

# عایق ها و فشار قوی

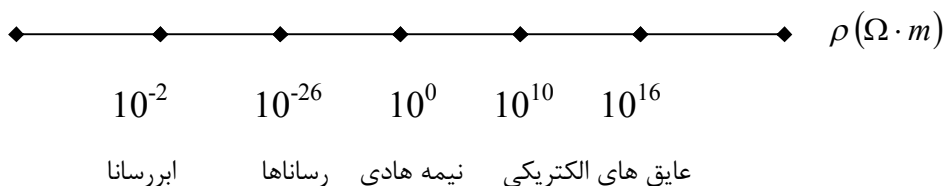
## درس : تورانداز

مراجع:

- ۱- عایق ها و فشارقوی - مهدی ثقفی، رحمت ا... هوشمند - انتشارات دانشگاه چمران
- ۲- مبانی مهندسی فشارقوی الکتریکی - حسین محسنی - انتشارات دانشگاه تهران
- ۳- اصول مهندسی فشار قوی - محمد قلی محمدی - انتشارات دانشگاه امیرکبیر
- ۴- فیزیک و تکنولوژی عایق ها - محمد قلی محمدی - انتشارات پژوهش
- ۵- جزوه درس عایق و فشار قوی - احمد غلامی - دانشگاه علم و صنعت
- ۶- جزوه درس عایق و فشار قوی - میرزایی - دانشگاه صنعتی بابل

تعریف عایق الکتریکی: ماده‌ای که در شرایط عادی دارای قابلیت هدایت کم و مقاومت بالا باشد را عایق گویند.

الکترون‌ها و یون‌های آزاد در عایق‌ها در مقایسه با هادیها بسیار کمتر است.



تعاریف برخی از ویژگی‌های مهم عایق‌های الکتریکی :

۱- **استقامت الکتریکی:** سطح ولتاژی است که یک عایق در واحد طول می‌تواند آن را تحمل کند که

آن را با  $v_b$  یا  $E_b$  نشان می‌دهند که  $E$  میدان الکتریکی حاصل از  $v$  می‌باشد. (b: Break down)

۲- **استقامت مکانیکی:** این ویژگی مخصوص عایق جامد است و میزان مقاومتی است که یک عایق

جامد در برابر نیروهای مکانیکی (تنش - خمش - پیچش و...) یا نیروی الکترو مکانیکی حاصل از اتصال کوتاه از خود نشان می‌دهد.

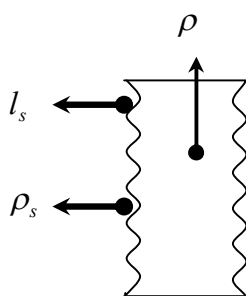
۳- **استقامت حرارتی یا دمای مجاز:** بیشترین دمای مجاز یا میزان در دمای مجازی است که عایق

الکتریکی در آن شرایط به حالت غیر عادی متمایل می‌شود. به عبارت دیگر میزان دمایی است که دمای فراتر از آن خواص اصلی مواد رفته رفته از بین می‌رود.

در اجسام عادی یک رابطه‌ای بصورت  $R = R_0(1 + \alpha \Delta T)$  برقرار است که این رابطه در عایق‌ها

به صورت  $R_{in} = R_0(1 + \alpha \Delta T)$  می‌باشد لذا زیر پست نباید آتش روشن گردد.

۴- **مقاومت مخصوص:** که خود به دو نوع تقسیم بندی شده است.



a- مقاومت ویژه ذاتی

$$\rho = R_{in} \frac{A}{l}$$

$$\rho_s = R_s \frac{A}{l}$$

مقاومت ویژه سطحی عایق کمتر می‌باشد و اکثر جرقه‌های زده شده در عایق‌ها (مقره‌ها) در سطح آنها می‌باشد.

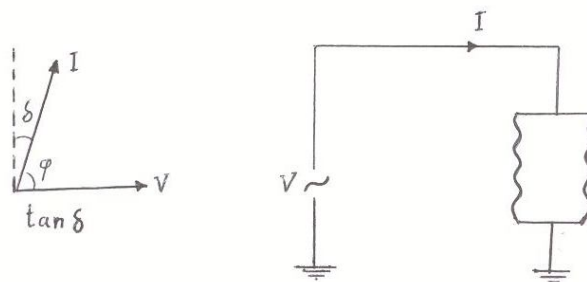
در سطح عایق یک جریان کمی جاری می‌شود که این جریان، جریان نشتی سطحی نامیده می‌شود. هدف زیاد کردن مقاومت سطحی است تا جریان نشتی سطحی کمتر شود.

۵- **ضریب گذردهی نسبی یا ثابت دی‌الکتریک:** نسبت ثابت دی‌الکتریک عایق به ثابت دی‌الکتریک

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{هوا را عدد دی‌الکتریک یا ضریب گذردهی می‌نامند.}$$

۶- **ضریب تلفات عایقی یا  $\tan \delta$ :** یک عایق تحت ولتاژ همواره دارای جریان است ولی جریان بسیار

کمتر است. یک عایق تحت ولتاژ را در نظر می‌گیریم که جریان  $I$  از آن می‌گذرد که به علت مقاومت و حالت خازنی، جریان پیش فاز می‌باشد.



**تعریف:** در جریان متناوب اختلاف فاز ولتاژ فاز ولتاژ و جریان برای یک عنصر را با  $\phi$  نشان

می‌دهند. متمم این زاویه را با  $\delta$  نشان داد و  $\tan \delta$  را ضریب تلفات عایقی گویند.

۷- **پایداری شیمیایی:** شرایطی همچون فشار، دما، رطوبت و غیره که باعث می‌شود عایق الکتریکی

خواص خود را نتواند حفظ کند مثل نفوذ رطوبت در کاغذ.

**طبقه‌بندی عایق‌های الکتریکی:**

## حالت اول: طبقه‌بندی فیزیکی

۱- عایق‌های گازی: ایجاد جریان الکتریکی در داخل گازها نیاز به ذرات باردار (یعنی الکترون و یون)

دارد. از طرفی تعداد ذرات باردار داخل یک گاز در شرایط عادی کم است بنابراین گازها عایق خوبی

هستند و جریان‌های الکتریکی در آنها بسیار کم و در حد مطلوبی است.

عایق‌های گازی در حالت عادی به شکل گاز هستند و در شرایط خاصی ممکن است به حالت ناپایدا

درآیند. عایق‌های گازی تحت فشار ممکن است مایع شوند در این حالت استقامت عایقی آنها کم می‌شود لذا

باید فشار عایق گازی در حد مجاز باشد.

از جمله عایق های گازی شامل نیتروژن، هیدروژن،  $SF_6$  (فلورئید گوگرد)،  $CO_2$  می باشد.

تعریف: در هر اتم با جذب انرژی، الکترون می تواند از یک مدار یا  $r$  به  $r'$  بالاتر منتقل شود که

مقدار این انرژی را با  $eV$  نشان می دهند.  $(v=w/q)$  که به این حالت همان یونیزاسیون گویند.

تعریف: به گازهایی که در حالت خنثی، قادر به جذب الکترون آزاد در لایه ظرفیت خود باشد را گازهای

الکترون دوست یا الکترون‌گاتیو می‌گویند مانند کلر، فلورئور

ویژگی برخی از عایق‌های گازی:

۱- هوا: هوا از جمله عایق‌های گازی بسیار ارزان است که در برخی از خازن‌های معمولی و بریکرها بکار

$$\text{برده می‌شود } \varepsilon_r \cong 1, E_b \approx 3 \frac{kv}{mm}, \tan \delta \approx 0$$

۲- فلورئورید گوگرد ( $SF_6$ ): یک گاز خنثی می‌باشد و با افزایش فشار می‌تواند به حالت مایع درآید.

استقامت الکتریکی آن تقریباً سه برابر هواست لذا در تجهیزات با ابعاد کوچک می‌توان از آن استفاده

کرد. قابلیت ترکیب شیمیایی بسیار کمی دارد و بر پوست بدن اثر نامطلوبی دارد. از این عایق در

بریکرها، خازن‌ها، کابل‌های فشار قوی، و ترانسفورماتورهای قدرت استفاده می‌گردد. در جاهایی که

$$\text{محدودیت فضا داریم از پست‌های با عایق گازی GIS استفاده می‌کنند. } E_b \approx 9 \frac{kv}{mm}$$

۳- هیدروژن: کاربرد آن در ژنراتور برای خنک‌سازی می‌باشد که علاوه بر خنک‌سازی وظیفه عایقی نیز دارد. عیب بزرگ آن داشتن خاصیت انفجاری است. امروزه از گازهای ترکیبی (mixed gas) مانند ترکیب SF<sub>6</sub> و هیدروژن استفاده می‌شود چون خواص عایقی بهتری از خود نشان می‌دهند.

## ۲- عایق‌های مایع:

عایق‌های مایع در کابل‌ها، خازن‌های فشارقوی، ترانسفورماتورها، کلیدهای قدرت، و سر کابل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر آن کار انتقال حرارت را در ترانسفورماتورها و خاموش کردن قوس الکتریکی در کلیدهای قدرت بر عهده دارند. روغن‌های معدنی و خام، معمول‌ترین استفاده را به عنوان عایق مایع دارند. هیدروکربن‌های مصنوعی و هیدروکربن‌های هالوژن‌دار هم می‌توانند در بعضی از دستگاهها به عنوان عایق مورد استفاده قرار گیرند. (مانند روغن سیلیکونی، هیدروکربن‌های فلئور و...) بعضی از روغن‌های گیاهی و استرها هم در حد کمتری مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ویژگی‌های مهم عایق‌های مایع

۱- خاصیت عایقی مناسب: که در بریکرها برای خاموش کردن جرقه و در ترانسفورماتورها برای خنک‌سازی است.

۲- می‌توانند کلیه منافذ را بپوشانند که مشابه گاز است.

۳- در قیاس با گازها، ضریب گذردهی نسبی بالایی دارند که می‌تواند باعث افزایش ظرفیت خازنی شود.

## محدودیت‌های بکارگیری عایق‌های مایع:

۱- بالا بودن وزن این عایق در تجهیزات (حدود ۲۰٪ وزن کل یک ترانس)

۲- استقامت حرارتی پایینی دارند. (حدود ۹۰ C° می‌باشد که اگر دما بالا برود روغن یونیزه شده و به

کربن و هیدروژن تجزیه می‌شود که کربن بصورت لجن در داخل ترانس ته نشین می‌شود و

هیدروژن کم کم خارج می‌شود.)

۳- قابلیت جذب ناخالصی که باعث افت استقامت الکتریکی می‌شود.

۴- بالا بودن هزینه تعمیر و نگهداری

۵- عمر مفید در قیاس با عایق‌های جامد کمتر می‌باشد.

### برخی از مشخصات آنها:

(که هر کدام از این مقادیر با  $\tan \delta = 10^{-3}$  ,  $T_{\max} = 90^{\circ}\text{C}$  ,  $E_b \approx 25 \frac{\text{kv}}{\text{mm}}$  ,  $\epsilon_r = 2.2$

توجه به شرایط محیطی می‌تواند تغییر کند)

### ۳- عایق‌های جامد که به سه دسته تقسیم می‌شوند.

مواد سلولزی: چوب و کاغذ

مواد معدنی: میکا، کوارتز، سرامیک، چینی، شیشه

مواد مصنوعی: تفلون - PVC - پلی‌استرها - صمغ‌ها

مزایای عایق‌های جامد:

۱- استقامت حرارتی بالایی دارند.

۲- استقامت الکتریکی بالایی دارند.

۳- استقامت مکانیکی بالایی دارند.

۴- تنوع بسیار زیادی دارند.

### محدودیت‌های مکانیکی عایق‌های جامد:

۱- در صورت بروز شکست قابل استفاده مجدد نمی‌باشند.

۲- شکل پذیری ندارند.

۳- وزن زیادی دارند (بخصوص معدنی)

۴- هم دارای شکست ذاتی‌اند و هم شکست سطحی که شکست سطحی را می‌توان دید و شکست ذاتی

را جز در شیشه نمی‌توان دید.

ویژگی برخی از عایق‌های جامد:

چوب و کاغذ:

۱- نسبت به عایق‌های معدنی سبک‌ترند و می‌توان بصورت لایه‌ها و ورقه‌های نازک آنها را ساخت.

۲- در صورت وجود حفره یا منفذ استقامت الکتریکی آنها بشدت کاهش می‌یابد.

۳- قابلیت جذب رطوبت دارند که باعث کاهش استقامت الکتریکی می‌شود.

