق‌بندی زیاد، عملی نبوده و بنابراین، از چند طبقهٔ ترانسفورماتور یا اصطلاحاً ترانسفورماتورهای سری استفاده می‌شود.

ترانسفورماتورهای سری از چند ترانسفورماتور جداگانه که هر کدام دارای سه سیم‌پیچ اوّلیه (۱)، ثانویّه با ولتاژ فشار قوی (۲)، و سیم‌پیچ تحریک (۳) هستند، تشکیل می‌شوند. شکل (۸-۱۷) چنین ترانسفورماتورهایی را که به‌صورت سری قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد.

اوّلین ترانسفورماتور (I) در پتانسیل زمین قرار دارد و اختلاف پتانسیل سیم‌پیچ ثانویّه آن نسبت به زمین V است. ترانسفورماتور دوم (II) روی یک تکیه‌گاه عایقی قرار دارد و بدنهٔ آن نسبت به زمین دارای اختلاف پتانسیل V و سیم‌پیچ ثانویّهٔ آن دارای اختلاف پتانسیل V نسبت به بدنه و $۲V$ نسبت به زمین می‌باشد. به‌همین ترتیب بدنهٔ ترانسفورماتورهای بعدی با زمین، اختلاف پتانسیل‌های $۲V$, $۳V$, ... , $(n-۱)V$، و سیم‌پیچ ثانویّهٔ آن‌ها ولتاژ V نسبت به بدنه و ولتاژهای $۳V$, $۴V$ ، , ... , nV را نسبت به زمین دارند که n ، تعداد ترانسفورماتورهاست. لازم به‌ذکر است، همان‌گونه که از شکل (۸-۱۷) پیداست، سیم‌پیچ ثانویّه و اوّلیه هر یک از ترانسفورماتورها در انتها به



شکل (۸-۱۷): یک نمونه مدار سه طبقهٔ ترانسفورماتورهای سری

بدنه، اتّصال الکتریکی دارد.

سیم‌پیچ اوّلیه هر ترانسفورماتور، از طریق سیم‌پیچ تحریک ترانسفورماتور قبلی تغذیه می‌شود. سیم‌پیچ تحریک هر ترانسفورماتور ممکن است با سیم‌پیچ ثانویهٔ آن سری باشد. معمولاً همهٔ ترانسفورماتورها از یک نوع هستند و دور سیم‌پیچ‌های اوّلیهٔ هر یک با سیم‌پیچ تحریک ترانسفورماتور قبلی یکسان است. اتّصال این دو سیم‌پیچ بین ترانسفورماتورها از طریق بوشینگ‌ها انجام می‌شود.

ولتاژ تغذیهٔ اوّلین ترانسفورماتور معمولاً ولتاژ عادی شبکه مثلاً ۲۲۰V است؛ گرچه در ولتاژهای بالاگاهی از ولتاژهای تا ۱۰kV هم برای تغذیهٔ اوّلین ترانسفورماتور استفاده می‌شود. از مزایای ترانسفورماتورهای سری، قابلیّت جدا کردن آن‌ها از یکدیگر و همچنین اتّصال تعداد دلخواهی از آن‌ها برای دستیابی به ولتاژهای مختلف می‌باشد. همچنین، حمل و نقل و نصب آن‌ها نیز راحت می‌باشد. این ترانسفورماتورها را می‌توان به‌صورت موازی هم به یکدیگر وصل کرد و جریان‌های بالاتری به‌دست آورد. از معایب این نوع مولّدها می‌توان تقسیم غیریکنواخت قدرت را روی آن‌ها نام برد.

در شکل (۸-۱۷) حاصل‌ضرب جریان در ولتاژ هر سیم‌پیچ با P نشان داده شده است. در این شکل، ترانسفورماتورهای سری از سه ترانسفورماتور I و II و III تشکیل شده است و قدرت خروجی آن $۳P$ است. در سیم‌پیچ ثانویهٔ ترانسفورماتور III مقدار جریان عبارت است از:

$$I=\frac{۳P}{۳V}=\frac{P}{V}$$

پس بار P باید از طریق اوّلیهٔ آن تأمین شود. از طرفی اوّلیهٔ ترانسفورماتور III، بار P را از طریق سیم‌پیچ تحریک ترانسفورماتور II تأمین می‌کند. ثانویهٔ ترانسفورماتور II هم، بار P را به ثانویهٔ ترانسفورماتور III تحویل می‌دهد. پس اوّلیهٔ ترانسفورماتور II، باید بار $۲P$ را تأمین کند، و سرانجام بار $۲P$ از سیم‌پیچ تحریک ترانسفورماتور I تأمین می‌شود. ثانویهٔ این ترانسفورماتور هم بار P را به ثانویهٔ ترانسفورماتور II تحویل می‌دهد. پس اوّلیهٔ ترانسفورماتور I باید بار $۳P$ را تأمین کند. بنابراین، ترانسفورماتور I باید سه برابر بار ترانسفورماتور III را تحمّل کند، در نتیجه بالطبع، باید سیم‌پیچ‌ها و عایق‌بندی آن‌ها برای چنین باری مناسب باشند.

آزمایش تجهیزات عایقی همیشه شامل اعمال یک ولتاژ فشار قوی AC به یک بار خازنی با تلفات توان بسیار کوچک است که می‌توان با صرف‌نظر کردن از تلفات آن، توان نامی خروجی (P_n) مورد نیاز از یک مولّد فشار قوی AC را تعیین نمود.

$$I_n = \frac{V_n}{X_c} = V_n \omega . C_t \qquad (۲۸-۸)$$

$$P_n = V_n I_n = K V_n^{۲} \omega . C_t \ , \quad K \geq ۱ \qquad (۲۹-۸)$$

که جریان I_n در حدود چند میلی‌آمپر است. در این رابطه،

C_t = ظرفیت خازنی عایق نمونه تحت آزمایش،

V_n = ولتاژ نامی مؤثّر مولّد فشار قوی AC،

K = ضریب اطمینان برای در نظر گرفتن خازن‌های اضافی در کلّ مدار مورد آزمایش است.

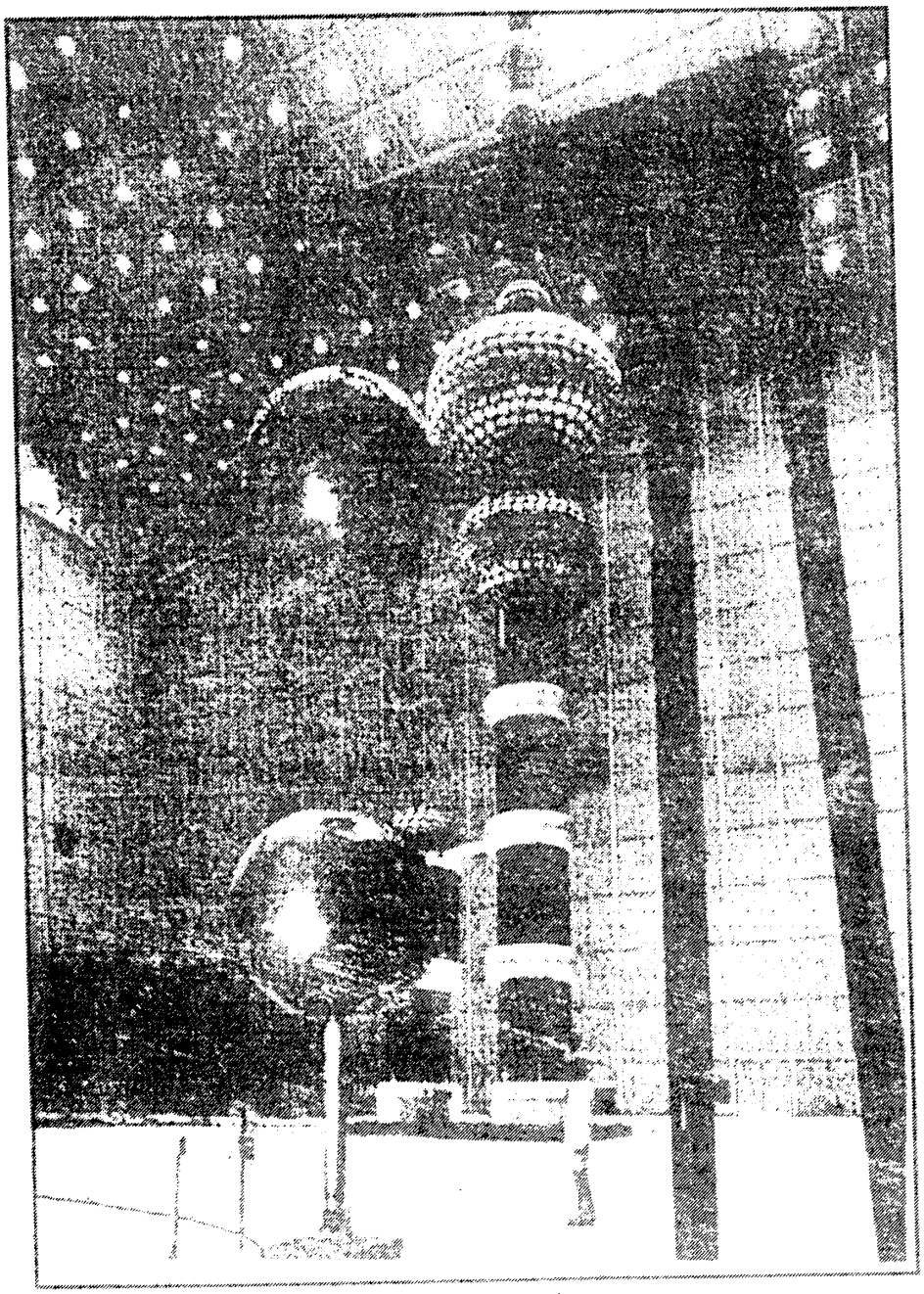
این ظرفیت‌های خازنی اضافی به‌سبب الکترودها، اتّصالات رابط بین عایق نمونه و دستگاه‌ها می‌باشند. همچنین وسایل اندازه‌گیری از جمله مقسّم‌های ولتاژ خازنی یا فاصله‌های هوایی بین گوی‌های درون مدار مورد آزمایش نیز مؤثّر می‌باشند.

ظرفیت خازنی عایق نمونه تحت آزمایش (C_t)، برای بعضی از عایق‌ها به شرح ذیل می‌باشد:

مقره‌های بشقابی آویزان یا مقرهٔ پست	چند ده پیکو فاراد
مقره‌های بوشینگ (عبوری)	۱۰۰ تا ۱۰۰۰ پیکو فاراد
ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری	۲۰۰ تا ۵۰۰ پیکو فاراد
ترانسفورماتورهای قدرت با توان کم‌تر از ۱۰۰۰kVA	حدود ۱۰۰۰ پیکو فاراد
ترانسفورماتورهای قدرت با توان بیشتر از ۱۰۰۰kVA	۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ پیکو فاراد
کابل‌های فشار قوی با عایق کاغذ و روغن	۲۵۰ تا ۳۰۰ پیکو فاراد بر متر
کابل‌های فشار قوی با عایق گازی	حدود ۶۰ پیکو فاراد بر متر

از آنجایی که ولتاژ مورد آزمایش فقط برای مدّت زمان کوتاه و خیلی محدودی به عایق اعمال می‌شود، بنابراین، قدرت نامی مولّد فشار قوی AC را نیز برای مدّت زمان‌های کوتاه در حدود حدّاکثر ۱۵ دقیقه درنظر می‌گیرند. همچنین با توجّه به بزرگ بودن ثابت زمانی افزایش درجه حرارت در ترانسفورماتورها، به سیستم‌های خنک‌کنندگی پیچیده‌ای نیاز نمی‌باشد. با توجّه به جریان بسیار کم عبوری از سیم‌پیچ

ترانسفورماتورهای این مولّد (در حدّ میلی‌آمپر)، نیاز به سطح مقطع بزرگ برای سیم‌پیچ‌ها نیست و با توجّه به عدم نیاز به سیستم‌های خنک کنندگی (رادیاتور و روغن)، حجم اشغال شده توسّط ترانسفورماتورهای مولّد، در مقایسه با ترانسفورماتورهای قدرت خیلی کم است. هر ترانسفورماتور از بدنه استوانه‌ای با پوشش خارجی عایقی تشکیل می‌شود که تکیه‌گاه عایقی برای طبقات بالاتر را تشکیل می‌دهد و استوانه‌ها روی هم قرار می‌گیرند و ارتفاع بلندی ایجاد می‌کنند. در شکل (۸-۱۸) یک نمونهٔ واقعی از یک مولّد AC چهار طبقهٔ ترانسفورماتوری نشان داده شده است.

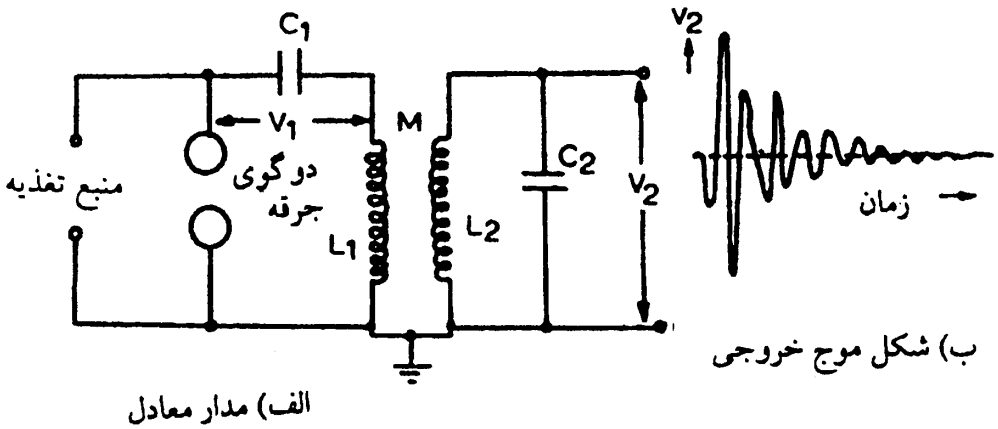


شکل (۸-۱۸): نمونهٔ واقعی مولّد AC چهار طبقه برای تولید ولتاژ ۲/۴MV

۸-۵-۲- تولید ولتاژ فشار قوی AC با فرکانس بالا

از ولتاژ فشار قوی با فرکانس زیاد، برای تغذیهٔ چند برابر کننده‌های ولتاژ DC استفاده می‌شود. همچنین در آزمایش تجهیزات الکتریکی در برابر امواج کلیدزنی، ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا با فرکانس زیاد مورد نیاز هستند. معمول‌ترین ترانسفورماتور تشدید در فرکانس زیاد، سیم‌پیچ تسلا است. این مدار از دو مدار تشدید قابل تنظیم مطابق شکل (۸-۱۹) تشکیل می‌شود.

این مدار معمولاً برای ولتاژ اوّلیه حدود ۱۰kV و ولتاژ ثانویّه از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰kV ساخته می‌شود. سیم‌پیچ اوّلیه توسّط یک منبع DC یا AC و از طریق خازن C_1 تغذیه می‌شود. یک فاصلهٔ هوایی G دو سر سیم‌پیچ اوّلیه قرار دارد که برای ولتاژ مطلوب V_1 تنظیم می‌شود. با تخلیهٔ این فاصلهٔ هوایی، ولتاژ خودالقایی زیادی در L_1 به‌وجود می‌آید. سیم‌پیچ‌های اوّلیهٔ L_1 و L_2 بر روی عایقی بدون هسته پیچیده می‌شوند و در روغن قرار می‌گیرند. فرکانس تشدید سیم‌پیچ‌ها با خازن C_1 و C_2 برای فرکانس‌های ۱۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز تنظیم می‌شود. ولتاژ خروجی V_2 تابعی از پارامترهای L_1، L_2، C_1، C_2 و اندوکتانس متقابل M است. معمولاً مقاومت سیم‌پیچ‌ها اندک است و تنها در میرا کردن نوسانات نقش دارد. با صرف‌نظر کردن از این مقاومت‌ها، می‌توان مدار را به‌سادگی تحلیل کرد. فرض کنید در هنگام تخلیه، فاصلهٔ هوایی به‌مقدار V_1 شارژ شده باشد و در این حال گذر جریان i_1 از اوّلیهٔ (L_1)، جریان i_2 را در L_2 و C_2 به‌وجود آورده است. آن‌گاه:



شکل (۸-۱۹): مدار معادل و شکل موج خروجی مدار سیم‌پیچ تسلا

$$V_1 = \frac{1}{C_1}\int_0^t i_1 dt + L_1\frac{di_1}{dt} + M\frac{di_2}{dt}$$

(۳۰-۸)

$$0 = \frac{1}{C_2}\int_0^t i_2 dt + L_2\frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt}$$

تبدیل لاپلاس معادلات اخیر به‌صورت زیر است:

$$\frac{V_1}{S} = \left[L_1 S + \frac{1}{C_1 S}\right] I_1(s) + MSI_2$$

(۳۱-۸)

$$0 = \left[L_2 + \frac{1}{C_2 S}\right] I_2(s) + MSI_1$$

در این رابطه، $I_1(s)$ و $I_2(s)$ تبدیل لاپلاس i_1 و i_2 هستند. ولتاژ خروجی V_2 در دو سر خازن C_2 مدار آزمایش از:

$$V_2 = \frac{1}{C_2}\int i_2 dt$$

$$V_2(s) = \frac{I_2(s)}{C_2 S}$$

(۳۲-۸)

در این رابطه $V_2(s)$ تبدیل لاپلاس V_2 است. با حلّ V_2 از معادلات فوق داریم:

$$V_2 = \frac{M V_1}{\sigma L_1 L_2 C_1}\cdot\frac{1}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2}\left[\cos(\gamma_1 t) - \cos(\gamma_2 t)\right]$$

(۳۳-۸)

که،

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}} = \sqrt{1 - k^2}$$

k ضریب کوپلاژ L_1 , L_2 است و،

$$\gamma_1, \gamma_2 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2}\right)^2 - \omega_1^2 \cdot \omega_2^2 (1 - k^2)}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad , \quad \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

ولتاژ خروجی در شکل (۸-۱۹) نشان داده شده است. دامنهٔ حدّاکثر ولتاژ ثانویّه (V_2) را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد.

$$V_{2max} = V_1 e\sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

(۳۴-۸)

که،

$$e = \frac{2\sqrt{1-\sigma}}{\sqrt{(1+a^2) - 4\sigma a}} \quad , \quad a = \frac{L_2 C_2}{L_1 C_1} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2}$$

مدار ارائه شده در شکل (۸-۱۹) را می‌توان به گونه‌ای ساده‌تر تحلیل کرد. انرژی ذخیره شده در مدار اوّلیه در خازن C_1، از طریق کوپلاژ مغناطیسی به C_2 منتقل می‌شود. اگر W_1 انرژی ذخیره شده در C_1 و W_2 انرژی ذخیره شده در C_2 و η بازدهٔ ترانسفورماتور باشد آن‌گاه:

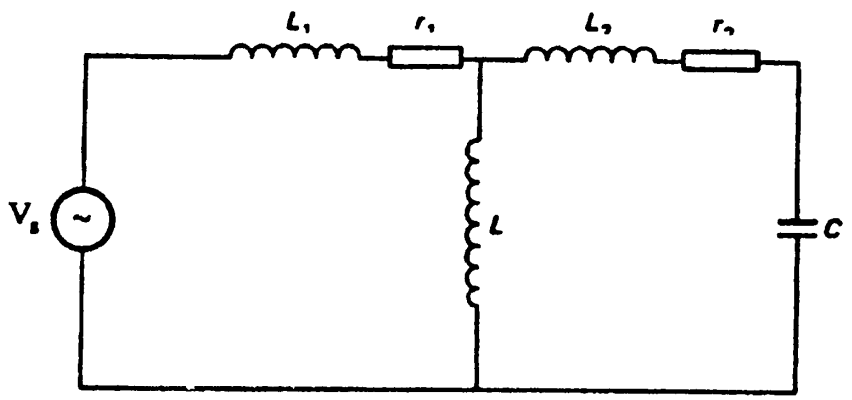
$$W_1 = \frac{1}{2} C_1 V_1^2 = \eta \left(\frac{1}{2} C_2 V_2^2\right) \qquad (۳۵-۸)$$

$$V_2 = \eta V_1 \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \qquad (۳۶-۸)$$

می‌توان نشان داد که اگر ضریب کوپلاژ k بزرگ باشد، فرکانس نوسان کوچک خواهد بود و اگر مقدار مقاومت‌های سیم‌پیچ‌ها و k به اندازهٔ کافی زیاد باشد، شکل موج به‌صورت یک پالس خواهد بود.

۸-۵-۳- مدار رزونانس برای تولید ولتاژ فشار قوی AC

مدار معادل یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی یک مرحله‌ای برای تولید ولتاژ فشار قوی، شامل راکتانس‌های پراکندگی سیم‌پیچ‌های آن، مقاومت‌های سیم‌پیچ‌ها و راکتانس مغناطیس‌کنندگی و خازن شنت معادل با عایق نمونهٔ تحت آزمایش می‌باشد. شکل (۸-۲۰) بیانگر مدار معادل این مولّد می‌باشد.



شکل (۸-۲۰): مدار معادل رزونانس، مدار تولید ولتاژ AC

اگر این مدار معادل در شرایطی به حالت یک مدار رزونانس سری درآید، آنگاه دامنهٔ ولتاژ دو سر خازن C می‌تواند به سادگی به چندین برابر دامنهٔ ولتاژ V_s (ولتاژ ورودی منتقل شده به ثانویهٔ ترانسفورماتور) درآید. با صرف‌نظر کردن از راکتانس مغناطیس‌کنندگی (بدلیل جریان ناچیز آن) در شرایط رزونانس سری و سرعت زاویه‌ای ω منبع، داریم:

$$X_c = X_L$$

$$\omega(L_1 + L_2) = \frac{1}{\omega C} \qquad (۳۷-۸)$$

در این شرایط، جریان در عایق نمونهٔ تحت آزمایش، بسیار زیاد می‌شود و تنها به‌وسیلهٔ مقاومت معادل مدار می‌تواند محدود شود. مقدار ولتاژ دو سر عایق نمونه (خازن C) برابر است با:

$$V_c = \left| \frac{-jV_s X_c}{R + j\,(X_L - X_c)} \right| = \frac{V_s}{R} X_c = \frac{V_s}{\omega.R.C}$$

در این حالت، ولتاژ دو سر عایق نمونه ممکن است به ۲۰ تا ۵۰ برابر ولتاژ فشار قوی ثانویهٔ ترانسفورماتور برسد که مقدار آن، بستگی به ضریب کیفیت مدار دارد. این ضریب برابر است با:

$$Q = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{\omega R.C} \qquad (۳۸-۸)$$

و ولتاژ دو سر عایق نمونه بر حسب کیفیت مدار برابر است با:

$$V_c = Q.V_s \qquad (۳۹-۸)$$

اگر ولتاژ مورد نیاز فشار قوی برای عایق نمونه V_c باشد و ضریب کیفیت مدار Q باشد، آنگاه ولتاژ منبع را باید به‌مقدار زیر تنظیم نمود:

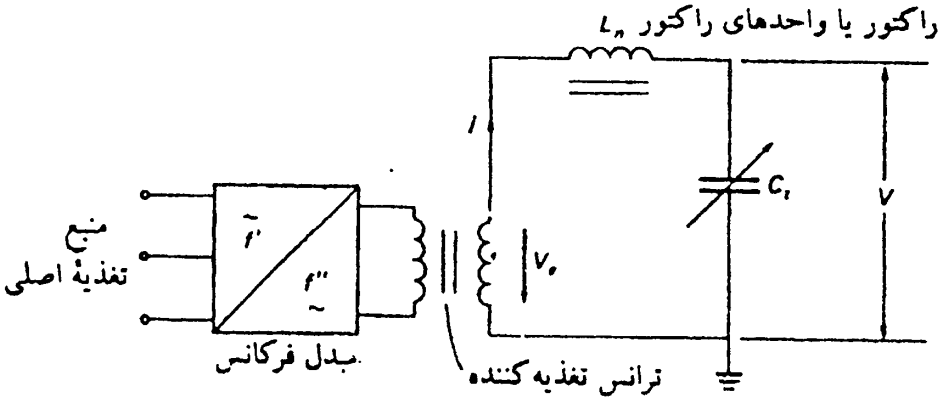
$$V_s = \frac{V_c}{Q}$$

بنابراین، ولتاژ ورودی و KVA مورد نیاز به‌وسیلهٔ ضریب $\frac{1}{Q}$ تقلیل داده می‌شود.

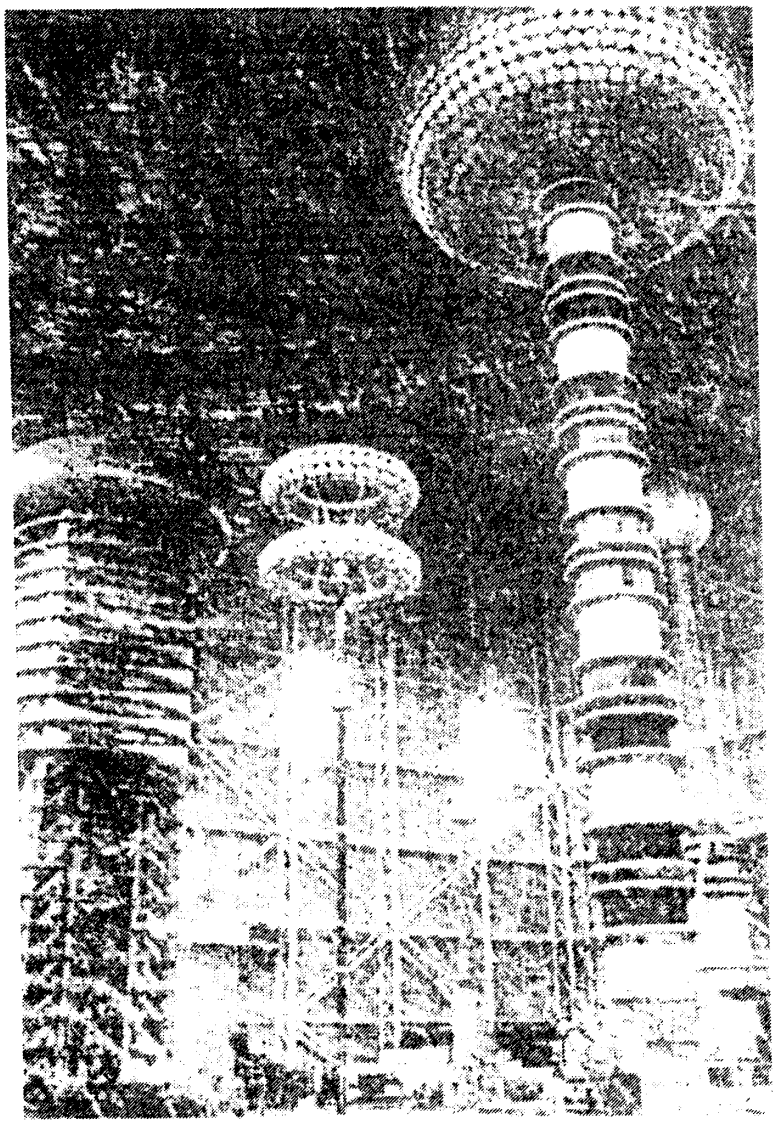
برای ایجاد رزونانس در ثانویهٔ یک ترانسفورماتور با ولتاژ نامی ۵۰kV تا ۱۰۰kV و جریان نامی نسبتاً بالا، یک چک (سلف L) اضافی قرار می‌دهند و آن را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کنند که رزونانس اتّفاق افتد (شکل ۸-۲۱ را ببینید). یعنی،

$$\omega\,(L + L_e) = \frac{1}{\omega.C} \qquad (۴۰-۸)$$

در رابطهٔ اخیر، L_e اندوکتانس معادل پراکندگی ترانسفورماتور می‌باشد. البته این



شکل (۸-۲۱): مدار آزمایش رزونانس سری با فرکانس متغیّر

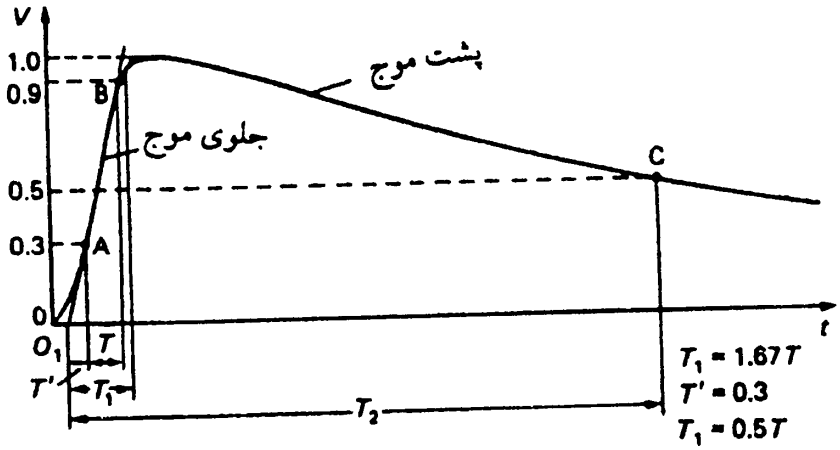


شکل (۸-۲۲): یک نمونهٔ واقعی مدار رزونانس سری برای تولید ولتاژ ۲/۲MV

مدارها کم‌تر به‌کار می‌روند ولی از آن‌ها در ارتباط با مجموعهٔ تولید اشعهٔ X استفاده می‌شود. همچنین در کارخانجات کابل‌سازی، برای آزمایش کابل‌های فشار قوی که معمولاً ظرفیت خازنی زیادی دارند، از مولّد ولتاژ AC با مدار رزونانس سری استفاده می‌شود. شکل (۸-۲۲)، یک نمونهٔ واقعی مدار رزونانس برای تولید ولتاژ فشار قوی AC را نشان می‌دهد.

۸-۶- ولتاژ فشار قوی ضربه‌ای[1]

اضافه ولتاژهای ناگهانی و گذرا با دامنه‌های خیلی زیاد در اثر صاعقه‌های آسمانی و سوئیچینگ مانند باز و بسته کردن کلید قدرت و یا اتّصال کوتاه روی خطوط انتقال به‌وجود می‌آیند. این اضافه ولتاژها به‌صورت یک موج ضربه‌ای غیرنوسانی ظاهر می‌شوندکه در مدّت زمان بسیار کوتاهی (در حدود چند میکرو ثانیه تا چند میلی‌ثانیه)، به‌مقدار دامنهٔ خود می‌رسد و مقدار دامنهٔ آن معمولاً تا چندین مگاولت هم رسیده است.. سپس موج ولتاژ تولید شده به‌صورت نمایی به صفر کاهش می‌یابد. برای آزمایش استقامت الکتریکی تجهیزات عایقی در برابر این اضافه ولتاژها، نیاز به تولید این نوع ولتاژ در آزمایشگاه‌های فشار قوی می‌باشد. شکل (۸-۲۳)، یک موج ضربه‌ای را نشان می‌دهد. آن قسمت از موج که در حال



شکل (۸-۲۳): شکل موج ولتاژ ضربه

1- *Impulse Voltage*

صعود است به پیشانی موج[۱] و آن قسمت که در حال نزول است به پشت موج[۲] معروف است. اگرچه امواج ضربه‌ای صاعقه یا سوئیچینگ عملاً دارای اَشکال متفاوتی هستند، امّا امروزه در آزمایشگاه‌ها آن‌ها را به‌شکل استاندارد تولید می‌کنند.

۸-۶-۱- موج ضربه‌ای استاندارد صاعقه

ولتاژهای فشار قوی زودگذر امواج صاعقه در خطوط انتقال، معمولاً دامنهٔ بسیار بزرگی دارند. تحقیقات عملی نشان داده است که این امواج، با سرعت بسیار زیادی و در یک زمان صعود ۰/۵ تا ۱۰ میکروثانیه افزایش می‌یابند و با سرعت کم‌تری و در زمان‌های در حدود ۳۰ تا ۲۰۰ میکروثانیه به ۵۰٪ مقدار دامنهٔ ولتاژ خود، افت پیدا می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که امواج ولتاژ فشار قوی صاعقه را می‌توان به‌صورت دو موج نمایی، طبق رابطهٔ زیر نشان داد:

$$V = V_{\circ} \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right) \qquad (۴۱-۸)$$

که α و β ثابت‌هایی با اندازه‌های میکروثانیه‌اند.

رابطهٔ اخیر یک شکل موج غیریکنواخت را که یک شیب تند تا مقدار دامنه دارد و سپس به آهستگی به‌مقدار صفر سقوط می‌کند، نشان می‌دهد. شکل موج عمومی موج ضربه‌ای استاندارد صاعقه در شکل (۸-۲۳) نشان داده شده است. امواج ضربه با زمان صعود و زمان نزول یا نیم پشت موج (زمان رسیدن به ۵۰٪ مقدار دامنهٔ ولتاژ) مشخّص می‌شوند. بنابراین، موج ۱۰۰۰kV با مشخّصات ۱/۲/۵۰μsec ، یک موج ولتاژ ضربه با زمان صعود ۱/۲μsec و زمان نزول ۵۰μsec و مقدار دامنهٔ ۱۰۰۰kV را نشان می‌دهد.

با مراجعه به شکل (۸-۲۳)، مقدار دامنهٔ ولتاژ با مقدار ۱/۰ در محور عمودی مشخّص شده است و مقدار ۱۰۰٪ را نشان می‌دهد. نقاطی که معادل ۳۰٪ و ۹۰٪ مقادیر دامنهٔ ولتاژ در قسمت پیشانی موج می‌باشند با حروف A و B معیّن شده است. همچنین خطّ متّصل کنندهٔ این نقاط تا قطع محور زمان در نقطهٔ 0_1، کشیده

1- *Front of Wave* 2- *Tail of Wave*

شده است. در واقع، نقطهٔ 0_1، مبدأ واقعی زمان موج ضربه‌ای می‌باشد. ادامهٔ خطّ مذکور، محور افقی مماس بر دامنهٔ موج ضربه‌ای را قطع می‌کند. فاصلهٔ زمانی تصویر این نقطه روی محور زمان تا نقطهٔ 0_1 طبق استاندارد زمان پیشانی موج (T_1) می‌باشد. طبق استاندارد بین‌المللی IEC، مقدار زمان پیشانی موج یا T_1 برابر است با:

$$T_1 = 1/2 \pm 30\% \ \mu sec \qquad (۴۲-۸)$$

همچنین نقطهٔ C روی قسمت نزولی موج، دارای ولتاژی معادل ۵۰٪ مقدار دامنهٔ ولتاژ موج ضربه‌ای است. فاصلهٔ زمانی تصویر این نقطه روی محور زمان تا نقطهٔ 0_1 زمان نیم‌پشت موج یا زمان نزول موج (T_2) است که طبق استاندارد بین‌المللی IEC مقدار آن برابر است با:

$$T_2 = 50 \pm 20\% \ \mu sec \qquad (۴۳-۸)$$

این موج را به اصطلاح، موج ضربه صاعقه $1/2/50\mu sec$ می‌نامند؛ یعنی زمان پیشانی موج برابر $1/2\mu sec$ و زمان نیم‌پشت موج برابر $50\mu sec$ است.

۸-۶-۲- موج ضربه‌ای استاندارد سوئیچینگ

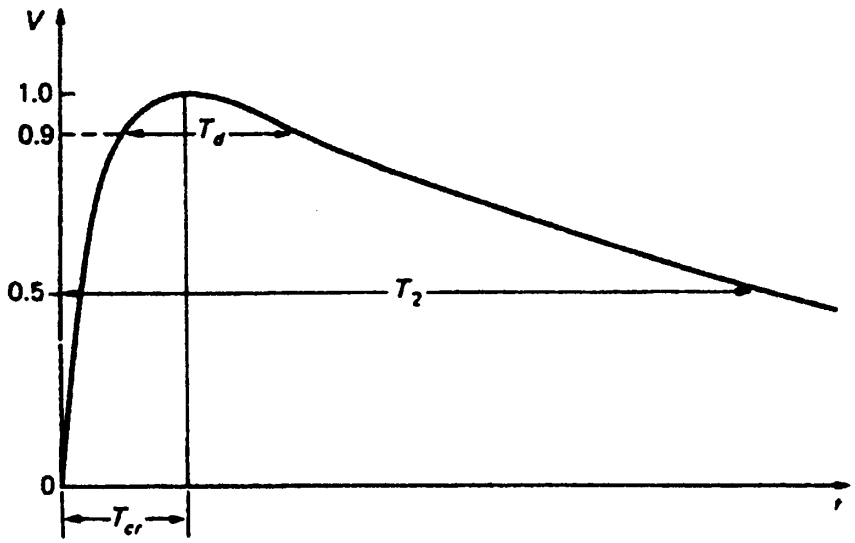
بر اثر نوسانات خط، در هنگام قطع و وصل کلیدها و یا به واسطهٔ اتّصال کوتاه، نوعی موج ضربه‌ای روی خط به‌وجود می‌آید که به آن، موج سوئیچینگ[1] می‌گویند. این نوع موج معمولاً طولانی‌تر از موج ضربه‌ای صاعقه است و به چند هزار میکروثانیه می‌رسد. همچنین ممکن است این موج به‌صورت مستطیل باشد، یعنی سریعاً بالا رفته، تقریباً مدّتی ثابت بماند و سپس به‌سرعت کم شود. این وضعیت موقعی اتّفاق می‌افتد که در زمان کوتاهی کلیدی وصل شده و فوراً قطع شود. در مورد این موج، چهار کمیت ذکر می‌شود که عبارتند از: سرعت بالا رفتن موج، مدّت زمانی که، موج ۹۰٪ از حدّاکثر خود را دارا باشد، زمان نیم‌پشت موج و مقدار دامنهٔ ولتاژ موج. شکل موج این نوع موج ضربه‌ای در شکل (۸-۲۴) نشان داده شده است. در این شکل، طبق استاندارد بین‌المللی IEC داریم:

1- Switching Surge

زمان رسیدن موج از مبدأ به صد در صد دامنه $T_{cr} = ۲۵۰ \pm ۲۰\% \ \mu sec$

زمان رسیدن موج از مبدأ به ۵۰٪ دامنه در پشت موج $T_۲ = ۲۵۰۰ \pm ۶۰\% \ \mu sec$

این موج را به اصطلاح، موج ضربه‌ای $۲۵۰/۲۵۰۰ \ \mu sec$ می‌نامند.

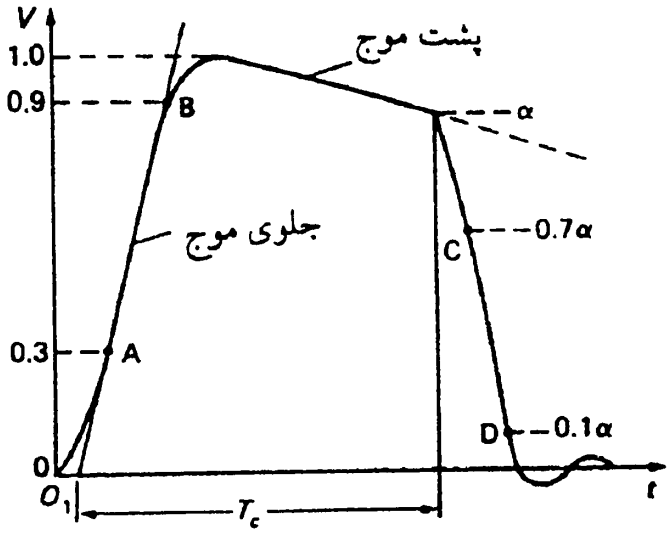


شکل (۸-۲۴): مشخّصات موج ضربه سویچینگ

۸-۶-۳- موج ضربه‌ای شکسته[1]

اگر موج ضربه‌ای یکباره یا با نوسان مختصری به صفر برسد، یک موج ضربه‌ای شکسته به‌دست می‌آید. این حالت مثل وضعیتی است که یک موج ضربه‌ای روی خطّ انتقال باعث ایجاد یک قوس الکتریکی بین خط و زمین شود که در نتیجه یک موج ضربه‌ای شکسته ایجاد می‌شود. در مورد این موج می‌توان کمیت دیگری را نیز بیان کرد که آن هم زمان شروع شکست است؛ زمان شروع شکست، فاصلهٔ تصویر این نقطه روی محور زمان تا نقطهٔ $o_۱$ در مورد موج شکسته است. البته برای موج ضربه‌ای شکسته، زمان نیم‌پشت موج معنی ندارد و بنابراین، ذکر نمی‌شود. این موضوع در شکل (۸-۲۵)، قابل مشاهده می‌باشد.

1- Chopped Wave

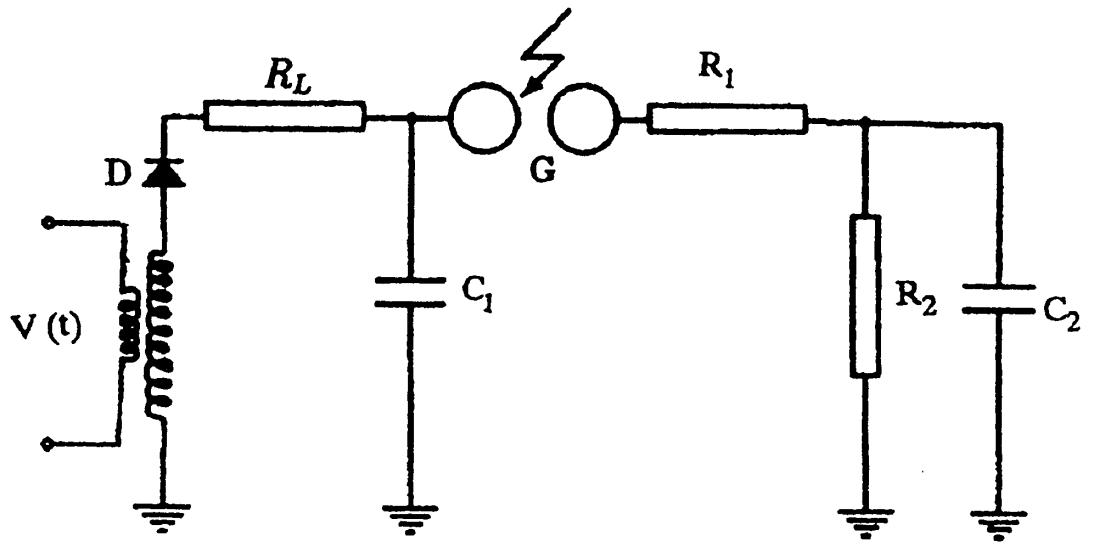


شکل (۸-۲۵): موج ضربه‌ای شکسته در زمان‌های مختلف

۸-۷- مولّدهای ولتاژ ضربه‌ای

۸-۷-۱- مدار RC تولید ولتاژ ضربه‌ای

ساده‌ترین مدار برای تولید موج ضربه، شکل (۸-۲۶) می‌باشد که از دو مدار RC تشکیل شده است. در این مدار، ولتاژ ثانویّهٔ ترانسفورماتور فشار قوی (حدّاکثر ۱۰۰kV)، توسّط دیود یکسو کنندهٔ D یکسو شده و از طریق مقاومت بارگیری R_L، موجب شارژ خازن C_1 می‌شود. به دلیل بالا بودن مقادیر خازن C_1 و مقاومت R_L، ثابت زمانی شارژ شدن، بالا بوده و شارژ خازن C_1 در مدّت زمان زیادی انجام می‌شود. پس از مدّت نسبتاً طولانی که C_1 شارژ شد، ولتاژ آن به حدّی می‌رسد که با توجّه به فاصلهٔ تنظیم شده برای گوی‌های فلزی G در این مدار، بین آن‌ها جرقّه زده می‌شود. اکنون خازن C_2 از طریق R_1 شارژ می‌شود که این خازن، همان عایق تحت آزمایش است. در این مدار با توجّه به این‌که $R_2 >> R_1$ است، ثابت زمانی شارژ خازن C_2 از طریق مقاومت R_1 خیلی کوچک‌تر از ثابت زمانی تخلیهٔ خازن‌های C_1 و C_2 روی مقاومت R_2 است؛ یعنی با توجّه به این‌که مقاومت R_1 کوچک است، خازن C_2 سریع شارژ می‌شود. بنابراین، پس از یک الی دو میکروثانیه، ولتاژ دو سر خازن C_2 به حدّاکثر خود می‌رسد. سپس خازن‌های C_1 و C_2 از طریق مقاومت R_2 تخلیه



شکل (۸-۲۶): مدار معادل مولّد ولتاژ ضربه

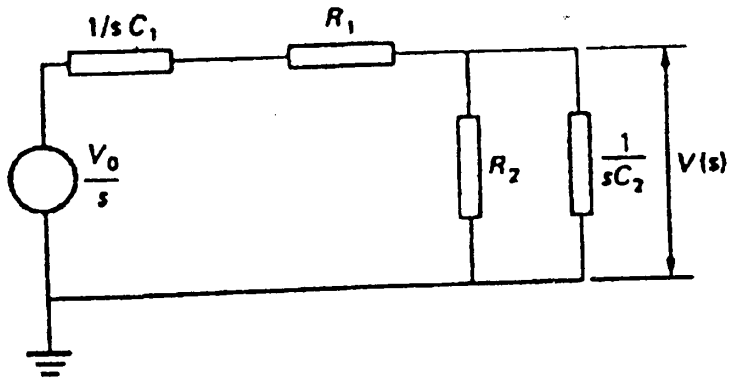
می‌شوند و ولتاژ دو سر خازن $C_۲$ کاهش می‌یابد. با توجّه به بزرگ بودن $R_۲$ ، زمان تخلیه طولانی است. به این ترتیب مقاومت $R_۱$ زمان پیشانی موج و مقاومت $R_۲$ زمان پشت موج را کنترل می‌کند. اگر ولتاژ شارژ خازن $C_۱$ هنگام جرقّه زدن گوی‌های G (که مانند یک کلید حساس به ولتاژ عمل می‌کنند)، برابر $V_۰$ باشد، با استفاده از تبدیل لاپلاس مدار، به تحلیل آن می‌پردازیم. مدار معادل در حوزهٔ لاپلاس پس از وقوع جرقّه بین گوی‌های G در شکل (۸-۲۷) آمده است. خازن $C_۱$ پس از شارژ تا حدّ ولتاژ $V_۰$ ، مانند یک باتری با ولتاژ $V_۰$ و با امپدانس داخلی معادل خازن $C_۱$ است. جریان کلّی این مدار، $I(t)$ و ولتاژ خروجی آن $V(t)$ است.

در این مدار روابط زیر حاکم است:

$$Z_۱(s) = R_۱ + \frac{۱}{SC_۱} \quad , \quad Z_۲(s) = \frac{R_۲ \frac{۱}{S\,C_۲}}{R_۲ + \frac{۱}{S\,C_۲}}$$

$$I\,(s) = \frac{\frac{V_۰}{S}}{Z_۱ + Z_۲}$$

$$V(s) = Z_۲(s)\,I\,(s) = \frac{\left(\frac{V_۰}{S}\,\frac{R_۲}{S\,C_۲}\right) / \left(R_۲ + \frac{۱}{S\,C_۲}\right)}{R_۱ + \frac{۱}{S\,C_۱} + \frac{R_۲/(S\,C_۲)}{R_۲ + ۱/(s\,C_۲)}}$$



شکل (۸-۲۷): مدار معادل مولّد ولتاژ ضربه، پس از جرقّه زدن گوی‌های فلزی G

$$V(s)=\frac{\frac{V_0}{S}\,\frac{R_2}{S\,C_2}}{R_2R_1+\frac{R_2}{S\,C_1}+\frac{R_1}{S\,C_2}+\frac{1}{S^2C_1C_2}+\frac{R_2}{S\,C_2}}$$

صورت و مخرج رابطهٔ بالا را در $\frac{SC_2}{R_2}$ ضرب می‌کنیم:

$$V(s)=\frac{V_0}{S}\,\frac{1}{SC_2R_1+\frac{C_2}{C_1}+\frac{R_1}{R_2}+\frac{1}{S\,C_1R_2}+1}$$

در مخرج رابطهٔ اخیر، مقدار R_1C_2 را فاکتور می‌گیریم:

$$V(s)=\frac{V_0}{R_1C_2}\,\frac{1}{S^2+\left(\frac{1}{R_1C_1}+\frac{1}{R_2C_2}+\frac{1}{R_1C_2}\right)S+\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \qquad (۸-۴۴)$$

با فرض مقادیر زیر،

$$K=R_1C_2\ ,\ a=\frac{1}{R_1C_1}+\frac{1}{R_2C_2}+\frac{1}{R_1C_2}\ ,\ b=\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$$

خواهیم داشت:

$$V(s)=\frac{V_0}{K}\,\frac{1}{S^2+aS+b} \qquad (۸-۴۵)$$

برای به‌دست آوردن ریشه‌های مخرج می‌توان نوشت:

$$S^2+aS+b=0$$

$$\alpha_1\ ,\ \alpha_2=\frac{-a\pm\sqrt{a^2-4b}}{2}$$

با توجّه به مقادیر مثبت a و b ، مقادیر α_1 و α_2 کوچک‌تر از صفر هستند. رابطهٔ (۸-۴۵) را می‌توان به‌صورت زیر در آورد:

$$V(s) = \frac{V_0}{K} \frac{1}{(S-\alpha_1)(S-\alpha_2)} \qquad (۸-۴۶)$$

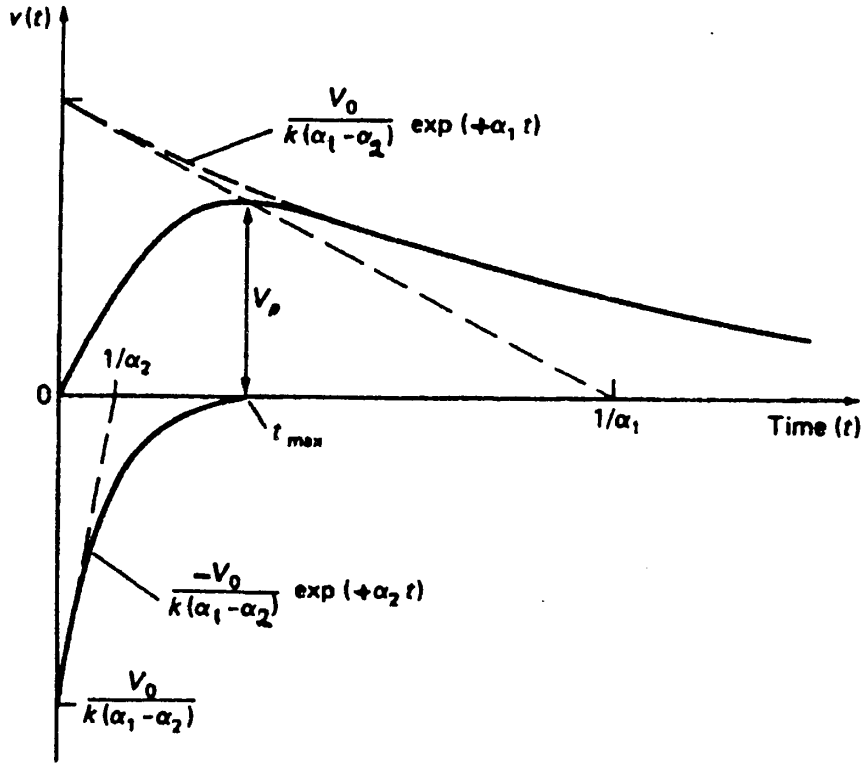
با استفاده از عکس تبدیل لاپلاس خواهیم داشت:

$$V(t) = \frac{V_0}{K} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2} \left[e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t} \right] \qquad (۸-۴۷)$$

بنابراین، ولتاژ خروجی از جمع دو تابع نمایی با علامت‌های مختلف به‌دست می‌آید که ثابت زمانی هر کدام برابر است با:

$$\tau_1 = \frac{1}{|\alpha_1|} \quad \text{و} \quad \tau_2 = \frac{1}{|\alpha_2|} \qquad (۸-۴۸)$$

با توجّه به این‌که $|\alpha_2| > |\alpha_1|$ است در نتیجه $\tau_1 > \tau_2$ است؛ یعنی ثابت زمانی تابع نمایی اوّلی بیشتر از ثابت زمانی تابع نمایی دومی است. منحنی این دو تابع در شکل (۸-۲۸) قابل مشاهده است. اکنون با انتخاب مناسب پارامترهای مدار، می‌توان شکل موج ضربه‌ای دلخواه را به‌دست آورد.



شکل (۸-۲۸): موج ولتاژ ضربهٔ تولید شده

بازدهٔ مدار مولّد ولتاژ ضربه‌ای به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{V_p}{V_\circ} \qquad (۴۹-۸)$$

بدیهی است که V_p کم‌تر از ولتاژ $V_\circ$ است. در نتیجه، بازدهٔ مدار کم‌تر از ۱۰۰٪ است. مقدار ولتاژ V_p را می‌توان با مشتق‌گیری از رابطهٔ (۸-۴۷) به‌صورت زیر به‌دست آورد.

$$\frac{dV_{(t)}}{dt} = \circ \Rightarrow \frac{V_\circ}{K}\frac{۱}{\alpha_۱ - \alpha_۲}\left(\alpha_۱ e^{\alpha_۱ t_{max}} - \alpha_۲ e^{\alpha_۲ t_{max}}\right) = \circ$$

در نتیجه،

$$\frac{\alpha_۱}{\alpha_۲} = \frac{e^{\alpha_۲ t_{max}}}{e^{\alpha_۱ t_{max}}}$$

که،

$$t_{max} = \frac{\ln(\alpha_۱/\alpha_۲)}{\alpha_۲ - \alpha_۱} \qquad (۵۰-۸)$$

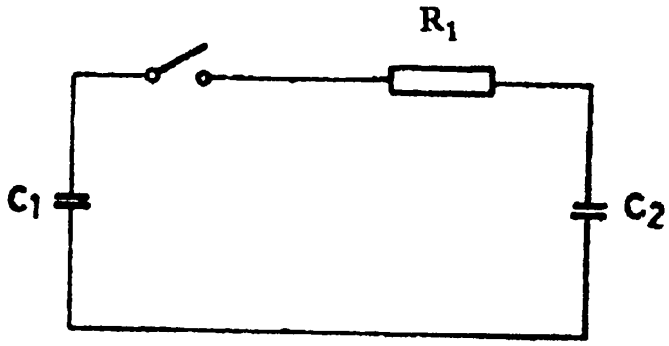
و در نتیجه ولتاژ V_p و بازدهٔ مدار مولّد، قابل محاسبه هستند.

$$V_p = \frac{V_\circ}{K}\frac{۱}{\alpha_۱ - \alpha_۲}\left[\left(\frac{\alpha_۱}{\alpha_۲}\right)^{\frac{\alpha_۱}{\alpha_۲ - \alpha_۱}} - \left(\frac{\alpha_۱}{\alpha_۲}\right)^{\frac{\alpha_۲}{\alpha_۲ - \alpha_۱}}\right] \qquad (۵۱-۸)$$

$$\eta = \frac{V_p}{V_\circ} = \frac{۱}{K(\alpha_۱ - \alpha_۲)}\left[\left(\frac{\alpha_۱}{\alpha_۲}\right)^{\frac{\alpha_۱}{\alpha_۲ - \alpha_۱}} - \left(\frac{\alpha_۱}{\alpha_۲}\right)^{\frac{\alpha_۲}{\alpha_۲ - \alpha_۱}}\right] \qquad (۵۲-۸)$$

همچنین می‌توان زمان رسیدن موج به ۵۰٪ مقدار دامنهٔ آن را در پشت موج محاسبه نمود.

در مدارهای موج ضربه‌ای و در شرایط عملی، روابط $R_۱ << R_۲$ و $C_۲ << C_۱$ حاکم می‌باشد. در نتیجه برای مدار شارژ خازن $C_۲$ از طریق مقاومت $R_۱$ و خازن $C_۱$ شکل (۸-۲۹) حاصل می‌شود. ثابت‌زمانی شارژ خازن $C_۲$ در این مدار به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.



شکل (۸-۲۹): مدار شارژ خازن $C_۲$

$$\tau_۲ = \frac{۱}{|\alpha_۲|} = R_۱ \frac{C_۱ C_۲}{C_۱ + C_۲} = R_۱ \frac{C_۲}{۱ + C_۲/C_۱} \qquad (۵۳-۸)$$

با توجّه به رابطهٔ $C_۱ >> C_۲$ به‌صورت تقریبی می‌توان نوشت:

$$\Rightarrow \quad \tau_۲ = \frac{۱}{|\alpha_۲|} \simeq R_۱ C_۲ \qquad (۵۴-۸)$$

چون ظرفیت خازنی $C_۲$ (عایق نمونهٔ تحت آزمایش) ثابت و غیر قابل کنترل است، بنابراین، فقط با تغییر مقاومت $R_۱$، ثابت زمانی $\tau_۲$ کنترل می‌شود. ثابت زمانی شارژ خازن ($\tau_۲$) متناسب با زمان رسیدن موج به‌مقدار حدّاکثر (یعنی متناسب با زمان جلوی موج) است. بنابراین، با تغییر مقاومت $R_۱$، زمان جلوی موج کنترل می‌شود. مقادیر $\tau_۲$ برای موج‌های استاندارد ضربه‌ای برابر است با:

برای موج استاندارد ۱/۲/۵۰ μsec $\qquad \tau_۲ = ۰/۴۰۵\ \mu$sec

برای موج استاندارد ۲۵۰/۲۵۰۰ μsec $\qquad \tau_۲ = ۶۲/۵\ \mu$sec

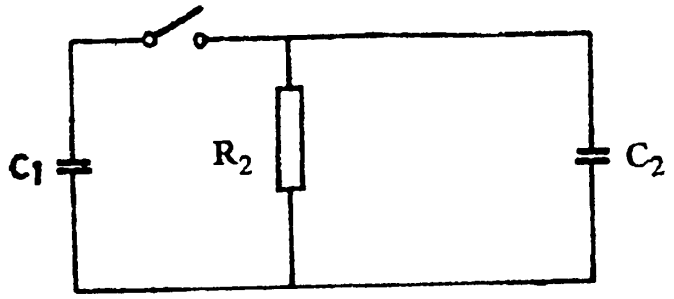
برای تخلیهٔ خازن‌های $C_۱$ و $C_۲$ در مقاومت $R_۲$، مدار شکل (۸-۳۰) را می‌توان ارائه داد. در این مدار، ثابت زمانی تخلیهٔ خازن‌های $C_۱$ و $C_۲$ در مقاومت $R_۲$ برابر است با:

$$\tau_۱ = \frac{۱}{|\alpha_۱|} = R_۲ (C_۱ + C_۲) \qquad (۵۵-۸)$$

با توجّه به این‌که $C_۱ >> C_۲$ است، از این‌رو، داریم:

$$\tau_۱ = \frac{۱}{|\alpha_۱|} \simeq R_۲ C_۱ \qquad (۵۶-۸)$$

در اینجا نیز ظرفیت خازنی $C_۱$ در ساختمان مولّد، مقدار ثابتی دارد و قابل تغییر



شکل (۸-۳۰): مدار تخلیهٔ خازن‌های C_1 و C_2

نیست. بنابراین، فقط با تغییر مقاومت R_2، ثابت زمانی τ_1 قابل کنترل است. ثابت زمانی تخلیهٔ خازن‌ها (τ_1)، متناسب با زمان نزول موج از مقدار حدّاکثر است (یعنی متناسب با زمان نیم‌پشت موج است). بنابراین، با تغییر مقاومت R_2 زمان نیم‌پشت موج کنترل می‌گردد. مقدار C_1 برای دو موج استاندارد به‌صورت زیر است.

برای موج استاندارد ۱/۲/۵۰ μsec $\tau_1 = ۶۸/۲\ \mu$sec

برای موج استاندارد ۲۵۰/۲۵۰۰ μsec $\tau_1 = ۳۱۵۵\ \mu$sec

ظرفیت مولّد C_1 و ظرفیت بار C_2 بسته به طرّاحی مدار و موضوع آزمایش ثابت خواهد بود. از این‌رو شکل موج درخواستی فقط با کنترل و تغییر مقادیر R_1 و R_2 حاصل خواهد شد.

لازم به ذکر است که در مدار شکل (۸-۲۹)، خازن C_1، خازن C_2 را از طریق R_1 شارژ می‌کند. زمان لازم برای شارژ خازن C_2 به‌طور تقریبی ۳ برابر ثابت زمانی مدار شارژ است و به‌وسیلهٔ معادلهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_1 = ۳R_1 \frac{C_1C_2}{C_1+C_2} = ۳R_1C_e \quad و \quad C_e = \frac{C_1C_2}{C_1+C_2} \qquad (۵۷-۸)$$

اگر R_1 بر حسب اهم و C_e بر حسب میکروفاراد باشد، در نتیجه τ_1 بر حسب میکروثانیه خواهد بود.

برای زمان دشارژ یا زمان پشت موج، خازن‌های C_1 و C_2 به‌صورت موازی در نظر گرفته می‌شوند که از طریق مقاومت‌های R_1 و R_2 دشارژ می‌شوند (شکل ۸-۳۰ را ببینید). از این‌رو زمان ۵۰٪ دشارژ به‌طور تقریبی با رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\tau_2 = ۰/۷\ (R_1+R_2)\ (C_1+C_2) \qquad (۵۸-۸)$$

در دو رابطهٔ اخیر، مقادیر τ_1 و τ_2 برای مدارهای معادل در شکل‌های (۸-۲۹) و (۸-۳۰) مشخّص شده است. با استفاده از روابط تقریبی، زمان‌های جلوی موج و پشت موج برای موج‌های ضربه را می‌توان در محدودهٔ ٪۲۰± از موج ضربهٔ استاندارد تخمین زد. دامنهٔ موج ضربه‌ای تولیدی را می‌توان با تغییر فاصلهٔ هوایی گوی‌های فلزی G کنترل نمود. هر چقدر فاصلهٔ هوایی گوی‌های فلزی G بیشتر شود، خازن C_1 امکان شارژ با ولتاژ V_0 بالاتری را پیدا می‌کند و بنابراین، جرقّه و برقراری اتّصال بین گوی‌ها در ولتاژ بالاتر خواهد بود. در نتیجه، دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای تولیدی بیشتر می‌شود. البته ولتاژ نامی خازن $C1$ مقدار ولتاژ شارژ V_0 آن را محدود می‌کند.

۸-۷-۲- مولّد ضربه‌ای چند طبقه - مدار مارکس[1]

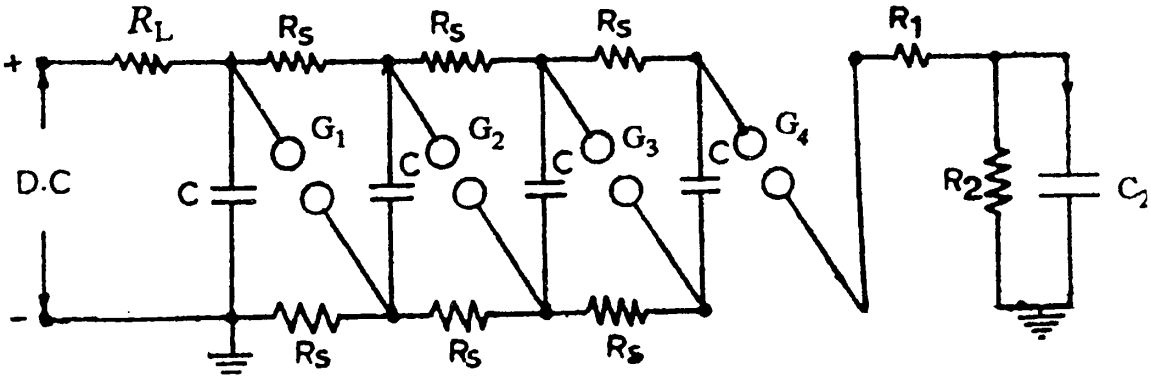
بر اساس مطالب بیان شده در مولّد یک طبقه، ابتدا خازن C_1 شارژ شده و سپس داخل مدار RC دشارژ می‌شود. معمولاً ولتاژ شارژ خازن C_1 تا حدّ حدّاکثر ۱۰۰ الی ۲۰۰kV میسّر می‌باشد ولی برای تولید موج‌های ضربه‌ای با ولتاژهای بالاتر، استفاده از یک خازن تکی C_1 باعث بزرگ شدن خازن مذکور و حجیم شدن مدار و پرهزینه شدن آن می‌شود. از این‌رو برای تولید ولتاژهای خیلی بالا، از یک مجموعه بانک خازنی که در ابتدا به حالت موازی قرار دارند و سپس به‌صورت سری در می‌آیند، استفاده می‌شود. در حالت موازی، خازن‌ها شارژ می‌شوند و سپس با سری شدن خازن‌ها، ولتاژ مورد نیاز برای دشارژ خازن‌ها ایجاد می‌شود. این نوع مولّدها که توسّط آقای مارکس ارائه‌شده است، به "مولّد ضربه‌ای چند طبقه" نیز معروف‌اند. طرح کلّی مدار مارکس و مدار اصلاح شدهٔ آن که امروزه برای مولّدهای ضربه‌ای چند طبقه بیشتر استفاده می‌شود، در شکل‌های (۸-۳۱) و (۸-۳۴) به‌صورت نمونه برای یک مولّد چهار طبقه نشان داده شده است. در این مدار،

C = ظرفیت‌های خازنی مولّد،

R_L و R_s = مقاومت‌های شارژ خازن‌های مولّد ($R_L \geq 100k\Omega$ و R_s=۱۰-۳۰kΩ)،

G = فواصل هوایی برای جرقّه زدن،

1- Marx

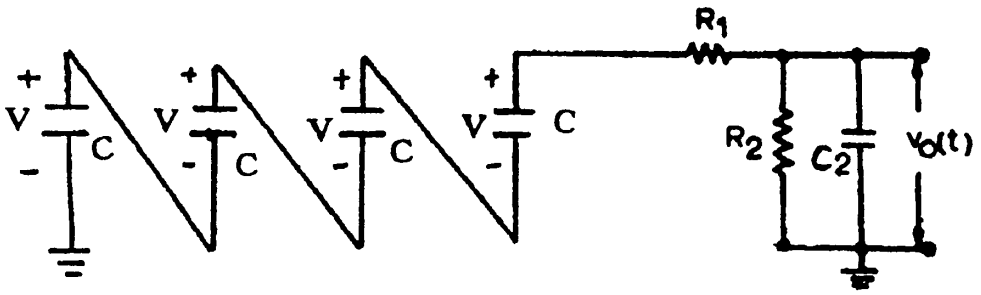


شکل (۸-۳۱): نمایی از طرح مدار مارکس
برای مولّد ضربه چند طبقه

R_1 و R_2 = مقاومت‌های سازندهٔ موج،
C_2 = عایق نمونهٔ تحت آزمایش.

معمولاً مقاومت‌های R_L و R_s برای محدود کردن جریان شارژ خازن‌های C (در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌آمپر)، به‌مقدار بزرگی انتخاب می‌شوند و ظرفیت‌های خازنی C نیز به‌گونه‌ای بزرگ انتخاب می‌شوند که حاصل CR_s (ثابت زمانی شارژ) حدود ۱۰ ثانیه تا ۱ دقیقه است. فاصلهٔ هوایی بین گوی‌ها طوری انتخاب می‌شود که ولتاژ شکست آن‌ها از ولتاژ شارژ V بزرگ‌تر باشد. بنابراین، همهٔ خازن‌ها از طریق مقاومت‌های سری R_s و R_L تا حدّ ولتاژ V در مدّت حدود ۱ دقیقه شارژ می‌شوند. سپس وقتی همهٔ خازن‌ها به اندازهٔ ولتاژ V شارژ شدند بین فاصلهٔ هوایی گوی‌های فلزی جرقّه زده می‌شود. فاصلهٔ G_2 کمی بیشتر از G_1 و فاصلهٔ G_3 کمی بیشتر از G_2 و فاصلهٔ G_4 از بقیه بیشتر است؛ زیرا وقتی G_1 جرقّه می‌زند، ولتاژ $2V$ در دو سر G_2 قرار می‌گیرد و بنابراین، لازم است برای عمل جرقّه زدن متوالی گوی‌های فلزی، فاصلهٔ بین گوی‌های پلّه‌های بالاتر به‌ترتیب، کمی زیادتر باشد. پس از جرقّه زدن همزمان گوی‌های فلزی، خازن‌های C (که به‌طور موازی شارژ شده بودند)، به‌طور سری در مدار RC سمت راست تخلیه می‌شوند. این مدار تخلیه در شکل (۸-۳۲) نشان داده شده است.

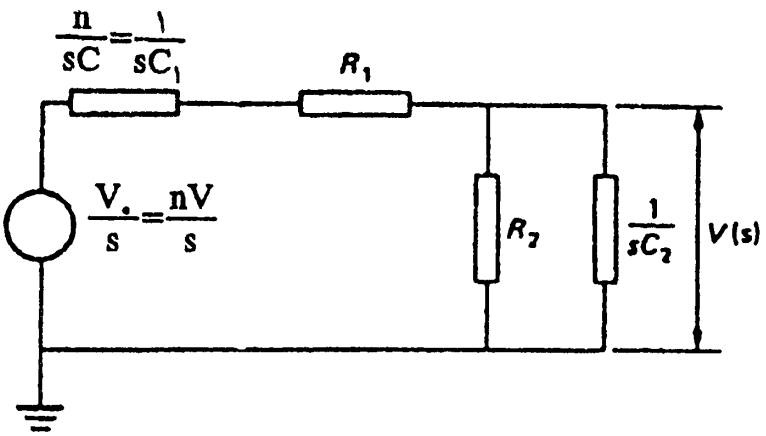
در نهایت، با اتّصال تمام گوی‌ها به یکدیگر، مدار معادل یک مولّد ضربه n طبقه



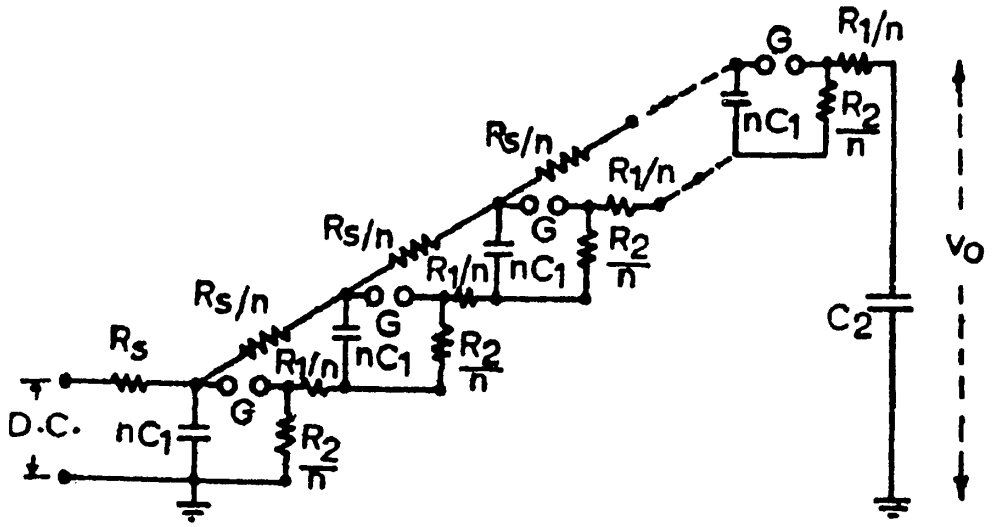
شکل (۸-۳۲): مدار معادل اوّلیهٔ مولّد ضربه چهار طبقه

با شارژ کامل خازن‌ها به‌صورت شکل (۸-۳۳) در می‌آید. با توجّه به این‌که ثابت زمانی تخلیه ($\frac{C}{n}R_2$) در برابر ثابت زمانی شارژ (C_1R_s) خیلی کوچک است، بنابراین، تخلیه در مقاومت‌های سری R_s صورت نمی‌گیرد. مدار معادل مولّد ضربه‌ای n طبقه، مشابه مدار معادل مولّد ضربه‌ای یک طبقه (مدار ساده RC) می‌باشد که به‌جای ظرفیت خازنی مولّد (C_1)، ظرفیت خازنی $\frac{C}{n}$ و به‌جای ولتاژ باتری (منبع V_0)، ولتاژ nV جایگزین شده است. مزیّت مولّد n طبقه این است که از تعدادی خازن با ولتاژ نامی کم‌تر به‌جای یک خازن با ولتاژ نامی بالا (که عایق‌بندی آن بسیار مشکل و هزینهٔ ساخت آن نیز خیلی زیاد است)، استفاده می‌شود. لازم به‌ذکر است که برای تولید موج ضربه‌ای منفی، کافی است پلاریتهٔ خازن‌های شارژ شونده را تعویض کرد.

امروزه برای صرفه‌جویی در فضای اشغال شده توسّط مولّد و اقتصادی‌تر شدن مدار، مقاومت‌های R_1 و R_2 نیز بین طبقات مدار مارکس تقسیم می‌شود و از مدار اصلاح شدهٔ شکل (۸-۳۴) استفاده می‌شود.



شکل (۸-۳۳): مدار معادل نهایی مولّد ضربه n طبقه



شکل (۸-۳۴): طرح دیگری از مولّد ضربه چند طبقه

در شکل (۸-۳۵) یک نمونهٔ واقعی از مولّد ضربه آزمایشگاهی نشان داده شده است.

مثال (۸-۲): یک ژنراتور موج ضربه‌ای ۸ طبقه را در نظر بگیرید که ظرفیت خازنی هر طبقهٔ آن ۰/۱۶μF بوده و خازن هر طبقه به‌مقدار ۱۲۰kV شارژ می‌شود. اگر ظرفیت خازنی عایق نمونهٔ تحت آزمایش ۱۰۰۰pF باشد، مقاومت‌های R_1 و R_2 مدار را برای تولید موج ضربه‌ای ۱/۲/۵۰μsec به‌دست آورید. همچنین دامنهٔ ولتاژ خروجی این ژنراتور و بازدهٔ آن را محاسبه کنید.

حل:

$$C_1 = \frac{۰/۱۶}{۸} = ۰/۰۲\,\mu F$$

$$C_2 = ۱۰۰۰ \times ۱۰^{-۱۲} = ۱ \times ۱۰^{-۹}\ F = ۰/۰۰۱\,\mu F$$

برای موج استاندارد ضربه‌ای ۱/۲/۵۰μsec باید ثابت‌های زمانی زیر را داشته باشیم.

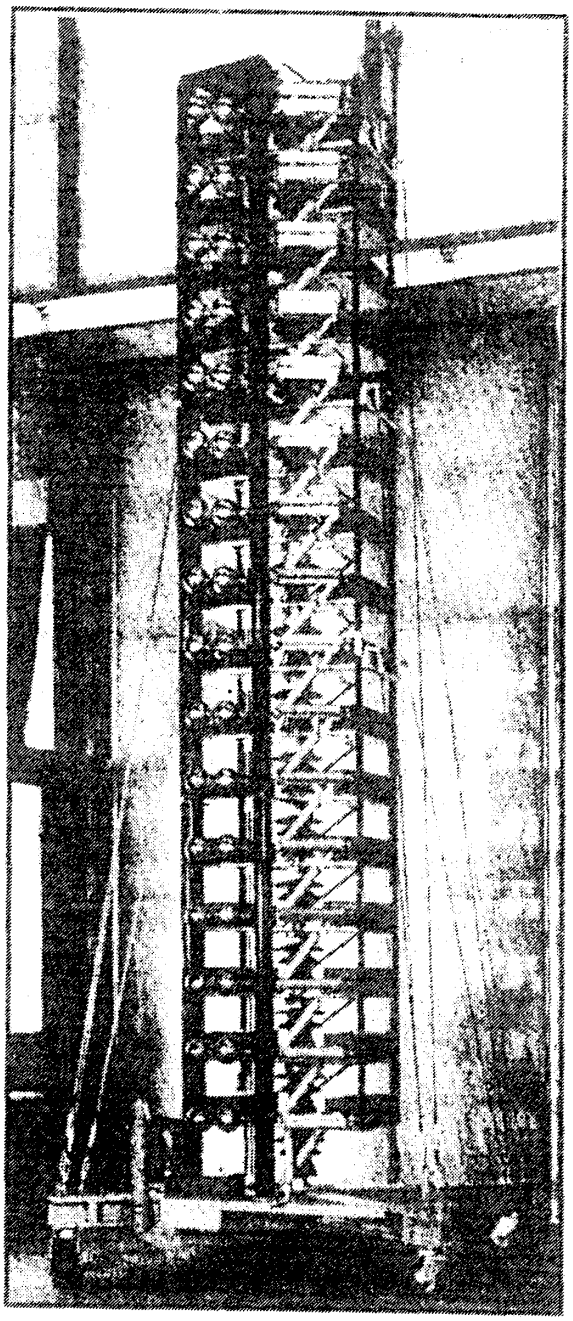
$$\tau_1 = ۶۸/۲\,\mu sec$$

$$\tau_2 = ۰/۴۰۵\,\mu sec$$

در نتیجه:

$$\tau_1 = R_2\,(C_1+C_2) \Rightarrow ۶۸/۲ = R_2(۰/۰۲ + ۰/۰۰۱) \Rightarrow R_2 = ۳۲۴۷\Omega$$

$$\tau_2 = R_1\,\frac{C_1\,C_2}{C_1+C_2} \Rightarrow ۰/۴۰۵ = R_1\,\frac{۰/۰۲ \times ۰/۰۰۱}{۰/۰۲ + ۰/۰۰۱} \Rightarrow R_1 = ۴۲۵/۲۵\Omega$$



شکل (۸-۳۵): یک نمونهٔ واقعی مولّد موج ولتاژ ضربه‌ای چند طبقه در آزمایشگاه برای تولید ولتاژ ۱۶۰۰ کیلوولت

برای تعیین دامنهٔ ولتاژ خروجی (V_p) و بازدهٔ مولّد (η)، ابتدا باید پارامترهای مورد نیاز را محاسبه کنیم:

$$V_{\circ} = ۸ \times ۱۲۰ = ۹۶۰\text{kV}$$

$$\alpha_{۱} = \frac{-۱}{\tau_{۱}} = \frac{-۱}{۶۸/۲\times۱۰^{-۶}} = -۱۴۶۶۲/۷۵$$

$$\alpha_۲ = \frac{-۱}{\tau_۲} = \frac{-۱}{۰/۴۰۵\times۱۰^{-۶}} = -۲/۴۶۹\times۱۰^{۶}$$

$$K = R_۱C_۲ = ۴/۲۵\times۱۰^{-۷}$$

در نتیجه، V_p به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_p = \frac{۹۶۰}{۴/۲۵\times۱۰^{-۷}}\times\frac{۱}{۲/۴۵۴\times۱۰^{۶}}\left[(۰/۰۰۵۹)^{۰/۰۰۵۹}-(۰/۰۰۵۹)^{۱/۰۰۶}\right]$$

$$V_p = ۹۶۰\times۰/۹۲۴ = ۸۸۷/۷\text{kV}$$

$$\eta = \frac{۸۸۷/۷}{۸\times۱۲۰} = ۰/۹۲۴ = ۹۲/۴\%$$

با تغییر فاصلهٔ گوی‌های فلزی G در هر دو مدار شکل‌های (۸-۳۱) و (۸-۳۴) می‌توان دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای را کاهش یا افزایش داد ولی با توجّه به قدرت عایقی دی‌الکتریک خازن‌های C، مقدار ولتاژ شارژ خازن $C_۱$ معادل، از یک مقدار حدّاکثر $V_{۰max}$ نمی‌تواند بیشتر شود؛ زیرا باعث آسیب رسیدن به آن‌ها می‌شود. دامنهٔ موج ضربه‌ای تولیدی نیز از یک مقداری که حتماً کم‌تر از مقدار $V_{۰max}$ است (به‌علّت اینکه راندمان مولد نمی‌تواند ۱۰۰٪ باشد)، کم‌تر خواهد بود. با توجّه به‌مقدار $V_{۰max}$ ، یک پارامتر مهم که به‌عنوان مشخّصات فنّی مولّدهای ضربه‌ای ارائه می‌شود، حدّاکثر انرژی قابل ذخیره توسّط مولّد است که بر حسب کیلوژول بیان می‌شود. مقدار این انرژی برابر است با:

$$W_{max} = \frac{۱}{۲}C_۱V_{۰max}^{۲} \qquad (۵۹-۸)$$

با تعویض پلاریتهٔ خازن $C_۱$ می‌توان موج ضربه‌ای منفی تولید نمود. استقامت عایقی در برابر موج ضربه‌ای منفی برای عایق‌ها، معمولاً بیشتر از موج ضربه‌ای مثبت است.