۴- استقامت حرارتی خوبی ندارند.

۵- استقامت مکانیکی بالایی ندارند.

۶- در خازن به عنوان دی‌الکتریک، در کابل‌ها، در شینه بندی ژنراتور یا ماشین‌های الکتریکی

استفاده می‌شود.

**مشخصات کلی این عایق:**  $\tan \delta = 3 \times 10^{-3}$  ,  $T_{\max} = 90^{\circ}\text{C}$  ,  $E_b = 20 \frac{\text{kv}}{\text{mm}}$  ,  $\epsilon_r = 2.2$

**عایق میکا:** جزء مواد معدنی‌اند، شفاف هستند و دارای خاصیت تورق‌اند. ولی عیب آنها شکننده

بودن آنهاست لذا در جایی که لغزش وجود دارد بتنهایی نباید استفاده کرد

- استقامت الکریکی بالا و تلفت دی‌الکتریک پایینی دارد

- هدایت حرارتی خوبی هم دارند.

$\tan \delta = 10^{-4}$  ,  $T_{\max} = 500 - 700^{\circ}\text{C}$  ,  $E_b = 15 - 20 \frac{\text{kv}}{\text{mm}}$  ,  $\epsilon_r = 5 - 8$

**عایق‌های سرامیکی و چینی:** (بیشترین کاربرد در مقره‌ها)

-وزن زیادی دارند.

- قابلیت جذب رطوبت و ناخالصی دارند و به همین خاطر روی آنها لعاب داده می‌شود و سطح آن را سیقلی

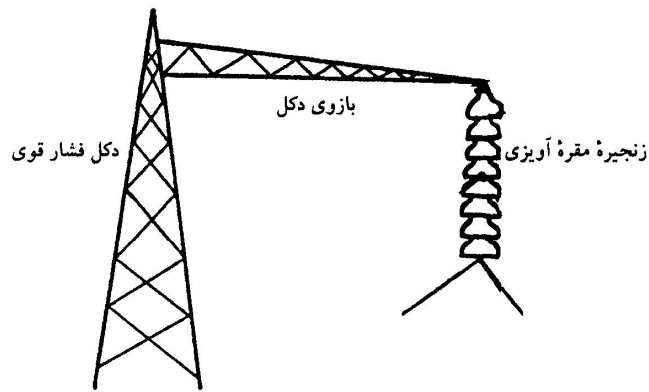
می‌کنند تا آب نماند.

-استقامت حرارتی و الکتریکی بالایی دارند

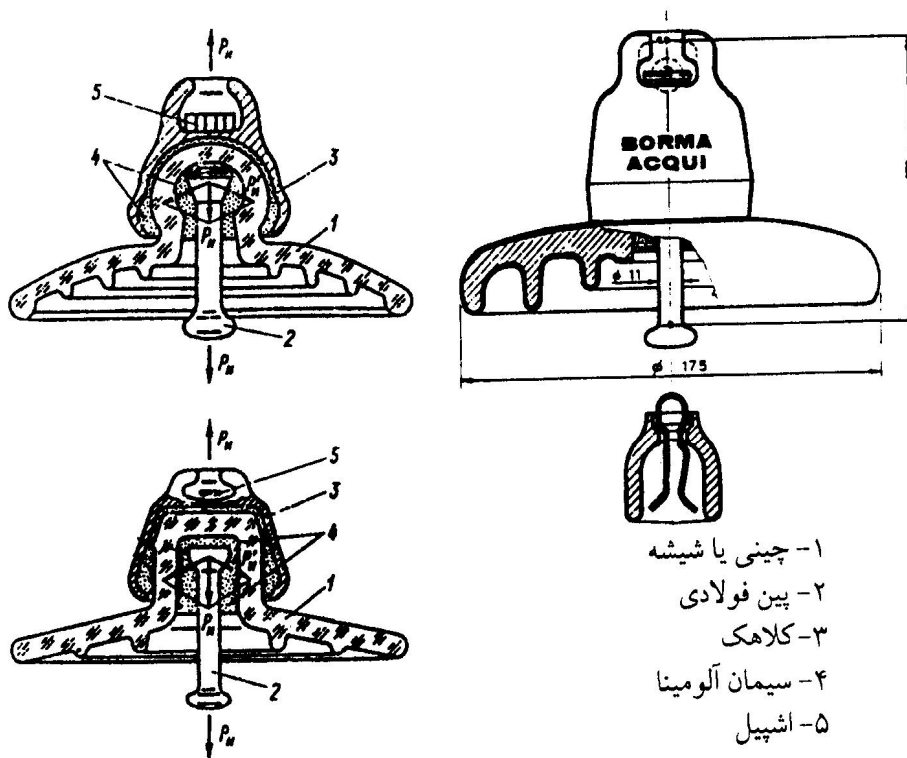
- در مقره‌های خطوط هوایی، پوشینگ ترانسفورماتور یا ترانس‌های اندازه‌گیری ولتاژ و جریان و در مقره‌های

اتکایی PI بکار می‌رود.

خطوط انتقال اکثراً دارای مقره های آویزان می باشند ولی در برخی از خطوط 20 kv از مقره های اتکایی استفاده می شود. (شکل)

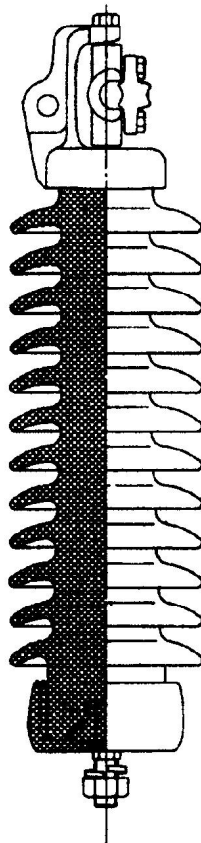


نحوه اتصال زنجیره مقره های آویزان بشقابی



یک نمونه از مقره های آویزی بشقابی





مقره نوع ایستگاه مخصوص خطوط انتقال

شیشه:

- نیاز به لعاب ندارد و رطوبت در آن نفوذ نمی‌کند
- اگر در اثر پدیده‌ای دار شکست یا ترک شود با چشم قابل دیدن است
- در اثر حرارت در مقایسه با سرامیک زودتر می‌شکنند
- استقامت مکانیکی آن از سرامیک بیشتر ولی استقامت ضربه‌ای آن کمتر است.

$$\tan \delta = 10^{-3} , T_{\max} = 300^{\circ}c , E_b = 50 \frac{kv}{mm}$$

تفلون  $((C_2H_3F)_n)$ : خاصیت تورق نسبتاً مناسبی دارد. کاربرد اکثر در خازن به‌عنوان دی‌الکتریک

است. برخی از مشخصات آن

$$\tan \delta = 10^{-4} , E_b = 70 \frac{kv}{mm}$$

پی‌وی‌سی  $PVC$ : کاربرد آن به‌عنوان روکش کابل فشار قوی و ضعیف است.

$$\tan \delta = 10^{-1} - 10^{-2} , T_{\max} = 65^{\circ}c , E_b = 10 - 30 \frac{kv}{mm} , \epsilon_r = 2 - 5$$

پلی استر: در شیشه‌بندی ژنراتورها، همراه عایق ... بصورت ترکیبی استفاده می‌شود.

$$\tan \delta = 10^{-2} , T_{\max} = 110^{\circ}c , E_b = 20 \frac{kv}{mm} , \epsilon_r = 3$$

پلی اتیلن  $(C_2H_4)_n$ : ویژگی آن‌ها این است که آب روی آن‌ها بصورت قطره قطره قرار می‌گیرد. خیلی سبک می‌باشند که مزیت بالایی است و چون از جنس مواد پلی اتیلن می‌باشند انعطاف پذیر (flexible) هستند.

- می‌توان در دمای خاصی به آن‌ها شکل داد

- دمای مجاز پایینی دارند و کاربردها در کابل یا خازن می‌باشد.

عایق مرکب (*composite insulator*): سبک می‌باشند که این هم مزیت است و هم عیب. مزیت آن این است که چون سبک‌اند دکل از نظر مکانیکی می‌تواند ضعیف‌تر باشد ولی عیب آن این است که چون سبک هستند براحتی منحرف می‌شوند و در نتیجه خطای خط افزایش می‌یابد چراکه براحتی مقرره منحرف می‌شود و فازها نزدیک می‌شوند و آرک می‌زنند و کلید هم خط را قطع می‌کنند.

## انواع دیگر طبقه‌بندی :

طبقه‌بندی شیمیایی:

- معدنی: میک، چینی، شیشه، سرامیک، کوارتز

- آلی: سلولزها و پلی‌مری‌ها

طبقه‌بندی از نظر ساخت و تولید:

- عایق‌های طبیعی: مواد اولیه در طبیعت وجود دارد و فقط با یک پروسه ساخت ساده به

مواد مورد دلخواه تبدیل می‌شوند. (کاغذ- چوب)

- عایق‌های مصنوعی: عنصر اولیه آنها پلی‌مر است که طبق فرآیندهای پیچیده‌ای به مواد دیگر

تبدیل می‌شوند (*PVC*، پلی اتیلن و ...)

طبقه‌بندی از نظر نوع واکنش حرارتی:

- ترموپلاست: در اثر حرارت تغییر شکل می دهند. (پلی اتیلن ها و ...)

- ترموست: در اثر حرارت تجزیه می شوند. (صمغ و ...)

طبقه بندی حرارتی از نظر کلاس حرارتی:

<i>y</i>	$T_{\max} \leq 90^{\circ}\text{C}$
<i>A</i>	$90^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} \leq 110^{\circ}\text{C}$
<i>E</i>	$110^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} \leq 120^{\circ}\text{C}$
<i>B</i>	$120^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} \leq 130^{\circ}\text{C}$
<i>F</i>	$130^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} \leq 155^{\circ}\text{C}$
<i>H</i>	$155^{\circ}\text{C} \leq T_{\max} \leq 180^{\circ}\text{C}$
<i>C</i>	$T_{\max} \geq 180^{\circ}\text{C}$

دلیل و عامل ایجاد جریان در مواد عایقی:

- در گازها وجود الکترون و یون های آزاد موجب جاری شدن جریان می شود.

- در اجسام جامد تعدادی الکترون های آزاد وجود دارند که می توانند ایجاد جریان کنند که اگر

چگالی حجمی آنها کمتر باشد قابلیت هدایت جامد پایین است.

- در مایعات نیز یون ها باعث جاری شدن جریان می شوند.

**مشخصات یک عایق خوب چیست؟**

۱- استقامت الکتریکی بالا

۲- ضریب تلفات عایقی پایین

۳- مقاومت و استقامت عایقی بالا

۴- استقامت حرارتی بالا

۵- ثابت دی الکتریک بالا

۶- عدم جذب رطوبت و ناخالصی

۷- قابلیت شکل پذیری مناسب

- استقامت سطحی بالا (در جامدات)

۹- استقامت مکانیکی مناسب

۱۰- ارزان بودن و فراوان بودن و وزن کم و عمر طولانی و...

### اصول کلی در انتخاب عایق های الکتریکی

۱- انواع تنش های وارده بر عایق

تنش الکتریکی: شدت میدان الکتریکی که عایق در آن قرار بگیرد و آسیب نبیند

تنش مکانیکی: در محل نصب شده و با توجه به نوع نصب، باید علیه تنش ها و نیروهای مختلف را تحمل کند.

تنش حرارتی: آیا عایق می تواند اصلاً دما و حرارت محیطی را که در آن بخش کار می کند تحمل کند.

۲- فراوان و قابلیت دسترسی

۳- هزینه تعمیر و نگهداری

۴- شرایط محیطی

معرفی برخی از تجهیزات فشار قوی و عایق های بکار رفته در آن:

ترانسفورماتور قدرت، ترانس اندازه گیری ولتاژ و جریان:

- کاغذ آغشته به روغن

- ضمغ

- روغن

- گازهای بی نظیر  $SF_6$ ،  $N_2$

کلاس خنک‌سازی ترانسفورماتورها:

O: oil , A: air , N: natural (طبیعی) , F: force (اجباری-با پمپ)

۱-ONAN: برای ترانسفورماتور با قدرت کم: روغن و هوا بصورت طبیعی ترانس را خنک می‌کنند

۲-ONAF: روغن بصورت طبیعی جریان می‌یابد ولی هوا بصورت اجباری

۳-OFAN: روغن بصورت اجباری و هوا بصورت طبیعی

۴-OFAF: هم روغن و هم هوا هر دو بصورت اجباری ترانس را خنک می‌کنند.