۸-۷-۳- تولید امواج سوئیچینگ[۱] نوسانی

امروزه در خطوط انتقال با ولتاژ فوق‌العاده بالا[۲] و سیستم‌های قدرت، موج سوئیچینگ یکی از عوامل مؤثّری است که در طرّاحی موادّ عایقی اثر دارند. یک

1- Switching Surges

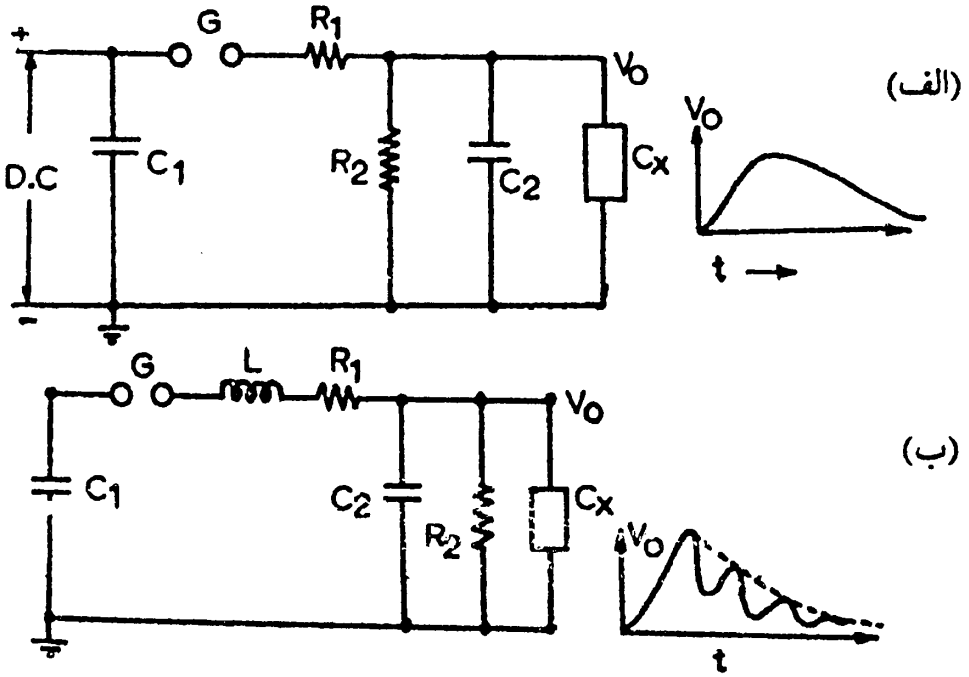
2- Extra High Voltage (EHV)

موج ولتاژ سوئیچینگ در اثر باز و بسته شدن ناگهانی کلیدهای قدرت ایجاد می‌شود که همراه با یک قوس الکتریکی در کلید می‌باشد. موج ولتاژ سوئیچینگ ممکن است یک موج نوسانی یا یک موج نوسانی میرا شونده باشد که مقدار فرکانس آن از چند صد هرتز تا چند کیلو هرتز می‌باشد. همچنین مدّت زمان رسیدن به دامنهٔ موج در حدود ۰/۱ تا ۱۰ میلی‌ثانیه و زمان نزول آن (زمان نیم‌پشت موج) از ۱ تا چند میلی‌ثانیه است. بنابراین، امواج سوئیچینگ در مقایسه با ولتاژهای ضربهٔ صاعقه، دارای انرژی بیشتری هستند. چندین نوع مدار برای تولید امواج سوئیچینگ انتخاب شده‌اند که عبارت است از:

۱- مدار RC مولّد ضربه، برای ایجاد شکل موج‌های با مدّت زمان طولانی‌تر.

۲- ترانسفورماتورهای قدرت یا ترانسفورماتورهای آزمایشی که با امواج نوسانی معیّن ولتاژهای DC تحریک شده است. شکل (۸-۳۶)، مدارات مولّد ضربه را برای ایجاد امواج سوئیچینگ نشان می‌دهد.

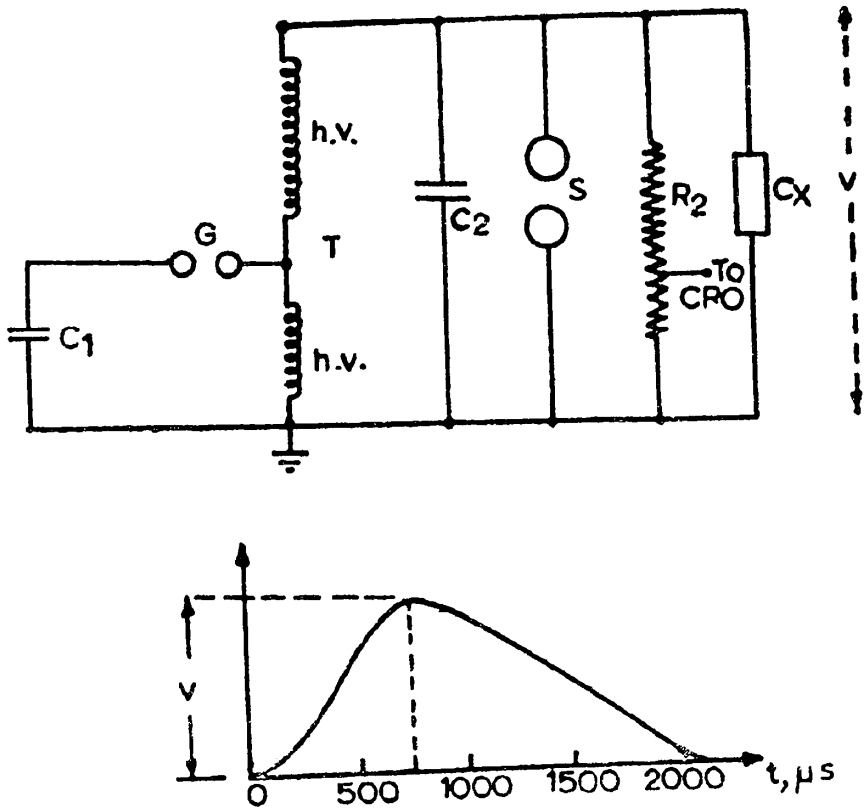
ترتیب عناصر مدار، مانند مولّد ضربه‌ای موج صاعقه است. مقادیر R_1 و R_2 برای تولید شکل موج‌های با مدّت زمان طولانی‌تر، مثل ۱۰۰/۱۰۰۰μsec یا



شکل (۸-۳۶) : مدارهایی برای تولید ولتاژهای موج سوئیچینگ

μsec ۴۰۰/۴۰۰۰، به‌ترتیب مقادیری از ۱ تا ۵ کیلو اهم و ۵ تا ۲۰ کیلواهم خواهند بود. بنابراین، R_1 در حدود ۲۰ تا ۳۰٪ مقدار R_2 خواهد بود. از این گذشته، مقادیر مقاومت‌های شارژ کنندهٔ R_1، به‌مقدار زیادی افزایش می‌یابند تا در مرحلهٔ دشارژ خازن C_2، با مقاومت R_2 موازی شود. مدار ارائه شده در شکل (۸-۳۶-ب) نوسانات غیریکنواخت میرا شونده را تولید می‌کند. با استفاده از یک سلف L، مقدار R_1 به‌مقدار زیادی کاهش می‌یابد و در نتیجه، کارآیی مولّد بالا می‌رود. نوسانات میرا شونده ممکن است دارای فرکانس‌هایی در حدود ۱ تا ۱۰ کیلو هرتز باشند که این فرکانس‌ها وابسته به پارامترهای مدار هستند.

معمولاً حدّاکثر دامنهٔ موج سوئیچینگ از ۲۵۰ تا ۳۰۰kV است که از یک مولّد ضربه‌ای با مقادیر نامی ۱۰۰۰kV و ۵kW.sec به‌دست می‌آید. با استفاده از یک سلف L و مقاومت الکتریکی کم، می‌توان موج ضربه‌ای سوئیچینگ با ولتاژ بیشتر از ۵۰۰kV را تولید نمود. امواج سوئیچینگ با دامنه‌های بسیار بالا و مدّت زمان طولانی را می‌توان با استفاده از مدار نشان داده شده در شکل (۸-۳۷) به‌دست آورد. خازن



شکل (۸-۳۷): مدار تولید امواج ضربه و شکل موج رایج آن‌ها

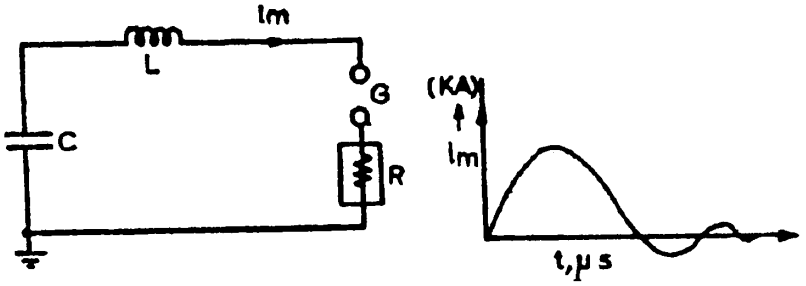
C_1 مولّد ضربه‌ای، با یک ولتاژ DC پایین (۲۰ تا ۲۵ کیلوولت)، شارژ می‌شود و سپس در داخل یک سیم‌پیچ فشار ضعیف از یک ترانسفورماتور قدرت یا ترانسفورماتور آزمایش دشارژ می‌شود. سیم‌پیچ ولتاژ بالا با خازن بار C_2 و با یک مقسم پتانسیل R_2، با یک گوی فاصلهٔ هوایی S و با وسیلهٔ مورد آزمایش، به حالت موازی بسته می‌شود. در طول آزمایش، یک اتوترانسفورماتور، موج سوئیچینگ را در دو سر وسیلهٔ مورد آزمایش به‌شکل مناسب تولید می‌کند.

۸-۸- مولّد جریان‌های ضربه‌ای

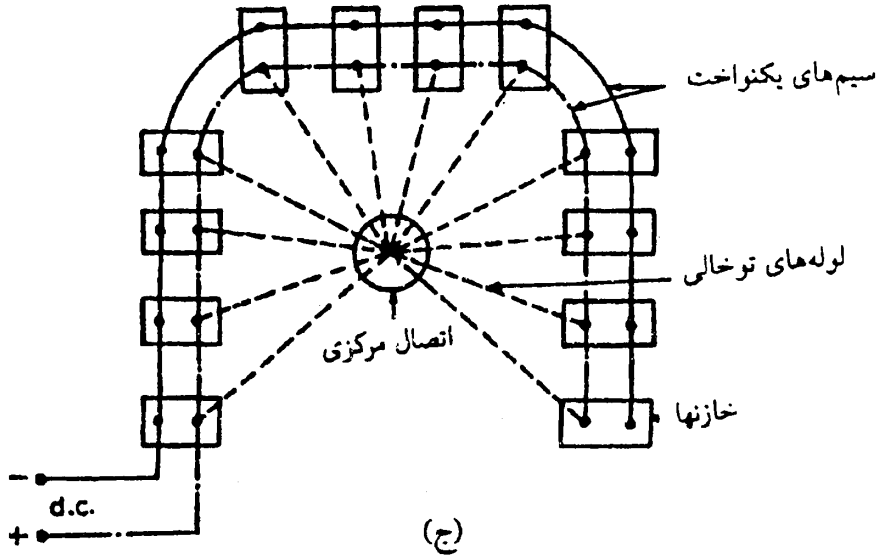
تخلیه‌های الکتریکی صاعقه روی خطوط انتقال، هم امواج ضربه‌ای با ولتاژ بالا و هم امواج ضربه‌ای با جریان بالا را ایجاد می‌کنند. با استفاده از وسیله‌های محافظ مثل تضعیف‌کننده‌های موج، جریان‌های صاعقه بدون وارد کردن صدمه‌ای به خطوط، به زمین تخلیه می‌شوند. بنابراین، موج جریان ضربه‌ای با دامنهٔ بزرگ (تقریباً ۱۰۰kA) را باید در آزمایشگاه‌های تولید جریان ضربه ایجاد نمود تا از آن بتوان در مباحث تحقیقاتی و آزمایش تجهیزات استفاده کرد.

۸-۸-۱- تعریف شکل موج‌های جریان ضربه‌ای

شکل موج‌هایی که در آزمایش‌ها استفاده می‌شوند، ۴/۱۰μsec و ۸/۲۰μsec هستند که مشخّصات کلّی آن مطابق با شکل (۸-۳۸-ب) نشان داده شده است. خطای مجاز منظور شده روی زمان‌های جلو و عقب موج در حدود ٪۱۰± است. علاوه بر موج جریان ضربهٔ استاندارد، امواج مربّعی با مدّت زمانی طولانی در آزمایش نیز استفاده می‌شوند. امواج مربّعی معمولاً مدّت زمانی بین ۰/۵ تا 5msec دارای مقدار ثابتی هستند که زمان‌های صعود و نزول این نوع امواج، کم‌تر از ٪۱۰ زمان کلّ موج می‌باشد. این خطای منظور شده برای حدّاکثر ولتاژ، در حدود ٪۲۰+ و ٪۰- است (به‌عبارت دیگر مقدار حدّاکثر جریان ممکن است از مقدار تعیین شده بیشتر باشد، امّا کم‌تر از آن نمی‌تواند باشد). همچنین مدّت زمان موج برابر مدّت زمانی است که مقدار جریان، حدّاقل به‌مقدار ٪۱۰ از مقدار حدّاکثر جریان باشد.



(الف) (ب)



(ج)

R_s = مقاومت شارژ S = فاصلهٔ هوایی جرقه زن
T = موضوع آزمایش LC = شبکه ساخت ضربه
R_v = تقسیم ولتاژ برای اندازه‌گیری ولتاژ
R_{sh} = جریان شنت برای اندازه‌گیری جریان

شکل (۸-۳۸): مدار تولید جریان ضربه‌ای و شکل موج آن؛
الف) مدار اصلی یک مولّد جریان ضربه‌ای؛ ب) شکل موج جریان ضربه‌ای؛
ج) ترتیب خازن‌ها برای تولید جریان ضربه‌ای

۸-۸-۲- مدار تولید امواج جریان ضربه‌ای

برای تولید جریان‌های ضربه‌ای با دامنهٔ بالا، یک سری خازن در حالت موازی مطابق شکل (۸-۳۸-ج) متّصل می‌شوند و در یک مقدار معیّن شارژ شده و از طریق یک مدار سری R-L دشارژ می‌گردند که در شکل (۸-۳۸-الف) نشان داده شده است. در این شکل، یک بانک خازنی در حالت موازی قرار دارد که خازن‌های آن از طریق یک

منبع DC (با اندازهٔ ولتاژ بالاتر از ۲۰۰kV) شارژ می‌شوند. مقاومت R، بیانگر مقاومت دینامیکی وسیلهٔ تحت آزمایش و مقاومت مدار شنت[۱] می‌باشد. همچنین L یک سلف جریان بالا با هستهٔ هوایی است که معمولاً از یک لوله مارپیچ با تعداد دور کمی از سیم‌های پیچیده تشکیل شده است. اگر خازن به اندازهٔ ولتاژ V شارژ شود، و فاصلهٔ هوایی دو گوی فلزی، به‌طور ناگهانی از طریق جرقّه متّصل گردند، آن‌گاه خازن دشارژ می‌شود. جریان i_m ایجاد شده از معادلهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$V = R\, i_m + L\frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C}\int_0^t i_m\, dt$$

معمولاً مدار در حالت زیر میرایی است. یعنی،

$$\frac{R}{2} < \sqrt{\frac{L}{C}}$$

از این‌رو i_m را می‌توان به‌صورت زیر تعیین نمود:

$$i_m = \frac{V}{\omega L}\, e^{-at} \sin(\omega t) \qquad (۶۰-۸)$$

که،

$$a = \frac{R}{2L} \quad , \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \qquad (۶۱-۸)$$

مدّت زمانی که جریان i_m از مقدار صفر به اوّلین مقدار پیک خود بالا می‌رود، را می‌توان به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\tau_1 = \tau_f = \frac{1}{\omega}\sin^{-1}\frac{\omega}{\sqrt{LC}} \qquad (۶۲-۸)$$

مدّت زمان برای یک نیم سیکل موج نوسانی میرا شونده τ_2 به‌صورت زیر است:

$$\tau_2 = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \qquad (۶۳-۸)$$

می‌توان نشان داد که معمولاً مقدار حدّاکثر i_m برای یک انرژی معیّن $W=\frac{1}{2}CV^2$ و اندوکتانس مؤثّر L، به‌مقدار V و C غیروابسته است. این موضوع را می‌توان از

۱- مقاومت شنت: مقاومت کوچکی که برای افزایش دامنهٔ اندازه‌گیری یک دستگاه سنجش جریان، به‌طور موازی با ترمینال‌های آن قرار می‌گیرد.

معادلهٔ (۸-۶۰) هم مشاهده نمود که برای داشتن جریان‌های بالا در یک ولتاژ شارژ V، یک اندوکتانس کوچک لازم است.

برای یک موج جریان ضربهٔ استاندارد $8/20\mu sec$، مقادیر $a=0/0535\times10^6$ و $\omega=0/133\times10^6$ را خواهیم داشت که در این شرایط، R، L و C به‌ترتیب بر حسب اهم، میکروهانری و میکرو فاراد هستند. در این حالت، حاصل‌ضرب $LC=65$ است. از این‌رو، با دانستن مقدار ظرفیت مولّد C، مقدار L از رابطهٔ $L=\frac{65}{C}$ محاسبه می‌شود و مقدار R هم از رابطهٔ (۸-۶۱) حاصل می‌شود (به‌طوری که $R=2L\alpha$). همچنین مقدار حدّاکثر $i_m=I_p$ از طریق $(VC)/14$ به‌دست می‌آید، که V بر حسب kV و I_p برحسب kA و C بر حسب μF است.

۸-۸-۳- تولید جریان‌های ضربه‌ای با دامنهٔ بالا

برای تولید مقادیر بالای جریان‌های ضربه، یک تعداد از خازن‌ها، در حالت موازی شارژ شده و سپس به‌طور موازی در مدار دشارژ می‌شوند. ترتیب خازن‌ها در شکل (۸-۳۸-ج) نشان داده شده است. برای به حدّاقل رساندن اثر اندوکتانس، خازن‌ها به واحدهای کوچک‌تر تقسیم شده است.

اگر n_1 گروه خازن وجود داشته باشد و هر گروه شامل n_2 واحد و اگر L_0 اندوکتانس مسیر مشترک دشارژ باشد و L_1 مربوط به گروه باشد، پس اندوکتانس مؤثّر L با رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$L = L_0 + \frac{L_1}{n} + \frac{L_2}{n_1 n_2} \qquad (۸-۶۴)$$

قسمت‌های ضروری یک مولّد جریان ضربه عبارتند از:

۱- یک واحد شارژ DC معیّن، تا ولتاژ متغیّری را برای بانک خازنی ایجاد کند.

۲- خازن‌هایی با ظرفیت زیاد (۰/۵ تا ۵ میکرو فاراد)، که هر کدام با تعداد زیادی اندوکتانس سلفی با ظرفیت کم، با توانایی جریان‌های بالا در حالت اتّصال کوتاه موازی می‌شوند.

۳- یک مجموعهٔ القاگر با هستهٔ هوایی با ظرفیت جریانی بالا.

۴- تجهیزات مخصوص و اسیلوگراف به منظور اندازه‌گیری متغیّرها.

۵- یک واحد تریگر کننده و دوگوی، با فاصلهٔ هوایی برای تولید جرقّه در مولّد جریان.

فصل نهم

اندازه‌گیری ولتاژهای فشار قوی و تلفات عایقی

۹-۱- مقدّمه

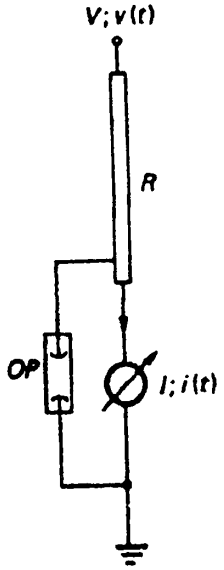
برای آزمایش تجهیزات فشارقوی و نیز انجام کارهای تحقیقاتی در آزمایشگاه‌های فشار قوی، لازم است بتوانیم ولتاژهای بالا را اندازه‌گیری کنیم. همچنین در بهره‌برداری از خطوط انتقال و ایستگاه‌های برق فشار قوی، به‌منظور کنترل و نظارت بر مقادیر ولتاژها و جریان‌های فشار قوی، نیاز به اندازه‌گیری آن‌ها می‌باشد. برای اندازه‌گیری ولتاژهای بالا، روش‌های مختلفی وجود دارد که در این فصل به آن‌ها اشاره می‌کنیم.

۹-۲- اندازه‌گیری ولتاژهای DC

برای اندازه‌گیری ولتاژهای فشارقوی DC ، روش‌های مختلفی وجود دارد. روش‌های مرسوم به شرح زیر است.

۹-۲-۱- استفاده از مقاومت سری و میکروآمپرمتر

ساده‌ترین روش انداه‌گیری مقدار یک ولتاژ فشارقوی DC، استفاده از یک مقاومت اهمی بسیار بزرگ در سری با یک میکروآمپرمتر مطابق با شکل (۹-۱) است. در این روش، شدّت جریان عبوری از مقاومت اهمی بزرگ، توسّط میکروآمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود. برای به‌دست آوردن ولتاژ باید مقدار مقاومت را



شکل(۹-۱): اندازه‌گیری ولتاژ DC با میکروآمپرمتر
(op حفاظت اضافه‌ولتاژ را به عهده دارد)

دقیقاً دانست تا بتوان ولتاژ را از رابطهٔ زیر محاسبه کرد.

$$V = R.I \qquad (۹-۱)$$

به‌سبب امپدانس بسیار کم میکروآمپرمتر، از افت ولتاژ دو سر آن صرف‌نظر می‌شود. عبور جریان از مقاومت R باعث گرم شدن و تغییر مقدار آن می‌شود؛ بنابراین، جنس مقاومت R باید از هادی‌هایی باشد که ضریب حرارتی آن‌ها خیلی کوچک و در حدّ صفر باشد (مانند مانگانین[۱])؛ زیرا در غیر این صورت، با توجّه به بزرگ بودن مقدار مقاومت R، خطای نسبی بزرگی در اندازه‌گیری ولتاژ پدید می‌آید. معمولاً مقاومت R از چند طبقه مقاومت سری تشکیل شده است. چنان‌چه از شکل (۹-۱) نیز ملاحظه می‌شود، از یک دیود زنر[۲] موازی با آمپرمتر جهت حفاظت آن استفاده می‌شود.

۹-۲-۲- استفاده از مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر با امپدانس بالا

مقسّم ولتاژ مقاومتی از یک بازوی با مقاومت بسیار زیاد (R_1) و یک بازوی با مقاومت نسبتاً کم (R_2) تشکیل شده است. قسمت اعظم ولتاژ فشارقوی روی

1- Manganin

2- Zener Diode

مقاومت بزرگ R_1 و ولتاژ نسبتاً کمی روی مقاومت کوچک R_2 می‌افتد. اکنون با استفاده از یک ولت‌متر و اندازه‌گیری ولتاژ دو سر مقاومت R_2 (برابر با V_2) و دانستن نسبت مقاومت‌های R_1 و R_2 می‌توان به اندازه‌گیری مقدار ولتاژ فشارقوی دست یافت. این مدار در شکل (۹-۲) نشان داده شده است.

$$V = V_1 + V_2 = R_1 i_1 + R_2 i_2$$

چون امپدانس داخلی ولت‌متر خیلی زیاد است، جریان مصرفی آن بسیار کوچک بوده و قابل صرف‌نظر کردن خواهد بود؛ به‌طوری که $i \cong 0$ است و در نتیجه می‌توان نوشت:

$$i_1 \cong i_2$$

$$V = R_1 i_1 + R_2 i_1$$

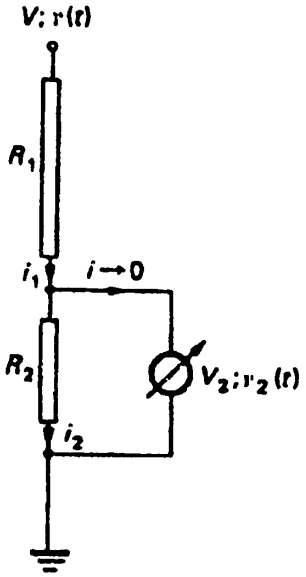
$$V_2 = R_2 i_1$$

آن‌گاه می‌توان نوشت:

$$\frac{V}{V_2} = \frac{R_1 i_1 + R_2 i_1}{R_2 i_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = (1 + \frac{R_1}{R_2})$$

در نتیجه،

$$V = (1 + \frac{R_1}{R_2}) V_2 \qquad (۹-۲)$$

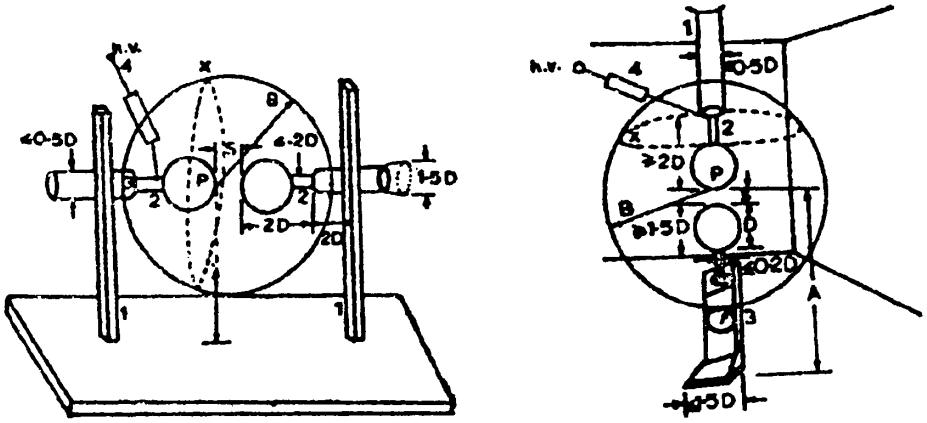


شکل (۹-۲): اندازه‌گیری ولتاژ DC با استفاده از ولت‌متر و مقسّم ولتاژ مقاومتی

با معلوم بودن مقاومت‌های R_1 و R_2 و ولتاژ اندازه‌گیری شده توسّط ولت‌متر (V_2)، ولتاژ فشارقوی V به‌دست می‌آید.
جدای از دقّت ولتاژ اندازه‌گیری شده توسّط ولت‌متر (V_2)، دامنهٔ ولتاژ فشارقوی در این رابطه، فقط بستگی به نسبت مقاومت‌های R_1 و R_2 دارد. بنابراین، در این روش، دقّت بالاتری حاصل می‌شود؛ زیرا تغییر مقاومت‌های R_1 و R_2 در اثر تغییر درجه حرارت ناشی از عبور جریان، به یک نسبت می‌باشد. در نتیجه، اثر درجه حرارت در خطای اندازه‌گیری حذف می‌شود.
ولت‌مترهای الکترونیکی امروزی با امپدانس خیلی بالا و دقّت کافی، استفاده از این روش را امکان‌پذیر می‌سازد. در این مدار، به‌جای ولت‌متر، می‌توان از یک اسیلوسکوپ نیز استفاده نمود.

۹-۲-۳- استفاده از دو الکترود کروی شکل فلزی

اندازه‌گیری ولتاژ به کمک دو الکترود کروی شکل فلزی بر این مبنا استوار است که در فاصلهٔ بین دو کره در اثر اعمال ولتاژ بین آن‌ها، میدان الکتریکی یکنواختی به‌وجود می‌آید. اگر فاصلهٔ بین کره‌ها به اندازه‌ای باشد که شدّت میدان ایجاد شده موجب شکست الکتریکی هوای موجود در فضای بین دو کره گردد، آنگاه به‌سبب معلوم بودن شدّت میدان شکست هوا (مثلاً در شرایط جوّی استاندارد برابر ۳۰kV/cm است) می‌توان مقدار ولتاژ اعمال شده را تعیین (اندازه‌گیری) نمود.
در این روش، دو الکترود کروی شکل به‌طور افقی و یا عمودی در مقابل یکدیگر قرار می‌گیرند. یکی از آن‌ها ثابت باقی می‌ماند و دیگری متحرّک می‌باشد و می‌توان با آن، فاصلهٔ بین دو الکترود (S) را تنظیم نمود. این روش در شکل (۹-۳) نشان داده شده است. در این روش، ولتاژ را بین دو الکترود کروی (که مقابل یکدیگر به‌صورت افقی یا عمودی قرار دارند)، متّصل می‌کنند. سپس دو کره را با سرعت کم (آهسته آهسته) به همدیگر نزدیک می‌نمایند. در یک فاصلهٔ معیّن S بین دو گوی جرقّه زده، که با وسیلهٔ اندازه‌گیری طول (مانند کولیس) اندازه‌گیری می‌شود. از روی جدول‌های مخصوص و روابط مربوط به آن، با داشتن رطوبت هوا، فشار هوا و درجه حرارت محیط، شدّت میدان الکتریکی لازم برای شکست هوای محیط آزمایشگاه (E_s)



(الف) (ب)

شکل (۹-۳): اندازه‌گیری ولتاژ DC و AC و ضربه‌ای با استفاده از دو الکترود فلزی

به‌دست می‌آید. حالا ولتاژ مجهول را از رابطهٔ مربوط به میدان‌های الکتریکی یکنواخت به‌دست می‌آورند.

$$V = E_s \cdot S \qquad (۹-۳)$$

این اندازه‌گیری معمولاً چندین بار تکرار می‌شود و میانگین ولتاژهای محاسبه شده از رابطهٔ بالا که به همدیگر نزدیک می‌باشند، به‌عنوان ولتاژ واقعی اندازه‌گیری شده تعیین می‌شود. عیب این روش در آن است که بر اثر جرقّه، اتّصال کوتاه برقرار شده و در نتیجه، به واسطهٔ جریان زیاد، رله‌ها ولتاژ را قطع می‌کنند. البتّه این روش دارای مزایایی از جمله سادگی، خطای نسبتاً کم و اطمینان به آن است.

در این روش اندازه‌گیری باید به نکات زیر توجّه نمود:

۱- فاصلهٔ بین دو کره (S)، باید کم‌تر از نصف قطر کره‌ها باشد $(S \leq \frac{1}{2} D)$ تا میدان یکنواخت بین دو کره ایجاد گردد. این مهم‌ترین شرط برای صادق بودن رابطهٔ (۹-۳) است.

۲- سطح کره‌ها باید کاملاً صاف و هموار باشد.

۳- سطح کره‌ها را باید کاملاً تمیز و خشک نمود.

۴- بسته به قطر کره‌ها و فاصلهٔ بین دو کره، مقادیر قطر میله‌های پایه کره‌ها، طول آن‌ها، و نیز فاصلهٔ کره‌ها از سطح زمین و حدّاقل فاصلهٔ شعاعی کره‌ها از محیط دیواره‌های اطراف و وسایل دارای پتانسیل زمین، باید طبق استاندارد رعایت شود تا شدّت میدان، کاملاً یکنواخت گردد.

با این روش اندازه‌گیری می‌توان مقدار پیک ولتاژهای متناوب و نیز دامنهٔ ولتاژهای ضربه‌ای را نیز اندازه‌گیری نمود. این روش علاوه بر سادگی، خطای اندازه‌گیری بسیار کمی دارد. در نتیجه، از این روش غالباً برای کالیبره نمودن دستگاه‌های اندازه‌گیری دیگر نیز استفاده می‌کنند. لازم به ذکر است که در اندازه‌گیری دامنهٔ موج ضربه‌ای، باید فاصلهٔ بین دو کره آنقدر تغییر داده شود تا با تکرار آزمایش در ۵۰٪ موارد، شکست الکتریکی و جرقّه بین دو کره زده شود.

در این روش، اگر شعاع کره‌ها و فاصلهٔ بین آن‌ها، خیلی کوچک باشد، ممکن است احتمالاً بین دو کره، الکترون آزادی برای به‌وجود آمدن شرط یونیزاسیون و تخلیهٔ الکتریکی به‌وجود نیاید. بنابراین، بین دو کره را توسّط لامپ جیوه‌ای روشن می‌کنند تا یونیزاسیون به نحو مطلوبی انجام شود. این مسئله خصوصاً برای اندازه‌گیری دامنهٔ موج‌های ضربه‌ای که زمان وقوع پیک آن‌ها خیلی کوتاه است و برای تقلیل زمان تأخیر آماری خیلی مهم است.

۹-۲-۴- استفاده از ولت‌مترهای الکترواستاتیکی

اگر با اعمال ولتاژ بین دو صفحهٔ فلزی، یک میدان الکتریکی را به‌وجود آوریم، در این صورت در این میدان الکترواستاتیکی ایجاد شده، نیروی جاذبه‌ای بین دو الکترود به‌وجود می‌آید. مقدار این نیرو از مشتق انرژی الکتریکی ذخیره شده نسبت به فاصلهٔ x در جهت الکترودها به‌دست می‌آید. یعنی،

$$F = \left| \frac{-dW}{dx} \right| \qquad (۹-۴)$$

با اعمال ولتاژ V بین دو صفحه با ظرفیت خازنی C، انرژی $W = \frac{۱}{۲} CV^۲$ در میدان ذخیره می‌شود. اگر سطح الکترودها برابر A باشد آن‌گاه:

$$C = \varepsilon \frac{A}{x}$$

$$W = \frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x} V^۲ \qquad (۹-۵)$$

$$\frac{dW}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x} V^۲\right) = -\frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x^۲} . V^۲$$

در نتیجه،

$$F = \frac{۱}{۲} \varepsilon \frac{A}{x^۲} V^۲ \qquad (۹-۶)$$

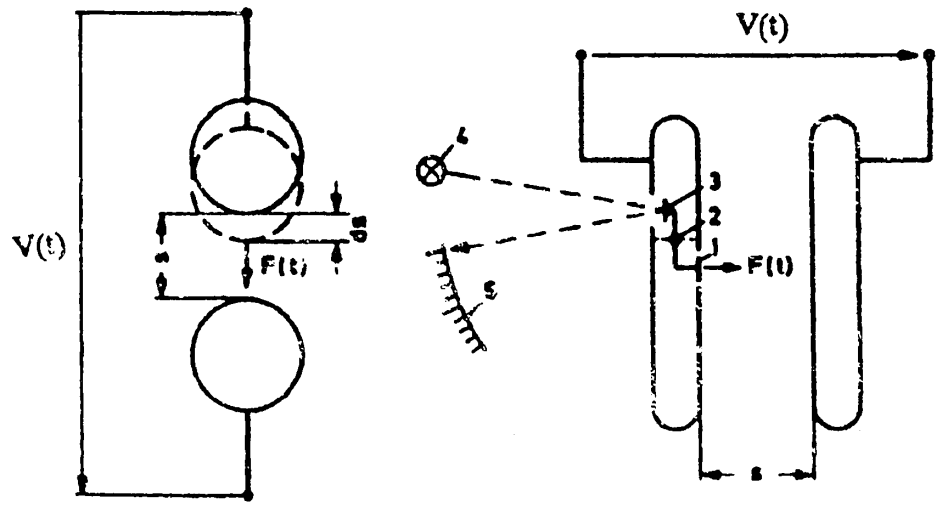
از رابطهٔ اخیر درمی‌یابیم که نیروی جاذبه بین الکترودها، همواره مثبت بوده و مستقل از پلاریتهٔ ولتاژ اعمال شده بین الکترودها است.

اگر ولتاژ اعمالی بین الکترودها به جای یک ولتاژ DC، یک ولتاژ متناوب AC باشد، ولتاژ V با زمان تغییر می‌کند ولی میانگین نیروی جاذبه بین الکترودها برابر است با:

$$\bar{F} = \frac{1}{T}\int_0^T F(t)dt = \frac{1}{2}\varepsilon\frac{A}{x^2}\frac{1}{T}\int_0^T V^2(t)\,dt = \frac{1}{2}\varepsilon\frac{A}{x^2}V_{rms}^2 \qquad (۹-۷)$$

از ولت‌مترهای الکترواستاتیکی بر اساس معادلات (۹-۶) و (۹-۷) به ترتیب می‌توان برای اندازه‌گیری مقدار ولتاژ فشار قوی DC و یا مقدار مؤثّر ولتاژ فشارقوی متناوب AC بهره جست. لازم به‌ذکر است که در این روش، یکی از الکترودها را ثابت نگه می‌دارند و به الکترود دیگر یا به قسمتی از الکترود دیگر، اجازهٔ حرکت می‌دهند و از تغییر جزئی شدّت میدان در اثر تغییر مکان الکترودها نیز صرف‌نظر می‌شود.

برای اندازه‌گیری با دقّت بیشتر، دو الکترود صفحه‌ای می‌سازند تا بین آن‌ها یک میدان یکنواخت به‌وجود آید و در وسط یکی از این دو صفحه، یک ورقهٔ کوچک متحرّک قرار می‌دهند (شکل ۹-۴ را ببینید). میدان الکتریکی بین دو صفحه، کاملاً یکنواخت است و در اثر حرکت ورقهٔ کوچک، یکنواختی میدان به‌مقدار کمی تغییر می‌کند. بر اثر میدان الکتریکی ایجاد شده، ورقهٔ کوچک می‌تواند حول محور افقی خود حرکت کند. یک آینه به این ورقهٔ متحرّک متّصل می‌شود که همزمان با چرخش صفحهٔ متحرّک می‌چرخد. آن‌گاه، به‌وسیلهٔ یک چراغ، نور به سطح آینه تابیده



شکل (۹-۴): اندازه‌گیری ولتاژ DC و AC با استفاده از ولت‌متر الکترواستاتیکی

می‌شود که بازتاب نور از روی سطح آینه به صفحهٔ مدرّج منتقل می‌شود. با اعمال ولتاژ مورد نظر بین دو صفحه، در اثر نیروی F، صفحهٔ متحرّک به حرکت در آمده و به دنبال آن، آینه نیز حرکت می‌کند و نور بازتاب را روی صفحهٔ مدرّج تغییر مکان می‌دهد. درجه‌بندی روی صفحه مدرّج را متناسب با ولتاژهای اعمالی مختلف انجام می‌دهند. این نوع دستگاه و دستگاه‌های مشابه آن را ولت‌متر الکترواستاتیکی می‌گویند. مزیّت این نوع ولت‌متر، پایین بودن ظرفیت خازنی و بالا بودن امپدانس آن‌ها است که در نتیجه، خطای آن‌ها نیز کم می‌شود.

۹-۲-۵- استفاده از ولت‌متر مولّد[1]

ولت‌متر خازنی نوعی دستگاه سنجش ولتاژ است که در آن، یک خازن به‌طور موازی با ولتاژ مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و مقدار ظرفیت آن بر حسب ولتاژ تغییر می‌کند. جریان منتجّه در خازن، یکسو شده و می‌تواند مبنای اندازه‌گیری ولتاژ قرار گیرد. ولت‌متر خازنی یک مولّد ولتاژ الکترواستاتیکی، با ظرفیت خازنی متغیّر است که جریانی متناسب با ولتاژ خروجی منتجّه تولید می‌کند. این دستگاه اندازه‌گیری توسّط موتور با سرعت ثابت به‌حرکت در می‌آید و در نتیجه هیچ قدرت یا انرژی را از منبع اندازه‌گیری ولتاژ دریافت نمی‌کند.

بار ذخیره شده در خازن به ظرفیت C با رابطهٔ $q = CV$ تعیین می‌شود. اگر ظرفیت خازن مذکور در هنگام وصل به منبع ولتاژ V نسبت به زمان تغییر کند، آنگاه جریان عبوری از خازن برابر است با:

$$i = \frac{dq}{dt} = V\frac{dC}{dt} + C\frac{dV}{dt} \qquad (۹-۸)$$

برای ولتاژهای DC، $\frac{dV}{dt} = 0$ خواهد بود. از این‌رو،

$$i = \frac{dq}{dt} = V\frac{dC}{dt} \qquad (۹-۹)$$

اگر ظرفیت خازنی C بین حدود C_0 و $C_0 + C_m$ به‌صورت سینوسی تغییر کند

1- *Generating Voltmeters*

(چنان‌که $C = C_{\circ} + C_m \sin\omega t$) آن‌گاه جریان i به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$i = i_m \cos\omega t$$

که در این رابطه،

$$i_m = V C_m \omega \qquad (۹-۱۰)$$

i_m مقدار دامنهٔ جریان است. همچنین مقدار مؤثّر جریان با رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$i_{rms} = \frac{V C_m \omega}{\sqrt{۲}} \qquad (۹-۱۱)$$

برای یک فرکانس زاویه‌ای ثابت ω، جریان با ولتاژ منتجّه V متناسب است. اغلب جریان تولیدی یکسو شده، توسّط یک میکروآمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از رابطهٔ (۹-۱۰) ولتاژ V تعیین می‌شود. در صورتی‌که فرکانس زاویه‌ای ω مساوی یا نصف فرکانس تغذیه باشد، بر اساس رابطهٔ (۹-۱۱)، ولت‌متر خازنی می‌تواند برای اندازه‌گیری ولتاژهای AC نیز استفاده شود.

یک ولت‌متر خازنی شامل یک استوانهٔ چرخنده شامل ۲ الکترود و یک آرمیچر با دو قطب متحرّک می‌باشد که با یک موتور سنکرون در سرعت ثابت n به‌چرخش درمی‌آید. جریان AC ایجاد شده در آرمیچر توسّط دو جاروبک و یک سیستم کموتاتور یکسو می‌گردد که مقدار متوسّط آن به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i = \frac{n}{۳۰}(\Delta C)\, V \qquad (۹-۱۲)$$

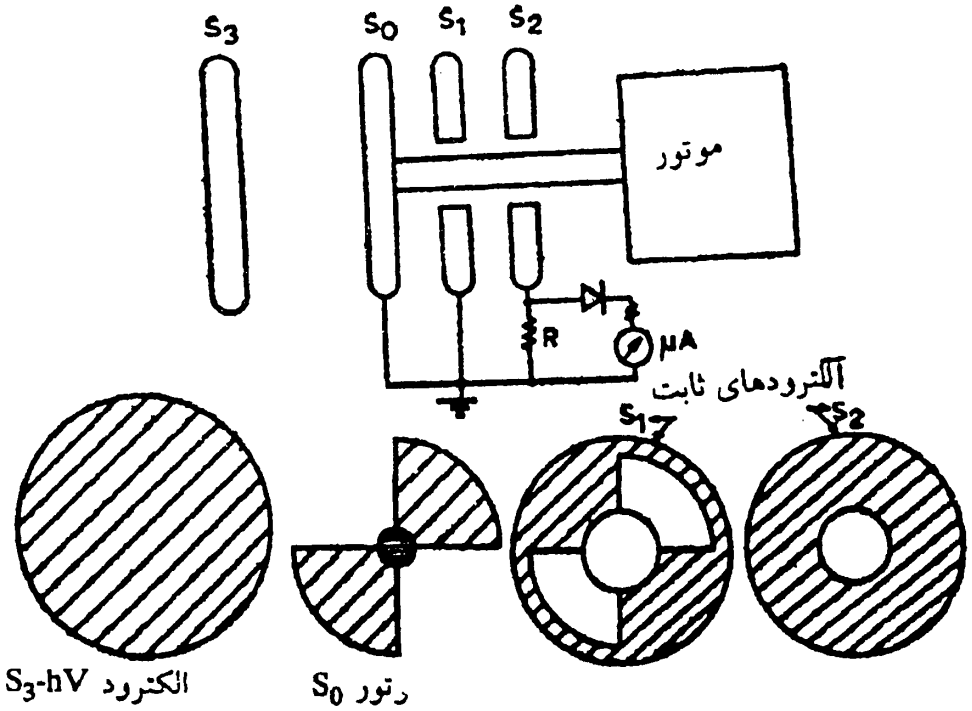
که،

$$\Delta C = C_{max} - C_{min}$$

برای یک ولتاژ متقارن $C_{min} = ۰$ است. هنگامی‌که ولتاژ، متقارن نباشد، یکی از الکترودها زمین شده و C_{min} یک مقدارمحدود دارد. ضریب متناسب با $\frac{n}{۳۰}\Delta C$ برای انجام کالیبراسیون تعیین می‌شود.

این دستگاه می‌تواند برای اندازه‌گیری ولتاژهای AC نیز استفاده شود. سرعت موتور متحرّک، نصف فرکانس ولتاژ اندازه‌گیری شده است. بنابراین، یک موتور سنکرون ۴ قطبی با ۱۵۰۰rpm برای منبع با فرکانس ۵۰ هرتز مفید است.

ولت‌مترهای خازنی شعاع‌های چرخندهٔ دایره، شکل یا پره‌هایی را برای تغییر ظرفیت به‌کار می‌برند. شکل (۹-۵)، طرح کلّی از یک ولت‌متر خازنی را مشخّص



شکل (۹-۵): نمایی از یک ولت‌متر خازنی

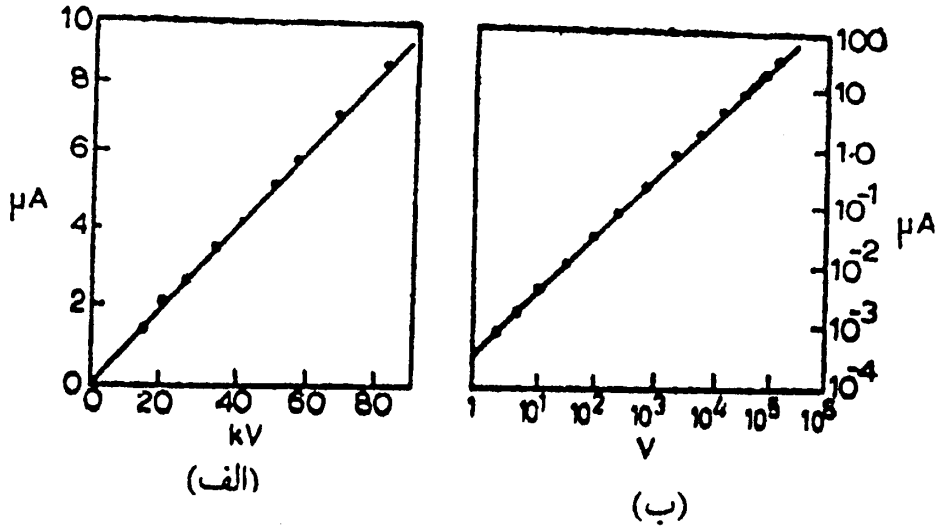
می‌کند. ولتاژ فشار قوی به الکترود دیسکی شکل S_3 متّصل می‌شود که این الکترود در یک فاصلهٔ ثابت روی محور الکترودهای فشار ضعیف S_2، S_1، S_0 نگه داشته می‌شود. رتور S_0 با یک سرعت ثابت توسّط یک موتور سنکرون با یک سرعت مناسب (۱۵۰۰، ۱۸۰۰، ۳۰۰۰ یا ۳۶۰۰rpm) می‌چرخد. پره‌های رتور S_0، یک تغییر دوره‌ای را در ظرفیت خازنی بین دیسک عایق شدهٔ S_2 و الکترود فشار قوی S_3 مهیا می‌کنند. شکل و تعداد پره‌های S_0 و S_1 چنان طرّاحی شده‌اند که تغییرات سینوسی را در ظرفیت خازنی تولید می‌کنند. جریان تولیدی AC در دو سر مقاومت R تصحیح شده و پس از یکسوسازی، توسّط یک میکروآمپرمتر قرائت می‌شود. اگر ظرفیت خازن موازی، بزرگ باشد به یک تقویت‌کننده احتیاج است. نمودارهای کالیبرهٔ نمونه از یک ولت‌متر خازنی در شکل (۹-۶-الف و ب)، مشخّص شده است.

از فواید ولت‌متر خازنی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- بدون منبع بار،

۲- اتّصال مستقیمی با الکترود فشار قوی وجود ندارد؛

۳- درجه‌بندی خطّی است و امتداد دادن محدودهٔ آن به‌آسانی قابل انجام است؛



شکل (۹-۶): نمودارهای کالیبره برای یک ولت‌متر خازنی؛
الف) نوع استوانه چرخان؛ ب) نوع پرهٔ چرخان

۴- یک وسیلهٔ اندازه‌گیری بسیار راحتی برای مولّدهای الکترواستاتیک (مثل مولّد واندوگراف و شتاب‌دهنده‌های ذرّه) می‌باشد.

همچنین از محدودیت‌های ولت‌متر خازنی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- به کالیبره شدن احتیاج دارند؛

۲- به ساختمان دقیق و یک اسباب سنگین احتیاج دارند.

۹-۳- اندازه‌گیری ولتاژهای AC

در اندازه‌گیری ولتاژهای فشار قوی AC، روش‌های مختلفی از قبیل دو الکترود کروی شکل، ولت‌متر الکترواستاتیکی، مقاومت سری و میکروآمپرمتر، مقسّم مقاومتی و ولت‌متر، خازن سری و آمپرمتر، مقسّم‌های خازنی و ترانسفورماتورهای ولتاژ وجود دارند. بعضی از روش‌ها برای اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ فشار قوی AC و بعضی برای اندازه‌گیری مقدار مؤثّر می‌باشد.

۹-۳-۱- استفاده از دو الکترود کروی شکل فلزی

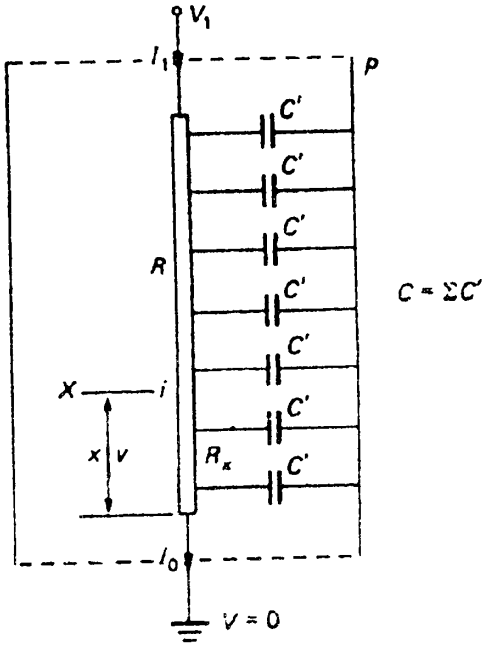
روش اندازه‌گیری مانند بخش ۹-۲-۳ می‌باشد. در این روش، مقدار دامنهٔ ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود.

۹-۳-۲- استفاده از ولت‌متر الکترواستاتیکی

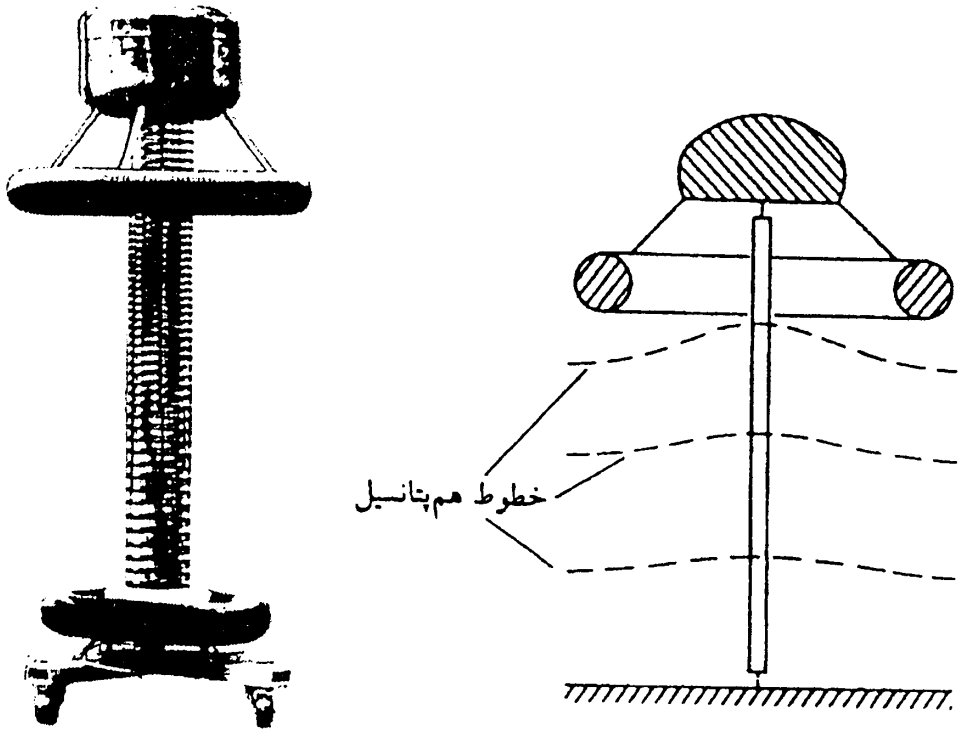
این روش اندازه‌گیری نیز در بخش ۹-۲-۴ قبلاً توضیح داده شده است. در این روش، مقدار مؤثّر ولتاژ با استفاده از رابطهٔ (۹-۷) اندازه‌گیری می‌شود.

۹-۳-۳- استفاده از مقاومت سری و میکروآمپرمتر

طریقه اندازه‌گیری مشابه بخش ۹-۲-۱ می‌باشد، لیکن به‌جای آمپرمتر DC از آمپرمتر AC که مقدار مؤثّر جریان را اندازه‌گیری می‌کند، استفاده می‌شود. بنابراین، ولتاژ مؤثّر با این روش اندازه‌گیری خواهد شد. در این روش، به‌علّت ظرفیت خازنی بین طبقات مختلف مقاومت‌ها و زمین (شکل ۹-۷ را ببینید) و جاری شدن جریان در این خازن‌های ناخواسته (شبیه به حالت زنجیرهٔ مقره‌های آویزان)، توزیع پتانسیل روی طبقات مختلف به‌صورت یکنواخت نخواهد بود. در نتیجه، این جریان‌های ناخواسته، خطای زیادی را در تعیین ولتاژ فشار قوی با این روش به‌وجود می‌آورند. برای این‌که توزیع پتانسیل را یکنواخت نماییم، مطابق با شکل (۹-۸) از یک حلقهٔ محافظ در الکترود بالایی استفاده می‌شود. علّت استفاده از حلقهٔ محافظ این است که ظرفیت خازنی ایجاد شده بین طبقات مختلف مقاومت‌ها و این حلقه، اثر



شکل (۹-۷): مدار معادل اثر خازنی یک مقاومت در ولتاژ فشار قوی AC



شکل (۹-۸): استفاده از حلقهٔ محافظ برای توزیع میدان یکنواخت برای مقاومت در ولتاژ AC

خازن‌های ناخواستهٔ مذکور را کاهش داده و توزیع پتانسیل یکنواخت گردد. در واقع شدّت میدان، کنترل می‌شود و خطای آزمایش کم‌تر می‌شود.

۹-۳-۴- استفاده از مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر با امپدانس بالا

این روش نیز، مشابه آنچه در بخش ۹-۲-۲ در مورد اندازه‌گیری ولتاژ DC ارائه گردید، می‌باشد؛ ولی به‌جای ولت‌متر DC ، ولت‌متر AC که مقدار ولتاژ مؤثّر را اندازه‌گیری می‌کند، جایگزین می‌گردد. در این روش نیز، اثر خازن‌های ناخواسته که در بخش قبل به آن اشاره شد، موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در خطای اندازه‌گیری می‌شوند. برای کاهش این خطا، در اینجا نیز از حلقهٔ محافظ در الکترود بالایی مانند شکل (۹-۸) استفاده می‌شود.

۹-۳-۵- استفاده از خازن سری و آمپرمتر

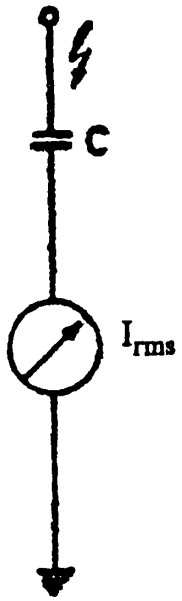
با توجّه به مشکلات استفاده از مقاومت سری در جریان متناوب (به‌علّت وجود

خازن‌های ناخواسته)، می‌توان از خازن‌های سری و آمپرمتر در اندازه‌گیری مقدار مؤثّر ولتاژ فشار قوی AC به‌جای مقاومت‌های سری و آمپرمتر استفاده کرد. این روش در شکل (۹-۹) نشان داده شده است.

$$I = J\omega CV$$

$$|V_{rms}| = \frac{|I_{rms}|}{\omega C} \qquad (۱۳-۹)$$

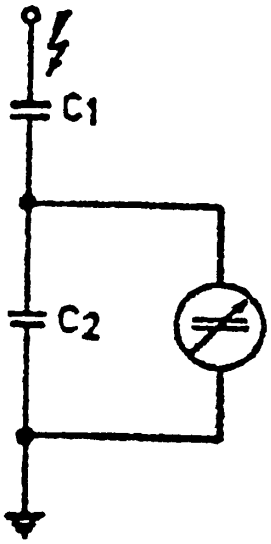
جریان I، جریان عبوری از خازن است که توسّط آمپرمتر AC، مقدار مؤثّر آن اندازه‌گیری می‌شود. با اندازه‌گیری جریان مؤثّر و با استفاده از رابطهٔ (۹-۱۳) ولتاژ مؤثّر AC محاسبه می‌شود.



شکل (۹-۹): اندازه‌گیری ولتاژ AC با خازن سری و آمپرمتر

۹-۳-۶- استفاده از مقسّم ولتاژ خازنی و ولت‌متر الکترواستاتیکی

خطای ناشی از وجود خازن‌های ناخواسته در روش مقسّم ولتاژ مقاومتی و ولت‌متر می‌تواند با استفاده از مقسّم‌های ولتاژ خازنی و ولت‌متر الکترواستاتیکی یا یک دستگاه اندازه‌گیری با امپدانس بالا حذف شود. اگر وسیلهٔ اندازه‌گیری از طریق یک کابل طولانی وصل شده‌باشد، ظرفیت آن باید در کالیبره کردن دستگاه، مدّ نظر قرار گیرد. معمولاً در این مدار (شکل ۹-۱۰)، خازن C_1، یک خازن گازی (پر شده



شکل (۹-۱۰): اندازه‌گیری ولتاژ AC با مقسّم خازنی

از گاز) یا یک خازن با هوای فشردهٔ استاندارد و خازن $C_۲$ یک خازن با ظرفیت بزرگ می‌باشد (خازن با عایق‌های میکا، کاغذ یا هر خازن با تلفات کم). خازن $C_۱$ از طریق یک کابل پوشش یافته، به $C_۲$ متّصل می‌شود. در نتیجه، ولتاژ فشار قوی بین خازن‌های $C_۱$ و $C_۲$ تقسیم می‌گردد. قسمت اعظم ولتاژ فشار قوی روی خازن $C_۱$ قرار می‌گیرد. با استفاده از یک ولت‌متر الکترواستاتیکی می‌توان ولتاژ نسبتاً کم دو سر خازن $C_۲$ (مقدار $V_۲$) و در نهایت ولتاژ فشار قوی V را به‌دست آورد. با توجّه به نوع ولت‌متر، جریان عبوری از هر دو خازن یکسان است و در نتیجه رابطهٔ زیر صادق خواهد بود.

$$j\omega C_۱ V_۱ = j\omega C_۲ V_۲$$

$$C_۱ V_۱ = C_۲ V_۲ \qquad (۹-۱۴)$$

در نهایت، ولتاژ فشار قوی AC به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$V = V_۱ + V_۲$$

$$V_۱ = V - V_۲$$

با جایگزینی در رابطهٔ (۹-۱۴) داریم:

$$C_۱ (V - V_۲) = C_۲ V_۲$$

$$C_۱ V = (C_۱ + C_۲) V$$

$$V = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_2 \qquad (۱۵-۹)$$

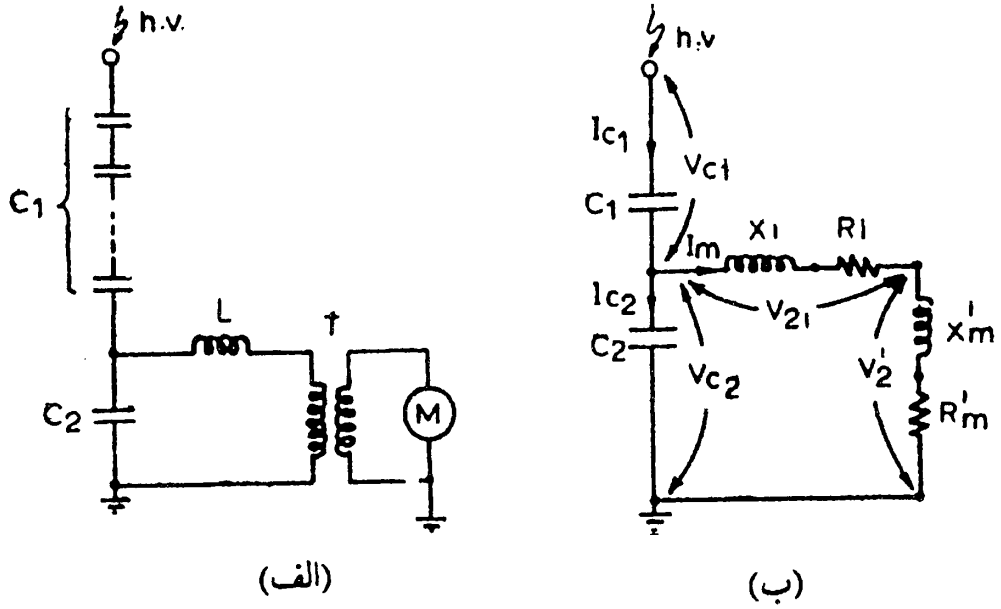
اگر ظرفیت خازنی ولت‌متر الکترواستاتیکی، کابل اتّصال و سیم‌ها C_v باشد، آن‌گاه می‌توان نوشت:

$$V = \frac{C_1 + C_2 + C_v}{C_1} V_2 \qquad (۱۶-۹)$$

معمولاً مقدار C_v خیلی کوچک بوده و قابل صرف‌نظر کردن است.

۹-۳-۷- استفاده از ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT)[1]

در ایستگاه‌های برق فشار قوی، برای اندازه‌گیری ولتاژ شین‌ها و خطوط انتقال، اغلب از مقسّم خازنی همراه با یک ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ و ولت‌متر مطابق شکل (۹-۱۱-الف) استفاده می‌شود. این دستگاه اساس یک CVT را تشکیل می‌دهد. برای جبران اثر خازن C_2 در مقسّم خازنی، از اندوکتانس القایی L استفاده می‌شود تا مدار به‌صورت اهمی خالص درآید. مدار معادل CVT در شکل (۹-۱۱-ب) نشان



شکل (۹-۱۱): ترانسفورماتور ولتاژ خازنی (CVT) ؛الف)طرح کلّی مدار؛ ب)مدار معادل

1- Capacitor Voltage Transformer

داده شده است. خازن معادل C_1 از چندین واحد خازن سری مشابه ولتاژ بالا ساخته شده است و ظرفیت کلّ آن، حدود چند هزار پیکوفاراد است.

وسایل اندازه‌گیری در قسمت فشار ضعیف از قبیل وات‌متر، کنتور و نیز وسایل حفاظتی مانند رله‌ها، به توانی در حدود چند صد ولت‌آمپر نیاز دارند که این توان را نمی‌توان مستقیماً از یک مقسّم ولتاژ خازنی به‌دست آورد؛ بلکه باید ولتاژ V_2 را توسّط یک ترانسفورماتور ولتاژ القایی به حدود ۱۰۰ تا ۱۱۰ ولت کاهش داد. مقدار ولتاژ فشار قوی نامی طرف اوّلیهٔ این ترانسفورماتور هم در حدود ۱۰ تا ۳۰کیلو ولت می‌باشد. برای این‌که ترانسفورماتور، اختلاف فازی ناشی از جریان خازنی نداشته باشد، در حالت بی‌باری ترانسفورماتور، تعادلی بین C_2 و چوک L به‌وجود می‌آورند. مقدار تنظیم شدهٔ چوک L، در ساخت مدار CVT منحصراً برای مقاومتی شدن مدار، یا برای رساندن شرایط رزونانس مدار انتخاب می‌شود. این شرایط وقتی مهیّا می‌شود که،

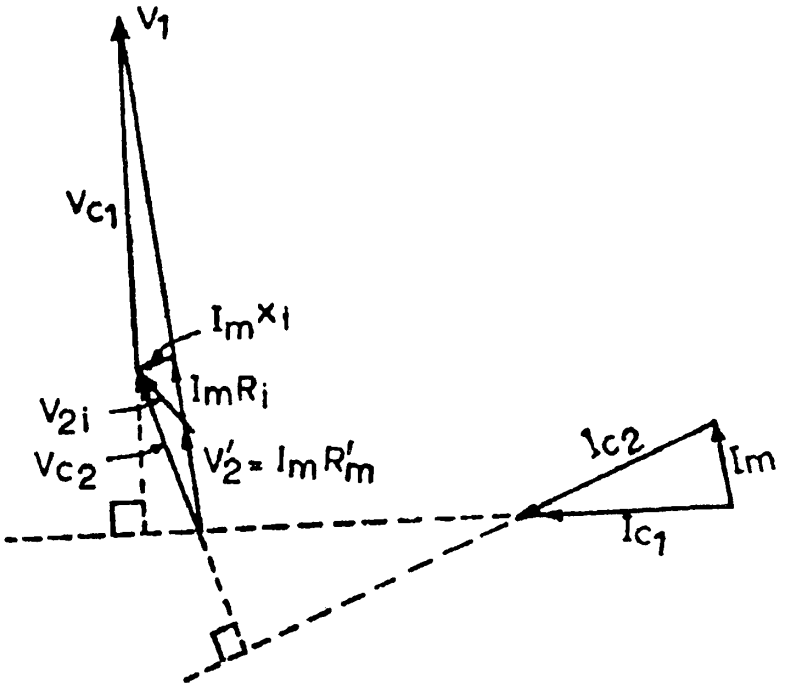
$$\omega\left(L+L_T\right)=\frac{1}{\omega\left(C_1+C_2\right)} \qquad (۱۷-۹)$$

که در این رابطه،

L = اندوکتانس چوک

L_T = اندوکتانس معادل ترانسفورماتور منتقل شده به طرف اوّلیهٔ آن

چوک به‌عنوان سیم‌پیچی که در فرکانس‌های بالاتر از حدّ یک مدار، امپدانس بالایی از خود نشان داده و در نتیجه به‌منظور صاف کردن جریان‌های ضربانی و جلوگیری از عبور فرکانس‌های زیاد به‌کار می‌رود. در این حالت، ولتاژ V_2 (ولتاژ اندازه‌گیری دستگاه)، هم فاز با ولتاژ ورودی V_1 خواهد بود. در شکل (۹-۱۲) نمودار فازوری CVT تحت شرایط رزونانس داده شده است. جریان I_{c1} از ولتاژ V_{c1} کشیده شده و به I_{c2} (جریان خازن V_{c2}) و I_m (جریان دستگاه اندازه‌گیری) تقسیم می‌شود. اگر نسبت دورهای اوّلیه به ثانویهٔ ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ (که برابر با نسبت تبدیل ولتاژ نامی اوّلیه به ثانویهٔ آن می‌باشد)، برابر K_1 و نسبت تبدیل مقسّم



شکل (۹-۱۲): نمودار فازوری تحت شرایط رزونانس

خازنی نیز بر اساس معادلهٔ (۹-۱۵) برابر،

$$K_۲ = \frac{V_۱}{V_{c۲}} = \left(۱ + \frac{C_۲}{C_۱} \right)$$

باشد، آنگاه نسبت تبدیل مجموعهٔ CVT برابر خواهد بود با:

$$K = \frac{V_۱}{V_۲} = K_۱ \times K_۲ \qquad (۹-۱۸)$$

مزایای CVT را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

۱- طرّاحی ساده و نصب آسان،

۲- از CVT به دو صورت می‌توان استفاده نمود، هم به‌عنوان یک وسیلهٔ اندازه‌گیری ولتاژ برای ثبت متغیّرهای اندازه‌گیری و برای سیستم‌های حفاظتی، و هم به‌عنوان یک خازن در سیستم‌های مخابراتی خطوط قدرت (PLC[۱])؛

۳- در CVT بر خلاف ترانسفورماتورهای ولتاژ مغناطیسی معمولی، توزیع ولتاژ

1- *Power Line Carier*

وابسته به فرکانس صورت نمی‌گیرد؛

۴- ایجاد سیستم عایقی بین ولتاژ فشار قوی سیستم و دستگاه‌های اندازه‌گیری ولتاژ.

همچنین معایب CVT عبارتند از:

۱- نسبت تبدیل ولتاژ با تغییرات دما حسّاس است؛

۲- ایجاد مسئلهٔ فرورزونانس در سیستم‌های قدرت.

۹-۳-۸- استفاده از ترانسفورماتورهای ولتاژ (نوع مغناطیسی PT[1])

ترانسفورماتورهای ولتاژ مغناطیسی، قدیمی‌ترین وسایل برای اندازه‌گیری‌های ولتاژ AC هستند. آن‌ها از نظر ساختمانی ساده‌اند و فقط برای ولتاژهای کم‌تر از ۵۰ کیلوولت، به شکل یک ترانسفورماتور کاهندهٔ ولتاژ طرّاحی می‌شوند. برای ولتاژهای بالاتر، ساخت این نوع ترانسفورماتورها غیر اقتصادی است و به‌جای آن‌ها از CVT استفاده می‌شود.

نسبت تبدیل این ترانسفورماتور برابر $a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2}$ است که V_1 و V_2 ولتاژهای نامی اوّلیه و ثانویّه و N_1 و N_2 تعداد دور سیم‌پیچ‌های اوّلیه و ثانویّه هستند. ولتاژ فشار قوی، به اوّلیهٔ ترانسفورماتور اعمال می‌شود و در ثانویّهٔ آن، یک ولت‌متر فشار ضعیف، ولتاژ را قرائت می‌کند. ولتاژ فشار قوی بر اساس مقدار ولتاژ قرائت شده از ولت‌متر و نسبت تبدیل ترانسفورماتور ($V_1 = a.V_2$) به‌دست می‌آید. به‌دلیل فوق‌العاده پایین بودن جریان در اوّلیه و ثانویّهٔ این ترانسفورماتورها، قطر سیم‌های آن بسیار نازک بوده و عایق‌بندی آن‌ها نیز معمولاً به‌صورت خشک و از جنس اپوکسی‌رزین است.

خطای این روش از خطاهای نسبت تبدیل و زاویهٔ فاز توسّط امپدانس‌های نشتی و مغناطیسی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به‌وجود می‌آید. این خطاها را می‌توان با تنظیم نسبت دورها جبران نمود.

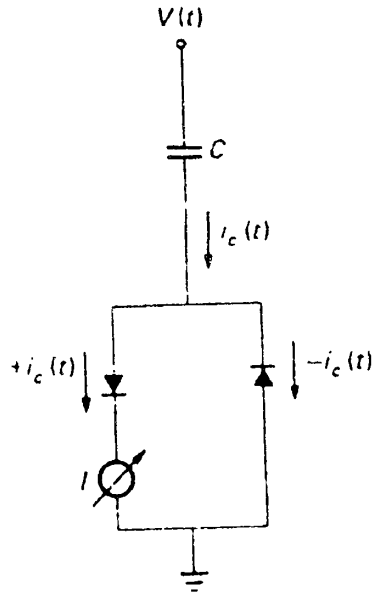
1- Potential Transformer

۹-۳-۹- استفاده از خازن سری، آمپرمتر DC و دیودهای یکسوساز

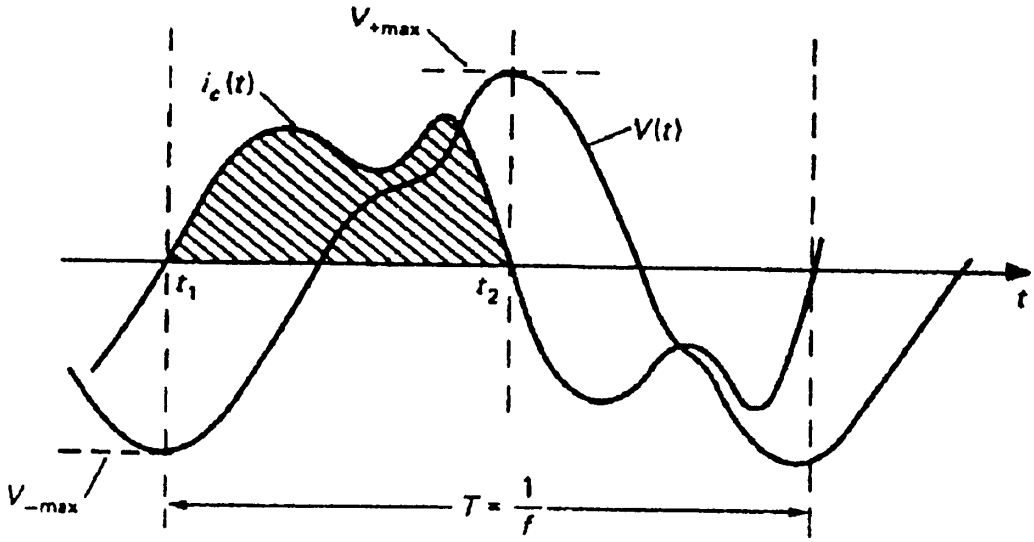
ساده‌ترین مدار برای اندازه‌گیری مقدار دامنهٔ ولتاژ فشار قوی AC ، استفاده از یک خازن، دو دیود و یک دستگاه قاب‌گردان (آمپرمتر DC) مطابق شکل (۹-۱۳) است.

جریان خازنی $i_c(t)$ به دو مؤلّفهٔ مثبت و منفی به‌وسیلهٔ دو دیود که در دو جهت مخالف با هم موازی شده‌اند، تقسیم می‌شوند. هر یک از دیودها در یک نیم سیکل جریان را هدایت می‌کنند. یک آمپرمتر DC نیز در یکی از شاخه‌ها برای اندازه‌گیری مقدار متوسّط جریان در یک نیم سیکل قرار می‌دهیم. دیود D_1 برای یکسو کردن جریان شارژ خازن C ، و دیود D_2 برای دشارژ نمودن خازن C در نیم پریود بعدی است. مقدار متوسّط جریان عبوری در نیم پریود در شاخهٔ دیود D_1 ، متناسب با مقدار دامنهٔ ولتاژ فشارقوی AC است (شکل ۹-۱۴ را ببینید). مقدار متوسّط جریان در نیم پریودی که توسّط آمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود، برابر است با:

$$I = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} i_c(t)\cdot dt = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} C\frac{dV_c(t)}{dt}\,dt \qquad (۱۹-۹)$$



شکل (۹-۱۳): روش اندازه‌گیری مقدار دامنهٔ ولتاژ AC



شکل (۹-۱۴): شکل موج ولتاژ و جریان AC

$$I = \frac{۱}{T}\int_{t_۱}^{t_۲} C dV_c(t) = \frac{C}{T}\left[V_{max} - (-V_{max})\right]$$

$$I = \frac{۲CV_{max}}{T} \qquad (۲۰-۹)$$

$$V_{max} = \frac{IT}{۲C}$$

چون $T = \frac{۱}{f}$، دامنهٔ ولتاژ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{max} = \frac{I}{۲fC} \qquad (۲۱-۹)$$

در این روش، خطای اندازه‌گیری، ناشی از تلفات خازن و آمپرمتر و کابل ارتباطی آن دو می‌باشد. لازم به ذکر است که خازن دستگاه از نوع عایق گازی SF6 با فشار بالا است.

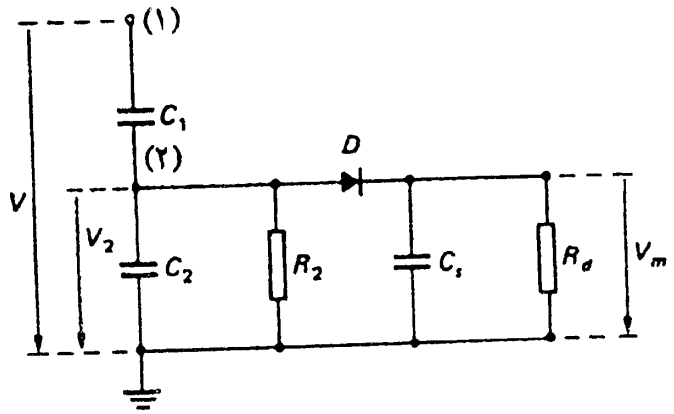
برای بعضی از آزمایش‌ها، مقدار دامنهٔ ولتاژ AC خیلی مهم است (مثلاً برای به‌دست آوردن حدّاکثر استقامت الکتریکی عایق‌ها و غیره)، اگر شکل موج کاملاً سینوسی خالص نباشد، مقدار دامنهٔ آن دقیقاً $\sqrt{۲}$ برابر مقدار موثّر آن نیست. در نتیجه، مطلوب است تا بتوانیم مقدار دامنهٔ موج را به‌طور مجزّا و مستقیم اندازه‌گیری کنیم.

۹-۳-۱۰- استفاده از مقسّم خازنی، یکسوسازی ولتاژ و شارژ خازن تا حدّ دامنه

روش دیگر اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ، استفاده از یک مقسّم خازنی است که در شکل (۹-۱۵) نشان داده شده است. در این مدار، ولتاژ فشارقوی توسّط مقسّم خازنی تقسیم می‌شود.

$$V_{\max} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} V_{2\,\max} \qquad (۲۲-۹)$$

در این مدار، مقدار R_2 به گونه‌ای بزرگ انتخاب می‌شود که در برابر امپدانس خازن C_2 اثری ندارد. در این مدار، خازن C_s از طریق دیود D به‌مقدار دامنهٔ ولتاژ V_2 (یعنی به‌مقدار $V_{2\,\max}$) شارژ می‌شود؛ سپس با یک ولت‌متر الکترواستاتیکی این مقدار را اندازه‌گیری می‌کنیم. برای این‌که بار خازن C_s بتواند تخلیه شود و برای اندازه‌گیری بعدی آماده شود، باید مقاومت اهمی R_d را با آن موازی ببندیم. چون به‌طور کلّی در هر اندازه‌گیری، کمّیت مورد سنجش، برای چند لحظه‌ای باید پایدار بماند. در نتیجه، ثابت زمانی R_dC_s را حدود ۱ ثانیه انتخاب می‌کنیم که این کار با مقدار مناسب R_d به‌وجود می‌آید. اکنون وقتی دیود D هدایت می‌کند، مقداری از بار الکتریکی خازن C_2 از نقطهٔ (۲) و از طریق یکسوکننده و R_d تخلیه می‌شود، که این موضوع باعث می‌شود تا به مقسّم خازنی لطمه‌ای وارد شود و روی یکی، ولتاژ بیشتری بیفتد. بنابراین، برای جبران آن، از مقاومت R_2 برای بستن یک مسیر جریان و تأمین بار در نقطهٔ (۲) استفاده می‌شود (در نیم پریود منفی). البتّه مقاومت‌های R_2 و R_d خطایی را در اندازه‌گیری وارد می‌کنند که مقدار آن ناچیز است.



شکل (۹-۱۵): مدار ساده اندازه‌گیری ولتاژ حدّاکثر AC

۹-۴- اندازه‌گیری ولتاژهای ضربه‌ای

برای اندازه‌گیری ولتاژ ضربه‌ای نیز روش‌های مختلفی وجود دارد که در این بخش به توضیح این روش‌ها خواهیم پرداخت.

۹-۴-۱- استفاده از دو الکترود کروی شکل برای تعیین دامنهٔ موج ضربه‌ای

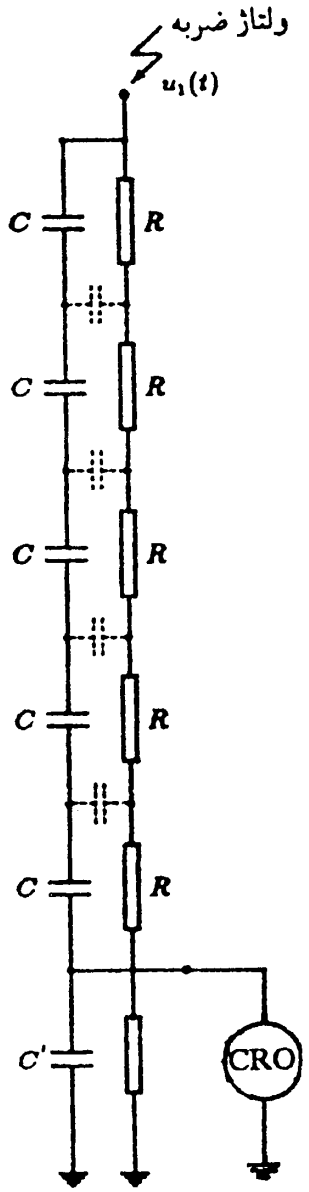
این روش قبلاً در بخش ۹-۲-۳ توضیح داده شد.