**ماشین‌الکتریکی:**

میکا، صمغ، اپوکساید، کاغذ، پلی‌استر (با ترکیب میکا در ژنراتور)، هیدروژن (فقط در ژنراتور)،

عایق‌های ترکیبی (کامپوزیت‌ها)

**بریکر (در ژنراتورها):** چمبر (از جنس سرامیک)، مواد مصنوعی کامپوزیتی، روغن

**کابل‌های فشار قوی:** PVC، روغن، SF<sub>6</sub>، پلی‌اتیلن، تفلون

**خازن:** کاغذ آغشته به روغن، مواد مصنوعی مثل تفلون، گاز SF<sub>6</sub>، N<sub>2</sub>، CO<sub>2</sub>

**خطوط هوایی:** شیشه، سرامیک، مواد کامپوزیتی، هوا

**بررسی انواع عایق‌های الکتریکی:**

۱- عایق گازی:

مفروضات:

۱- مولکول‌ها کروی شکل گازها با جنس یکسان هستند

۲- مولکول‌های گاز بصورت اتفاقی و پیوسته در حال جابجایی هستند.

۳- فاصله متوسط بین مولکول‌ها از قطرشان خیلی بزرگتر باشد.

۴- برخورد مولکول‌ها ارتجاعی باشد.

۵- نیروی بین مولکول‌ها و دیواره محفظه قابل اغماض باشد.

الکترون ولت: مقدار انرژی برابر با یک الکترون ولت مقدار انرژی لازم برای انتقال یک الکترون از نقطه‌ای دیگر با اختلاف پتانسیل یک ولت می‌باشد.

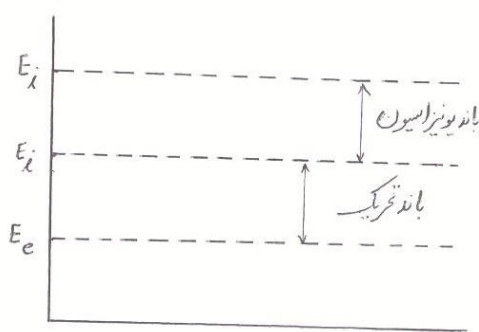
$$1e.v = 1 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1v = 1.6 \times 10^{-19} \text{ j}$$

**انرژی تحریک گاز:** مقدار انرژی مورد نیاز برای انتقال یک الکترون از یک مدار کوچکتر به مدار بزرگتر را انرژی تحریک گازی گویند.

### انرژی یونیزاسیون یا پدیده یونیزاسیون:

مقدار انرژی است که باعث می‌شود الکترون از لایه آخر اتم‌ها جدا و به عنوان الکترون آزاد در داخل گاز قرار گیرد. به مابقی آن یون مثبت می‌گویند.

هر اتمی که نیروی پیوندی کمتر داشته باشد زودتر یونیزه می‌شود (تحت انرژی ثابت) به عبارت دیگر قطع پیوند الکترواستاتیکی بین بارهای مخالف در اتم.



- $E'_i$  ← انرژی لازم برای شروع یونیزاسیون
- $E_i$  ← انرژی لازم برای یونیزاسیون کامل
- $E_e$  ← انرژی تحریک

$$E_e(H_2) = 10 \text{ ev}$$

$$E'_i(H_2) = 12 \text{ ev} \quad 3 \text{ ev} < E_i < 25 \text{ ev}$$

$$E_i(H_2) = 13.5 \text{ ev}$$

در گازها برگشت الکترون از مدار بالاتر به مدار پایین‌تر (جهت پایداری) با از دست دادن انرژی نورانی (فوتونی) صورت می‌پذیرد.

$$E = h.f = E_1 - E_2 \quad h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ j.sec} \quad , \quad f : \text{frequency}$$

$E_1$ : انرژی الکترون متحرک (تحریک شده)

$E_2$ : انرژی باقی مانده پس از تشکیل اتم خنثی در اتم

## انواع حالات ممکن جهت وقوع پدیده یونیزاسیون:

۱- یونیزاسیون نوری یا تابشی: امواج یا تابش نور با طول موج کوتاه قادر به یونیزاسیون گازها می‌باشند

که شرط این یونیزاسیون آن است که  $(hf)$  آن بزرگتر از انرژی یونیزاسیون آن گاز باشد.

$$h.f \geq E_i \quad \& \quad \lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{h.c}{E_i}$$

مثال- طول موج لازم برای یونیزاسیون گاز بخار سدیم با انرژی یونیزاسیون  $3.88\text{eV}$  را محاسبه

$$\lambda_{\max} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{3.88 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 3.189 \times 10^{-7} \text{ m} \quad \text{نمایید.}$$

۲- یونیزاسیون ضربه‌ای: اگر یک ذره متحرک انرژی دار به یک اتم برخورد کند باعث می‌شود که عمل

یونیزاسیون انجام و الکترون دیگری آزاد شود. در اینجا فرض می‌شود که یک الکترون با سرعت  $v_{e0}$

به یک اتم خنثی و ساکن برخورد کند و سپس سرعت الکترون پس از برخورد  $v_{e1}$  باشد و سرعت

اتم خنثی به  $v_1$  برسد در اینصورت مقدار انرژی انتقالی چقدر است. ؟

$$\frac{1}{2} m_e v_{e0}^2 = \frac{1}{2} m_e v_{e1}^2 + \frac{1}{2} m v_1^2 + \Delta \quad \text{بقای انرژی (۱)}$$

$$m_e v_{e0} = m_e v_{e1} + m v_1 \quad \text{بقای اندازه حرکت (۲)}$$

$$(1) \quad \rightarrow \quad v_{e0}^2 = v_{e1}^2 + \frac{m}{m_e} v_1^2 + \frac{2\Delta}{m_e}$$

$$(2) \quad \rightarrow \quad \left(\frac{m}{m_e}\right)^2 v_1 = v_{e0} - v_{e1}$$

$$\left(\frac{m}{m_e}\right)^2 v_1^2 = (v_{e0} - v_{e1})^2 \Rightarrow v_1^2 = \left(\frac{m_e}{m}\right)^2 (v_{e0} - v_{e1})^2$$

$$(1), (2) \quad \rightarrow \quad v_{e0}^2 = v_{e1}^2 + \left(\frac{m_e}{m}\right) (v_{e0} - v_{e1})^2 + \frac{2\Delta}{m_e}$$

$$\Delta = \frac{m_e}{2} (v_{e0}^2 - v_{e1}^2) - \frac{m_e^2}{2m} (v_{e0} - v_{e1})^2$$

سوال: سرعت الکترون پس از برخورد  $(v_{e1})$  که به ازای آن انرژی حداکثر باشد؟

$$\Delta_{\max} = \frac{\frac{1}{2} m_e v_{e0}^2}{1 + \frac{m_e}{m}} \frac{d\Delta}{dv_{e1}} = 0 \Rightarrow v_{e1} = \frac{m_e}{m_e + m} v_{e0} \rightarrow$$

$$m \gg m_e \Rightarrow \Delta_{\max} = \frac{1}{2} m_e v_{e0}^2$$

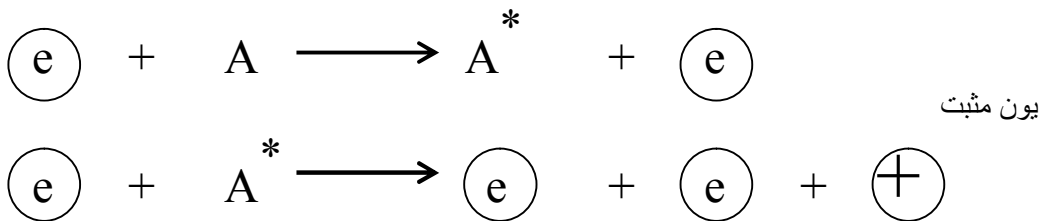
$$\frac{1}{2} m_e v_{e0}^2 \geq E_i \Leftrightarrow \Delta_{\max} \geq E_i \quad \text{شرایط یونیزاسیون}$$

پدیده یونیزاسیون ضربه ای معمولا در چند مرحله انجام می شود.

یونیزاسیون ضربه ای مرحله ای

۱- برخورد نوع اول (۹۰٪):

تحرک شده



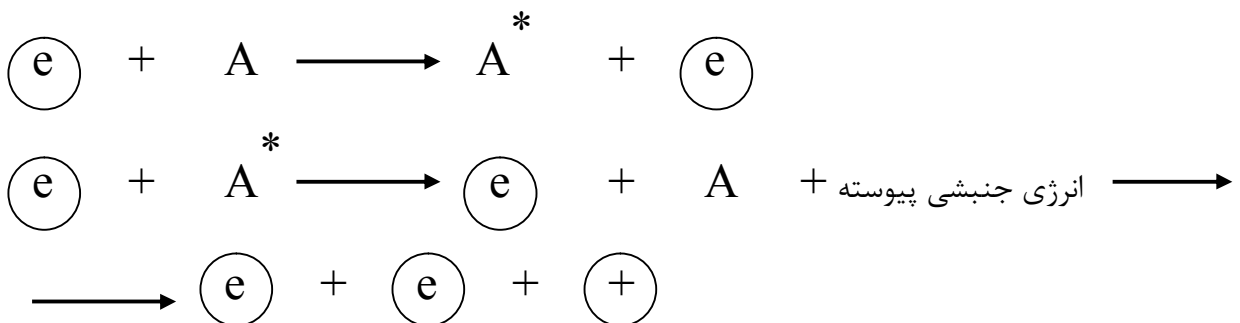
یک الکترون دیگر

ترکیب مجدد: در صورتیکه در اثر تحریک و یونیزاسیون اتم خنثی، الکترون آزادی بوجود آید و این

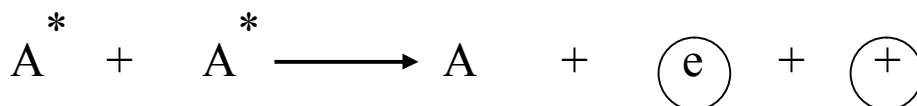
حالت بیش از یک زمان خاص پایدار بماند، اتم دوباره به حالت اول بر می گردد که به آن ترکیب مجدد

گویند. (حدود  $10^{-7}$  ثانیه طول می کشد)

۲- برخورد نوع دوم.



۳- برخورد نوع سوم.





سرعت الکترون آزاد باید در حد خاصی باشد تا بتواند زمان برخورد مناسبی را ایجاد کند و یونیزاسیون را انجام دهد (برخورد زیاد سریع نباشد).

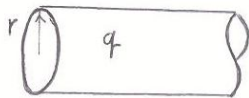
۳- یونیزاسیون حرارتی: در این حالت انرژی حرارتی باعث کاهش نیروی جاذبه بین الکترون و هسته می‌شود و در نتیجه عایق یونیزه می‌شود.

$$E_i = M.C.T \geq E_i$$

اگر  $E_I$  بیشتر از  $E_i$  شود پدیده یونیزاسیون رخ می‌دهد لذا باید حد حرارتی مجاز در نظر گرفته شود.

۴- یونیزاسیون سطحی: خروج الکترون از سطح کاتد و یا یون مثبت از سطح آنند در اثر اعمال ولتاژ و شدت میدان الکتریکی را یونیزاسیون گویند بخصوص در نقاط ناصاف و برجسته

### پدیده کرونا:



$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon r}$$

در داخل میدان نداریم اما در خارج از رابطه بالا بدست می‌آید.

$$E_{\max} = \frac{q}{2\pi\epsilon r_0}$$

به علت بالا بودن گرادیان ولتاژ در اطراف تجهیزات فشارقوی هوای اطراف این تجهیزات یونیزه می‌شود که به این پدیده کرونا گویند.

### آثار کرونا:

- صدای وزوز (تخلیه الکتریکی ناقص)

- نور بنفش رنگ اطراف هادی (در صورت رطوبت کافی و تخلیه الکتریکی شدید)

- ایجاد تلفات کرونا

- با توجه به اینکه هوای اطراف، هادی را یونیزه می‌کند تولید گاز اوزن می‌کند که سمی و

خورنده است و روی هادی و سطح آن اثر مخربی دارد

- نویز مخابراتی در صورتیکه خطوط موازی وجود داشته باشد

- آثار سوء زیست محیطی

راه‌های جلوگیری از پدیده کرونا : راه حل افزایش شعاع هادی است ولی چون عملی و اقتصادی

نیست لذا باندل می‌کنیم. و حذف نقاط نوک تیز در پست‌ها

عوامل بوجود آورنده و تشدید کننده کرونا:

- شدت میدان الکتریکی زیاد یا ولتاژ بالا

- آلودگی محیطی (رطوبت- نمک و...)