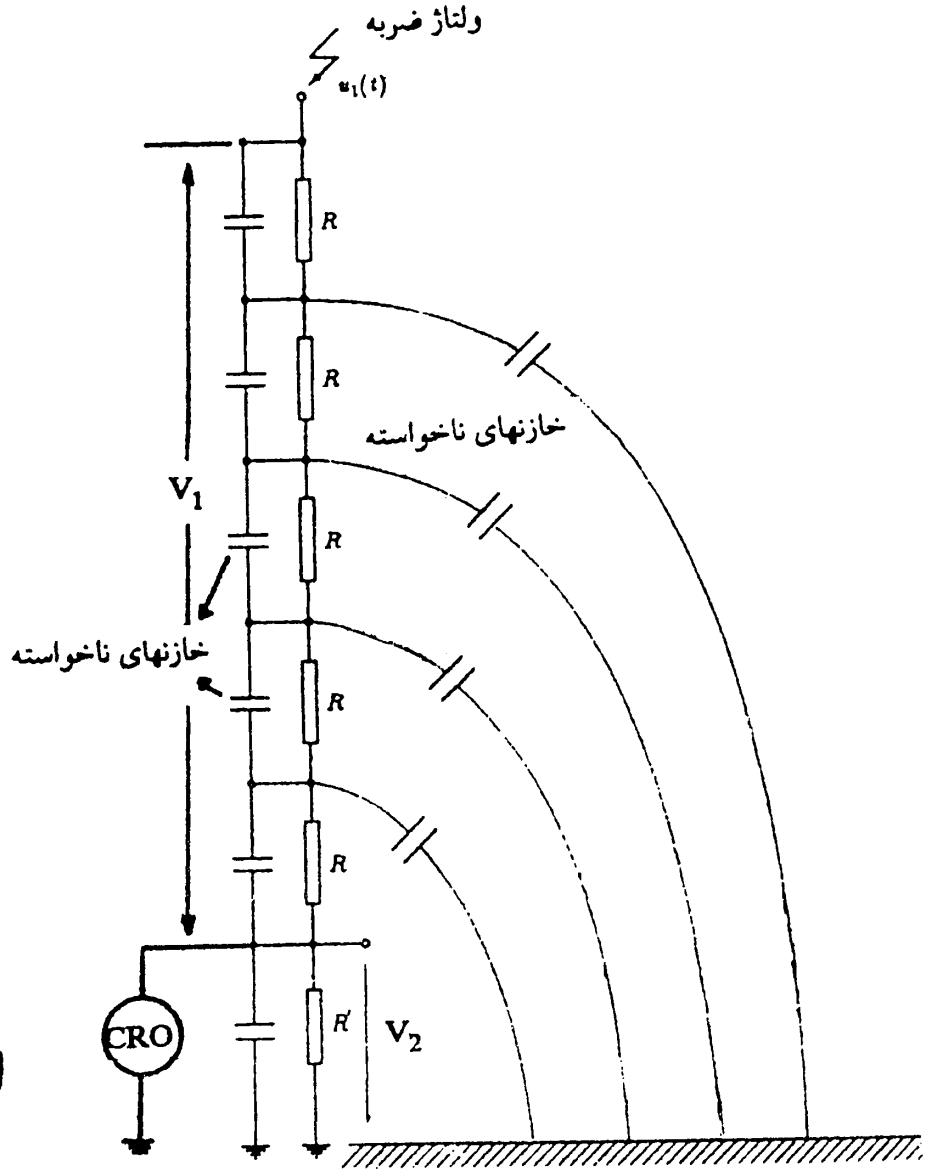
۹-۴-۲- استفاده از مقسّم‌های ولتاژی

اندازه‌گیری ولتاژهای ضربه‌ای نیاز به دقّت بیشتری دارد. این به آن علّت است که دامنهٔ آن فقط در مدّت زمان بسیار کوتاهی در حدّ چند میکرو ثانیه اتّفاق می‌افتد و موج هم غیر نوسانی است. در اندازه‌گیری موج ولتاژ ضربه‌ای، شکل موج و تعیین دامنهٔ آن هر دو مهم هستند. بنابراین، معمولاً به جای ولت‌متر از یک اسیلوسکوپ (CRO) برای به‌دست آوردن شکل موج و عکسبرداری از آن (به‌وسیلهٔ دوربین مناسبی) استفاده می‌شود و یا با استفاده از اسیلوسکوپ حافظه‌دار، آزمایش انجام می‌شود. چون دامنهٔ موج‌های ولتاژ ضربه‌ای خیلی بالا و در حدّ مگاولت هستند؛ از این‌رو، باید ابتدا دامنه را توسّط مقسّم‌های ولتاژی کوچک نماییم تا بتوانیم به‌وسیلهٔ اسیلوسکوپ، شکل آن را به‌دست آوریم. این مقسّم‌ها نباید شکل موج را تغییر دهند.

اگر از یک مقسّم ولتاژ مقاومتی مطابق شکل (۹-۱۶) استفاده کنیم، به‌سبب ظرفیت‌های خازنی ناخواسته بین طبقات مختلف با هم و با زمین، خطای بزرگی در اندازه‌گیری به‌دست می‌آید. چون ظرفیت‌های خازنی بین مقاومت‌ها با هم برابرند، خطایی در اندازه‌گیری به‌وجود نمی‌آورد؛ زیرا آن‌ها خود یک مقسّم خازنی را تشکیل می‌دهند ولی ظرفیت‌های خازنی ناخواسته بین مقاومت‌ها و زمین، خطای بزرگی را در اندازه‌گیری وارد می‌کنند. به واسطهٔ وجود این ظرفیت‌ها دیگر ولتاژهای V_1 و V_2 متناسب نیستند.

برای از بین بردن اثر این ظرفیت‌های خازنی ناخواسته از مقسّم‌های مرکّب خازنی و مقاومتی مطابق شکل (۹-۱۷) استفاده می‌شود. یعنی موازی با هر مقاومت، یک خازن قرار می‌دهند. چون ظرفیت این خازن‌ها در برابر خازن‌های



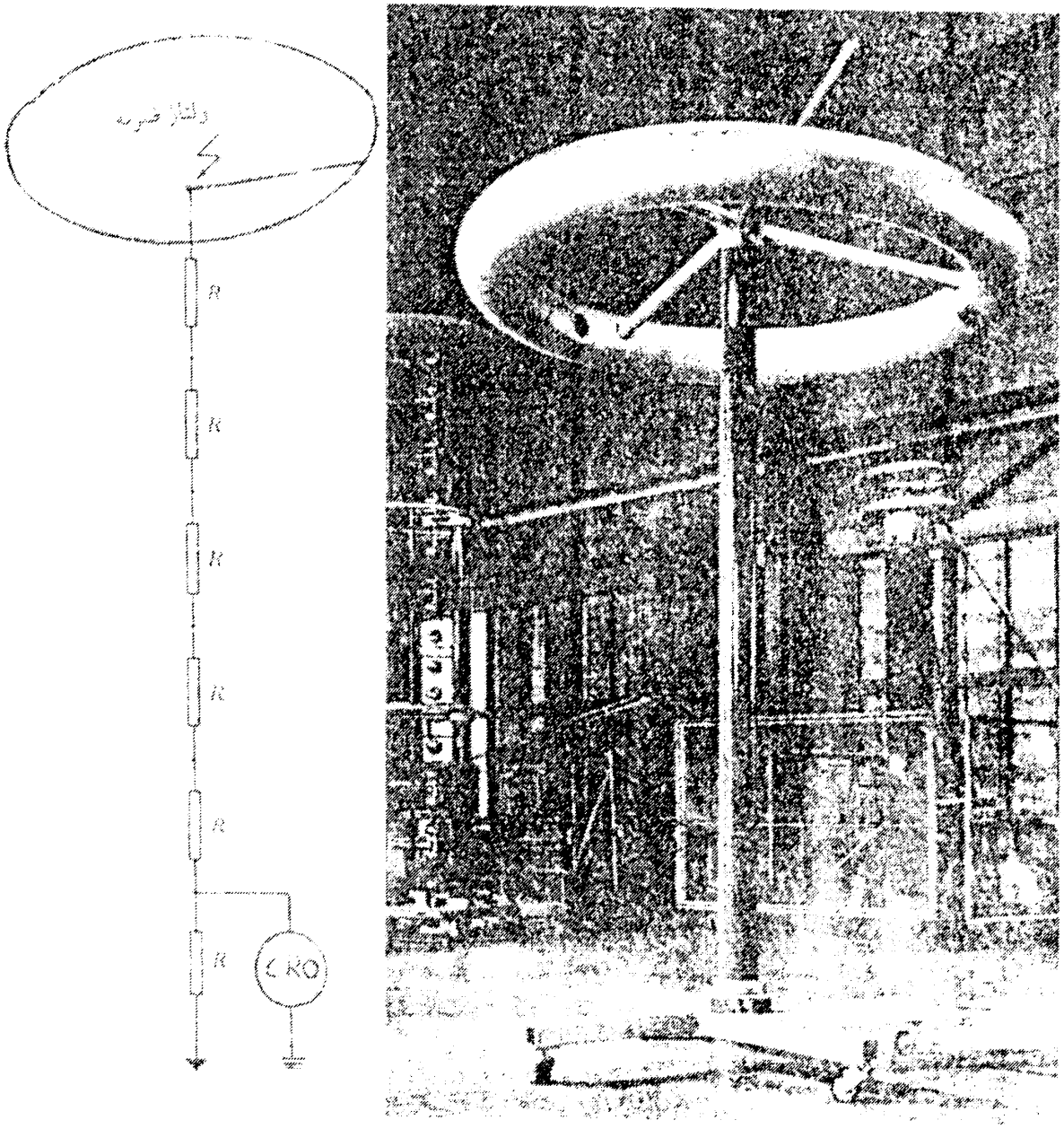


شکل (۹-۱۶): اثرات خازن‌های ناخواسته در مقسّم مقاومتی

شکل (۹-۱۷): مقسّم خازنی-مقاومتی در اندازه‌گیری ولتاژ ضربه‌ای

ناخواسته زیاد است، در نتیجه، اثر این ظرفیت‌های ناخواسته از بین می‌رود. امّا چون مقادیر مقاومت‌ها و خازن‌ها را نمی‌توان از نظر فناوری ساخت، کاملاً با هم یکسان در نظر گرفت، از اتّصال بین طبقات مدار اجتناب می‌شود. عیب مقسّم‌های خازنی مرکّب، آن است که به‌عنوان باری برای ژنراتور ضربه ی عمل می‌کند و ممکن است باعث

طولانی شدن زمان پیشانی موج گردد. بنابراین، همان گونه که در شکل (۹-۱۸) مشخّص شده است، از همان مقسّم مقاومتی استفاده می‌کنند، ولی در ترمینال فشار قوی، از یک حلقهٔ مدوّر بزرگ برای یکنواخت کردن توزیع پتانسیل استفاده می‌شود. به‌واسطهٔ وجود این حلقه که خود دارای ظرفیتی نسبت به زمین است، شکل میدان در اطراف مقسّم

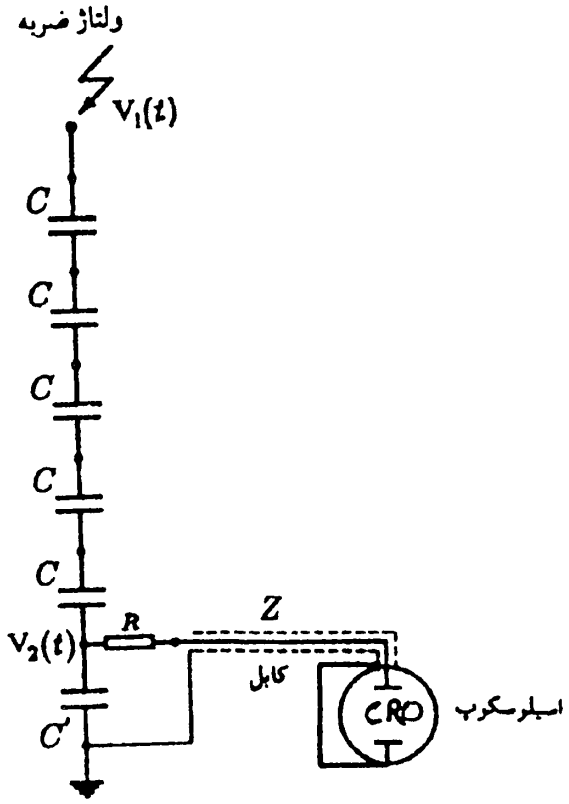


شکل (۹-۱۸): مقسّم مقاومتی با حلقهٔ یکنواخت کننده توزیع ولتاژ برای اندازه‌گیری ولتاژهای ضربه‌ای

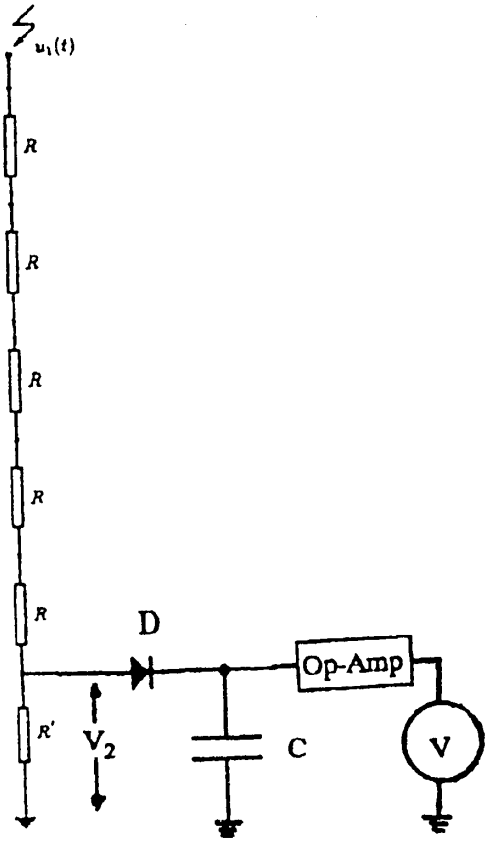
به‌صورت منظّمی در می‌آید، به این ترتیب اثر ظرفیت‌های ناخواسته خنثی می‌شود. یعنی اگر فقط حلقهٔ محافظ وجود داشت و یا اگر فقط مقسّم مقاومتی وجود داشت، در هر دو حالت، پتانسیل هر نقطه از ستون مقسّم یکی بود. وقتی پتانسیل دو نقطه یکی باشد، اگر ظرفیتی هم بین آن دو نقطه موجود باشد، این ظرفیت بدون اثر خواهد بود. از مقسّم خازنی هم به تنهایی مطابق شکل (۹-۱۹) می‌توان استفاده نمود؛ لیکن به‌دلیل این‌که این نوع مقسّم نیز به‌عنوان باری برای ژنراتور ضربه‌ای محسوب می‌شود، معمولاً به‌جای آن ار مقسّم مقاومتی با حلقه فلزی در ترمینال فشار قوی استفاده می‌شود.

۹-۴-۳- اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای به‌وسیلهٔ مقسّم ولتاژ مقاومتی، یکسوسازی ولتاژ و شارژ خازن تا حدّ دامنهٔ ولتاژ

در این روش، برای اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای از یک خازن، یک یکسوکننده، تقویت کننده، و ولت‌متر DC مطابق شکل (۹-۲۰) استفاده می‌شود.



شکل (۹-۱۹): مقسّم خازنی در اندازه‌گیری ولتاژ ضربه



شکل (۹-۲۰): مقسّم مقاومتی برای اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای

طرز کار دستگاه چنین است که توسّط مقسّم ولتاژ، دامنهٔ ولتاژ کاهش می‌یابد و ولتاژ کاهش یافتهٔ V_2 که با ولتاژ ورودی V متناسب است، توسّط دیود D یکسو می‌شود. دیود D فقط در قسمت صعودی شکل موج ضربه‌ای، جریان را هدایت می‌کند و خازن C را تا حدّ دامنهٔ ولتاژ ضربه‌ای کاهش یافته شده (V_2) شارژ می‌کند و در قسمت نزول موج دیود D باز می‌ماند. حالا این ولتاژ را می‌توان توسّط ولت‌متر اندازه‌گیری نمود. البتّه برای این‌که خازن به واسطهٔ مقاومت داخلی ولت‌متر تخلیه نشود، سر راه ولت‌متر یک تقویت‌کننده می‌گذارند.

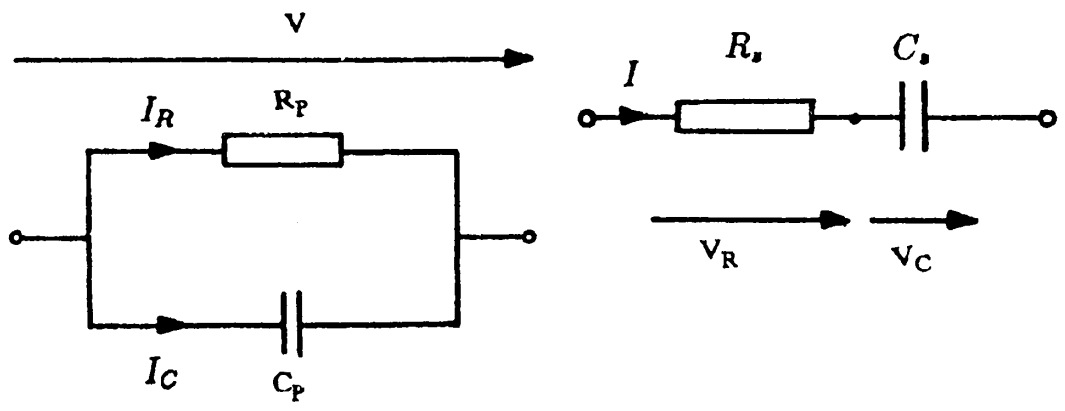
کالیبراسیون این دستگاه هم توسّط دوگوی فلزی صورت می‌گیرد. دوگوی فلزی مهم‌ترین وسیلهٔ اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ فشار قوی ضربه‌ای است و در هر صورت، برای کالیبراسیون هم قابل استفاده است. البتّه باید به ویژگی‌های هر وسیلهٔ دقّت نمود. با این روش، اندازه‌گیری دامنهٔ ولتاژ انجام می‌شود و می‌توان معلوم کرد که دامنهٔ ولتاژ چه مقداری بوده است؛ ولی با استفاده از اسیلوسکوپ و عکس‌برداری، گذشته از این که مقدار حدّاکثر معلوم می‌شود، شکل موج را هم می‌توان ضبط و مشاهده کرد.

۹-۵- اندازه‌گیری ظرفیت خازنی و ضریب تلفات عایقی

در یک خازن ایده‌ال و در ولتاژ متناوب AC، جریان خازن، °۹۰ از ولتاژ آن جلوتر است و خازن دارای هیچ‌گونه تلفات حرارتی نیست. البتّه در خازن‌های واقعی، اختلاف فاز جریان و ولتاژ به اندازهٔ زاویهٔ کوچک δ، کم‌تر از °۹۰ بوده، خازن دارای مقداری تلفات حرارتی نیز می‌شود. در نتیجه، می‌توان مدار معادل یک خازن واقعی را به‌صورت یک خازن ایده‌ال C_P موازی با مقاومت R_P در نظر گرفت. البتّه این معادل سازی را می‌توان با المان‌های سری شامل یک خازن ایده‌ال C_S و یک مقاومت R_S نیز مدل‌سازی نمود که این موضوع در شکل (۹-۲۱) نشان داده شده است.

در مدل موازی یک خازن واقعی مطابق با رابطهٔ (۴-۲۳)، ضریب تلفات عایقی برابر است با:

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{V}{R_P}}{\omega C_P V} = \frac{1}{\omega R_P C_P}$$



شکل (۹-۲۱): مدار معادل موازی و سری یک خازن واقعی

همچنین در مدار معادل سری مطابق با رابطهٔ (۴-۲۵)، برای ضریب تلفات عایقی داریم:

$$\tan\delta = \frac{V_R}{V_C} = \frac{R_S I}{\frac{I}{\omega C_S}} = \omega R_S C_S$$

امّا برای اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی ($\tan\delta$) از مدار معادل سری و از پل شرینگ استفاده می‌شود که در شکل (۹-۲۲) نشان داده شده است.

در این پل اندازه‌گیری، روی مقاومت‌های $R_۳$ و $R_۴$ و خازن $C_۴$ افت ولتاژ کمی داریم. در نتیجه ولتاژ نقاط a و b نسبت به زمین خیلی کم است و تغییر دادن مقاومت متغیر $R_۳$ و خازن $C_۴$ توسّط دست، خطری ندارد. با تغییر مقاومت $R_۳$ و خازن $C_۴$، پل را به حالت تعادل در می‌آوریم تا گالوانومتر، جریان صفر یا جریان خیلی ناچیزی را نشان دهد تا ولتاژ نقاط a و b با هم برابر شوند. در حالت تعادل پل، جریان در شاخه‌های جانبی با هم برابرند. یعنی،

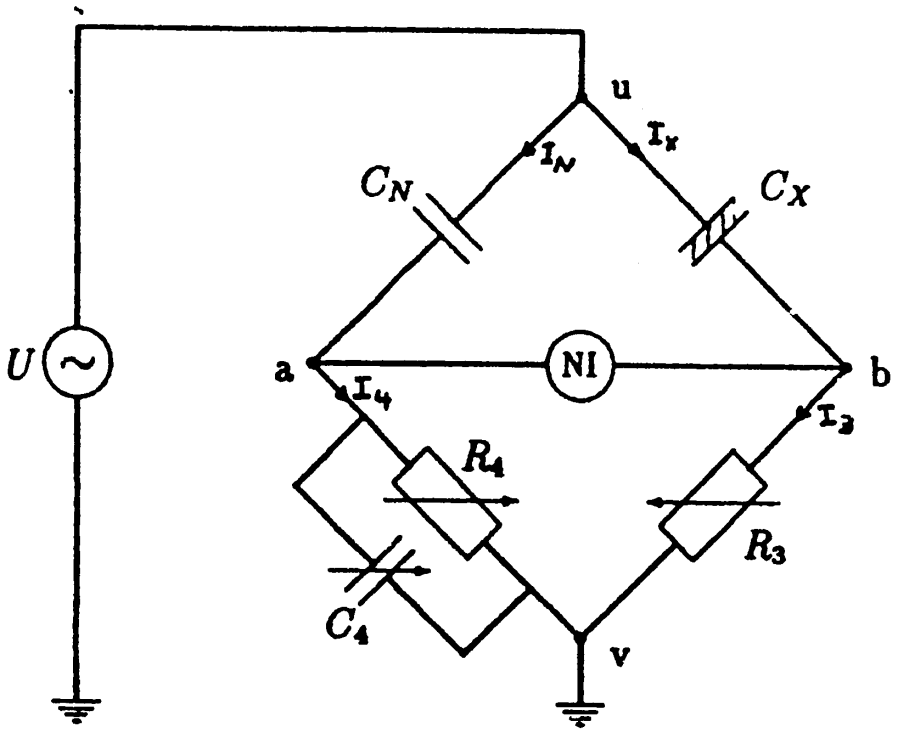
$$I_N = I_۴ \qquad (۹-۲۳)$$

$$I_X = I_۳ \qquad (۹-۲۴)$$

تقسیم ولتاژ در حالت تعادل پل در دو شاخه با هم برابر است. یعنی،

$$\frac{U_N}{U_۴} = \frac{U_X}{U_۳}$$

$$\frac{Z_N I_N}{Z_۴ I_۴} = \frac{Z_X I_X}{Z_۳ I_۳} \qquad (۹-۲۵)$$



شکل (۹-۲۲): مدار سادهٔ پل شرینگ برای محاسبهٔ tgδ

با توجّه به معادلات (۹-۲۳) و (۹-۲۴)، رابطهٔ (۹-۲۵) به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$\frac{Z_N}{Z_۴} = \frac{Z_X}{Z_۳} \qquad (۹-۲۶)$$

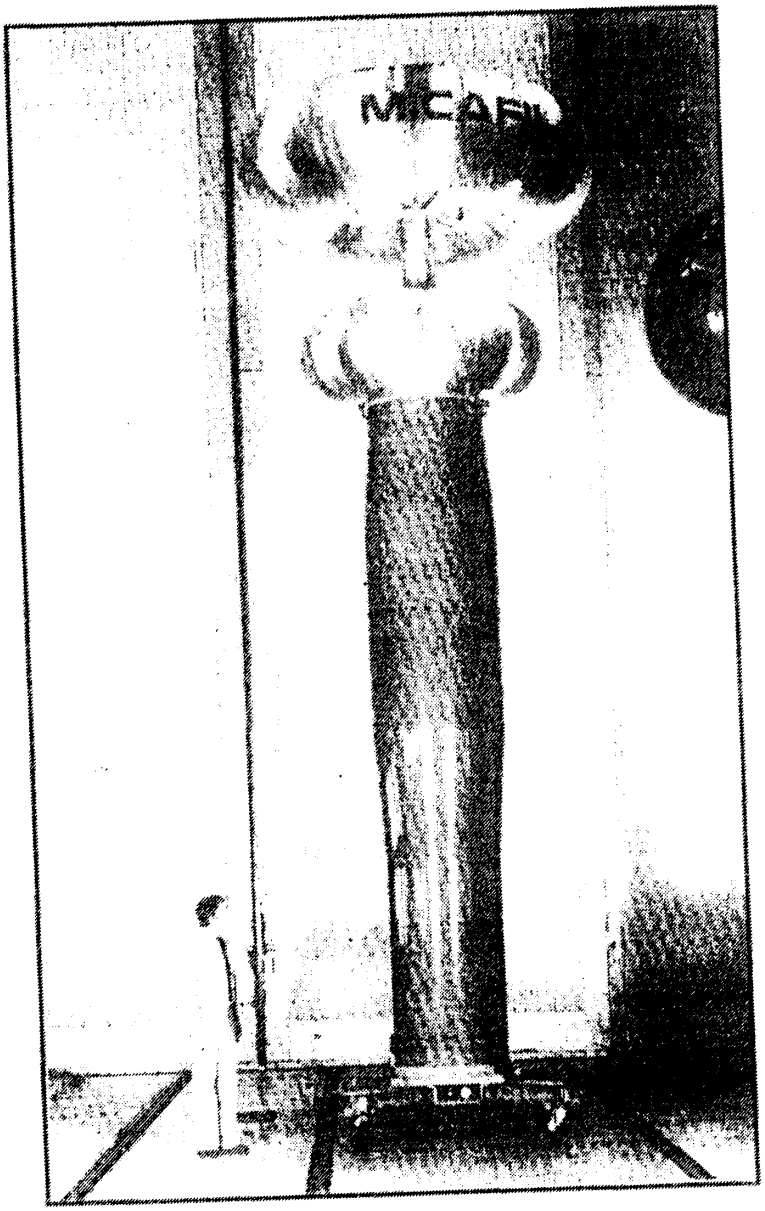
خازن C_N یک خازن استاندارد یا اصطلاحاً خازن نرمال با عایق گازی SF6 است که ضریب تلفات عایقی آن بسیار ناچیز و در حدّ صفر است و خازن بدون تلفات است (گازها ضریب تلفات عایقی کوچکتری دارند). شکل (۹-۲۳) یک نمونه خازن نرمال ۱۰۰۰ کیلوولت را نشان می‌دهد. امپدانس این خازن برابر است با:

$$Z_N = \frac{۱}{j\,\omega\, C_N}$$

با در نظر گرفتن مدار معادل سری برای نمونهٔ عایق تحت آزمایش Z_x داریم:

$$Z_X = R_S + \frac{۱}{j\,\omega\, C_S}$$

$$Z_۳ = R_۳$$



شکل (۹-۲۳): یک نمونه خازن نرمال ۱۰۰۰ کیلوولت

$$\frac{1}{Z_4} = \frac{1}{R_4} + j\omega C_4 = \frac{1 + j\omega C_4 R_4}{R_4}$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

پس در حالت تعادل پل و با استفاده از رابطهٔ (۹-۲۶) داریم:

$$\frac{\dfrac{1}{j\omega C_N}}{\dfrac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}} = \frac{R_S + \dfrac{1}{j\omega C_S}}{R_3} \qquad (۹-۲۷)$$

پس از ساده‌سازی رابطهٔ (۹-۲۷) خواهیم داشت:

$$R_S + \frac{1}{j\omega C_S} = \frac{R_3}{j\omega R_4 C_N} + \frac{R_3 C_4}{C_N}$$

از مقایسهٔ قسمت‌های حقیقی و موهومی طرفین تساوی اخیر خواهیم داشت:

$$R_S = \frac{R_3 C_4}{C_N} \qquad (۲۸-۹)$$

$$C_S = \frac{R_4 C_N}{R_3} \qquad (۲۹-۹)$$

در نتیجه می‌توان نوشت:

$$\tan\delta = \omega R_S C_S = \omega \frac{R_3 C_4}{C_N} \times \frac{R_4 C_N}{R_3} = \omega R_4 C_4 \qquad (۳۰-۹)$$

بدین ترتیب، ظرفیت خازنی (C_S) و ضریب تلفات عایقی ($\tan\delta$) عایق نمونه از روابط (۹-۲۹) و (۹-۳۰) در حالت تعادل پل شرینگ به‌دست می‌آید.

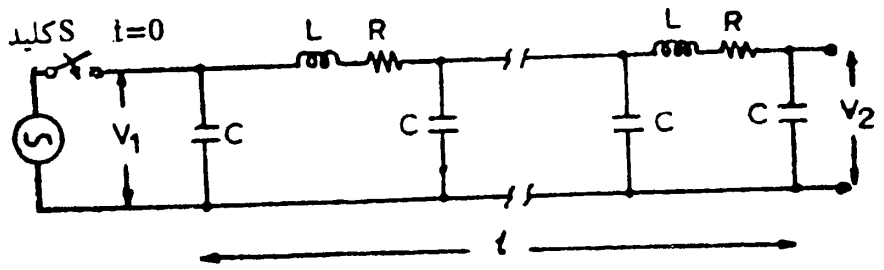
فصل دهم

امواج سیّار در خطوط انتقال

۱۰-۱- مقدّمه

بر اثر برخورد صاعقه‌های آسمانی یا بر اثر عبور ابرهای باردار از بالای خطوط انتقال، اضافه ولتاژهای ناگهانی به‌صورت موج ضربه‌ای روی خطوط انتقال القا می‌شود. همچنین بر اثر سویچینگ ناشی از کلیدزنی یا اتّصال کوتاه، یک اضافه ولتاژ ضربه‌ای ایجاد می‌گردد. هنگامی‌که این اضافه ولتاژها در یک نقطه ایجاد می‌شوند، به‌طور آنی و همزمان تمام نقاط خط دارای این اضافه ولتاژ نمی‌شوند، بلکه این امواج به‌صورت موج‌های سیّار روی خطوط انتقال حرکت می کنند و با توجّه به سرعت امواج الکترومغناطیسی (کمیّت‌های الکتریکی نیز از همین نوع هستند)، مدّتی طول می‌کشد تا یک موج از ابتدای خط به انتهای خط برسد. سرعت حرکت موج‌های الکترومغناطیسی بستگی به محیطی دارد که در آن انتشار می‌یابند. مثلاً در هوا، سرعت آن‌ها ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه است. اگر این موج‌های سیّار ضربه‌ای، داخل تجهیزات سیستم قدرت (مانند ترانسفورماتورها و ماشین‌های الکتریکی) شوند، موجب توزیع نابرابر تنش‌های الکتریکی در طول سیم‌پیچ‌ها شده و می‌توانند موجب از بین رفتن عایق‌بندی آن‌ها شوند. بنابراین، باید از ورود آن‌ها به تجهیزات جلوگیری شود.

برای بررسی و مطالعهٔ این امواج سیّار روی خطوط انتقال، از مدل گسترده‌ٔ یک خطّ انتقال که به‌صورت شکل (۱۰-۱) است، استفاده می‌کنیم. برای سهولت، از مقاومت و کندوکتانس خط نیز صرف‌نظر می‌کنیم؛ یعنی یک خطّ بدون تلفات را در نظر می‌گیریم.



شکل (۱۰-۱): عناصر توزیع شدهٔ خطّ انتقال

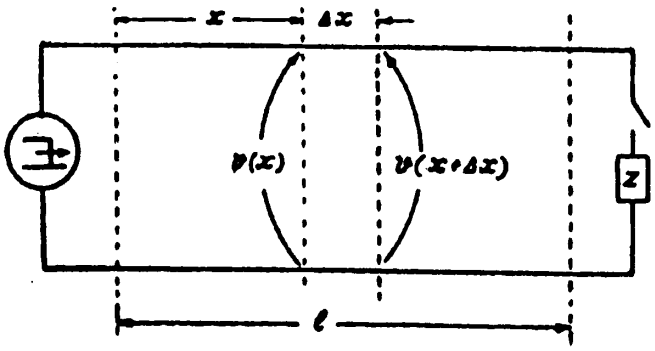
هنگامی‌که خطّ مذکور به‌طور ناگهانی توسّط کلید S به مولّد وصل می‌شود، تمام نقاط خط به‌طور همزمان برق‌دار نمی‌شوند؛ بلکه ابتدا در اثر اعمال ولتاژ به مدار، خازن اوّلی شارژ می‌شود و سپس خازن مذکور در سلف اوّلی دشارژ می‌شود و باعث برقراری جریان در سلف اوّل می‌شود که از این طریق، خازن دوم شارژ می‌گردد و این عمل تکرار می‌شود تا ولتاژ به انتهای خط برسد. این وضعیت مانند آن است که موج ولتاژ در طول ابتدا تا انتهای خط به‌صورت یک موج سیّار در حال حرکت باشد. به‌همین ترتیب وقتی که یک صاعقه روی خط زده می شود، در نقطهٔ صاعقه زده شده، موج ضربهٔ القا شده به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود و در دو جهت مختلف به‌صورت امواج سیّار روی خط حرکت می کنند.

۱۰-۲- معادلات موج سیّار روی خطّ انتقال

فرض کنید که L اندوکتانس واحد طول خط بر حسب H/m و C کاپاسیتانس واحد طول خط بر حسب F/m باشد. یک تکهٔ کوچک Δx از خطّ مذکور را برای یک زمان معیّن t مطابق با شکل (۱۰-۲) در نظر بگیرید. با صرف‌نظر کردن از مقاومت اهمی و کندوکتانس خط (خطّ انتقال بدون تلفات اهمی)، ولتاژ ابتدا و انتهای خط را می‌توان به‌صورت روابط زیر نوشت:

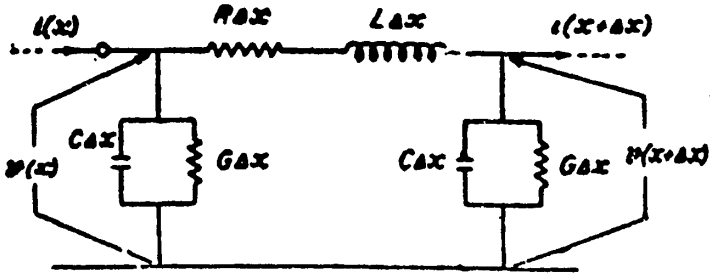
$$V(x+\Delta x\ ,\ t) = V(x\ ,t)\ - L.\Delta x\,\frac{\partial i\,(x\ ,t)}{\partial t} \qquad (۱-۱۰)$$

$$\frac{V(x+\Delta x\ ,t)\ -\ V(x\ ,t)}{\Delta x} = \ -L\,\frac{\partial i(x\ ,t)}{\partial t} \qquad (۲-۱۰)$$



ابتدای خط انتهای خط

(الف)



(ب)

شکل (۱۰-۲): عناصر یک خطّ انتقال

اگر $\Delta x \to 0$ میل کند، آن‌گاه رابطهٔ (۱۰-۲) را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -L\frac{\partial i}{\partial t} \qquad (۱۰-۳)$$

یعنی هر تغییر زمانی در جریان روی خط، تغییر ولتاژی در طول خط ایجاد می‌کند.

همچنین برای جریان‌ها داریم:

$$i(x+\Delta x, t) = i(x,t) - C.\Delta x\frac{\partial V(x+\Delta x, t)}{\partial t} \qquad (۱۰-۴)$$

$$\frac{i(x+\Delta x, t) - i(x,t)}{\Delta x} = -C\frac{\partial V(x+\Delta x, t)}{\partial t} \qquad (۱۰-۵)$$

با فرض $\Delta x \to 0$ و صرف‌نظر کردن ار تغییرات درجهٔ دوم ولتاژ، رابطهٔ (۱۰-۵) به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C\frac{\partial V}{\partial t} \qquad (۱۰-۶)$$

به‌عبارت دیگر، هر تغییر زمانی ولتاژ روی خط، تغییر شدّت جریان در طول خط را به‌وجود می‌آورد.

تغییرات مکانی موج، متناسب با تغییرات زمانی آن است. طبق قانون اهم، بین ولتاژ و جریان نیز رابطهٔ زیر صادق است.

$$V(x,t) = Z\, i(x,t) \qquad (۷-۱۰)$$

حال اگر معادلهٔ (۱۰-۷) را در معادلات (۱۰-۳) و (۱۰-۶) قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$Z\frac{\partial i}{\partial x} = -L\frac{\partial i}{\partial t} \qquad (۸-۱۰)$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -CZ\frac{\partial i}{\partial t} \qquad (۹-۱۰)$$

از تقسیم دو معادلهٔ اخیر بر یکدیگر داریم:

$$Z = \frac{L}{CZ}$$

$$Z^{۲} = \frac{L}{C} \qquad (۱۰-۱۰)$$

در نتیجه،

$$Z = \pm\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad (۱۱-۱۰)$$

به این امپدانس، امپدانس مشخّصه[۱] یا امپدانس موجی[۲] خط می‌گویند. بنابراین، جواب‌های معادلات دیفرانسیل (۱۰-۳) و (۱۰-۶) را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

$$V(x,t) = \sqrt{\frac{L}{C}}\; i(x,t)$$

$$V(x,t) = -\sqrt{\frac{L}{C}}\; i(x,t)$$

اختلاف این دو رابطه را بعداً خواهیم شناخت.

با قرار دادن امپدانس موجی Z از معادلهٔ (۱۰-۱۱) در معادلهٔ (۱۰-۸) داریم:

$$\pm\sqrt{\frac{L}{C}}\;\frac{\partial i}{\partial x} = -L\frac{\partial i}{\partial t} \qquad (۱۲-۱۰)$$

1- Characteristic Impedance 2- Surge Impedance

این رابطه بیان می‌کند که هر تغییر زمانی شدّت جریان، تغییر مکانی آن را نیز به دنبال دارد. برای به‌دست آوردن سرعت حرکت موج ولتاژ و جریان، نسبت تغییرات زمانی به تغییرات مکانی را به‌دست می‌آوریم.

$$v=\frac{dx}{dt}=\frac{\frac{\partial i}{\partial t}}{\frac{\partial i}{\partial x}}=\frac{\pm\sqrt{\frac{L}{C}}}{-L}$$

$$v=\pm\frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad (۱۳-۱۰)$$

برای خطوط هوایی، با توجّه به آنکه ظرفیت خازنی آن‌ها در مقایسه با کابل‌ها کم‌تر و اندوکتانس آن‌ها بیشتر است، لذا، امپدانس موجی خطوط هوایی، خیلی بیشتر از کابل‌ها است. همچنین سرعت سیر و حرکت موجی روی خطوط هوایی زیادتر از کابل‌ها است.

مثال (۱۰-۱): برای یک خطّ هوایی $C=0/0067\,\mu F/km$ و $L=1/67\ mH/km$ است. آن‌گاه،

$$Z=\pm\sqrt{\frac{L}{C}}=\sqrt{\frac{1/67\times10^{-3}}{0/0067\times10^{-6}}}=500\ \Omega$$

$$v=\frac{1}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{\sqrt{1/67\times10^{-3}\times0/0067\times10^{-6}}}\simeq300000\ km/sec$$

برای کابل مشابه با $C=0/133\,\mu F/km$ و $L=0/33\ mH/km$، مقادیر فوق برابر $Z=50\Omega$ و $v=150000\,km/s$ می‌شود.

اکنون می‌خواهیم معادلات موجی خطّ انتقال را به‌دست آوریم. بدین منظور اگر، هم از معادلهٔ (۱۰-۳) نسبت به متغیّر x مشتق بگیریم و هم از معادلهٔ (۱۰-۶) نسبت به t مشتق بگیریم، آن‌گاه خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}=-L\frac{\partial^2 i}{\partial x\,\partial t} \qquad (۱۴-۱۰)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x\,\partial t}=-C\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \qquad (۱۵-۱۰)$$

با جایگزینی معادلهٔ (۱۰-۱۵) در معادلهٔ (۱۰-۱۴) داریم:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = L C \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \qquad (۱۶-۱۰)$$

حال از معادلهٔ (۱۰-۳) نسبت به t و از معادلهٔ (۱۰-۶) نسبت به x مشتق می‌گیریم.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x\, \partial t} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \qquad (۱۷-۱۰)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = -C \frac{\partial^2 V}{\partial x\, \partial t} \qquad (۱۸-۱۰)$$

با جایگزینی معادلهٔ (۱۰-۱۷) در معادلهٔ (۱۰-۱۸) داریم:

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L C \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \qquad (۱۹-۱۰)$$

معادلات (۱۰-۱۶) و (۱۰-۱۹) به معادلات موجی خطّ انتقال معروف هستند و می‌توان آن‌ها را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \qquad (۲۰-۱۰)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \qquad (۲۱-۱۰)$$

برای حلّ معادلات دیفرانسیل با مشتق‌های جزئی (۱۰-۲۰) و (۱۰-۲۱) باید شرایط مرزی و شرایط اوّلیهٔ ولتاژ و جریان را داشته باشیم. شرایط مرزی ولتاژها، مقدار ولتاژ در ابتدا و انتهای خطّ انتقال، و شرایط اوّلیهٔ ولتاژها، شکل موج ولتاژ در لحظهٔ $t=0$ و شکل موج مشتق ولتاژ در لحظهٔ $t=0$ می‌باشد. برای شرایط اوّلیه، معادلات زیر صادق است:

$$\begin{cases} t = 0 \\ V(x,t) = f(x) \end{cases} \qquad \begin{cases} t = 0 \\ \dfrac{\partial V(x,t)}{\partial t} = h(x) \end{cases}$$

با فرض $h(x)=0$ در این صورت با روش حلّ دالامبر، جواب معادلات دیفرانسیل با مشتق جزئی برای موج ولتاژ (معادلهٔ ۱۰-۲۰) به‌صورت زیر خواهد بود:

$$V(x,t) = \frac{1}{2}\left[g(x+vt) + g(x-vt)\right] \qquad (۲۲-۱۰)$$

که در این معادله،

$$g(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\frac{n\pi x}{l} + b_n \sin\frac{n\pi x}{l}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

معادلهٔ g (یا در حقیقت ضرایب a_n و b_n) با توجّه به شرایط اوّلیه معلوم می شود. معادلهٔ (۱۰-۲۲) سیّار بودن موج ولتاژ را نشان می‌دهد؛ زیرا از دو تابع سیّار $g(x+vt)$ و $g(x-vt)$ تشکیل شده است که یکی به طرف جلو و دیگری به طرف عقب حرکت می‌کند (شکل ۱۰-۳ را ببینید).

اگر t به اندازهٔ Δt تغییر کند و به طرف جلوی خط با سرعت v حرکت کنیم، داریم:

$$\Delta x = v \cdot \Delta t$$

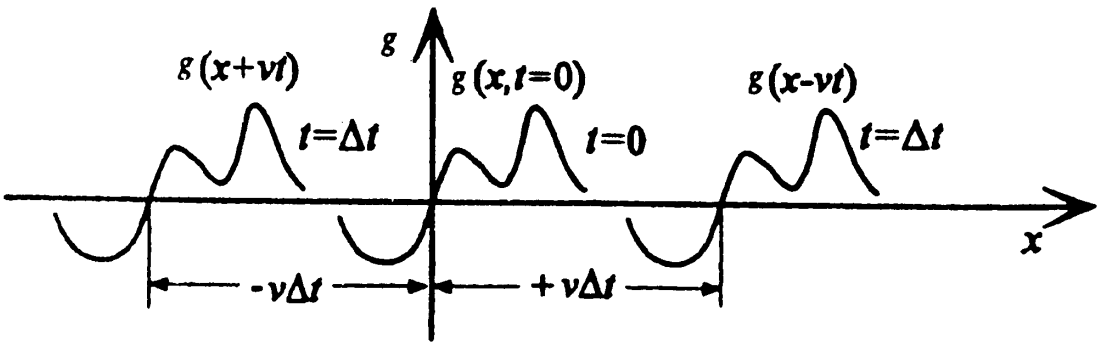
$$g(x+\Delta x - v(t+\Delta t)) = g(x+\Delta x - vt - v\,\Delta t) = g(x+\Delta x - vt - \Delta x) = g(x-vt)$$

و اگر زمان t به اندازهٔ Δt، تغییر کند و در طرف عقب خط $(-x)$ با سرعت v پیش برویم، خواهیم داشت:

$$\Delta x = -v \cdot \Delta t$$

$$g(x+\Delta x + v(t+\Delta t)) = g(x+\Delta x + vt + v\,\Delta t) = g(x+\Delta x + vt - \Delta x) = g(x+vt)$$

پس مطابق با شکل (۱۰-۳)، تابع موج $g(x-vt)$ در جهت مثبت محور xها و تابع $g(x+vt)$ در جهت منفی محور xها در حال حرکت است.



شکل (۱۰-۳): حرکت موج سیّار به طرف‌های خط

حال با توجّه به شرایط اوّلیه،

$$V(x, t=0) = f(x)$$

و با جایگزینی در معادلهٔ (۱۰-۲۲) خواهیم داشت:

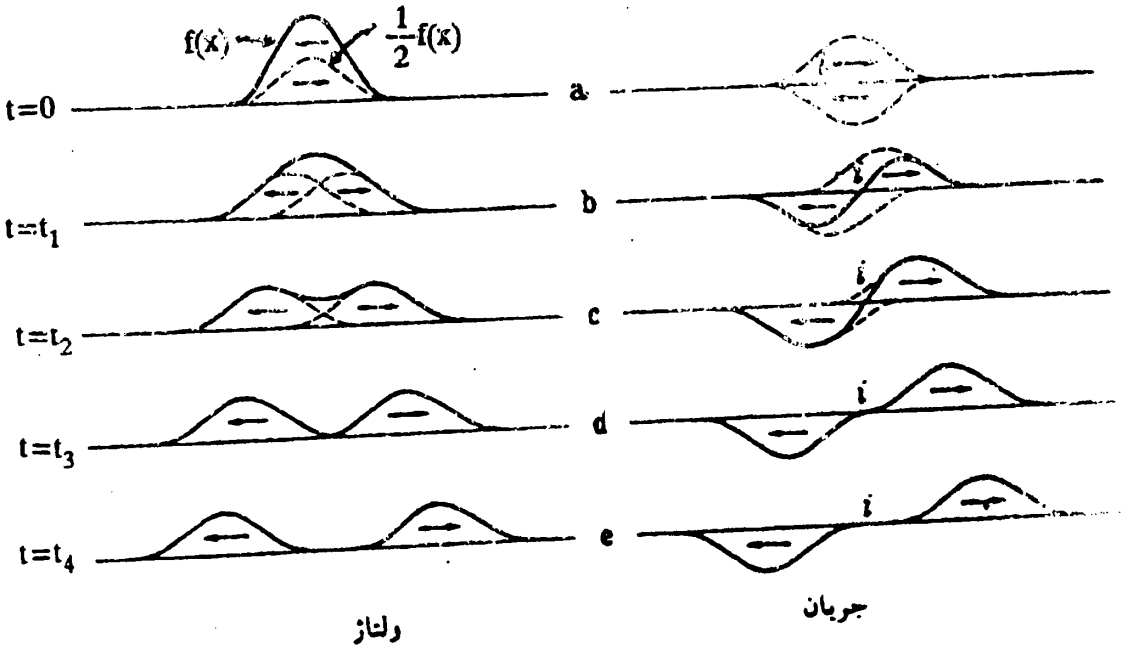
$$f(x) = \frac{1}{2}\left[g(x) + g(x)\right] = g(x) \qquad (۱۰-۲۳)$$

بنابراین، داریم:

$$V(x, t) = \frac{1}{2}\left[f(x+vt) + f(x-vt)\right] \qquad (۱۰-۲۴)$$

یعنی $f(x)$ (تابع ولتاژ در لحظهٔ $t=0$) در زمان $t=0$ به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود که یکی از آن‌ها با سرعت v به طرف جلو و دیگری با همین سرعت به سمت عقب حرکت می‌کنند (شرط مساوی بودن آن است که $\left.\frac{\partial V}{\partial t}\right|_{t=0}=0$ باشد). این موضوع را می‌توان در شکل (۱۰-۴) مشاهده نمود.

به موجی که در حال حرکت به سمت جلو است "موج تابش"[1] می‌گویند که برابر است با،



شکل (۱۰-۴): تقسیم موج ضربه‌ای و حرکت آن به دو سمت خطّ انتقال

1- Incident Wave

$$V_i = \frac{۱}{۲} f(x - vt) \qquad (۲۵-۱۰)$$

همچنین به موجی که در حال حرکت به طرف عقب است، "موج بازتاب"[۱] می‌گویند که برابر است با،

$$V_r = \frac{۱}{۲} f(x + vt) \qquad (۲۶-۱۰)$$

بنابراین، در هر نقطه از خطّ انتقال و در هر لحظهٔ زمانی t، ولتاژ خطّ انتقال، مجموع این دو موج است:

$$V = V_i + V_r \qquad (۲۷-۱۰)$$

لازم به‌ذکر است که شکل واقعی ولتاژها توسّط شرایط مرزی مشخّص می‌شود.

با توجّه به معادلهٔ (۱۰-۷) می‌توان جریان را به‌شکل زیر به‌دست آورد:

$$i(x,t) = \frac{V(x,t)}{Z}$$

$$i(x,t) = \frac{۱}{۲Z}\left[f(x+vt) + f(x-vt)\right] \qquad (۲۸-۱۰)$$

همچنین برای جریان‌ها خواهیم داشت:

$$i = i_i + i_r \qquad (۲۹-۱۰)$$

جریان i_i جریان تابش و i_r جریان بازتاب می‌باشد. اکنون می‌خواهیم به مفهوم علامت مثبت و منفی امپدانس موجی Z در رابطهٔ (۱۰-۱۱) پی ببریم. برای این منظور از معادلهٔ ولتاژ (۱۰-۲۴) نسبت به زمان، مشتق گرفته و از معادلهٔ جریان (۱۰-۲۸) نسبت به فاصلهٔ x مشتق می‌گیریم:

$$\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{۱}{۲Z}\left[f'(x+vt) + f'(x-vt)\right]$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{۱}{۲}\left[vf'(x+vt) - vf'(x-vt)\right]$$

حال با جایگزینی دو معادلهٔ اخیر در رابطهٔ (۱۰-۶) خواهیم داشت:

$$\frac{۱}{۲Z}\left[f'(x+vt) + f'(x-vt)\right] = -\frac{C}{۲}\left[vf'(x+vt) - vf'(x-vt)\right]$$

1- Reflected Wave

با مقایسه طرفین رابطهٔ اخیر داریم:

$$\frac{1}{Z} = -Cv \quad \text{برای موج برگشت} \qquad (۳۰-۱۰)$$

$$\frac{1}{Z} = Cv \quad \text{برای موج تابش} \qquad (۳۱-۱۰)$$

در رابطهٔ (۱۰-۳۰)، چون $v>0$ و $C>0$ است، پس باید $Z<0$ باشد. بنابراین، برای موج بازتاب $f(x+vt)$ باید $Z=-\sqrt{L/C}$ باشد. همچنین برای موج تابش، در معادلهٔ (۱۰-۳۱) چون $v>0$ و $C>0$ است، پس باید $Z>0$ یعنی $Z=\sqrt{L/C}$ باشد؛ ولی برای سادگی، همیشه مقدار $Z>0$ در نظر می‌گیریم و برای موج بازتاب، یک علامت منفی جلوی آن قرار می دهیم. پس روابط ولتاژ و جریان موج‌های رو به جلو و رو به عقب به‌صورت زیر خواهد بود:

$$V_i = Z\, i_i \qquad (۳۲-۱۰)$$

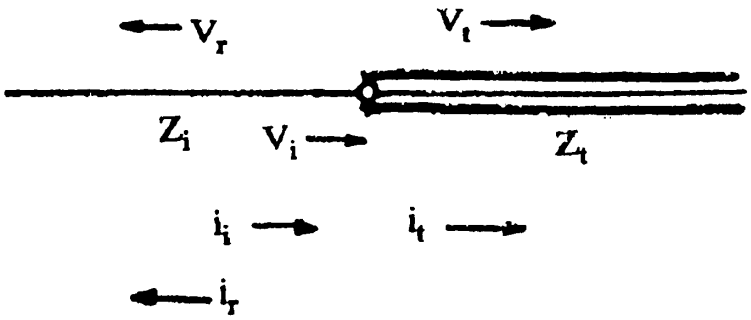
$$V_r = -Z\, i_r \qquad (۳۳-۱۰)$$

که در این روابط $Z=\sqrt{L/C}$ است

۱۰-۳- قوانین انعکاس و انتقال موج سیّار در خطوط انتقال

هنگامی‌که موج سیّار روی خطوط انتقال (مانند سایر امواج از جمله موج نور، موج صدا، یا موج منتشر شده در یک طناب)، به یک ناپیوستگی برخورد کند، مقداری از موج، منعکس و مقداری از آن نیز، منتقل می‌شود و وارد محیط دوم (بعد از نقطهٔ ناپیوستگی) می‌گردد. این ناپیوستگی در خطوط انتقال می‌تواند به‌صورت اتّصال دو خط با امپدانس‌های موجی متفاوت باشد، و یا محلّ اتّصال خطّ انتقال به یک ایستگاه برق (ترانسفورماتوری- که امپدانس موجی متفاوت با خطّ انتقال داشته باشد) باشد. هنگامی‌که موج سیّار با ولتاژ V_i به محلّ ناپیوستگی برخورد می‌کند، به اندازهٔ مقدار V_t منتقل می‌شود و موج انتقال یافته[1] را می‌سازد و به اندازهٔ V_r هم منعکس می‌شود و موج منعکس شده[2] را می‌سازد که در شکل (۱۰-۵)

1- *Transmitted Wave* 2- *Reflected Wave*



شکل (۱۰-۵): اتّصال یک خطّ انتقال، با یک کابل فشار قوی

نشان داده شده است.

طبق "قانون ولتاژ کیرشُف" در نقطهٔ ناپیوستگی، باید ولتاژ در دو طرف با هم برابر باشند.

$$V_۱ = V_۲$$

در نتیجه،

$$V_۱ = V_i + V_r \quad , \quad V_۲ = V_t$$

$$V_i + V_r = V_t \qquad (۳۴-۱۰)$$

همچنین طبق "قانون جریان کیرشُف"، جریان منتجّهٔ ورودی به نقطهٔ ناپیوستگی، با جریان خروجی برابر است.

$$i_۱ = i_۲$$

$$i_i + i_r = i_t \qquad (۳۵-۱۰)$$

با توجّه به امپدانس موجی دو خط یعنی Z_i و Z_t، از معادلهٔ (۱۰-۳۵) داریم:

$$\frac{V_i}{Z_i} - \frac{V_r}{Z_i} = \frac{V_t}{Z_t} \qquad (۳۶-۱۰)$$

حال معادلهٔ (۱۰-۳۴) را بر Z_i تقسیم می‌کنیم.

$$\frac{V_i}{Z_i} + \frac{V_r}{Z_i} = \frac{V_t}{Z_i} \qquad (۳۷-۱۰)$$

از جمع دو رابطهٔ (۱۰-۳۶) و (۱۰-۳۷) داریم:

$$\frac{۲V_i}{Z_i} = V_t \left(\frac{۱}{Z_t} + \frac{۱}{Z_i} \right)$$

در نتیجه،

$$V_t = \left(\frac{۲Z_t}{Z_i + Z_t}\right) V_i \qquad (۳۸-۱۰)$$

اگر ضریب انتقال موج را به‌صورت زیر تعریف کنیم:

$$K_t = \frac{۲Z_t}{Z_i + Z_t} \qquad (۳۹-۱۰)$$

آن‌گاه خواهیم داشت:

$$V_t = K_t\ V_i \qquad (۴۰-۱۰)$$

علاوه بر این، از معادلهٔ (۱۰-۳۴) داریم،

$$V_r = V_t - V_i = K_t V_i - V_i = (K_t - ۱) V_i$$

در نتیجه،

$$V_r = \left(\frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t}\right) V_i \qquad (۴۱-۱۰)$$

اگر ضریب انعکاس موج به‌صورت زیر تعریف شود:

$$K_r = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} \qquad (۴۲-۱۰)$$

آن‌گاه داریم:

$$V_r = K_r\ V_i \qquad (۴۳-۱۰)$$

برای جریان‌های تابش، منعکس یافته و انتقال شده، روابط زیر حاصل می‌گردد:

$$i_i = \frac{V_i}{Z_i} \qquad (۴۴-۱۰)$$

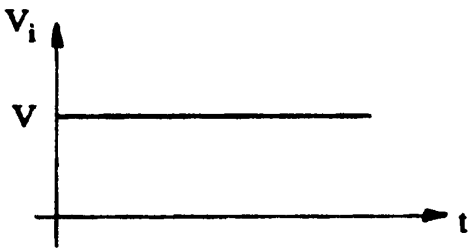
$$i_t = \frac{V_t}{Z_t} = \frac{۲}{Z_i + Z_t} V_i \qquad (۴۵-۱۰)$$

$$i_r = -\frac{V_r}{Z_i} = \frac{Z_i - Z_t}{Z_i + Z_t}\ \frac{V_i}{Z_i} \qquad (۴۶-۱۰)$$

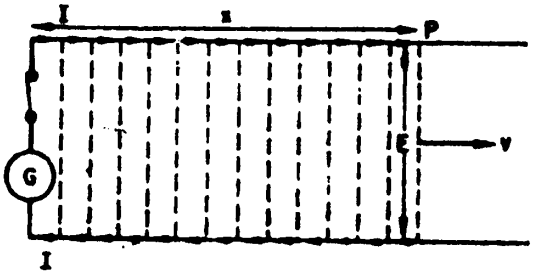
۱۰-۴- بررسی حالت‌های خاص

برای بررسی حالت‌های خاص حرکت موج سیّار روی خطوط انتقال، از ساده‌ترین و مرسوم‌ترین موج یعنی یک موج پله‌ای استفاده می‌کنیم. این موج به عنوان موج سیّار تابش در شکل (۱۰-۶) نشان داده شده است.

این موج در لحظهٔ $t=0$ به‌مقدار V پرش می‌کند؛ یعنی این موج مانند آن است که در لحظهٔ $t=0$، یک منبع ولتاژ دائم و ثابت V را به مدار وصل کنیم. این موج ضربه‌ای، خطرناک‌ترین موج است؛ زیرا پرش آن از مقدار صفر به‌مقدار حدّاکثر به‌صورت ناگهانی است و مانند یک موج ضربه‌ای با پیشانی خیلی تیز عمل می‌کند. از این‌رو، باعث ایجاد بیشترین تنش الکتریکی در تجهیزات می‌شود و چون مقدار دامنهٔ آن نیز حفظ می‌شود، بیشترین نوسان را در سیم‌پیچ‌های ماشین‌های الکتریکی تولید می‌کند (شکل ۱۰-۷ را ببینید).



شکل (۱۰-۶): موج ولتاژ پله‌ای

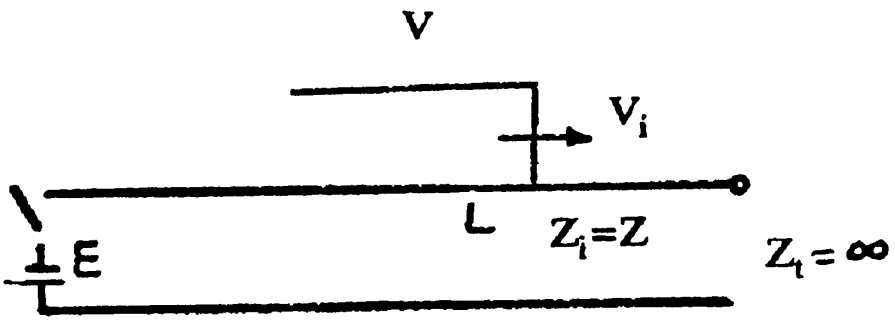


شکل (۱۰-۷): تولید موج سیّار

۱۰-۴-۱- خطّ انتقال با انتهای باز

فرض کنید که یک موج ولتاژ $V_i=Vu(t)$ روی یک خطّ انتقال که انتهای آن باز است، منتقل شود. در این حالت، در نقطهٔ ناپیوستگی و برای مدار باز، مانند این است که خطّ دوم با امپدانس موجی $Z_t=\infty$ باشد (شکل ۱۰-۸ را ببینید). آنگاه ضرایب خط برابر خواهند بود با،

$$K_t = \frac{2Z_t}{Z_i + Z_t} = \frac{2}{\frac{Z_i}{Z_t} + 1}$$



شکل (۱۰-۸): موج انتقالی سیّار، روی خطّ با انتهای باز

$$Z_t \to \infty \quad \Rightarrow \quad K_t = ۲$$

$$K_r = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} = \frac{۱ - \frac{Z_i}{Z_t}}{۱ + \frac{Z_i}{Z_t}}$$

$$Z_t \to \infty \quad \Rightarrow \quad K_r = ۱$$

در نتیجه،

$$V_t = K_t V_i = ۲V$$

$$V_r = K_r V_i = V$$

$$i_i = \frac{V_i}{Z_i} = \frac{V}{Z}$$

$$i_t = \frac{۲}{Z_i + Z_t} V_i \quad , \; Z_t \to \infty \quad \Rightarrow \quad i_t = ۰$$

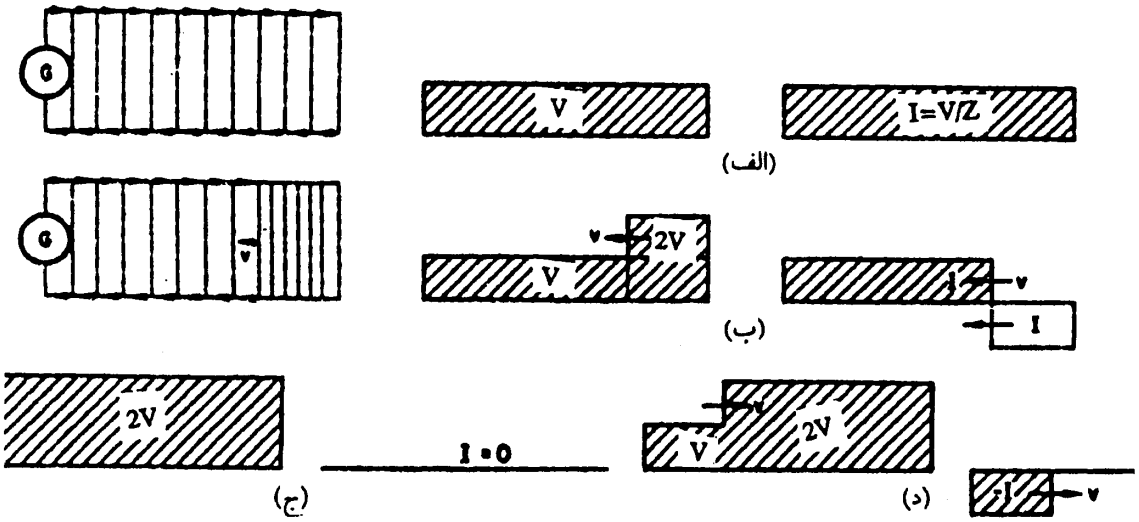
$$i_r = \frac{Z_i - Z_t}{Z_i + Z_t} \frac{V_i}{Z_i} = \frac{\frac{Z_i}{Z_t} - ۱}{\frac{Z_i}{Z_t} + ۱} \frac{V_i}{Z_i} = \frac{-V_i}{Z_i} = -i_i$$

چون در مدار باز، جریان صفر می‌شود بنابراین، تمام انرژی الکترومغناطیسی $\frac{۱}{۲}Li^۲$ به انرژی الکترواستاتیکی $\frac{۱}{۲}CV^۲$ تبدیل می‌شود. به‌همین دلیل ولتاژ در مدار

بی‌تلفات، دو برابر شده است (شکل ۱۰-۹ را ببینید). همچنین:

$V = V_i + V_r = V + V = ۲V$ در هر نقطهٔ خط

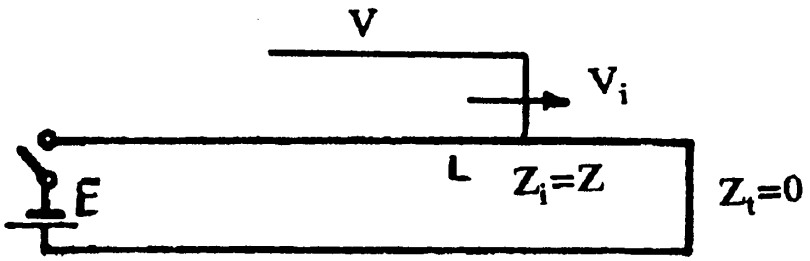
$i = i_i + i_r = i_i - i_i = ۰$ در هر نقطهٔ خط



شکل (۱۰-۹): امواج سیّار در یک خطّ مدار باز

۱۰-۴-۲- خطّ انتقال با انتهای اتّصال کوتاه

فرض کنید روی خطّی که انتهای آن اتّصال کوتاه شده باشد، موج $V_i=Vu(t)$ مطابق شکل (۱۰-۱۰) حرکت کند. در این حالت، در نقطهٔ ناپیوستگی برای مدار اتّصال کوتاه شده، مانند این است که خطّ دوم با امپدانس موجی $Z_t=۰$ باشد. در نتیجه ضرایب انتقال و انعکاس به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:



شکل (۱۰-۱۰): موج انتقالی روی خطّ با انتهای اتّصال کوتاه شده

$$K_t = \frac{۲Z_t}{Z_i + Z_t} = ۰$$

$$K_r = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} = -۱$$

با استفاده از این ضرایب خواهیم داشت:

$$V_t = K_t V_i = ۰$$

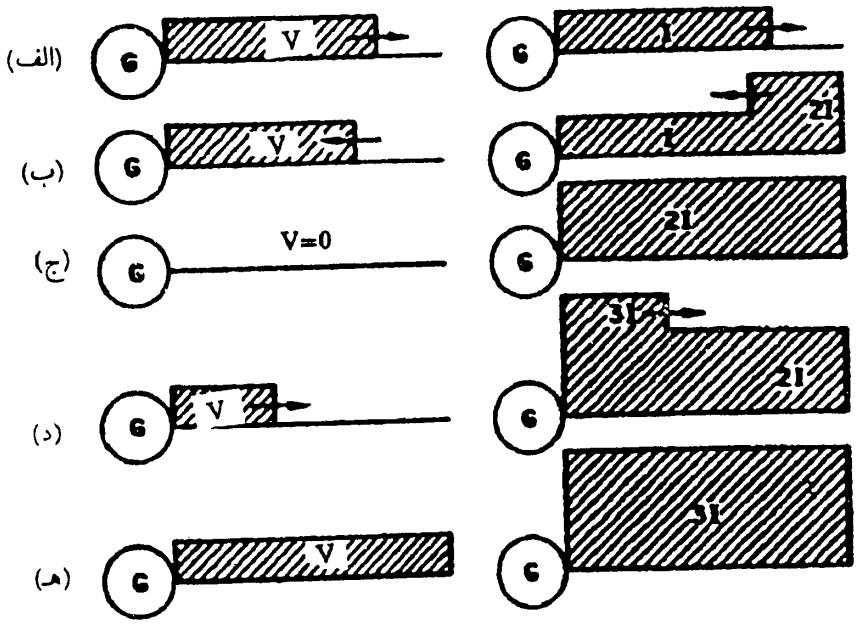
$$V_r = K_r V_i = -V$$

$$i_i = \frac{V_i}{Z_i} = \frac{V}{Z}$$

$$i_t = \frac{۲}{Z_i + Z_t} V_i = \frac{۲}{Z} V = ۲i_i$$

$$i_r = \frac{-V_r}{Z_i} = \frac{V}{Z} = i_i$$

این مشخّصات در شکل (۱۰-۱۱) نشان داده شده است. چون در مدار اتّصال کوتاه، ولتاژ صفر می‌شود، تمام انرژی الکترواستاتیکی $\frac{۱}{۲}CV^۲$ به انرژی الکترومغناطیسی $\frac{۱}{۲}Li^۲$ تبدیل می‌شود. به‌عبارت دیگر، جریان در مدار بدون تلفات، دو برابر شده است.

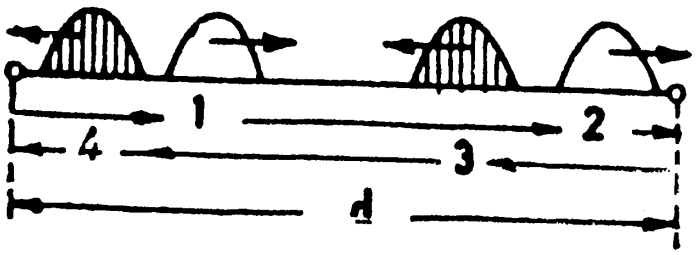


شکل (۱۰-۱۱): امواج سیّار در خطّ اتّصال کوتاه شده

در هر نقطهٔ خط $V = V_i + V_r = V - V = ۰$

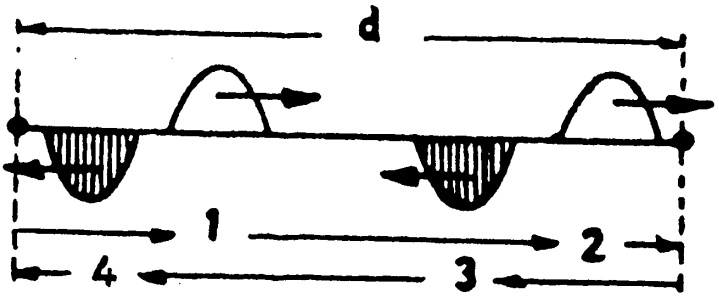
در هر نقطهٔ خط $i = i_i + i_r = i_i + i_i = ۲i_i$

از نتایج دو حالت خاص ۱۰-۴-۱ و ۱۰-۴-۲ در می‌یابیم که اگر مثلاً یک خطّ انتقال با دو طرف باز داشته باشیم و یک موج ضربه‌ای روی خط قرار گیرد، هر بار که موج به یک طرف خط می‌رسد، با همان شکل قبلی خود بر می‌گردد؛ زیرا در هر دو طرف K_r=۱ می‌باشد. در شکل (۱۰-۱۲) حالات مختلف حرکت یک موج روی یک خط به طول d با دو طرف باز، به‌ترتیب با شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است (دایرهٔ توخالی در دو طرف خط به‌معنای باز بودن دو طرف خط است).



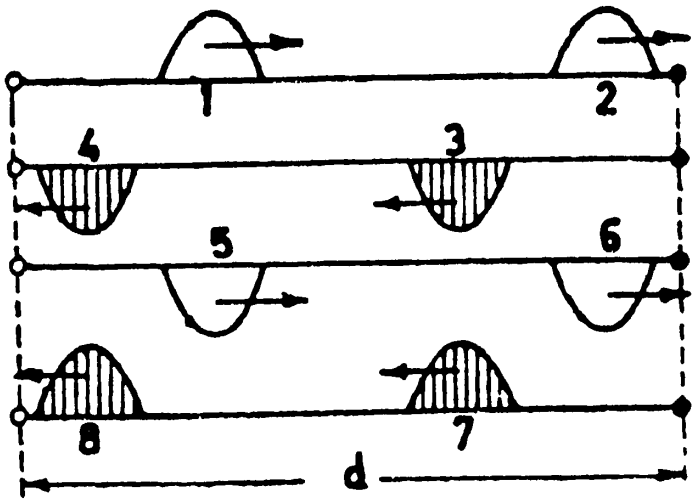
شکل (۱۰-۱۲): نحوهٔ حرکت موج سیّار در خط با دو طرف باز

بنابراین، با یک بار رفت و برگشت موج روی خط، موج در موقعیّت اوّلیه خود قرار می‌گیرد و اگر دو طرف خطّ انتقال، اتّصال کوتاه باشد، فقط در هر بار برخورد به یک طرف انتهای خط، پلاریتهٔ موج عوض می‌شود. در شکل (۱۰-۱۳) حالات مختلف حرکت یک موج روی یک خط با دو طرف اتّصال کوتاه، به‌ترتیب با شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است (در این شکل، نقاط توپر در دو طرف خط به‌معنای اتّصال کوتاه بودن آن است).



شکل (۱۰-۱۳): نحوهٔ حرکت موج سیّار در خط با دو طرف اتّصال کوتاه

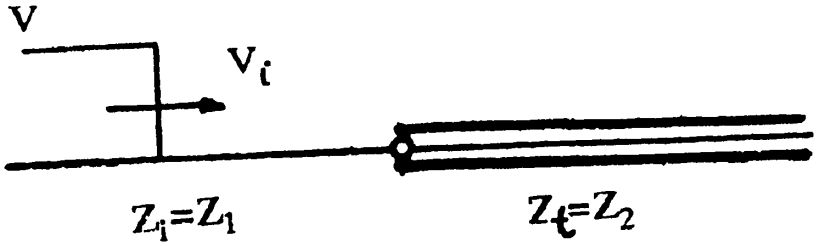
حال اگر یک طرف خط، مدار باز و طرف دیگر آن اتّصال کوتاه باشد، هر بار موج به طرف مدار باز برخورد می‌کند، به همان صورت باز می‌گردد و هر بار به طرف اتّصال کوتاه شده برخورد می‌کند، با معکوس شدن پلاریته، آن موج باز می‌گردد. بنابراین، با دو بار رفت و برگشت موج روی خط، دوباره به همان صورت اوّلیه در می‌آید. در شکل (۱۰-۱۴) مراحل مختلف حرکت یک موج سینوسی در برخورد به انتها و ابتدای یک خط، به‌ترتیب با شماره‌های ۱ تا ۸ نشان داده شده است. دایرهٔ توپر انتهای خط به‌معنای اتّصال کوتاه بودن آن، و دایرهٔ توخالی ابتدای خط به‌معنای باز بودن آن است.



شکل (۱۰-۱۴): نحوهٔ حرکت موج سیّار در خط با یک طرف باز و یک طرف اتّصال‌کوتاه

۱۰-۴-۳- اتّصال دو خط به یکدیگر

اگر دو خط با امپدانس‌های موجی Z_1 و Z_2 مطابق با شکل (۱۰-۱۵) به همدیگر متّصل شوند و یک موج سیّار پلّه‌ای با دامنهٔ V ($V_i=Vu(t)$) از روی خطّ اوّل به



شکل (۱۰-۱۵): اتّصال دو خط با امپدانس‌های مختلف

محلّ اتّصال دو خط برخورد کند داریم:

$$Z_i = Z_۱ \quad , \; Z_t = Z_۲$$

$$K_t = \frac{۲Z_t}{Z_i + Z_t} = \frac{۲Z_۲}{Z_۱ + Z_۲}$$

$$K_r = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} = \frac{Z_۲ - Z_۱}{Z_۲ + Z_۱}$$

در این حالت:

الف) اگر $Z_۱ > Z_۲$ باشد، مانند این‌که خطّ اوّل یک خطّ هوایی و خطّ دوم یک کابل باشد آن‌گاه،

$$K_t = \frac{۲}{۱ + \frac{Z_۱}{Z_۲}} < ۱$$

$$K_t > ۰$$

$$K_r < ۰$$

چون $K_t < ۱$ است، در نتیجه دامنهٔ موج سیّار انتقال یافته به کابل، کوچک می‌شود و چون $K_r < ۰$ است، موج منعکس شده، پلاریته‌اش عوض می‌شود. در صورتی‌که $Z_۲ = ۰$ باشد، مثل این است که مدار، اتّصال کوتاه شده باشد و در نتیجه $V_t = ۰$ می‌شود. بنابراین، اتّصال یک تکه کابل به خطّ هوایی، خودش باعث میراشدن موج سیّار وارد شده به آن می‌گردد و در نتیجه خیلی مناسب است تا برای اتّصال ترانسفورماتورها و ژنراتورها به خطّ هوایی، از یک تکّه کابل استفاده شود.

ب) اگر $Z_۱ = Z_۲$ باشد (یعنی ناپیوستگی وجود نداشته باشد) آن‌گاه،

$$K_t = \frac{۲Z_۲}{Z_۲ + Z_۲} = ۱$$

$$K_r = ۰$$

یعنی تمام موج وارد شده به نقطهٔ اتّصال، به خطّ دوم منتقل می‌شود.

ج) اگر $Z_۱ < Z_۲$ باشد (یعنی خطّ اوّل، کابل و خطّ دوم، خطّ هوایی باشد) آن‌گاه،

$$K_r > ۰$$

$$K_t > ۰$$

$$K_t = \frac{۲}{۱ + \frac{Z_۱}{Z_۲}} > ۱$$

یعنی، همواره موج منتقل شده، پلاریتهٔ ثابتی دارد و پلاریتهٔ موج منعکس شده هم ثابت است. چون $K_t > ۱$ است، دامنهٔ موج سیّار منتقل‌شده به خطّ هوایی تقویت می‌شود و با توجّه به $K_r < ۱$، دامنهٔ موج سیّار منعکس شده در کابل، کوچک می‌شود.

مثال (۱۰-۲): اگر موج سیّار $V_i = ۲۰۰ Vu(t)$ روی خطّ هوایی با امپدانس موجی ۴۰۰ اهم در حال حرکت به طرف نقطهٔ اتّصال به کابل با امپدانس موجی ۴۰ اهم باشد، ولتاژ و جریان منعکس شده و انتقالی را محاسبه کنید.

حل:

$$K_t = \frac{۲Z_۲}{Z_۱ + Z_۲} = \frac{۲ \times ۴۰}{۴۰۰ + ۴۰} = ۰/۱۸۲$$

$$V_t = ۰/۱۸۲ \times ۲۰۰ = ۳۶/۴ \text{ kV}$$

$$K_r = \frac{Z_۲ - Z_۱}{Z_۱ + Z_۲} = \frac{۴۰ - ۴۰۰}{۴۰۰ + ۴۰} = -۰/۸۱۸$$

$$V_r = -۰/۸۱۸ \times ۲۰۰ = -۱۶۳/۶ \text{ kV}$$

$$i_i = \frac{V_i}{Z_۱} = \frac{۲۰۰}{۴۰۰} = ۰/۵ \text{ kA}$$

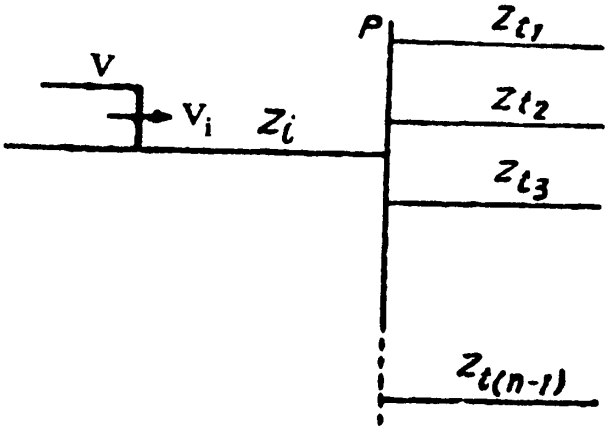
$$i_r = \frac{-V_r}{Z_۱} = \frac{۱۶۳/۶}{۴۰۰} = ۰/۴۰۹ \text{ kA}$$

$$i_t = \frac{V_t}{Z_۲} = \frac{۳۶/۴}{۴۰} = ۰/۹۱ \text{ kA}$$

۱۰-۴-۴- اتّصال چند خط در یک نقطه

اگر یک خطّ انتقال با امپدانس موجی Z_i در یک نقطه به $(n-۱)$ خطّ دیگر متّصل گردد و یک موج سیّار روی خطّ فوق به محلّ اتّصال خطوط عبور کند، آن‌گاه در نقطهٔ اتّصال، موج سیّار وارد شده، روی خطوط انشعابی تقسیم می‌گردد و مقداری از آن نیز منعکس می‌شود (شکل ۱۰-۱۶ را ببینید).