روش های کاهش پدیده کرونا : باندل کردن (چون هادی مجازی با شعاع *GMR* در نظر گرفته می شود)

در پست ها حذف نقاط نوک تیز با پیچ کردن یا استفاده از کلاهک

مزیت پدیده کرونا: اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی به صورت تلفات کرونا از بین می‌رود.

*Electrical Discharge* ((تخلیه الکتریکی))

بر چند نوع است که بررسی میشود

تعریف : تبادل بارهای الکتریکی بین دو الکتروود را گویند.

انواع تخلیه الکتریکی:

۱- تخلیه الکتریکی ناقص (کرونا)

۲-تخلیه الکتریکی کامل

۳- تخلیه الکتریکی سطحی که مخصوص عایق های جامد است.

Δ تخلیه الکتریکی در عایق های گازی با عنوان *flash over* نیز نامیده می شود.

Δ تخلیه الکتریکی در عایق های جامد با عنوان *puncture* (سوراخ شدگی ) نامیده میشود.

Δ تخلیه الکتریکی در عایق های مایع با عنوان *spark* نامیده میشود.

ولی آرک را برای هر سه نوع می توان بکار برد

برای مقره ها *puncture voltage* تعریف میشود.

$\Delta$  نشانه های تخلیه الکتریکی کامل جرقه و نور میباشد یا تولید صدا را نیز می توان عنوان کرد.

$\Delta$  در بحث عایق های مایع و گاز اصطلاح تخلیه الکتریکی جزئی *partial discharge* مطرح است.

فیزیک گازها:

عامل جاری شدن جریان در گاز ها الکترون های آزاد و یون های مثبت است.

$$N_0: \text{تعداد ذره در یک سانتی متر مکعب گاز در دمای متعارف} \quad N = \frac{P [\text{mmHg}]}{760} \times \frac{273}{T [^{\circ}k]} \times N_0$$

$N$ : تعداد ذره در واحد حجم گاز در هر دما و فشاری

$$\text{انرژی متوسط ذره در حالت تعادل} \quad W = \frac{3}{2} K . T$$

$$W = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} K . T \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{3KT}{m}} \quad \left\{ \begin{array}{l} v \propto \frac{1}{m^{\frac{1}{2}}} \\ v \propto T^{\frac{1}{2}} \end{array} \right.$$

تعریف فاصله آزاد  $\lambda$  : مسیر طی شده توسط یک ذره متحرک بدون برخورد با ذرات دیگر یا فاصله حرکت

یک الکترون در طی دو برخورد متوالی

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad \text{میانگین فاصله آزاد: مقدار متوسط فاصله آزاد طی شده}$$

$$Z = \frac{1}{\lambda} \quad \text{فرض کنیم در واحد طول } Z \text{ تصادم داشته باشیم}$$

حال اگر در یک محیط گازی  $n$  ذره وجود داشته باشد که هر یک سرعت های  $V_1, V_2, \dots, V_n$  را داشته

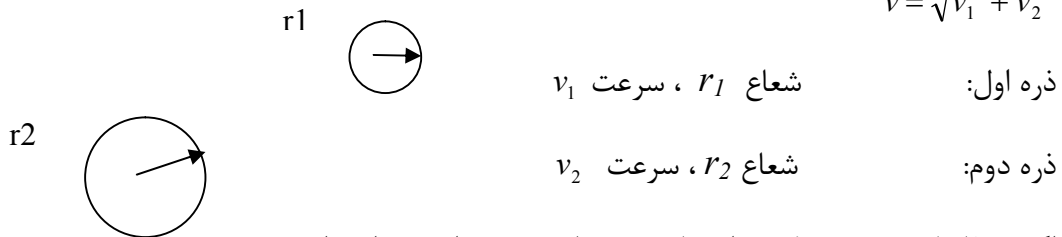
$$\bar{v} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2} \quad \text{باشند در آن صورت سرعت متوسط ذرات برابر خواهد بود:}$$

## تخلیه الکتریکی در گازها:

پارامترهای  $\lambda$  و  $Z$  قبلاً تعریف شده اند.

دو ذره فرض شوند که سرعت یکی  $v_1$  و سرعت دومی  $v_2$  باشد سرعت متوسط بصورت زیر تعریف می شود.

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$



اگر  $r$  فاصله بین دو مرکز ذرات باشد شرط برخورد را می توان داشت:

$$r \leq r_1 + r_2 \quad \text{شرط برخورد}$$

اگر دو ذره به هم برخورد کنند و با هم حرکت کنند انگاه حجم طی شده در واحد زمان برابر است با:

$$V = \pi(r_1 + r_2)^2 \cdot v$$

$v$ : سرعت حرکت دو ذره است.

تعداد برخورد در واحد زمان ( $Z'$ ):

اگر  $N$  تعداد برخورد ذره دوم در واحد حجم باشد

$$Z' = N \times V = N\pi(r_1 + r_2)^2 v$$

$$Z' = N\pi(r_1 + r_2)^2 \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

پارامتر دیگری تعریف می شود:  $Z=?$

$$Z = \frac{N\pi(r_1 + r_2)^2 \sqrt{v_1^2 + v_2^2}}{v_1}$$

$$\lambda = \frac{1}{Z} = \frac{v_1}{N\pi(r_1 + r_2)^2 \sqrt{v_1^2 + v_2^2}}$$

فرضی که شده اشت ان بوده است که یکی ساکن باشد و یکی به دومی برخورد کند و با هم بروند.

### حالات مختلف :

$$\begin{cases} v = v_2 \\ r_1 = r_2 = r \end{cases} \quad \text{۱- اگر هر دو ذره مولکول باشند:}$$

$$\lambda_{mol} = \frac{v_1}{N\pi * 4r^2 * v_1 * \sqrt{2}} = \frac{1}{4\sqrt{2}N\pi r^2}$$

اگر ذره اول یون و ذره دوم مولکول باشد.

$$\begin{cases} v_1 \gg v_2 \\ r_1 = r_2 = r \end{cases} \quad \text{(سرعت حرکت یون بسیار بیشتر از مولکول است)}$$

$$\lambda_{ion} = \frac{1}{4N\pi r^2}$$

$$\begin{cases} v_1 \gg v_2 \\ r_1 \ll r_2 \end{cases} \quad \text{۳- اگر ذره اول الکترون و ذره دوم مولکول باشد:}$$

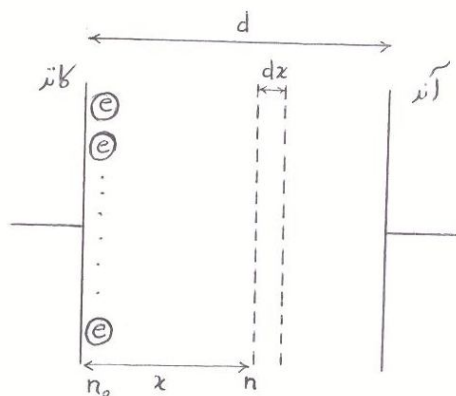
$$\lambda_{elc} = \frac{1}{N\pi r_2^2}$$

مقایسه ای که می توان انجام داد:  $\lambda_{elc} \lambda_{ion} \lambda_{mol}$

یعنی یک الکترون فاصله آزاد و آزادی عمل بیشتری دارد یعنی فاصله بیشتری را می توان بدون برخورد طی کند.

$$N = \frac{\rho}{k.T} \quad \text{رابطه ای که قبلا داشتیم:}$$

می خواهیم بررسی کنیم که اگر  $n_0$  (e) از کاتد کنده شود و به سمت آند حرکت کند چه تعداد به آند خواهد رسید.



$n$  تعداد الکترونی است که بدون برخورد فاصله  $x$  را طی کرده اند.

فرض می کنیم هر الکترونی که برخورد داشته باشد بایستد بنابراین:  $n \ll n_0$

$n_0 - n$  = تعداد الکترونی که برخورد داشته اند

$Z$ : تعداد برخورد در واحد طول

$Z \cdot dx$ : تعداد برخورد در فاصله  $dx$

$dn = n - n_0$  ← تعداد برخورد در فاصله  $dx$  یعنی  $n_0$  تعداد جدید در ورودی  $dx$  و  $n$  تعداد نهایی در  $dx$

می باشد.

می توان نوشت:  $n \cdot Z \cdot dx = -dn$

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \int_0^x -Z dx$$

$$\ln \frac{n}{n_0} = -Zx \Rightarrow n = n_0 e^{-Zx} \Rightarrow n = n_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

$n$ : تعداد الکترون در فاصله  $x$  از کاتد

$n_0$ : تعداد اولیه الکترون ها

$n_A = n_0 e^{-\frac{d}{\lambda}}$  ← تعداد الکترونی که به آنود می رسد

$$\text{if } x = \lambda \rightarrow \begin{cases} n_0 = 100 & \lambda = 2m & x = 2m \\ n = 100e^{-1} = 36 \end{cases}$$

یعنی 36 درصد الکترون ها بدون برخورد به فاصله  $x = \lambda$  می رسند. یعنی خود  $\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{x}{\lambda}}$  تابع احتمال

این پدیده تصادفی است.

$$\begin{aligned} \lambda &= 2m & x &= 4m \\ \text{if } x &= 2\lambda & n_0 &= 100 \\ & & n &= 100e^{-2} = 14 \end{aligned}$$

یعنی ۱۴ درصد به فاصله  $2\lambda$  می رسند.

### شکست الکتریکی گازها:

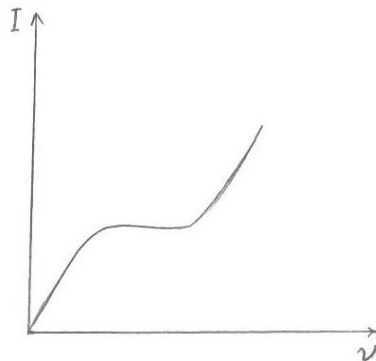
عوامل متعددی بر این موضوع تاثیر گذارند از قبیل :

فشار گاز ، رطوبت گاز ، شکل الکترون ها

در بحث شکست الکتریکی دو بحث ولتاژ کم - ولتاژ زیاد مطرح است.

جریان ناشی از گاز ها را می خواهیم بر حسب ولتاژ بررسی کنیم

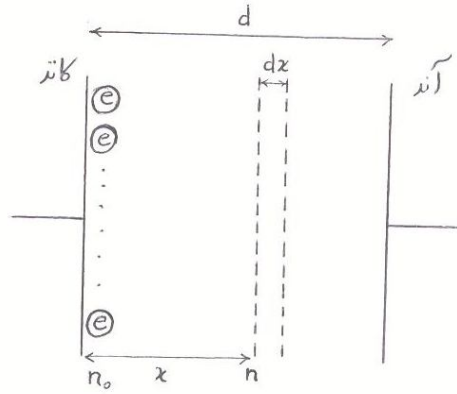
شکل موج  $I$  بر حسب  $v$  بصورت زیر ارائه می شود: (برای بررسی رابطه شکل موج به کتاب محسنی مراجعه شود)



یعنی ابتدا تغییرات خطی - بعد اشباع و بعد از افزایش نهایی را داریم:

شکل موج فوق را اولین بار شخصی بنام تانزند بدست آورد.

قضیه تانزند یا بهمن الکترونی:



ضریب اولیه یونیزاسیون : تعداد الکترون آزاد شده ناشی از یک الکترون در واحد طول ( $\alpha$ )

$\alpha \cdot dx$  : تعداد الکترون آزاد شده ناشی از یک الکترون در فاصله  $dx$

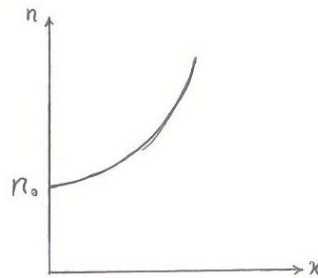
$n \cdot dx \cdot \alpha$  : تعداد الکترون آزاد شده توسط  $n$  الکترون در فاصله  $dx$

فرض می کنیم در فاصله  $dx$  تعداد  $dn$  الکترون داریم بنابراین :

$$\alpha \cdot n \cdot dx = dn$$

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = \int_0^x \alpha dx \Rightarrow \ln \frac{n}{n_0} = \alpha x \Rightarrow n = n_0 e^{\alpha x} \Rightarrow n(x) = n_0 e^{\alpha x}$$

این منحنی که شکل نمایی دارد بوجود آورنده بخش نمایی موج  $V-I$  در صفحه قبل است.