اگر امپدانس معادل خطوط موازی انشعاب‌ها را با Z_t نشان دهیم، داریم:



شکل (۱۰-۱۶): اتّصال n خط در یک نقطه

$$\frac{1}{Z_t} = \frac{1}{Z_{t1}} + \frac{1}{Z_{t2}} + \ \ldots + \frac{1}{Z_{t(n-1)}}$$

اگر Z_t از امپدانس موجی خطّ اوّل یعنی Z_i کم‌تر باشد ($Z_t<Z_i$ که معمولاً هم چنین است) در این شرایط، موج سیّار عبور کرده و وارد شده به خطوط، کم‌تر از موج سیّار ورودی است و قسمت اعظم موج، منعکس می‌شود. در اینجا نیز روابط قبلی صادق است:

$$K_t = \frac{2Z_t}{Z_i + Z_t} \quad , \quad V_t = K_t V$$

$$K_r = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} \quad , \quad V_r = K_r V$$

البتّه ولتاژ عبور کرده از تمام خطوط موازی، با هم برابر است و مساوی مقدار V_t می‌باشد. همچنین جریان هر یک از خطوط موازی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_i = \frac{V_i}{Z_i}$$

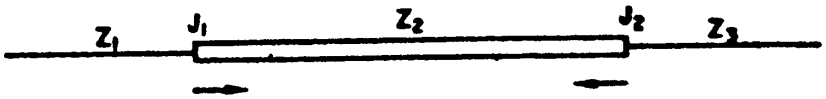
$$i_r = \frac{-V_r}{Z_i}$$

$$i_{t1} = \frac{V_t}{Z_{t1}} \ , \ i_{t2} = \frac{V_t}{Z_{t2}} \ , \ \ldots \ , \ i_{t(n-1)} = \frac{V_t}{Z_{t(n-1)}}$$

نمونهٔ این حالت، در ایستگاه‌های انتقال برق قابل مشاهده است که یک خط به‌عنوان ورودی و چندین خط به‌صورت خروجی می‌باشد.

۱۰-۴-۵- اتّصال چند خطّ انتقال به‌صورت سری

اگر چند قطعه خط پشت سر هم بکار روند، به‌گونه‌ای که بترتیب امپدانس موجی آن‌ها زیاد شود و موج سیّار از کابل وارد خطّ هوایی شود، آنگاه به‌علّت این‌که امپدانس موجی زیاد شده، دامنهٔ آن نیز زیادتر می‌شود. حال وقتی این موج وارد ترانسفورماتوری می‌شود که امپدانس موجی آن از خطّ هوایی بیشتر است، باز هم دامنهٔ موج زیاد می‌گردد که این موضوع خطرناک است (شکل ۱۰-۱۷ را ببینید).

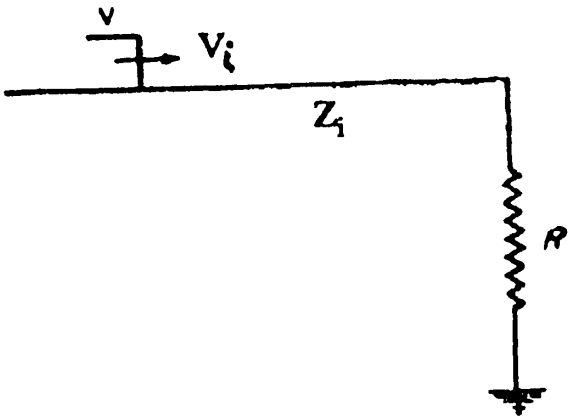


شکل (۱۰-۱۷): اتّصال چند خطّ انتقال به‌صورت سری

۱۰-۴-۶- اتّصال مقاومت در انتهای خط

در این حالت، مطابق شکل (۱۰-۱۸)، یک موج ضربه‌ای پلّه‌ای $V_i=Vu(t)$ بر خط سوار می‌شود. اگر امپدانس موجی خط برابر Z_i و مقاومت اهمی خالص انتهای خط، $Z_t=R$ باشد، آنگاه ضرایب خط برابر است با:

$$K_t = \frac{۲Z_t}{Z_i + Z_t} = \frac{۲R}{Z_i + R}$$



شکل (۱۰-۱۸): اتّصال مقاومت در انتهای خط

$$V_t = \frac{۲R}{Z_i + R} V$$

$$K_r = \frac{Z_t - Z_i}{Z_i + Z_t} = \frac{R - Z_i}{Z_i + R}$$

$$V_r = \frac{R - Z_i}{Z_i + R} V$$

در نتیجه،

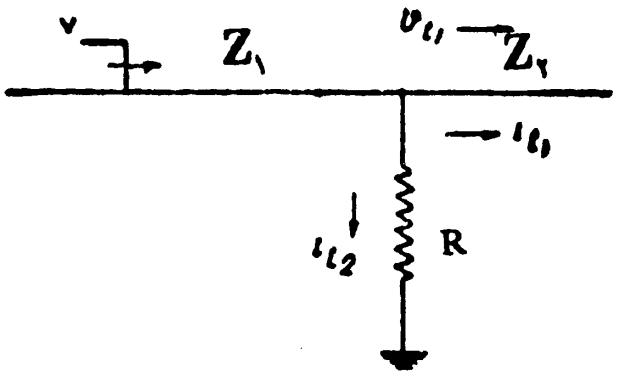
$$i_i = \frac{V}{Z_i}$$

$$i_r = \frac{-V_r}{Z_i} = \frac{Z_i - R}{Z_i + R}\frac{V}{Z_i} = \frac{Z_i - R}{Z_i + R} i_i$$

$$i_t = \frac{V_t}{Z_t} = \frac{۲}{Z_i + R} V$$

۱۰-۴-۷- اتّصال مقاومت در نقطهٔ اتّصال دو خط

در این حالت، خطّ دوم می‌تواند یک ترانسفورماتور یا یک ایستگاه ترانسفورماتوری باشد که امپدانس موجی آن $Z_۲$ است. $Z_۱$ امپدانس موجی یک کابل یا خطّ هوایی است که در شکل (۱۰-۱۹) نشان داده شده است. در این وضعیت، اتّصال ۳ خط در یک نقطه را خواهیم داشت (بخش ۱۰-۴-۴ را ببینید) که مقاومت، به‌مقدار R و خطّ با امپدانس موجی $Z_۲$ با هم موازی هستند. در این حالت داریم:



شکل (۱۰-۱۹): اتّصال مقاومت در نقطهٔ اتّصال دو خط

$$Z_i = Z_۱ \quad , \quad V_i = V\,u(t)$$

$$\frac{۱}{Z_t} = \frac{۱}{Z_۲} + \frac{۱}{R}$$

$$Z_t = \frac{Z_۲ R}{Z_۲ + R}$$

$$K_t = \frac{۲ Z_t}{Z_i + Z_t}$$

$$K_t = \frac{\frac{۲ Z_۲ R}{Z_۲ + R}}{Z_۱ + \frac{Z_۲ R}{Z_۲ + R}}$$

$$K_t = \frac{۲ Z_۲ R}{Z_۱ Z_۲ + Z_۱ R + z_۲ R}$$

با تقسیم صورت و مخرج بر $Z_۱ Z_۲ R$ خواهیم داشت:

$$K_t = \frac{۲/Z_۱}{\frac{۱}{R} + \frac{۱}{Z_۱} + \frac{۱}{Z_۲}}$$

در نتیجه،

$$V_t = \frac{۲/Z_۱}{\frac{۱}{R} + \frac{۱}{Z_۱} + \frac{۱}{Z_۲}} V$$

مشابه با مراحل فوق خواهیم داشت:

$$V_r = \frac{\frac{۱}{Z_۱} - \frac{۱}{Z_۲} - \frac{۱}{R}}{\frac{۱}{R} + \frac{۱}{Z_۱} + \frac{۱}{Z_۲}} V$$

حال اگر مقاومت R را به‌حدّ کافی کوچک انتخاب کنیم، موج ولتاژ عبوری (یعنی وارد شده به خط یا ترانسفورماتور با امپدانس موجی $Z_۲$)، خیلی کوچک خواهد ماند. البتّه برای این‌که در شرایط عادی، جریان نامی خط از آن عبور نکند، مقاومت

R در شرایط عادی باید در حدّ بی‌نهایت باشد و یا باید با این مقاومت، یک خازن با فاصلهٔ هوایی سری نماییم که این مجموعه در حقیقت تشکیل یک برقگیر را می‌دهد.
انرژی تلف شده در مقاومت برابر است با:

$$P_{loss} = \frac{V_t^{۲}}{R}$$

$$P_{loss} = \frac{\frac{۴}{Z_۱^۲}}{\left(\frac{۱}{R} + \frac{۱}{Z_۲} + \frac{۱}{Z_۱}\right)^۲} \frac{V^۲}{R} \qquad (۴۷-۱۰)$$

و انرژی موج سیّار وارد شده به نقطهٔ اتّصال از روی خط با امپدانس موجی $Z_۱$ برابر است با:

$$P_{wave} = \frac{V_i^{۲}}{Z_۱}$$

$$P_{wave} = \frac{V^۲}{Z_۱} \qquad (۴۸-۱۰)$$

اکنون برای چنین برقگیری، ضریب بهره را به‌صورت نسبت انرژی تلف شده در داخل آن، به انرژی ورودی آن، تعریف می‌کنیم:

$$\eta = \frac{P_{loss}}{P_{wave}} = \frac{\frac{۴}{Z_۱ R}}{\left(\frac{۱}{R} + \frac{۱}{Z_۱} + \frac{۱}{Z_۲}\right)^۲} \qquad (۴۹-۱۰)$$

به‌ازای مقدار معیّنی از مقاومت R، ضریب بهره به حدّاکثر خود می‌رسد. برای محاسبهٔ این مقدار مقاومت R خواهیم داشت:

$$\frac{d\eta}{dR} = ۰$$

$$\frac{۱}{R} = \frac{۱}{Z_۱} + \frac{۱}{Z_۲} \qquad (۵۰-۱۰)$$

$$\eta_{max} = \frac{R}{Z_۱} \qquad (۵۱-۱۰)$$

اگر در رابطهٔ η_{max}، مقدار $R=\frac{Z_۱Z_۲}{Z_۱+Z_۲}$ را طبق معادلهٔ (۱۰-۵۰) قرار دهیم آن‌گاه:

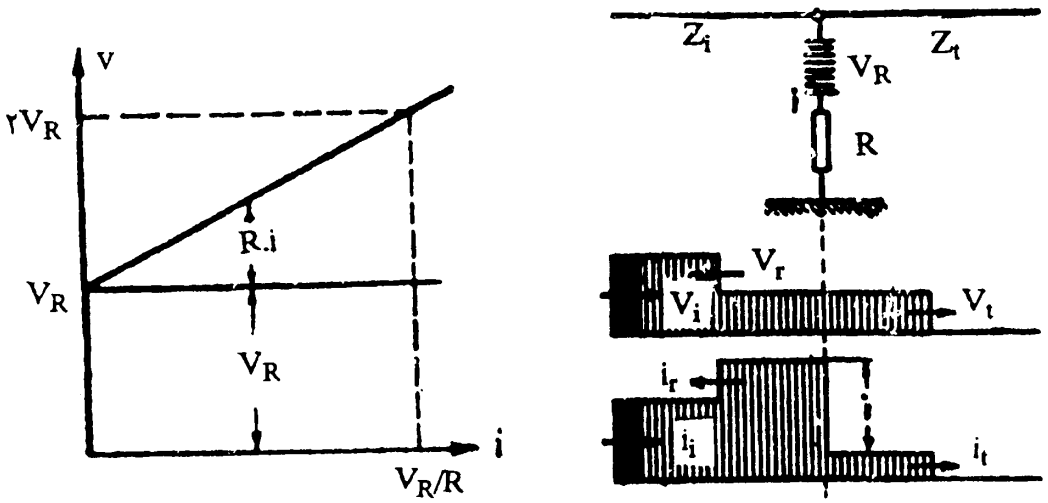
$$\eta_{max} = \frac{Z_۲}{Z_۱ + Z_۲} = \frac{۱}{\frac{Z_۱}{Z_۲} + ۱} \qquad (۵۲-۱۰)$$

می‌بینیم که هر چه امپدانس موجی Z_2 بیشتر باشد، حدّاکثر ضریب بهره، زیادتر می‌شود. بنابراین، کاربرد یک مقاومت اهمی موازی در نقطهٔ اتّصال (به‌گونه‌ای که امپدانس موجی Z_1 کوچک‌تر از امپدانس موجی خطّ دوم Z_2 باشد)، در از بین بردن انرژی موج سیّار بسیار مفید است. چنین مقاومتی را می‌توانیم با یک فاصله هوایی سری کنیم تا وقتی اضافه ولتاژ ناشی از موج سیّار به این نقطه وارد می‌شود، فاصله هوایی طوری تنظیم شده باشد که در اثر اضافه ولتاژ در آن، جرقه زده شود. بنابراین، مقاومت اهمی R فقط هنگام ورود امواج سیّار به آن، در مدار قرار می‌گیرد و انرژی موج سیّار را با عبور دادن جریان از خود از بین می‌برد و به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند. چنین برقگیری به ازای ولتاژ معیّنی مانند V_R وارد مدار می‌شود و مشخّصه ولتاژ-جریان آن به‌صورت شکل (۱۰-۲۰) است؛ یعنی برای جریان‌های عبوری خیلی کم از آن، ولتاژ تا حدّ ولتاژ V_R نزول می‌کند و برای جریان‌های بالاتر، ولتاژ آن زیاد می‌شود. لازم به‌ذکر است که برقگیر مذکور به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که V_R بزرگ‌تر از ولتاژ نامی خطّ انتقال باشد.

در نقطهٔ اتّصال این برقگیر با خط داریم،

$$\begin{cases} V_i + V_r = V_t \\ i_i + i_r = i_t + i \end{cases} \qquad (۱۰-۵۳)$$

اگر رابطهٔ اوّلی از دسته معادلهٔ (۱۰-۵۳) را بر Z_i تقسیم کرده و رابطهٔ دوم را بر حسب ولتاژ بنویسیم، خواهیم داشت:



شکل (۱۰-۲۰): اتّصال برقگیر و اثر آن در نقطهٔ اتّصال دو خط

$$\begin{cases} \dfrac{V_i}{Z_i} + \dfrac{V_r}{Z_i} = \dfrac{V_t}{Z_i} \\ \dfrac{V_i}{Z_i} - \dfrac{V_r}{Z_i} = \dfrac{V_t}{Z_t} + \dfrac{V_t - V_R}{R} \end{cases}$$

با جمع دو رابطهٔ اخیر خواهیم داشت:

$$\frac{۲V_i}{Z_i} = V_t \left(\frac{۱}{Z_i} + \frac{۱}{Z_t} + \frac{۱}{R}\right) - \frac{V_R}{R}$$

$$V_t = \frac{\dfrac{V_R}{R} + \dfrac{۲V_i}{Z_i}}{\left(\dfrac{۱}{Z_i} + \dfrac{۱}{Z_t} + \dfrac{۱}{R}\right)} \qquad (۵۴-۱۰)$$

$$V_r = V_t - V_i$$

$$V_r = \frac{\dfrac{V_R}{R} + \left(\dfrac{۱}{Z_i} - \dfrac{۱}{Z_t} - \dfrac{۱}{R}\right) V_i}{\left(\dfrac{۱}{Z_i} + \dfrac{۱}{Z_t} + \dfrac{۱}{R}\right)} \qquad (۵۵-۱۰)$$

$$i = \frac{V_t - V_R}{R}$$

$$i = \frac{۲\dfrac{V_i}{Z_i} - \left(\dfrac{۱}{Z_i} + \dfrac{۱}{Z_t}\right) V_R}{۱ + R\left(\dfrac{۱}{Z_i} + \dfrac{۱}{Z_t}\right)} \qquad (۵۶-۱۰)$$

در برقگیرهای امروزی با حذف فاصله هوایی، از مقاومت‌های غیر خطّی اکسید فلزی مانند ZnO (اکسید روی) استفاده می‌شود. این نوع مقاومت در شرایط عادی، مقاومت خیلی زیادی از خود نشان می‌دهد و جریان نشتی ضعیفی از آن عبور می‌کند؛ ولی هنگام بروز اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه یا سوییچینگ، مقاومت آن به‌مقدار فوق‌العاده زیادی، کاهش می‌یابد تا اضافه ولتاژ را از طریق جریان زیاد اتّصال کوتاه به زمین تخلیه کند.

مثال (۱۰-۳): برای خطّی با امپدانس موجی ۵۰۰Ω، موج سیّار پلّه‌ای با دامنهٔ ۶۰kV از روی آن عبور کرده و به نقطه‌ای می‌رسد که برقگیری با ولتاژ حدّی ۲۰kV و مقاومت اهمی ۱۰۰Ω متّصل شده است. دامنهٔ ولتاژ عبور داده شده از خط، جریان عبوری از برقگیر و جریان موج سیّار وارد شده به نقطهٔ اتّصال خط و برقگیر را محاسبه کنید.

حل:

$$Z_i = Z_t = ۵۰۰\,\Omega\ ,\ R = ۱۰۰\ \Omega\ \ ,\ V_R = ۲۰\,\text{kV}\ \ ,\ V_i = ۶۰\,u(t)$$

$$V_t = \frac{\dfrac{V_R}{R} + \dfrac{۲V_i}{Z_i}}{\left(\dfrac{۱}{Z_i} + \dfrac{۱}{Z_t} + \dfrac{۱}{R}\right)} = \frac{\dfrac{۲۰}{۱۰۰} + \dfrac{۲\times ۶۰}{۵۰۰}}{\dfrac{۱}{۵۰۰} + \dfrac{۱}{۵۰۰} + \dfrac{۱}{۱۰۰}} = ۳۱/۴۲\ \text{kV}$$

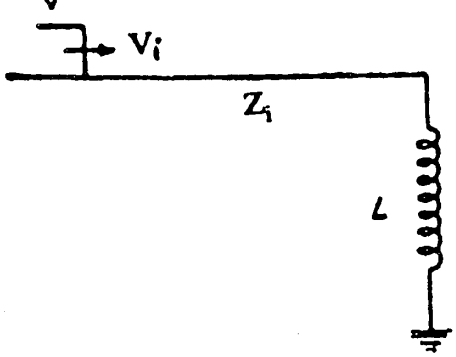
جریان عبوری از برقگیر: $i = \dfrac{V_t - V_R}{R} = \dfrac{۳۱/۴۲ - ۲۰}{۱۰۰} = ۰/۱۱۴\ kA = ۱۱۴\ \text{A}$

جریان موج سیّار ورودی: $i_i = \dfrac{V_i}{Z_i} = \dfrac{۶۰}{۵۰۰} = ۰/۱۲\ kA = ۱۲۰\ \text{A}$

یعنی قمست اعظم جریان عبوری از خط، (ناشی از موج سیّار) وارد برقگیر می‌شود.

۱۰-۴-۸- اتّصال سلف در انتهای یک خط

در این حالت فرض می‌شود که مطابق با شکل (۱۰-۲۱)، با اتّصال سلف به انتهای خط، موج ضربه‌ای پلّه‌ای $V_i(t)=Vu(t)$ روی خط با امپدانس موجی Z_i سوار شود. اگر سلف، خالص باشد، آنگاه در حوزهٔ لاپلاس $Z_t(s)=SL$ می‌گردد.



شکل (۱۰-۲۱): اتّصال سلف در انتهای یک خط

$$K_t = \frac{۲Z_t}{Z_i + Z_t} = \frac{۲SL}{Z_i + SL}$$

$$V_t = K_t V_i$$

$$V_i(s) = \frac{V}{S}$$

$$V_t(s) = \frac{۲SL}{Z_i + SL}\frac{V}{S} = \frac{۲L}{Z_i + SL}V = \frac{۲}{S + \frac{Z_i}{L}}V$$

$$V_t(t) = ۲Ve^{-\frac{Z_i}{L}t}$$

$$V_r(t) = V_t(t) - V_i(t)$$

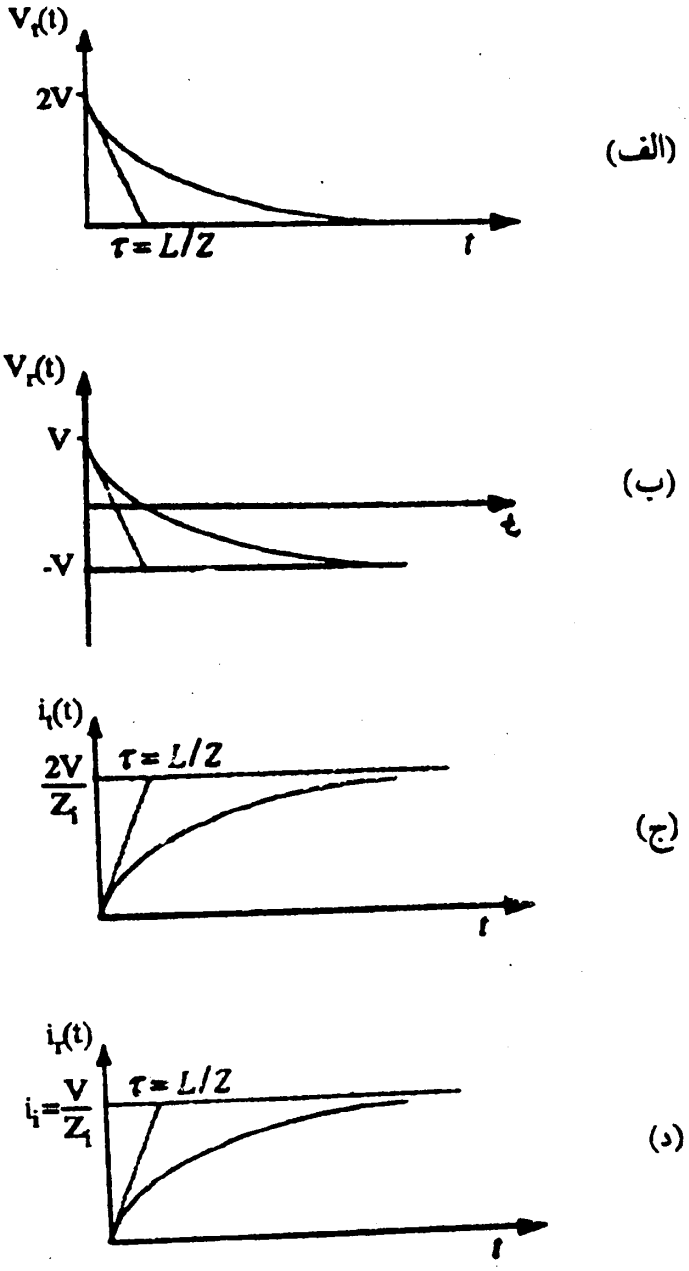
$$V_r(t) = ۲Ve^{-\frac{Z_i}{L}t} - V = V\left(۲e^{-\frac{Z_i}{L}t} - ۱\right)$$

$$i_t(s) = \frac{V_t(s)}{Z_t(s)} = \frac{۲}{SL\left(S + \frac{Z_i}{L}\right)}V$$

$$i_t(t) = \frac{۲V}{Z_i}\left(۱ - e^{-\frac{Z_i}{L}t}\right)$$

$$i_r(t) = i_t(t) - i_i(t) = \frac{V}{Z_i}\left(۱ - e^{-\frac{Z_i}{L}t}\right)$$

معادلات فوق در شکل (۱۰-۲۲) بر حسب زمان ترسیم شده است. همان‌طور که از روابط به‌دست آمده و منحنی‌های شکل (۱۰-۲۲) مشخّص است، در لحظهٔ رسیدن موج ضربه‌ای به سلف، دامنهٔ ولتاژ عبوری دو برابر می‌شود، ولی موج منعکس شده با همان دامنهٔ موج ورودی است و شدّت جریان عبوری، صفر خواهد بود. یعنی در لحظهٔ اوّل، سلف مانند یک خط باز عمل می‌کند ولی با گذشت زمان، ولتاژ عبوری صفر شده و جریان موج عبوری به دو برابر جریان موج ورودی می‌رسد، یعنی همانند یک خطّ اتّصال کوتاه عمل می‌کند. بنابراین، اگر یک سلف را به‌طور سری در جلوی یک ترانسفورماتور قرار دهیم، مانع از برخورد ناگهانی پیشانی موج ضربه‌ای



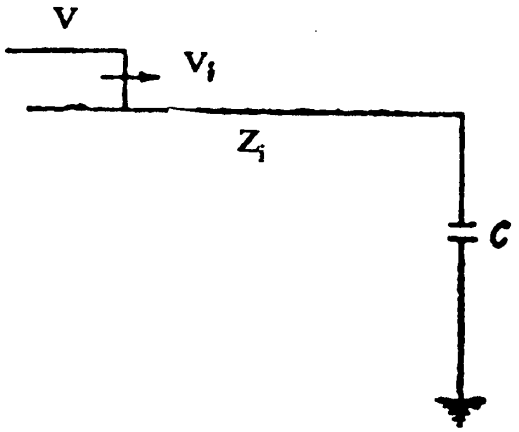
شکل (۱۰-۲۲): تغییرات ولتاژ و جریان در اتّصال سلف به انتهای یک خط

الف) ولتاژ منتقل‌شده؛ ب) ولتاژ منعکس‌شده؛ ج) جریان منتقل‌شده؛ د) جریان منعکس‌شده

به آن می‌شود؛ زیرا پیشانی تیز موج ضربه‌ای دارای فرکانس‌های بالایی است و سلف در برابر آن، مقاومت زیادی از خود نشان می‌دهد.

۱۰-۴-۱۰- اتّصال خازن در انتهای خط

در اینجا مطابق با شکل (۱۰-۲۳)، یک خازن به انتهای یک خطّ با امپدانس موجی Z_1 متّصل شده است. فرض کنید، یک موج ضربه‌ای $V_i(t)=Vu(t)$ روی خط،



شکل (۱۰-۲۳): اتّصال خازن در انتهای یک خط

به سمت انتهای آن، در حال حرکت است. برای خازن خالص در حوزهٔ لاپلاس، امپدانس $Z_t(s)=\frac{۱}{SC}$ را می‌توان در نظر گرفت. در این حالت، روابط زیر را خواهیم داشت:

$$K_t = \frac{۲Z_t}{Z_i + Z_t} = \frac{\frac{۲}{SC}}{Z_i + \frac{۱}{SC}} = \frac{۲}{۱ + Z_i SC}$$

$$V_t = K_t V_i \ , \ V_i(s) = \frac{V}{S}$$

$$V_t(s) = \frac{۲}{۱ + Z_i SC} \frac{V}{S}$$

$$V_t(t) = ۲V\left(۱ - e^{\frac{-t}{CZ_i}}\right)$$

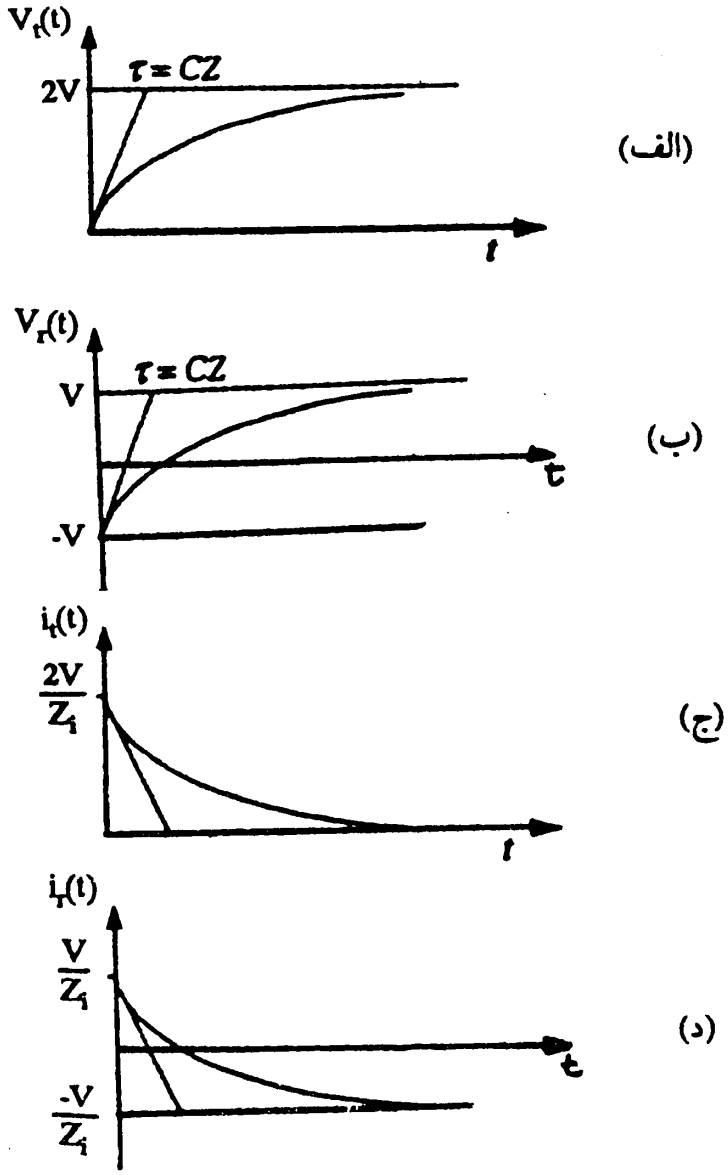
$$V_r(t) = V_t(t) - V_i(t) = V\left(۱ - ۲e^{\frac{-t}{CZ_i}}\right)$$

$$i_t(s) = \frac{V_t(s)}{Z_t(s)} = SC\left[\frac{۲}{۱ + Z_i SC}\frac{V}{S}\right] = \frac{۲VC}{۱ + Z_i SC}$$

$$i_t(t) = \frac{۲V}{Z_i} e^{-\frac{t}{CZ_i}}$$

$$i_r(t) = i_t(t) - i_i(t) = \frac{V}{Z_i}\left(۲e^{-\frac{t}{CZ_i}} - ۱\right)$$

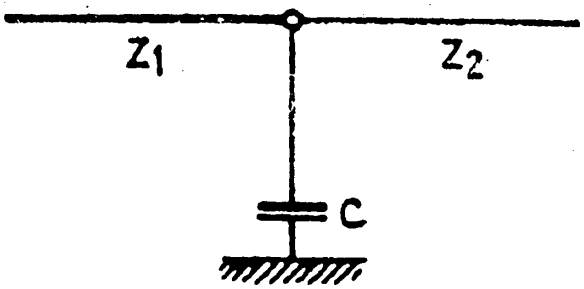
معادلات فوق در حوزهٔ زمان، در شکل (۱۰-۲۴) نشان داده شده‌اند. در اینجا نیز خازن باعث تغییر شکل موج ضربه‌ای می‌شود. خازن در لحظهٔ رسیدن موج ضربه‌ای به آن، در ابتدا مانند یک خطّ اتّصال کوتاه عمل می‌کند؛ زیرا دامنهٔ موج ولتاژ منتقل شده، دو برابر موج ورودی می‌شود و موج منعکس شده با پلاریتهٔ معکوس و با همان دامنهٔ موج ورودی است. همچنین موج جریان منتقل شده، دو برابر جریان ورودی است، ولی با گذشت زمان، خازن به‌صورت نمایی شارژ می‌شود و در نهایت، خازن مانند یک خطّ با انتهای باز، عمل خواهد کرد. در ابتدا چون خازن خالی است و پیشانی موج دارای



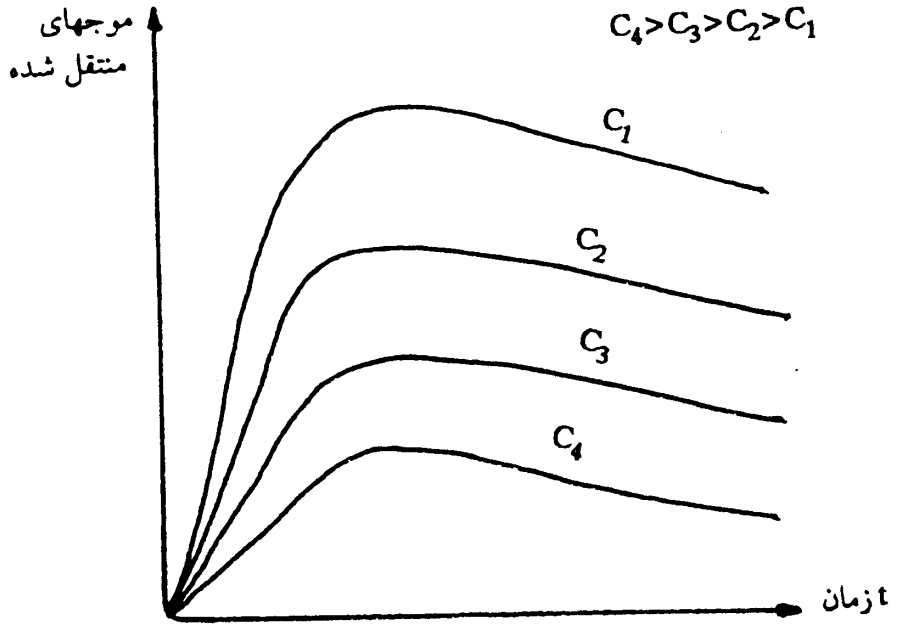
شکل (۱۰-۲۴): تغییرات ولتاژ و جریان در اتّصال خازن به انتهای یک خط

الف) ولتاژ منتقل شده؛ ب) ولتاژ منعکس شده؛ ج) جریان منتقل شده؛ د) جریان منعکس شده

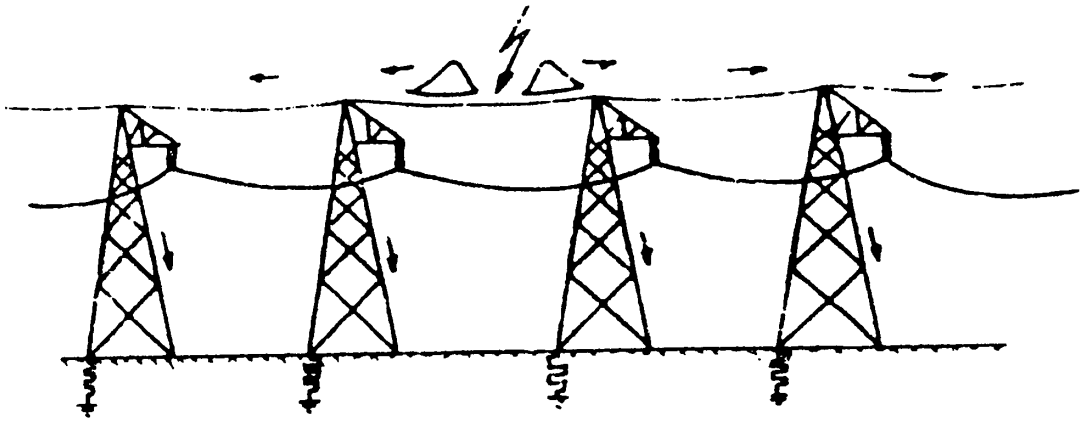
فرکانس‌های بالایی است، خازن در برابر آن، امپدانس خیلی کمی از خود نشان می‌دهد ولی وقتی شارژ شد، مانند یک خطّ باز عمل می‌کند. (شکل ۱۰-۲۴ را ببینید).
در اینجا اگر یک خازن به‌طور موازی با خط یا ترانسفورماتوری قرار گیرد، شکل موج ولتاژ در Z_2، عکس خازن و همانند سلف می‌شود؛ به‌عبارت دیگر مانند سلفی است که به‌طور سری قبل از خط یا ترانسفورماتور قرار گرفته باشد. بنابراین، گذاشتن یک خازن موازی نیز مانع از برخورد ناگهانی پیشانی موج ضربه‌ای به تجهیزات قرار گرفته بعد از خازن می‌شود. (شکل ۱۰-۲۵ را ببینید).
هر چه ظرفیت خازنی موازی شده با یک ترانسفورماتور یا ماشین الکتریکی زیادتر باشد، با ورود یک موج ضربه‌ای به خازن، هم زمان پیشانی موج طولانی‌تر می‌شود و هم از دامنهٔ موج وارد شده به ماشین، به‌مقدار بیشتری کاسته می‌شود. این موضوع در شکل (۱۰-۲۶) نشان داده شده است. با توجّه به این‌که سلف بدون هسته نمی‌تواند اندوکتانس خودالقای L کافی داشته باشد و با هسته هم در فرکانس‌های بالای امواج سیّار، با تلفات انرژی زیادی همراه است، بنابراین، از خازن به‌عنوان محافظ در برابر امواج سیّار بیشتر استفاده می‌شود. البتّه عملاً ترکیب خازن و برقگیر نتیجهٔ بهتری را به همراه دارد.
راه دیگر برای حفاظت خطوط انتقال در برابر موج‌های سیّار، استفاده از سیم زمین (گارد) در بالای برج‌های خطّ انتقال و بالاتر از هادی‌های شبکه می‌باشد. اگر زاویهٔ بین هر یک از هادی‌های سه فاز خطّ انتقال، با سیم گارد نزدیک به آن (که زاویهٔ حفاظت نام دارد) کم‌تر از ۳۰ درجه باشد، احتمال برخورد صاعقه به خط خیلی کاهش می‌یابد و با احتمال بیشتری موج سیّار صاعقه به سیم گارد (که به برج و زمین متّصل است)، برخورد نموده و تخلیه می‌گردد (شکل ۱۰-۲۷ را ببینید). در طرّاحی خطوط انتقال، بنا به ضرورت با انتخاب یک یا دو رشته سیم گارد سعی می‌کنند تا زاویهٔ حفاظت کم‌تر از ۳۰ درجه انتخاب گردد.

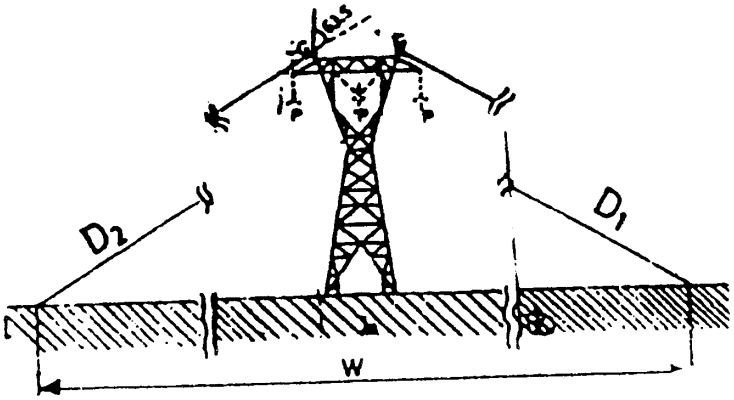


شکل (۱۰-۲۵): خازن موازی با یک خط



شکل (۱۰-۲۶): اثر خازن موازی با ماشین، روی موج‌های منتقل شده





شکل (۱۰-۲۷): نمایش سیم گارد در بالای خطوط انتقال

۱۰-۵- میرایی موج سیّار

عملاً به‌خاطر وجود مقاومت اهمی و کندوکتانس (مقاومت عایقی)، خطّ انتقال موج سیّار روی خطّ انتقال، حالت میرایی دارد. در نتیجه، دامنهٔ آن دائماً کم می‌شود و شکل موج هم تغییر می‌کند.

هر موج سیّار روی خطّ انتقال، دارای انرژی معیّنی است که شامل انرژی الکترومغناطیسی و انرژی الکترواستاتیکی موج می‌باشد. اگر L و C اندوکتانس و کاپاسیتانس واحد طول خط باشد، برای یک موج سیّار با ولتاژ V و جریان i، انرژی موج در واحد طول برابر با مجموع انرژی‌های الکترومغناطیسی و الکترواستاتیکی ذخیره شده در واحد طول است.

$$W = \frac{1}{2} L i^2 + \frac{1}{2} C V^2 \qquad (۵۷-۱۰)$$

و چون $V=Z.i$ (Z امپدانس موجی خط) و $Z^2=L/C$ است پس،

$$W = \frac{1}{2} L i^2 + \frac{1}{2} \frac{L}{Z^2} Z^2 i^2$$

$$W = \frac{1}{2} L i^2 + \frac{1}{2} L i^2 = L i^2 = C V^2 \qquad (۵۸-۱۰)$$

اکنون توان موج ضربه‌ای (P) را با داشتن سرعت موج (v) و انرژی واحد طول آن (W) به‌دست می‌آوریم:

$$P = Wv = \frac{L i^2}{\sqrt{LC}}$$

$$P = Z i^2 = \frac{C V^2}{\sqrt{LC}} = \frac{V^2}{Z} \qquad (۵۹-۱۰)$$

مثال (۱۰-۴): در خطّ هوایی با امپدانس موجی $Z=500\Omega$، و موج سیّار با ولتاژ $V=10^5 V$، توان موج سیّار برابر است با:

$$P = \frac{V^2}{Z} = \frac{(10^5)^2}{500} = 20 \times 10^6 \text{ Watt}$$

و شدّت جریان این موج سیّار برابر است با،

$$i = \frac{V}{Z} = \frac{10^5}{500} = 200 \text{ A}$$

و برای یک کابل با امپدانس موجی $Z=۵۰\Omega$ داریم:

$$P = \frac{(۱۰^۵)^۲}{۵۰} = ۲۰ \times ۱۰^۷ \ \text{Watt}$$

$$i = \frac{۱۰^۵}{۵۰} = ۲۰۰۰ \ \text{A}$$

می‌بینیم که توان موج سیّار روی کابل‌ها خیلی بیشتر از خطوط هوایی است. بنابراین، موج‌های سیّار روی کابل‌ها، خطرناک‌تر از خطوط هوایی هستند.

۱۰-۵-۱- اثر مقاومت اهمی خطوط در میرایی امواج سیّار

مقاومت اهمی خط، مقداری از توان موج سیّار را به‌صورت حرارت، تلف می‌نماید. اگر مقاومت واحد طول خط برابر r باشد، آن‌گاه تلفات توان در طول قطعهٔ کوچک dx از خط $ri^۲dx$ خواهد بود. لازم به ذکر است که قطعهٔ dx، به فاصلهٔ x از ابتدای خط قرار دارد.

از توان موج سیّار ($P=Z.i^۲$)، نسبت به i مشتق می‌گیریم تا میزان تغییر توان موج سیّار بر اثر تغییر جریان در جزء dx خط به‌دست آید:

$$dP = ۲Zi\,(di) \qquad (۶۰-۱۰)$$

میزان کاهش توان موج سیّار به‌دلیل کاهش جریان ناشی از وجود مقاومت اهمی برابر است با:

$$-dP = -۲Zi\,(di) \qquad (۶۱-۱۰)$$

این مقدار کاهش توان موج، باید با تلفات حرارتی ناشی از مقاومت اهمی خط برابر باشد:

$$r\,i^۲\,dx = -۲Zi\,(di) \qquad (۶۲-۱۰)$$

در نتیجه،

$$\frac{di}{i} = -\frac{r}{۲Z}dx$$

با انتگرال‌گیری از رابطهٔ اخیر داریم:

$$\int_{i_۰}^{i} \frac{di}{i} = -\int_{۰}^{x} \frac{r\,dx}{۲Z}$$

در نهایت خواهیم داشت:

$$i = i_۰\, e^{\frac{-r}{۲Z}x} \qquad (۶۳-۱۰)$$

که i_0 جریان موج سیّار در ابتدای شروع حرکت آن موج است. به‌همین ترتیب برای ولتاژ موج سیّار داریم:

$$V = V_0 \, e^{\frac{-r}{2Z}x} \qquad (۶۴-۱۰)$$

که V_0 دامنهٔ اوّلیهٔ موج سیّار در ابتدای شروع حرکت موج است.

بنابراین، مقاومت اهمی خط، باعث میرا شدن موج سیّار می‌گردد، هر چقدر موج، مسافت بیشتری را روی خطّ انتقال طی کند، مقاومت بیشتری از طول مسیر خط را در بر می‌گیرد؛ بنابراین، دامنهٔ ولتاژ و جریان موج، به‌مقدار بیشتری کم می‌شود که در شکل (۱۰-۲۸) نشان داده شده است.

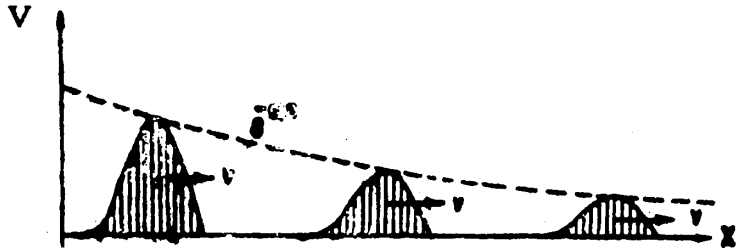
می‌بینیم که هر چه امپدانس موجی خط (Z) بیشتر باشد و مقاومت اهمی خط (r) کم‌تر باشد، میرایی موج کم‌تر می‌شود (خطّ بدون تلفات، دارای حالت میرایی نمی‌باشد).

مثال (۱۰-۵): برای خطّ هوایی با امپدانس موجی $Z=500\Omega$ و مقاومت $r_{dc}=0/7\Omega/km$، اگر طول خط ۱۰۰۰km باشد، پس از طیّ طول خط دامنهٔ موج نصف می‌شود، زیرا:

$$e^{\frac{-r}{2Z}x} = e^{\frac{0/7 \times 1000}{2 \times 500}} = e^{-0/7} = 0/5$$

البتّه مقاومت r برای خطوط انتقال در حالت عبور امواج سیّار از آن‌ها بدلیل فرکانس بالای موج‌های سیّار (مخصوصاً پیشانی موج ضربه‌ای) به‌علّت اثر پوستی، چندین برابر مقاومت DC آن است (حدود ۱۰ تا ۵۰ برابر)، بنابراین، مسافت لازم برای نصف شدن دامنهٔ موج سیّار، به‌مراتب کم‌تر از مقدار بالا خواهد بود.

حال مثلاً برای همان حالت خطّ انتقال با انتهای باز، پس از چند نوسان، ولتاژ خط به حالت دائم (همان V) خط می‌رسد.



(۱۰-۲۸): میرایی موج سیّار ناشی از مقاومت اهمی خطّ انتقال

۱۰-۵-۲- میرایی موج سیّار ناشی از پدیدهٔ کرونا

اگر دامنهٔ موج ولتاژ سیّار V در یک خط، بزرگ‌تر از ولتاژ لازم برای شروع کرونا باشد، در این شرایط جریان کرونا به‌وجود می‌آید که باعث تلف شدن مقداری از توان موج سیّار می‌شود. اگر G کندوکتانس عایقی واحد طول خطّ انتقال باشد، آن‌گاه در شرایط بروز کرونا به‌علّت یونیزه‌شدن هوای اطرّاف خطّ انتقال، مقدار کندوکتانس خط خیلی بیشتر از شرایط عادی است (چون مقاومت عایقی کم‌تر می‌شود). اگر شدّت جریان کرونا را تقریباً به‌صورت زیر محاسبه کنیم،

$$i_{corona} = (V - V_d)\, G \qquad (۶۵-۱۰)$$

در این رابطه، V دامنهٔ ولتاژ موج سیّار و V_d مقدار ولتاژ بحرانی برای شروع کرونا می‌باشد. در این صورت، تلفات کرونا در طول قطعهٔ کوچک dx از خط برابر است با:

$$V.i_{corona} = V(V - V_d)\, G(dx) \qquad (۶۶-۱۰)$$

این تلفات کرونا باعث کاهش ولتاژ موج سیّار می‌شود. با توجّه به توان موج سیّار ($P=V^2/Z$) ، میزان کاهش توان موج سیّار در طول قطعه کوچک dx، در اثر تلفات کرونا (به‌خاطر کم شدن V)، از مشتق‌گیری P نسبت به V به‌صورت زیر است:

$$-dP = \frac{-2V(dV)}{Z} \qquad (۶۷-۱۰)$$

این کاهش توان باید با تلفات کرونا در طول قطعه کوچک dx از خط برابر باشد. یعنی:

$$\frac{-2V(dV)}{Z} = V(V - V_d)\, G\,(dx) \qquad (۶۸-۱۰)$$

در نتیجه،

$$\frac{dV}{V - V_d} = -\frac{ZG}{2}dx$$

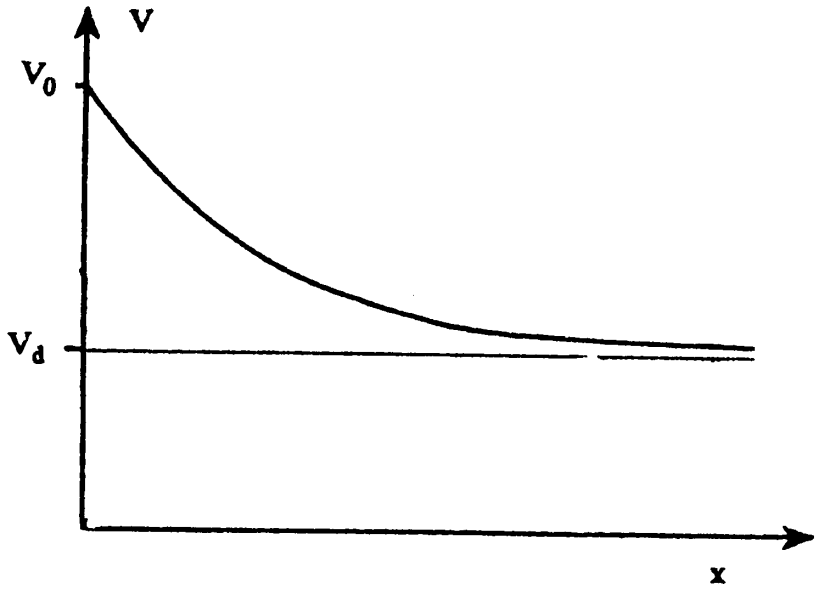
با انتگرال‌گیری از طرفین رابطهٔ اخیر داریم:

$$\int_{V_0}^{V} \frac{dV}{V - V_d} = -\int_{0}^{x} \frac{ZG}{2}dx$$

در نتیجه:

$$(V - V_d) = (V_0 - V_d)\, e^{-\frac{ZG}{2}x} \qquad (۶۹-۱۰)$$

که V_0 دامنهٔ ولتاژ موج سیّار در ابتدای شروع حرکت موج است. دامنهٔ موج سیّار مرتباً کم می‌شود تا به حدّ ولتاژ بحرانی شکست (V_d) برسد (شکل ۱۰-۲۹ را ببینید).



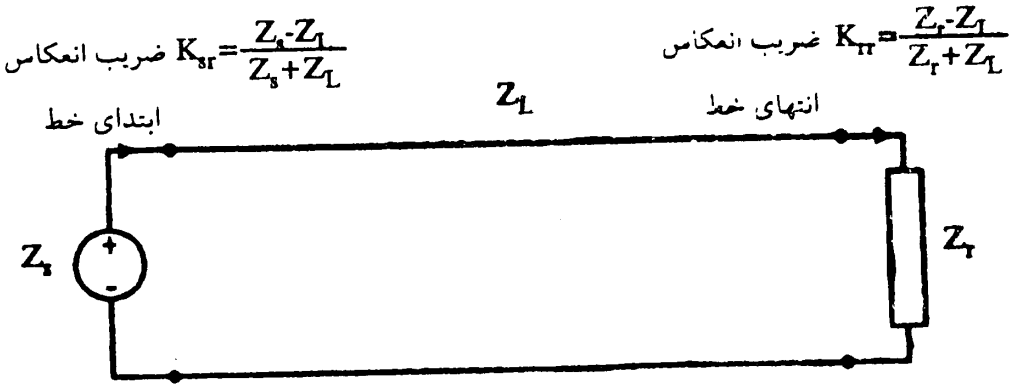
شکل (۱۰-۲۹): میرایی موج سیّار ولتاژ ناشی از تلفات کرونا در خطّ انتقال

۱۰-۶- نمودار شبکه‌ای بیولی[1]

آقای بیولی یک روش مناسب را برای دنبال کردن حرکت موج سیّار روی شبکه ارائه نموده است که با استفاده از آن می‌توان در هر لحظه از زمان، مقدار موج‌های تابش، منعکس شده و انتقالی را در هر نقطهٔ مکانی از شبکه به‌دست آورد. به‌عنوان مثال، فرض کنید که یک منبع تولید موج ضربه‌ای پلّه‌ای (با امپدانس موجی Z_s) به یک خطّ انتقال (با امپدانس موجی Z_L)، متّصل باشد. به انتهای خطّ انتقال هم یک امپدانس موجی Z_r وصل شده است. این مثال در شکل (۱۰-۳۰) نشان داده شده است.

وقتی که یک موج سیّار وارد خطّ انتقال با امپدانس موجی Z_L می‌شود، از موج رسیده به انتهای خط، مقداری از آن منعکس و مقداری هم به امپدانس موجی Z_r منتقل می‌شود. سپس موج منعکس شده مجدّداً در برخورد با منبع، منعکس شده و

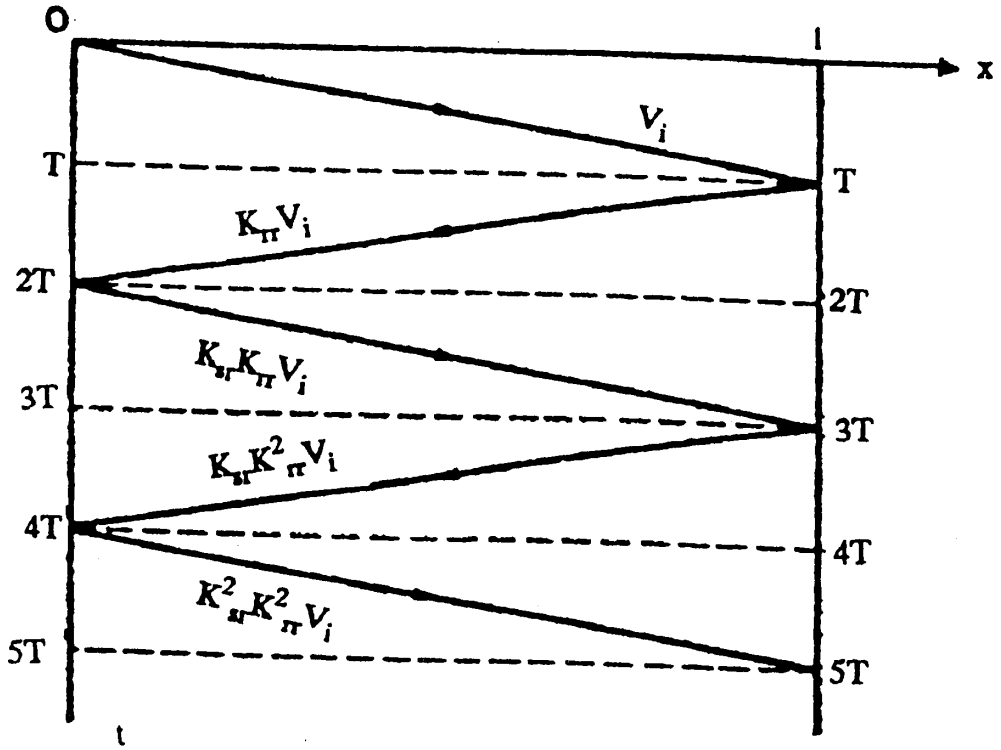
1- Bewley Lattice Diagram



شکل (۱۰-۳۰): اتّصال منبع الکتریکی با بار، توسّط خطّ انتقال

دوباره به امپدانس موجی Z_r می‌رسد و باز منعکس و منتقل می‌شود. بدین ترتیب مرتّباً این عمل تکرار می‌شود. با روش ترسیمی بیولی می‌توان مقدار موج سیّار را روی خطّ انتقال در هر لحظهٔ زمانی و در هر نقطه به‌دست آورد. در این نمودار طبق شکل (۱۰-۳۱)، یک خطّ افقی نشان دهنده موقعیّت مکانی موج بین ابتدا و انتهای خط رسم می‌شود. هر نقطه روی خطّ انتقال، متناسب با فاصلهٔ آن از ابتدای خط، روی این خطّ افقی مشخّص می‌شود. یک خطّ عمودی نیز نشان دهندهٔ موقعیّت زمانی موج است. هر نقطه روی محور عمودی، یک لحظهٔ زمانی را نشان می‌دهد. برای هر بار حرکت موج، از ابتدا تا انتهای خط، یک پلّهٔ زمانی T در نظر گرفته می‌شود. با توجّه به سرعت موج سیّار، خطوط زیگزاگ روی این نمودار نشان دهندهٔ موجی است که روی خط، در حال حرکت به طرف ابتدا و انتها است. به‌عبارت دیگر، این خطوط، انعکاس‌های مکرر را نشان می دهند و همچنین فلش روی این خطوط، جهت حرکت آن را مشخّص می‌کند و مقدار آن نیز روی آن نوشته می‌شود. این مقادیر، با توجّه به ضریب انعکاس موج در ابتدا و انتهای خط و مقدار موج قبل از برخورد به انتها یا ابتدای خط به‌دست می‌آید. مقدار موج منتقل شده را نیز می‌توان با توجّه به ضریب انتقال، در ابتدا و انتهای خط محاسبه نمود. به‌همین ترتیب، مقدار موج تابش شده را می‌توان روی ادامهٔ خط‌های زیگزاگ فوق مشخّص نمود. در شکل (۱۰-۳۱) فقط شکل موج‌های منعکس‌شده روی خطّ انتقال نشان داده شده است.

حال اگر موج پلّه‌ای مستمر روی خط وجود داشته باشد، مقدار موج در هر لحظه



شکل (۱۰-۳۱): نحوهٔ تغییرات موج‌های رفت و برگشت در شکل (۱۰-۲۹)

از زمان (t) و در هر نقطهٔ خط (x)، از حاصل‌جمع تمام عبارت‌هایی که بالای آن نقطهٔ (t,x) قرار دارند، به‌دست می‌آید. اگر طول خطّ انتقال برابر l باشد، مثلاً در نقطهٔ $x=۰/۲۵l$ و در زمان $t=۵/۵T$، ولتاژ در آن نقطه برابر با حاصل جمع مقادیر بالای آن نقطه است. یعنی،

$$V(\frac{۱}{۴}l, ۵/۵T) = V_i\,(K_{sr}^{۲}K_{rr}^{۲} + K_{sr}K_{rr}^{۲} + K_{sr}K_{rr} + K_{rr} + ۱)$$

برای جریان‌ها نیز به‌همین طریق می‌توان نمودار بیولی را ترسیم نمود. اگر تضعیف موج را نیز بخواهیم در نظر بگیریم، مقدار هر خطّ زیگزاگ را باید در مقدار نمایی تضعیف موج ($e^{-\alpha x}$) ضرب نماییم.

مثال (۱۰-۶): فرض کنید یک مولّد موج پلّه‌ای با دامنهٔ ۱۰۰۰V و با امپدانس داخلی صفر داریم (مولّد ایده‌آل است). این مولّد به ابتدای یک کابل با امپدانس موجی ۴۰Ω که در انتهای آن یک مقاومت ۶۰Ω قرار دارد، متّصل می‌شود. نمودار بیولی این شبکه را رسم نموده و مقدار ولتاژ را در فاصله‌ای به اندازهٔ $\frac{۳}{۴}$ از ابتدای کابل

و در زمان ۶/۵ برابر زمان لازم برای طیّ طول کابل توسّط موج سیّار به‌دست آورید. همچنین تغییرات ولتاژ انتهای کابل را بر حسب زمان رسم کنید.

حل:

$$Z_s=۰ \quad ، \quad Z_r=۶۰\Omega \quad ، \quad Z_L=۴۰\Omega$$

$$K_{sr} = \frac{Z_s - Z_L}{Z_s + Z_L} = \frac{۰ - ۶۰}{۰ + ۶۰} = -۱$$

$$K_{rr} = \frac{Z_r - Z_L}{Z_r + Z_L} = \frac{۶۰ - ۴۰}{۶۰ + ۴۰} = ۰/۲$$

$$V_i = ۱۰۰۰\ V$$

$$K_{rr}V_i = ۰/۲\,(۱۰۰۰) = ۲۰۰$$

$$K_{sr}\ K_{rr}V_i = (-۱)(۰/۲)\,(۱۰۰۰) = -۲۰۰$$

$$K_{sr}\ K_{rr}^{۲}V_i = (-۱)(۰/۲)^{۲}\,(۱۰۰۰) = -۴۰$$

$$K_{sr}^{۲}\ K_{rr}^{۲}V_i = (-۱)^{۲}(۰/۲)^{۲}\,(۱۰۰۰) = ۴۰$$

$$K_{sr}^{۲}\ K_{rr}^{۳}V_i = (-۱)^{۲}(۰/۲)^{۳}\,(۱۰۰۰) = ۸$$

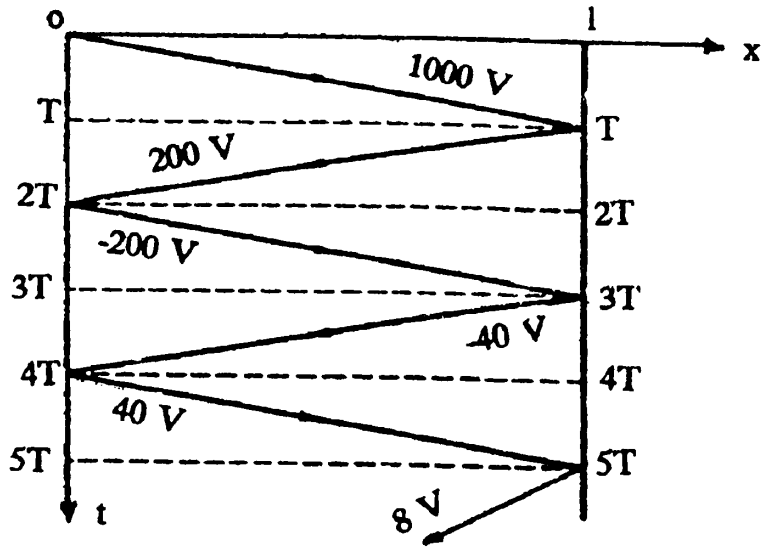
$$K_{sr}^{۳}\ K_{rr}^{۳}V_i = (-۱)^{۳}(۰/۲)^{۳}\,(۱۰۰۰) = -۸$$

نمودار بیولی این شبکه در شکل (۱۰-۳۲) ترسیم شده است. البتّه این نمودار وقتی است که موج ضربه‌ای پلّه‌ای به‌طور پیوسته با زمان از مولّد تولید شود.

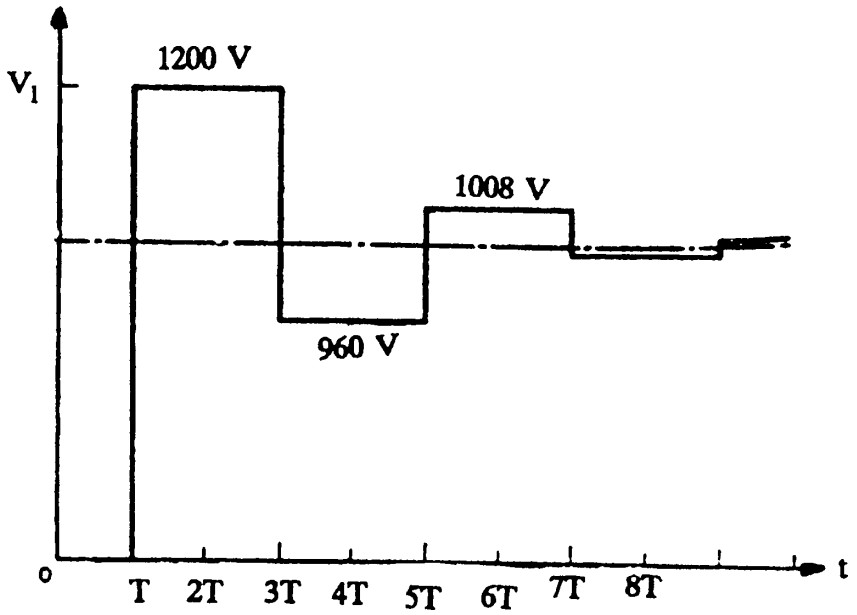
$$V(x=\frac{۳}{۴}l, t=۶/۵T) = ۱۰۰۰ + ۲۰۰ - ۲۰۰ - ۴۰۰ - ۴۰ + ۴۰ + ۸ = ۱۰۰۸\text{V}$$

تغییرات ولتاژ انتهای کابل و نمودار بیولی در شکل (۱۰-۳۲) رسم شده است. همچنین ولتاژ در حالت دائمی در انتهای کابل به‌مقدار ۱۰۰۰V می‌شود.

تغییرات ولتاژ انتهای خط ($x=l$) برحسب زمان در شکل (۱۰-۳۳) ترسیم شده است. چنان‌چه ملاحظه می‌شود، ولتاژ در انتهای خط، نوسان می‌کند و در نهایت، به‌مقدار دائم ۱۰۰۰V ثابت می‌ماند.



شکل (۱۰-۳۲): نحوهٔ تغییرات موج‌های رفت و برگشت و نمودار بیولی



شکل (۱۰-۳۳): نحوهٔ تغییرات ولتاژ انتهای خط

منابع و مآخذ

الکساندروف، گ.ن.، و طهماسبقلی شاهرخشاهی. **طرح ایزولاسیون خطوط انتقال انرژی و محیط زیست** : نشر دانش امروز، ۱۳۷۲.

جاویدی دشت‌بیاض، محمد حسین. **طرح خطوط هوایی انتقال انرژی** : مؤسسه چاپ و انتشارات آستان قدس رضوی، اردیبهشت ۱۳۶۸.

زهرایی، حسین. **جزوه عایق‌ها و فشار قوی** : دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۳.

سلطانی، مسعود. **راهنمای آزمایشگاه فن فشار قوی** : چاپ اوّل، انتشارات افروز، ۱۳۷۵.

قاضی زاده، امیر منصور، علی‌محمد رنجبر. **طرّاحی خطوط انتقال نیرو** : چاپ سوّم، انتشارات وزارت نیرو، ۱۳۶۴.

کافل، زانگل. **مبانی مهندسی فشار قوی** : ترجمه عبدالرضا رنجبران، چاپ اوّل، مرکز انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی، پاییز ۱۳۷۳.

لسانی، حمید. **انتقال و توزیع انرژی الکتریکی** : چاپ سوّم، انتشارات وزارت نیرو، ۱۳۶۴.

محسنی، حسین. **مبانی مهندسی فشار قوی الکتریکی** : مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، مهر ۱۳۷۷.

محسنی، حسین. **مهندسی فشار قوی پیشرفته** : مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه

تهران، فرودین ۱۳۷۳.

محمدی، محمد قلی. **اصول مهندسی فشار قوی الکتریکی** : چاپ سوّم، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تابستان ۱۳۷۵.

محمدی، محمد قلی. **تکنولوژی فشار قوی الکتریکی** : چاپ اوّل، انتشارات پژوهش، ۱۳۶۳.

محمدی، محمد قلی. **فیزیک و تکنولوژی عایق‌های الکتریکی** : چاپ اوّل، انتشارات پژوهش، ۱۳۶۳.

پروژه تحقیقاتی ساخت داخل، **مقره‌های توخالی سیلیکون‌رابر** : سازمان توانیر وزارت نیرو و شرکت پارس‌سویچ، ۱۳۷۹.

Anderson, J.G., **EHV Transmission Reference Book :** Edison Electric Company, New York, 1968.

Denno, K., **High Voltage Engineerring in Power Systems :** CRC Press, Inc., 1992.

Duval, M., **Dissolved Gas Analysis: It Can Save Your Transformer :** IEEE, Electrical Insulation Magazine, No.5, pp. 22-27, 1989.

Gallagher, T.G., and A.J. Pearmain, **High Voltage Measurment :** Testing and Design, J. Wiley & Sons Chichester, 1983.

Gupta, B.R., **Power System Analysis and Design :** A. H. Wheeler Company, 1985.

Jha, R.S., **High Voltage Engineering :** Dahanpat Pai & Sons, Delhi, 1981.

Kreuger, F.H., **Partail Dischage Detection in High Voltage Equipments** : Butterworths London, 1989.

Kreyszig, E., **Advanced Engineering Mathematics** : J. Wiley & Sons, 1988.

Kuffel, E., and W.S. Zaengl, **High Voltage Engineering** : Pergamon Press, Britian, 1984.

Naidu, M.S. , and V. Kamaraju, **High Voltage Engineering** : Tela McGraw Hill Publishing Company, Delhi, 1990.

Nonaka, Y., and et. all , **Electrical Field in Transformer Oil Measured with the Kerr_effect Techinque** : IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, No. 2, 1990.

Pahlavan Poor, B., **Characterisation of Insulating oils** : National Grid Company, Technology and Science Laboratories, UK, 1995.

Razevig, D.V., Translated: Chourasia, M.P., **High Voltage Engineerring** : KHANNA Publishers, Delhi, 1990.

Rogres, R.R., IEE, **IEC Codes to Interpret Incipient Fault in Transformers, Using Gas in Oil Analysis** : IEE Trans. Elect. Insul., EI.13, No.5, 349-354, 1978.

Schwab, A., **High Voltage Measurment Techinque** : M.I.T. Press, 1972.

Sillars, R.W., **Electrical Insulating Material and their Applications** :

Peter Peregrinus, London, 1973.

Tillar shugg, W., **Handbook of Electrical and Electronic Insulating Materials** : Van Nostrand Reinhold, New York, 1986.

Wetzer, J.M., and P.A.A. Wouters, **The Effect of Insulator Charging on Breakdown and Conditioning** : IEEE Transaction on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 4, 1993.

Wylie, C.R., **Advanced Engineering Mathematics** : McGraw Hill Company, 1966.

Transmission and Distribtion Reference Book : Westinghouse Electric Corporation and Oxford University Press, New Delhi, 1962.

Transmission lines Refernce Book, 345 kV and above Electric Power Research Institule : Palo Alto California, 1982.

واژه‌نامهٔ فارسی به انگلیسی

آ

آب‌گریزی	*Hydrophobicity*
آزمایش تحمّل بار الکترومکانیکی	*Electromechanical Failing Load Test*
آزمایش تحمّل ولتاژ در برابر سوراخ شدن مقره	*Puncture Test*
آزمایش تخلخل	*Porosity Test*
آزمایش حدّاکثر تحمّل بار مکانیکی	*Mechanical Failing Load Test*
آزمایش سیکل حرارتی	*Temprature Cycle Test*
آزمایش میزان گالوانیزاسیون	*Galvanizing Test*
آزمایش‌های سری	*Routine Tests*
آزمایش‌های نمونه	*Sample Tests*
آزمایش‌های نوعی	*Type Tests*

ا

اتم‌های متا استیبل	*Meta Stable Atoms*
اثر پنینگ	*Penning Effect*
اثر تیونل	*Tunnel Effect*
استقامت الکتریکی	*Breakdown Strength*
استرها	*Esters*
اشباع	*Saturation*
اشپیل	*Split Pin*
اضافه بار	*Over Load*

انتشار الکترون	*Electron Emission*
انتشار حرارتی	*Thermionic Emission*
انتشار فتوالکتریکی	*Photo Electric Emission*

ب

برقگیر	*Lightning Arrester*
بوشینگ	*Bushing*
بهمن الکترونی	*Electron Avalanch*

پ

پدیدهٔ استریمر	*Streamer*
پست‌های گازی	*Gas Insulation Substation*
پشت موج	*Tail of Wave*
پل شرینگ	*Schering Bridge*
پلی ونیل کلراید	*Poly Vinyl Chloride*
پولاریزاسیون	*Polarization*

ت

تانزند	*Townsand*
تانک الکترولیت	*Electrolytic Tank*
تخلیهٔ جزئی	*Partial Discharge*
تخلیهٔ غیرمستقل	*Non-self Sustained Discharge*
تخلیهٔ غیرمستقل	*Self Sustained Discharge*
تخلیهٔ کانال	*CANAL Spark*
تخلیهٔ کرونا	*Corona Discharge*
ترکیب مجدّد	*Recombination*

ث

ثابت دی‌الکتریک	*Dieletric Constant*

ج

جلوی موج	*Front of Wave*
جریان نشتی سطحی	*Surface Leakage Current*

ح

حدّاقل ولتاژ شکست	*Critical Flashover Voltage*
حلقه محافظ	*Guard Ring*

خ

خطوط هم‌پتانسیل	*Isopotential Lines*
خم روکوفسکی	*Rogowski Profile*

د

دیود زنر	*Zener Diode*

ر

رابطهٔ پیک	*Peek Equation*
ردیابی	*Tracking*
روش اجزای محدود	*Finite Elements Method (FEM)*
روش بارهای فرضی	*Charge Simulation Method (CSM)*
روش تفاضل محدود	*Finite Difference Method (FDM)*
روغن آسکارل	*Askarel Oil*
روغن‌های گیاهی	*Vegetable Oils*

ز

زمان تأخیر آماری	*Statistical Time Lag*
زمان شکل‌گیری تخلیه	*Formative Time Lag*

س

سختی	*Hardness*

سطح عایقی	*Insulation Level*
سلیکاژل	*Silicagel*
سیمان آلومینا	*Alumina*

ش

شکست حرارتی	*Thermal Breakdown*
شکست شاخه‌ای	*Treeing Breakdown*

ض

ضریب تلفات عایقی	*Dieletric Dissipation Factor*
ضریب اوّل تانزند	*First Townsend Coefficient*
ضریب دوم تانزند	*Second Townsend Coefficient*
ضریب دی‌الکتریک	*Dieletric Coefficient*

ف

فاصلهٔ خزشی مقره	*Creepage Distance*
فرکانس صنعتی	*Power Frequency*
فوق‌میرایی	*Over damped*

ق

قسمت در میلیون	*PPM*

ک

کرونا	*Corona*
کرونای کلّی	*General Corona*
کرونای محلی	*Local Corona*
کمیسیون بین‌المللی برق *(IEC)*	*International Electrotechnical Comission*
کنترل ابعاد	*Verification of Dimensions*

گ

گاز الکترونگاتیو	*Electro-negative Gas*
گاز کروماتوگرافی	*Gas Chromatography*

ل

لعاب	*Glaze*

م

متوسّط مسیر آزاد	*Mean Free Path*
مسیر آزاد	*Free Path*
مقره‌های چینی	*Porcelain Insulators*
مقرهٔ هیولت	*Hewlett Insulator*
مقسم خازنی	*Capacitor Divider*
موادّ اپوکسی‌رزین	*Epoxy resin Materials*
موادّ ترکیبی	*Composite Materials*
موج انتقال یافته	*Transmitted Wave*
موج بازتاب	*Reflected Wave*
موج تابش	*Incident Wave*
موج سوئیچینگ	*Switching Surge*
مولّد انجترون و دلتاترون	*Deltatron and Engetron Generator*
مولّد والتن	*Walton Generator*
مولّد واندوگراف	*Vande graaff Generator*

ن

نقطهٔ ریزش	*Pour Point*

و

ولتاژ بحرانی شکست	*Disruptive Critical Voltage*

ولتاژ بحرانی کرونای قابل رؤیت	*Visual Critical Voltage*
ولتاژ تداخل رادیویی	*Radio Influence Voltage*
ولتاژ جرقه گاز	*Spark Voltage*
ولتاژ شکست گاز	*Breakdown Voltage*
ولت‌متر خازنی	*Generating Voltmeter*
ویسکوزیته	*Viscosity*

هـ

هادی‌های غیرقابل شستشو	*Unwashable Conductors*

واژه‌نامهٔ انگلیسی به فارسی

A

Alumina	سیمان آلومینا
Askarel Oil	روغن آسکارل

B

Breakdown Strength	استقامت الکتریکی
Breakdown Voltage	ولتاژ شکست گاز
Bushing	بوشینگ

C

CANAL Spark	تخلیهٔ کانال
Capacitor Divider	مقسم خازنی
Charge Simulation Method (CSM)	روش بارهای فرضی
Composite Material	موادّ ترکیبی
Corona	کرونا
Corona Discharge	تخلیهٔ کرونا
Creepage Distance	فاصلهٔ خزشی مقره
Critical Flashover Voltage	حدّاقل ولتاژ شکست

D

Deltatron and Engetron Generator	مولّد انجترون و دلتاترون
Dielectric Coefficient	ضریب دی‌الکتریک

Dieletric Constant	ثابت دی‌الکتریک
Dieletric Dissipation Factor	ضریب تلفات عایقی
Disruptive Critical Voltage	ولتاژ بحرانی شکست

E

Electrolytic Tank	تانک الکترولیت
Electromechanical Failing Load Test	آزمایش تحمّل بار الکترومکانیکی
Electro-negative Gas	گاز الکترونگاتیو
Electron Avalanch	بهمن الکترونی
Electron Emission	انتشار الکترون
Epoxy resin Materials	موادّ اپوکسی‌رزین
Esters	استرها

F

Finite Difference Method (FDM)	روش تفاضل محدود
Finite Elements Method (FEM)	روش اجزای محدود
First Townsend Coefficient	ضریب اوّل تانزند
Formative Time Lag	زمان شکل‌گیری تخلیه
Free Path	مسیر آزاد
Front of Wave	جلوی موج

G

Galvanizing Test	آزمایش میزان گالوانیزاسیون
Gas Chromatography	گاز کروماتوگرافی
Gas Insulation Substation	پست‌های گازی
General Corona	کرونای کلّی
Generating Voltmeter	ولت‌متر خازنی
Glaze	لعاب

Guard Ring	حلقه محافظ

H

Hewlett Insulator	مقرهٔ هیولت
Hardness	سختی
Hydrophobicity	آب‌گریزی

I

Incident Wave	موج تابش
Insulation Level	سطح عایقی
International Electrotechnical Comission	کمیسیون بین‌المللی برق *(IEC)*
Isopotential Lines	خطوط هم‌پتانسیل

L

Lightning Arrester	برقگیر
Local Corona	کرونای محلی

M

Mean Free Path	متوسّط مسیر آزاد
Mechanical Failing Load Test	آزمایش حدّاکثر تحمّل بار مکانیکی
Meta Stable Atoms	اتم‌های متا استیبل

N

Non-self Sustained Discharge	تخلیهٔ غیرمستقل

O

Over Load	اضافه بار
Over damped	فوق‌میرایی

P

Partial Discharge	تخلیهٔ جزئی
Peek Equation	رابطهٔ پیک
Penning Effect	اثر پنینگ
Photo Electric Emission	انتشار فتوالکتریکی
Polarization	پولاریزاسیون
Poly Vinyl Chloride	پلی ونیل کلراید
Porcelain Insulators	مقره‌های چینی
Porosity Test	آزمایش تخلخل
Pour Point	نقطهٔ ریزش
Power Frequency	فرکانس صنعتی
PPM	قسمت در میلیون
Puncture Test	آزمایش تحمّل ولتاژ در برابر سوراخ شدن مقره

R

Radio Influence Voltage	ولتاژ تداخل رادیویی
Recombination	ترکیب مجدّد
Reflected Wave	موج بازتاب
Rogowski Profile	خم روکوفسکی
Routine Tests	آزمایش‌های سری

S

Sample Tests	آزمایش‌های نمونه
Saturation	اشباع
Schering Bridge	پل شرینگ
Second Townsend Coefficient	ضریب دوم تانزند
Self Sustained Discharge	تخلیهٔ غیرمستقل

Silicagel	سلیکاژل
Spark Voltage	ولتاژ جرقه گاز
Split Pin	اشپیل
Statistical Time Lag	زمان تأخیر آماری
Streamer	پدیدهٔ استریمر
Surface Leakage Current	جریان نشتی سطحی
Switching Surge	موج سوئیچینگ

T

Tail of Wave	پشت موج
Temprature Cycle Test	آزمایش سیکل حرارتی
Thermal Breakdown	شکست حرارتی
Thermionic Emission	انتشار حرارتی
Townsand	تانزند
Tracking	ردیابی
Transmitted Wave	موج انتقال یافته
Treeing Breakdown	شکست شاخه‌ای
Tunnel Effect	اثر تیونل
Type Tests	آزمایش‌های نوعی

U

Unwashable Conductors	هادی‌های غیرقابل شستشو

V

Vande graaff Generator	مولّد واندوگراف
Vegetable Oils	روغن‌های گیاهی
Verification of Dimensions	کنترل ابعاد مقره
Viscosity	ویسکوزیته

ولتاژ بحرانی کرونای قابل رؤیت	*Visual Critical Voltage*
W	
مولّد والتن	*Walton Generator*
Z	
دیود زنر	*Zener Diode*

انتشارات دانشجویان دانشگاه
www.EDASH.blogfa.com

کد: ۱۷۸۶

*** پایان ***