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

که  $n$  چون تعداد الکترون است می توان آن را به شکل جریان دانست:  $I_A = I_0 e^{\alpha d}$

در ابتدا تعداد الکترون کم است ولی با برخورد به مولکول های گاز الکترون های جدیدی را آزاد می کند و به

این ترتیب تعداد الکترون ها مرتباً افزایش می یابد و این همان بهمن الکترونی است.

می توان با توضیحات قبلی  $\alpha$  را بصورت زیر تعریف کرد:

$$\alpha = Z e^{-Zx_i} = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_i}{\lambda}}$$



$x_i$ : فاصله ای که در آن یونیزاسیون انجام می شود می باشد

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\pi^2 p}{KT}$$

اگر درجه حرارت ثابت باشد ضریب دیگری می توان تعریف کرد:  $Z = \frac{1}{\lambda} = A.p$

$$\alpha = A.p e^{-A p x_i}$$

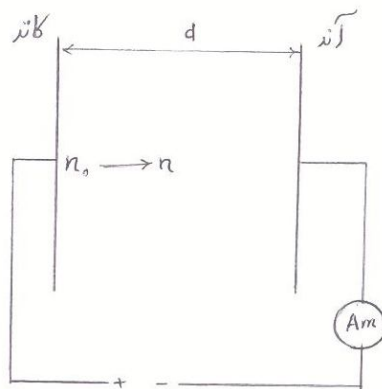
همچنین  $E = \frac{v}{x}$  می باشد ( $E_i, v_i$  مربوط به ولتاژ و میدان یونیزاسیون است) یعنی:

$$\alpha = A.p e^{-A p \frac{v_i}{E}} = A.p e^{-\frac{B.p}{E}} \Rightarrow \frac{\alpha}{p} = A e^{-\frac{B.p}{E}}$$

مسائلی که باید در مدنظر باشند:

- آزاد شدن الکترون های اضافی از سطح کاتد ناشی از برخورد یون های مثبت
  - یونیزه شدن اتم ها در مولکول های عایق در اثر برخورد فوتون های منتشر شده
  - آزاد شدن الکترون ها در اثر برخورد ذرات تحریک شده
- ضریب ثانویه یونیزاسیون تازند ( $\gamma$ ): تعداد الکترون آزاد شده ناشی از برخورد یک یون به صفحه کاتد

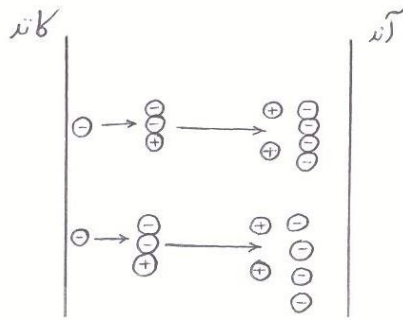
$$\gamma = g\left(\frac{E}{p}\right)$$



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

حالا هر دو اثر را بصورت یکجا بررسی می کنیم

این را از دو روش بررسی می کنیم ولی ابتدا یک مثال را بررسی می کنیم:



دو  $(e^-)$  از کاتد جدا شدند به یک اتم برخورد کردند و یک  $(e^-)$  و یک یون  $(+)$  آزاد کردند بعد  $(e^-)$  دوباره مسیر خود را ادامه دادند و این کار تکرار شد. در پایان ۸  $(e^-)$  و ۶ یون  $(+)$  آزاد شده است و تعداد دو الکترون هم که از اول جدا شده بود پس اختلاف  $n_0$ ، تعداد یون  $(+)$   $n - n_0$  خواهد بود این مثال را به صورت زیر تعمیم خواهیم داد:

یون مثبت تولید شده	الکترون رسیده به آند	الکترون آزاد شده از سطح کاتد
$n_0(e^{ad} - 1)$	$n_0 e^{ad}$	$n_0$
$m_0(e^{ad} - 1)^2$	$m_0(e^{ad} - 1)e^{ad}$	$m_0(e^{ad} - 1)$
$\gamma^2 n_0(e^{ad} - 1)^3$	$\gamma^2 n_0(e^{ad} - 1)^2 e^{ad}$	$\gamma^2 n_0(e^{ad} - 1)^2$
	$\gamma(e^{ad} - 1) = \eta$	

$$\leftarrow \text{تعداد کل الکترونی که به آند رسیده است} \quad n = n_0 e^{ad} [1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \dots] = \frac{n_0 e^{ad}}{1 - \eta}$$

$$I = I_0 \frac{e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)} \quad n = \frac{n_0 e^{ad}}{1 - \gamma(e^{ad} - 1)}$$

تعداد  $n_0$  از کاتد جدا شدند در پایان  $n_0 e^{ad}$  عدد شدند ولی در این پروسه یون مثبت تولید شد که این یون ها خود به کاتد برخورد می کند و به ازای هر یون  $\gamma$  الکترون آزاد می کند که این الکترون های آزاد شده خود برخورد کرده و همینطور این روند ادامه دارد... تعداد کل  $(e^-)$  هایی که به آند می رسند را می توان با جمع زدن روی ستون وسط بدست آورد.

$\eta$  برای گازها عدد کوچکی می باشد. در حالت اول به رابطه  $n = n_0 e^{ad}$  رسیده بودم این به خاطر آن است

که در آنجا فرض کردیم یون  $(+)$  کاری انجام نمی دهد این یعنی  $\eta = 0$ .

۳- اثبات فرمول به دست آمده از روش دیگر:

$n_0'$  : تعداد کل الکترونهاى خارج شده از سطح کاتد ناشى از یونیزاسیو ثانویه

$n_0''$  : کل الکترونهاى خارج شده از سطح کاتد

$$n_0'' = n_0 + n_0' \quad (1) \quad \text{براتی می توان نوشت که :}$$

$$\gamma(n - n_0'') = n_0' \quad (2) \rightarrow \begin{matrix} 1 & \gamma \\ n - n_0'' & n_0' \end{matrix} \rightarrow$$

یک یون مثبت  $\gamma$  (e) آزاد می کند حال تعداد  $n - n_0''$  یون مثبت که داریم کلاً  $n_0'$  الکترون را از

کاتد آزاد می کند. رابطه سوم هم می تواند به صورت زیر نوشت :

$$n = n_0'' e^{\alpha d} \quad (3)$$

$$\gamma(n - n_0 - n_0') = n_0' \quad (4)$$

$$n = (n + n_0') e^{\alpha d} \quad (6)$$

$$\gamma(n - n_0) = n_0'(1 + \gamma) \quad (5)$$

$$6 \rightarrow n = ne^{\alpha d} + \frac{\gamma}{1 + \gamma} (n - n_0) e^{\alpha d} \Rightarrow n = n_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

**شرط شکست کامل در یک گاز چیست ؟**

شکست کامل زمانی در یک گاز رخ می دهد که تعداد کل الکترونهاىى که به آنها می رسد بی نهایت شود

یعنی می توان این شرط را به صورت زیر نشان داد :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad \leftarrow \text{شرط شکست کامل}$$

**قضیه پاشن :**

$$\alpha = A \cdot p e^{-\frac{B \cdot p}{E}} \quad \text{قبلاً اثبات شده است که :}$$

$$\alpha = pf_1 \left( \frac{E}{p} \right) \quad \text{ضریب اولیه :}$$

$$\gamma = f_2 \left( \frac{E}{p} \right) \quad \text{ضریب ثانویه :}$$

$$\rightarrow \text{در حالت شکست کامل} \quad 1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0$$

$$1 - \left[ f_2 \left( \frac{E}{p} \right) \right] \left( e^{pd f_1 \left( \frac{E}{p} \right)} - 1 \right) = 0$$

این هر E نیست و مربوط به شکست است یعنی ( $E_b$  break down)

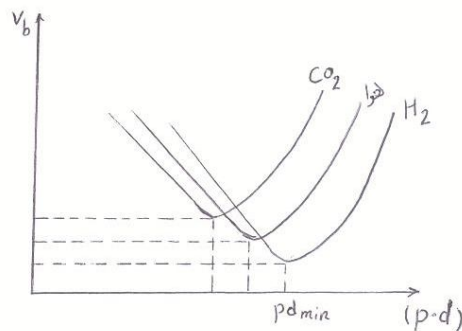
$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad \text{خود } E_b \text{ هم به ولتاژ شکست بستگی دارد:}$$

$$1 - \left[ f_2 \left( \frac{V_b}{p \cdot d} \right) \right] \left( e^{p \cdot d f_2 \left( \frac{V_b}{p \cdot d} \right)} - 1 \right) = 0 \quad \text{لذا داریم:}$$

از این رابطه چنین نتیجه ای می توان گرفت که:  $V_b = f(p \cdot d)$

توجه شود که  $f_1, f_2$  فقط تابع بودن را نشان می دهند و رابطه تحلیلی ندارند بلکه بررسی آزمایشگاهی است.

منحنی های آزمایشگاهی بدست آمده به صورت زیر است:



در یک  $p \cdot d$  مقدار  $v_b$  می نیمم می باشد که به صورت زیر آمده است:

$$(p \cdot d)_{\min} = 0.576 \text{ [Torr.cm]} \quad v_{b \min} = 327 \text{ volt} \quad \text{هوا}$$

$$(p \cdot d)_{\min} = 1.15 \text{ [Torr.cm]} \quad v_b = 273 \text{ volt} \quad \text{نیدروژن}$$

$$(p \cdot d)_{\min} = 0.51 \text{ [Torr.cm]} \quad v_b = 420 \text{ volt} \quad \text{دی اکسید کربن}$$

$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg}$$

$$760 \text{ Torr} = \text{atm} \quad \text{واحد فشار:}$$

محاسبه نقطه  $(p \cdot d)_{\min}$ :

$$\gamma(e^{ad} - 1) = 1 \Rightarrow e^{ad} - 1 = \frac{1}{\gamma} \Rightarrow e^{ad} \frac{1}{\gamma} + 1 = \frac{\gamma + 1}{1}$$

$$\alpha.d = \ln\left(\frac{\gamma+1}{1}\right)$$

$$\alpha = A.pe^{-\frac{B.p}{E}} \xrightarrow{\text{break down state}} \alpha = A.pe^{-\frac{B.p}{E_b}}$$

جایگذاری  $Apd e^{-\frac{Bp.d}{V_b}} = \ln\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)$

$$\ln(Ap.d) + \left(-\frac{B.p.d}{V_b}\right) = \ln\left[\ln\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)\right]$$

$$\ln A.p.d - \ln\left[\ln\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)\right] = \frac{B.p.d}{V_b}$$

$$V_b = \frac{B.p.d}{\ln\left[\frac{A.p.d}{\ln\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)}\right]} \quad \text{ولتاژ شکست را داریم :}$$

$$\frac{dV_b}{d(p.d)} = 0 \Rightarrow p.d_{\min} = \frac{e}{A} \ln\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) \Rightarrow V_{b\min} = \frac{B}{A} e \ln\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) \quad \text{e : عدد نپرین}$$

حالت‌های مختلف مورد بررسی :

$$(1) \quad p.d \ll (p.d)_{\min} \rightarrow \begin{cases} p \ll \rightarrow \lambda \uparrow \uparrow \Rightarrow v_b \uparrow \\ d \gg \rightarrow \text{احتمال برخورد، تجربه یونیزاسیون} \downarrow \Rightarrow v_b \uparrow \end{cases}$$

قبلاً اثبات کردیم  $\lambda_e \propto \frac{1}{p}$  حال اگر  $p \ll$  باشد  $\lambda_e$  خیلی زیاد می شود و این یعنی کاهش تعداد برخورد و

کاهش یونیزاسیون اتم های وسط ، بنابراین برای اینکه در این حالت شکست رخ بدهد باید  $v_b$  بالا برود.

اگر  $d$  خیلی کوچک باشد احتمال برخورد منجر به یونیزاسیون کم می شود در نتیجه باز برای شکست لازم

است  $v_b$  بالا رود.

$$(2) \quad p.d \gg (p.d)_{\min} \rightarrow \begin{cases} p \gg \rightarrow \lambda \downarrow \downarrow \rightarrow \text{کاهش میابد} \rightarrow v_b \rightarrow \text{انرژی یونیزاسیون حامل الکترون بشدت کاهش میابد} \\ d \gg \rightarrow E \downarrow \downarrow \rightarrow \text{کاهش میابد} \rightarrow v_b \rightarrow \text{انرژی یونیزاسیون حامل الکترون بشدت کاهش میابد} \end{cases}$$

وقتی  $p \uparrow$  می شود  $\lambda \downarrow \downarrow$  خیلی خیلی کوچک است در این حالت برخورد آن نیز زیاد است که دیگر اصلاً  $e$  انرژی کافی برای یونیزاسیون نخواهد داشت و بسیار پایین می آید لذا باز برای شکست باید  $v_b$  را افزایش دهیم.

در حالت  $d \uparrow \uparrow$  مطمئناً  $E$  خیلی کم می شود و دیگر الکترون ها انرژی لازم برای عمل یونیزاسیون ندارد و باید  $v_b$  را بالا برد تا  $E$  بالا رود و انرژی الکترون ها تامین شود.

رابطه تقریبی به دست آمده برای ولتاژ شکست گاز به صورت زیر می باشد: (هوا)

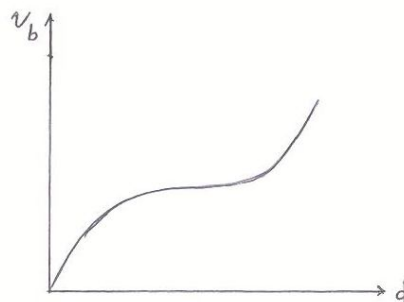
$$v_b = 24.22 \left[ \frac{293 pd}{760 T} \right] + 6.08 \left[ \frac{293 pd}{760 T} \right]^{\frac{1}{2}} \quad p = [Torr] \quad T = [^{\circ}k]$$

$$\text{if } p = 760 Torr \quad \& \quad T = 293 \text{ } ^{\circ}k$$

ولتاژ شکست برای شرائط فوق:  $v_b = 24.22 d + 6.08 \sqrt{d}$

و میدان شکست در هوا:  $E_b = \frac{v_b}{d} = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{d}}$

و از نظر نمودار



این شکل نشان می دهد که اگر به ازای یک  $d_0$  ولتاژ  $v_{b0}$  باشد برای  $2d_0$  نمی توان گفت که ولتاژ شکست  $2v_{b0}$  خواهد شد بلکه کمتر از آن است.

## ۲- بررسی عایقهای جامد:

ویژگی یا معیارهای عایقهای جامد:

استقامت الکتریکی: کشش، تنش، خمش، پیچش و ... این بحث در مورد عایقهای جامد که وظیفه مکانیکی نیز دارند مطرح است برای مثال مقره‌های خطوط انتقال از این نوع‌اند ولی مثالهایی نیز داریم که استقامت مکانیکی چندان مورد بحث نیست

- تلفات دی الکتریک ( $\delta \tan$ )

- درجه خلوص

- عدم جذب رطوبت و ناخالصی

- استقامت الکتریکی (شکست در عایق جامد بر دو نوع است: ذاتی - سطحی)

ولتاژ شکست عایق‌ها با زمان اندک اندک کم می‌شود که این در اثر استهلاک و گذشت زمان است

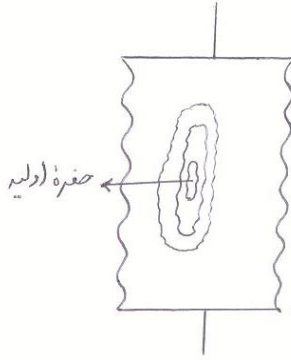
### انواع شکست در عایقهای جامد:

شکست الکترونی: عایق‌های جامد تا یک حدولتاژ را تحمل کرده و از آن به بعد دچار شکست می‌شوند این شکست را شکست الکترونی می‌گویند. این شکست تابع الکترون‌های آزاد در درون جسم عایق است.

شکست الکترومکانیکی: عایقهای جامد تحت نیروهای مختلف مکانیکی ناشی از اتصال کوتاه، ناشی از نیروهای خارجی به سیستم (وزن جسم یا برف، باد، برخورد فیزیکی با عایق و ...)

شکست حرارتی: در عایقهای جامد حرارت ناشی از تلفات باعث تحریک الکترون و افزایش قابلیت هدایت می‌گردد. در نتیجه به علت هدایت الکتریکی و از طرفی تلفات سیستم باعث نوعی شکست در عایق می‌شود که به عنوان شکست حرارتی مطرح است.

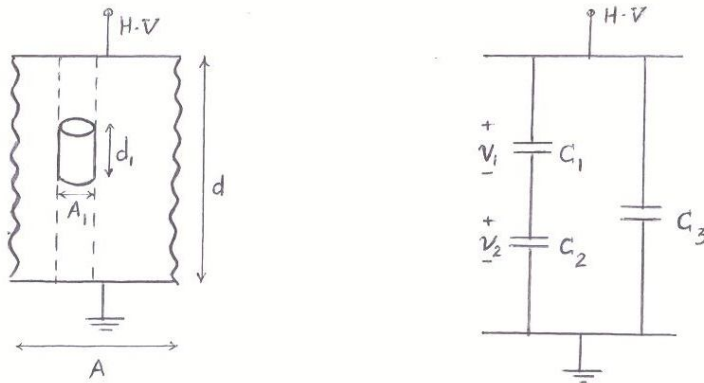
شکست فرسایشی: وجود حفره‌های کوچک در مرحله ساخت در داخل عایق باعث می‌شود که در این محفظه قوس‌هایی زده شود که باعث رسایش عایق از داخل می‌شود که بعد از گذشت زمان موجب بزرگتر شدن - محفظه می‌شود و در نهایت موجب شکست می‌شود



شکست سطحی: این شکست به پروفیل (شکل) عایق، به شرایط محیطی، آلودگی و رطوبت بستگی دارد. در اثر وجود اختلاف پتانسیل ناشی از جریانهای سطحی بوجود می آید.

شکست الکتروشیمیایی: در مورد مواد سلولزی، تجزیه شیمیایی یا اکسیداسیون و در مورد مواد معدنی خوردگی، اکسیداسیون و تجزیه شیمیایی می تواند خاصیت عایقی را بکاهد که در نهایت موجب شکست شود که شکست الکتروشیمیایی نامیده می شود.

شکست فرسایش یک عایق با یک حفره داخلی تحت ولتاژ  $V$  و میدان  $E$  در نظر بگیرید. که سطح مقطع عایق  $A$  و طول آن  $d$  می باشد و سطح مقطع حفره  $A_1$  و طول آن  $d_1$  می باشد این کانال معیوب را می توان با دو خازن مدل کرد و بقیه عایق را هم با یک خازن مدل سازی کرد.



$C_1$ : ظرفیت الکتریکی حفره

$C_2$ : ظرفیت الکتریکی کانال معیوب به غیر از حفره

$C_3$ : ظرفیت الکتریکی کانال سالم

$$v_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot v$$

$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A_1}{d_1}$$

$$C_2 = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{A_1}{d - d_1}$$



$$v_1 = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A_1}{d-d_1}}{\varepsilon_0 \frac{A_1}{d_1} + \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A_1}{d-d_1}} \cdot v = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A_1 d_1}{\varepsilon_0 A_1 (d-d_1) + \varepsilon_r \varepsilon_0 A_1 d_1} \cdot v = \frac{\varepsilon_r d_1}{d-d_1 + \varepsilon_r d_1} \cdot v$$

$$v_1 = v \cdot \frac{\varepsilon_r d_1}{d-d_1 + \varepsilon_r d_1}$$

$$E_1 \cdot d_1 = E \cdot d \frac{\varepsilon_r d_1}{d-d_1 + \varepsilon_r d_1} \Rightarrow E_1 = E \cdot \frac{\varepsilon_r d_1}{d-d_1 + \varepsilon_r d_1} = \frac{\varepsilon_r \cdot E}{1 + \frac{d_1}{d}(\varepsilon_r - 1)}$$

$d_1$  در مقایسه با  $d$  بالا بسیار کوچک است لذا  $\frac{d_1}{d} \approx 0$  می باشد بنابراین :

$$E_1 = \varepsilon_r \cdot E$$

این شدت میدان بالا در این حفره باعث بوجود آمدن قوس در حفره می شود و وجود این قوس موجب فرسایش داخلی عایق می شود.

**مقره‌های موجود در شبکه قدرت :**

$\Delta$  مقره‌هایی خطوط هوایی : برای عایق کردن هادیها نسبت به دکل،

$\Delta$  مقره‌هایی اتکایی: برای عایق کردن و نگهداری قسمت برقدار نسبت به زمین، ( $PI$ )

$\Delta$  مقره‌های عبوری: برای رساندن فشار الکتریکی به ترانسفورماتور، خازن و ... (بوشینگ‌ها)

شرایط یک مقره ایده‌آل:

- استقامت مکانیکی خوب

- مقاوم در برابر حرارت

- ثابت دی الکتریک زیاد

- استقامت در برابر ولتاژ شکست

- عادی از خلل و فرج و حفره‌های داخلی

- غیر قابل نفوذ بودن در مقابل نفوذ گاز و مایعات

**وظیفه کلی مقره‌ها:**

- خاصیت عایقی مناسب
- استقامت مکانیکی مناسب
- تحمل الکتریکی در برابر اضافه ولتاژها
- استقامت الکتریکی لازم در برابر تضعیف جریان نشتی
- استقامت در برابر درجه حرارت

### معیارهای فنی و اقتصادی بکارگیری مقره‌ها

معیارهای فنی:

معیارهای الکتریکی:

$\Delta$  استقامت در برابر ولتاژ و فرکانس قدرت: برای مدت یک دقیقه تعریف می‌شود برای مثال یک مقره  $20kv$  باید  $50kv$  را به مدت یک دقیقه تحمل کند.

$\Delta$  استقامت در برابر اضافه ولتاژ صاعقه در شرایط خشک پلاریته مثبت و منفی:

برای مثال یک مقره  $20kv$  باید  $75kv$  را به مدت  $50$  میکروثانیه تحمل کند.

$\Delta$  استقامت ولتاژ پنچر یا سوراخ شدگی

$\Delta$  استقامت در برابر اضافه ولتاژهای کلیدزنی

معیارهای مکانیکی

- تحمل وزن سیم در حالت عادی

- تحمل وزن سیم و نیروی باد

- تحمل وزن سیم و یخ تشکیل شده بر روی هادی

- تحمل ضربات خارجی وارد بر مقره [اصابت سنگ، نیروهای ناشی از نوسانات مکانیکی هادی]

- استقامت و پایداری در برابر عوامل فرساینده (اتمسفری، انواع آلاینده)

معیارهای اقتصادی

- عواملی همچون هزینه حمل و نقل و نسب و میزان کیفیت

- هزینه تعمیرات و بهره‌برداری در مدت طول عمر و یا سرویس‌دهی خط در طول بهره‌برداری

(همچون هزینه شستن مقره‌ها در دوره‌های خاص و تعویض مقره‌های معیوب)

### انواع مقره‌ها از لحاظ جنس (مواد مصرفی)

۱- مقره‌های چینی

این مقره‌ها از گذشته در شبکه‌های توزیع و انتقال مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مواد ساختاری مقره چینی

خاک رس

آلومینا

کائولین

فلدسپات

بر حسب مورد و برای حفظ خواص الکتریکی و مکانیکی از مواد دیگری همچون کربنات کلسیم و منیزیم استفاده می‌شود.

۲- مقره‌های شیشه‌ای

این مقره مخلوطی از سیلیس  $\text{SiO}_2$ ، اکسید سدیم، اکسید کلسیم و منیزیم بوده و بر حسب مورد و میزان خاصیت الکتریکی و مکانیکی از مواد با درصد‌های دیگر نیز استفاده می‌شود.

۳- مقره‌های کامپوزیت

نخستین بار این مقره‌ها در سال ۱۹۵۹۰ میلادی در آمریکا ساخته شده‌اند.

این مقره‌ها بر خلاف مقره‌های فوق یکپارچه نمی‌باشند.

این مقره‌ها به صورت اجزای ترکیبی شامل میله کامپوزیت (ترکیبی از الیاف شیشه و رزین اپوکسی و یا پلی استر)، روکش پولیمری از جنس لاستیک سیلیکونی و قسمت‌های فلزی (یراق‌آلات) می‌باشد.

۴- مقره‌های نیمه‌هادی

این مقره‌ها از دهه ۷۰ میلادی در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

تفاوت عمده این مقره‌ها در جنس لعاب آن است.

لعاب این نوع مقره‌ها از جنس  $\text{SnO}_2$  و مقداری *antimony* که ماده اول به عنوان عایق بوده که توسط ماده دوم به نیمه‌هادی تبدیل می‌شود.

### شرایط کاری مختلف مقره‌ها

۱- شرایط عادی

شرایطی است که استرس‌های الکتریکی و مکانیکی و یا عوامل کاهش‌دهنده کارایی مقره در حالت عادی خط، استرس‌های اضافی را بر مقره اعمال ننماید

## ۲- شرایط عادی

شرایطی است که باعث تاثیر منفی بر عملکرد و کارایی مقره می شود. تجمع برف و یخ بر روی مقره و یا آلودگی های متفاوت که باعث مشکلات و هزینه های متفاوتی برای مقره ها خواهد شد

### بررسی مقره های چینی

#### معایب

- ۱- ترک های داخلی قابل رویت نمی باشد.
- ۲- رشد قارچی سیمان در مناطق مرطوب که ابتدا با ترک در قسمت عایق و در نهایت با پنچری مقره در داخل کلاهک همراه است.
- ۳- در برخی مناطق کویری با طوفان شن ، صدمه دیدن تدریجی مقره کاهش کارایی آن را سبب می شود.
- ۴- ترک برداشتن و توسعه ترک های مویی که به ترک های بزرگتر و در نهایت به پنچری آن منجر می شود.
- ۵- در برخی از تیپ این مقره ها به علت فواصل کم بین شیار ها ، جمع شدن آلودگی سریعتر بوده و بعضا با شستن نیز باقی می ماند ؛ که این باعث تضعیف مقره می شود.
- ۶- در مقره های با شیار کم ، پیوستگی جرقه های سطحی به یکدیگر سریعتر انجام می گیرد.
- ۷- در هنگام تغییر دما ، رطوبت بیشتری بر روی سطح این مقره ها (نسبت به شیشه) می نشیند.
- ۸- قیمت نسبی این مقره ها (در مقایسه با شیشه) بیشتر و همچنین نرخ شکستگی این مقره ها در حین حمل و نقل حدود ۲٪ بر آورد می شود. (این مبلغ می بایست به نرخ برآورد هزینه ها اضافه گردد).
- ۹- این مقره ها دارای وزن زیاد ، تولید ، ساخت و شکل گیری بسیار مشکل و دارای دقت کم در ساخت می باشد.
- ۱۰- در اثر برخورد صاعقه ، اغلب ترکهای موئی باعث شکست عایقی مقره می شود

#### مزایا

- ۱- تحمل حرارتی این مقره ها در درجه حرارت های بالا بیشتر است.
- ۲- استقامت آن در برابر مواد شیمیایی و شرایط مختلف جوی مناسب است.
- ۳- در مقایسه با مقره های شیشه ای ذرات آلوده نمکی یا صنعتی با سرعت کمتری بر روی آنها جمع می شود.
- ۴- احتمال ترک خوردگی این مقره ها در درجه حرارت های پائین کم است.
- ۵- ضریب مقاومت مخصوص چینی در حدود ۳۰۰۰ اهم-سانتی متر ، ضریب دی الکتریک آن بین ۳-۵ است.
- ۶- ضریب تلفات عایقی چینی در حدود ۲ تا ۳ در صد است.
- ۷- استقامت عایقی چینی در حدود ۱۶۰ کیلو ولت بر سانی متر است.

### بررسی مقره های شیشه ای

معایب

- ۱- در صورت پائین بودن کیفیت مقره های شیشه ای ، نرخ شکستگی آنها در مراحل مختلف کار به شدت افزایش می یابد.
- ۲- وجود برخی نمک های معدنی در شیشه (alkalia) باعث افزایش هدایت سطحی شیشه شده و با افزایش خاصیت الکترولیتی می تواند آن را از نظر الکتریکی ضعیف کند. ( با کاهش محتویات آلکالین استقامت ولتاژی از ۱۷/۹ به ۴۸ کیلوولت بر میلی متر افزایش می یابد).
- ۳- حتی در هنگام نگهداری ، تغییرات سریع دمایی نیز بعضا باعث شکست آنها می شود.
- ۴- در مرحله نصب ، در صورت کشیده شدن مقره بر روی زمین و یا برخورد آن به سنگ و صخره ، احتمال وقوع پدیدگی پولکی شکل از سطح آن زیاد است
- ۵- موضوع فوق میتواند به هنگام مرطوب بودن سطح مقره و تغییرات سریع دمایی به شکست احتمالی منجر شود.
- ۶- امکان تجمع آلاینده ها بر روی مقره های شیشه ای زیاد است

مزایا

- ۱- در اثر شکست و یا داشتن ترک مویی در این مقره ها ، می توان آن را با چشم مورد بازدید قرار داده و از نظر مکانیکی و الکتریکی آن را بررسی نمود.
- ۲- در مقایسه با چینی دارای قیمت پائین تری است.
- ۳- استقامت عایقی شیشه بیشتر از چینی است. (د محدود ۲۵۰ کیلوولت بر سانتی متر)
- ۴- استقامت در برابر فشار مکانیکی آن تقریبا سه برابر چینی است.
- ۵- مقره های شیشه ای در برابر امواج ضربه ناشی از پدیده های گذرا مقاوم تر بوده و منهدم نمی گردند.

### بررسی مقره های کامپوزیتی

قسمت های تشکیل دهنده مقره کامپوزیتی

#### ۱- هسته یا میله کامپوزیت

شامل دو جز اصلی ماتریس و الیاف (فیبرها) می باشند.

رزین اپوکسی و یا پلی استر

الیاف های تقویت شده از نوع شیشه ای

نقش ماتریس ها

۱- حفاظت سطح الیاف از سایش

۲- حفاظت در برابر شرایط محیطی نامطلوب

۳- انتقال تنش بین الیاف ها

نقش و وظیفه الیاف ها(اصلی ترین جز عایق)

تحمل بار مکانیکی

## ۲- روکش پولیمری

برای محافظت از هوازدگی و اثرات مخرب رطوبت و شرایط جوی و نیز افزایش ولتاژ لازم برای شکست الکتریکی و ایجاد جرقه در اطراف مقره، روی هسته با مواد پولیمری مختلفی همچون لاستیک سیلیکونی، رزین اپوکسی، الاستومرهای کوپلیمر اتیلن - پروپیلن به نام روکش پوشاننده می شود.

خواص لاستیک های سیلیکونی

۱- داشتن حس خاصیت آب گریزی

۲- مقاومت در برابر ترک (در ساختار مولکولی آنها اتم کربن کمتری قرار دارد).

۳- عایق بودن خاکستر ناشی از حرارت و یا جرقه و یا تخریب آنها

۴- مقاوم بودن در برابر امواج ماورا بنفش و مغناطیسی بر خلاف الاستومرهای کوپلیمر اتیلن - پروپیلن

۵- داشتن خاصیت آب گریزی سطحی مناسب

## ۳- یراق آلات

هسته مقره کامپوزیتب از دو انتها، توسط یراق آلات حمایت می گردند.

بررسی مقره های کامپوزیت

معایب

۱- با توجه به مواد پولیمری بکار رفته در روکش این مقره ها، آنها در برابر پیر شدگی حساس اند. (لازم است طبق استاندارد حداقل درصد سیلیکون در نظر گرفته شود).

۲- مقره های کامپوزیت در مقایسه با دیگر مقره ها، بخاطر هزینه های بالای مواد بکار رفته در ساخت آنها، گران تر می باشند.

۳- مقره های کامپوزیت به دلیل تشکیل شدن از قسمت های مختلف، آسیب پذیر تر هستند. (با نفوذ آب به هسته کامپوزیت و الیاف شیشه، خصوصیات الکتریکی آن تا حدی افت می کند).

۴- در مقره های نوع EPDM، قابلیت دفع آب بسیار کم دوام بوده و محدود به چند سال عمر کارکرد آنها می باشد.

۵- امروزه بهترین و با دوام ترین مقره های سیلیکونی از نوع الیاف شیشه ای با اپوکسی رزین می باشد. در هسته های کامپوزیت با میله پلی استر و ونیل استر، کیفیت پایین و قیمت نیز در حدود نصف است.

۶- در مناطق با گرمای حدود ۵۰ درجه سانتی گراد و بالاتر استقامت کششی آنها تا حدود ۳۰ درصد کاهش می یابد. ضمناً دچار افزایش طول نیز می شود.

مزایا

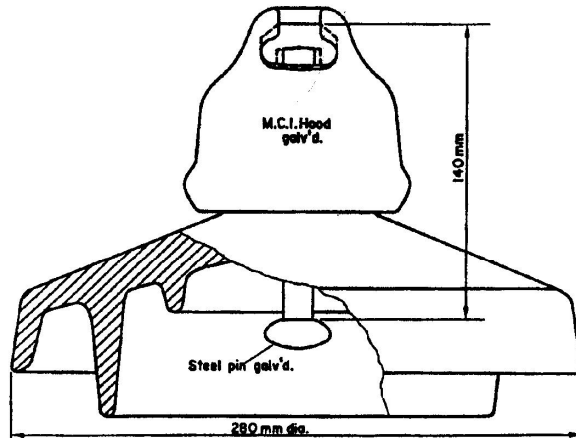
۱- مقره های کامپوزیتی دارای وزن کم می باشند. (حدود ۳۳٪ معادل چینی) لذا باعث کاهش هزینه های جانبی می گردد.

- ۲- مقره های کامپوزیت قابلیت عایقی بسیار خوبی دارند. (به خاطر ترکیبات مولکولی داخل لاستیک سیلیکونی ، دارای خاصیت آبگریزی است.)
- ۳- استقامت سطحی آن بالا و میزان جریان خزشی کم است.
- ۴- با توجه به خواص ویژه روکش ها ، این نوع مقره ها نیاز به شستشو در حال کار ندارند. لذا باعث کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری می شود.
- ۵- در برابر جرقه و آتش استقامت خوبی دارند.
- ۶- در برابر شوک های ناشی از بار گذاری مکانیکی و همچنین ناهمواری های سطحی از خود مقاومت نشان می دهند. (استقامت کشش مکانیکی برای مقره کامپوزیت ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ مگاپاسکال ، مقره های چینی ۳۰ تا ۱۰۰ مگاپاسکال و برای مقره های شیشه ای ۱۰۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال است.)
- ۷- در مقره های کامپوزیت تلفات بسیار کم ، آلودگی صوتی و رادیویی بسیار پائین و کرونا نیز ناچیز است.
- ۸- در مراحل تولید و حمل در مقایسه با مقره های چینی و شیشه ای ، به خاطر انعطاف پذیری ، ضایعات کمتر خواهد بود.
- ۹- همچنین برای مناطقی که شکستن مقره ها توسط عوامل انسانی رایج است ، مناسب می باشند.
- ۱۰- این مقره ها در مقابل اصابت گلوله بدون اینکه اثر فوری بر استقامت مکانیکی و یا الکتریکی آنها داشته باشد ، مقاومت می نمایند. لیکن در صورت از بین بردن روکش سیلیکونی و رسیدن گلوله به میله ، در معرض بودن هوا و رطوبت اسیدی می تواند به گسیختگی مقره منجر شود.
- ۱۱- در مناطق برفگیر و یخبندان ، به لحاظ شکل و قطر کوچک بشقاب ها ، کارآیی بهتری نسبت به مقره های سرامیکی دارد.

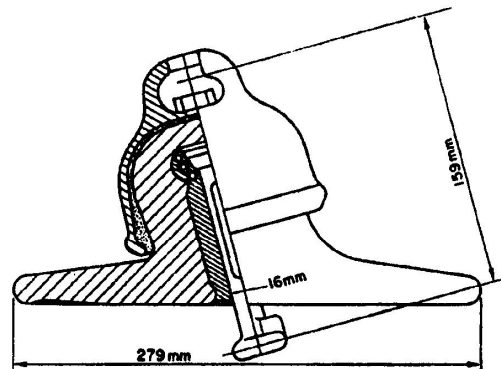
### انواع مقره ها با توجه به سطح ولتاژ و محل نصب :

مقره های بشقابی :

- معمولی
  - ضد مهی - خاصیت ائرو دینامیکی بیشتری دارند-
- در صورت افزایش ولتاژ تعداد بشقابها بسیار زیاد است.



قره بشقابی با فرورفتگی های عمیق

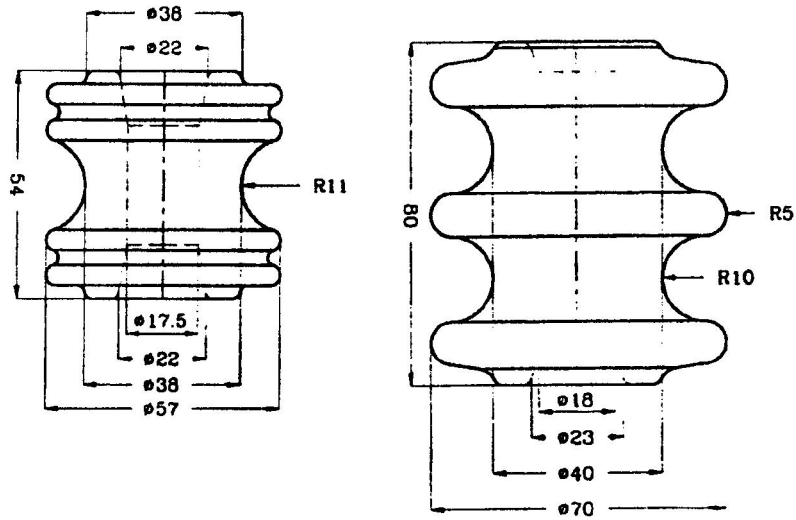


قره آویزی بشقابی دارای انحراف نسبت به محور

مقره های سوزنی (اتکایی) : pin insulator

در سیستم توزیع با ولتاژ پایین 20 kv به کار می روند.

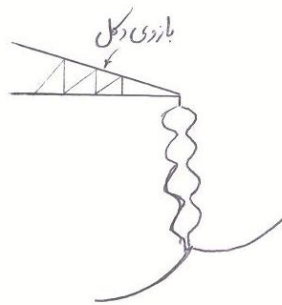




مقره های اتکایی یا PI : - post insulator -

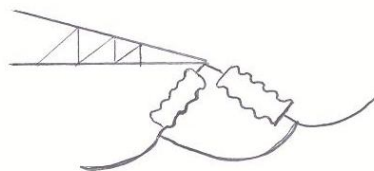
در پستها به کار می روند و از نظر سایز بسیار بزرگ اند.

آرایش مقره ها در خطوط :

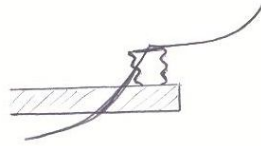


مقره های آویزی :

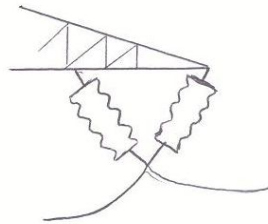
مقره های کششی :



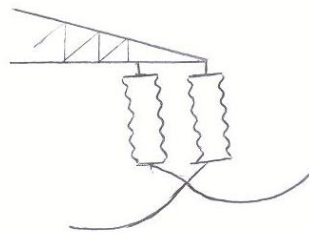
مقره های ثابت : - در توزیع به صورت اتکایی یا در PIها



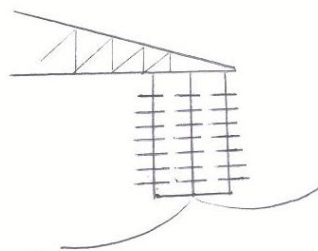
مقره های V شکل :



مقره های II شکل :



مقره های III شکل : - با توجه به استقامت مکانیکی انتخاب می شوند -



مقره های بشقابی از سه قسمت تشکیل شده اند:

- کلاهک فلزی

- بدنه عایق

- میل مقره (میله فلزی)

### مشخصات مقره های بشقابی :

قطر ، ارتفاع ، کشش مکانیکی ، ولتاژ نامی ، ولتاژ ضربه صاعقه  $\pm$  خشک و مرطوب ( حالت خشک و مرطوب با پلاریته مثبت یا منفی )

### مقایسه بین مقره های سوزنی و بشقابی :

تحت گشتاور خمشی امکان شکست مقره سوزنی بیشتر است هزینه تعمیر و نگهداری مقره سوزنی هم بیشتر است. مقره بشقابی چون بشکل آویز است قابلیت حرکت دارند لذا گشتاور خمش وارد شده به آنها کمتر اثر می گذارد

قیمت مقره بشقابی از مقره سوزنی با ولتاژ نامی مشابه کمتر است .

هزینه نصب و تعمیر مقره های بشقابی خیلی کمتر است.

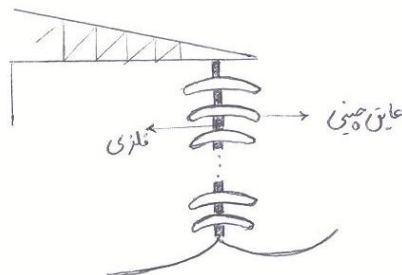
بدلیل خاصیت جابجایی، حرکت پاندلی آن گشتاور خمشی خیلی کمتر به مقره های بشقابی اعمال می گردد.

در صورت نیاز می توان بسادگی تعداد مقره های بشقابی در زنجیر را تغییر داد.

مقره های بشقابی نیروهای کششی را می توانند تعدیل کنند.

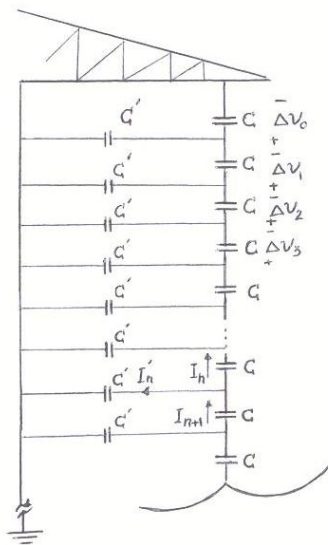
توزیع غیر یکنواخت پتانسیل بر روی مقره های بشقابی از ایرادات آنهاست.

این را از نظر ریاضی ، فرمولی اثبات می کنیم:



عایق های چینی را بصورت خازن مدل سازی می کنیم. ولی آیا این باعث توزیع غیر یکنواخت می شود یا خیر؟

بدلیل وجود قسمت های فلزی بین بشقاب ها یک خازن  $c'$  نسبت به زمین دارند. (دکل)  
لذا داریم:



$$I_{n+1} = I_n + I'_n$$

$$I_n = c\omega\Delta V_n$$

$$I_{n+1} = c\omega\Delta V_{n+1}$$

$$I'_n = c'\omega V_{n+1}$$

$$c\omega\Delta V_{n+1} = c'\omega V_{n+1} + c\omega\Delta V_n$$

$$\Delta V_{n+1} = \Delta V_n + \frac{c'}{c} V_{n+1} \quad \frac{c}{c'} = m$$

$$\begin{cases} \Delta V_{n+1} = \Delta V_n + \frac{V_{n+1}}{m} \\ \Delta V_n = V_{n+1} - V_n \end{cases} \rightarrow \text{این نشانه برابر نبودن } \Delta v_{n+1} \text{ و } \Delta v_n \text{ است.}$$

مثال: در یک خط هوایی با ولتاژ  $63kv$  از مقره های زنجیرهای در هر فاز و در هر زنجیره 5 واحد مقره بشقابی استفاده شده است. اگر نسبت ظرفیت هر واحد مقره به ظرفیت میله مقره دکل برابر 10 باشد مطلوبست تعیین افت ولتاژ بر روی هر واحد مقره در زنجیره خط .

$$v_L = 63 \text{ kv} \quad n = 5 \quad m = \frac{c}{c'} = 10$$

$$\begin{cases} \Delta V_{n+1} = \Delta V_n + \frac{V_{n+1}}{m} \\ \Delta V_n = V_{n+1} - V_n \end{cases}$$

$$n = 0 \quad \begin{cases} \Delta V_0 = V_1 - V_0 = V_1 \\ \Delta V_1 = \Delta V_0 + \frac{V_1}{m} \end{cases} \Rightarrow \Delta V_1 = \Delta V_0 + \frac{\Delta V_0}{10} = 1.1\Delta V_0$$

$$n = 1 \quad \begin{cases} \Delta V_1 = V_2 - V_1 \\ \Delta V_2 = \Delta V_1 + \frac{V_2}{10} \end{cases} \Rightarrow 1.1\Delta V_0 = V_2 - \Delta V_0 \rightarrow V_2 = 2.1\Delta V_0 \Rightarrow \Delta V_2 = 1.1\Delta V_0 + \frac{2.1\Delta V_0}{10} = 1.31\Delta V_0$$

$$\Delta V_2 = 1.31\Delta V_0$$

$$n = 2 \quad \begin{cases} \Delta V_2 = V_3 - V_2 \\ \Delta V_3 = \Delta V_2 + \frac{V_3}{m} \end{cases} \Rightarrow 1.31\Delta V_0 = V_3 - 2.1\Delta V_0 \rightarrow \Delta V_3 = 1.31\Delta V_0 + \frac{3.41\Delta V_0}{10} = 1.651\Delta V_0$$

$$\Delta V_3 = 1.651\Delta V_0$$

$$n = 3 \quad \begin{cases} \Delta V_3 = V_4 - V_3 \\ \Delta V_4 = \Delta V_3 + \frac{V_4}{m} \end{cases} \Rightarrow 1.651\Delta V_0 = V_4 - 3.41V_3 \rightarrow V_4 = 5.061\Delta V_0 \Rightarrow \Delta V_4 = 1.651\Delta V_0 + \frac{5.061}{10}\Delta V_0$$

$$\Delta V_4 = 2.1571\Delta V_0$$

$$\Delta V_0 + \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 + \Delta V_4 = \frac{63 \text{ kv}}{\sqrt{3}}$$

$$\Delta V_0 + 1.1\Delta V_0 + 1.31\Delta V_0 + 1.651\Delta V_0 + 2.1571\Delta V_0 = \frac{63}{\sqrt{3}} \text{ kv}$$

$$\Delta V_0 = A \quad \Delta V_1 = 1.1A \quad \Delta V_2 = 1.31A \quad \Delta V_3 = 1.651\Delta V_0 A \quad \Delta V_4 = 2.1571\Delta V_0 A$$

یعنی در بشقابهای نزدیک دکل عایقی داریم که کمتر از آن استفاده شده است لذا یک رضیب بهره به صورت

زیر تعریف می شود :

$$\eta = \frac{v_{ph}}{n \times \Delta v}$$

$$\% \eta = \frac{\frac{63 \text{ kv}}{\sqrt{3}}}{5 \times 2.1571 A} \times 100 \quad \text{در این مثال :}$$

روش دوم برای محاسبه افت ولتاژ :

امپدانس واحد طول :  $Y = jkc\omega$

ادمیتانس واحد طول :  $Z = \frac{-j}{c\omega}$

$$dv = ZdxI \quad \rightarrow \quad dv = ZIdx \quad \rightarrow \quad \frac{dv}{dx} = ZI \quad (1)$$

$$dI = Ydx.(v + dv) \rightarrow dI = Y(v + dv)dx$$

$$dI = Yvdx \rightarrow \frac{dI}{dx} = Yv \quad (2)$$

$$(1) \rightarrow \text{مشتق} \quad \frac{d^2v}{dx^2} = Z \frac{dI}{dx} = ZYv$$

$$\frac{d^2v}{dx^2} - ZYv = 0 \quad ZY = \gamma^2$$

$$\frac{d^2v}{dx^2} - \gamma^2v = 0 \rightarrow S^2 - \gamma^2 = 0 \rightarrow S = \pm\gamma$$

$$\Rightarrow V_{(x)} = K_1 e^{\gamma x} + K_2 e^{-\gamma x}$$

$V_{(x)}$  ولتاژ نقطه ای به فاصله ط نسبت به زمین است .

برای به دست آوردن  $K_1, K_2$  داریم :

$$\begin{cases} x=0 \rightarrow v=0 \\ x=l \rightarrow v=v_n \text{ ولتاژ فاز} \end{cases} \quad \begin{cases} K_1 + K_2 = 0 \\ K_1 e^{\gamma l} + K_2 e^{-\gamma l} = V_n \end{cases}$$

طول زنجیره ←

$$K_1 = \frac{V_n}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}, \quad K_2 = \frac{V_n}{e^{-\gamma l} - e^{\gamma l}}$$

$$V_{(x)} = \frac{V_n}{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}} [e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}] = \frac{V_n}{2 \sinh(\gamma l)} \cdot 2 \sinh(\gamma x) = \frac{\sinh(\gamma x)}{\sinh(\gamma l)} V_n$$

$$V_{(x)} = \frac{\sinh(\gamma x)}{\sinh(\gamma l)} V_n$$

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{\frac{1}{jc\omega} \cdot jk\omega} = \sqrt{k}$$

$$\gamma = K^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{m}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{c'}{c}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{Ng} = \frac{\sinh(\gamma_N)}{\sinh(\gamma_n)} \times V_n \quad n \text{ کل مقمره ها}$$

$$V_{mg} = \frac{\sinh(\gamma_m)}{\sinh(\gamma_n)} \times V_n$$

$$V_{(m-1)g} = \frac{\sinh(\gamma_{(m-1)})}{\sinh(\gamma_n)} \times V_n$$

## عوامل موثر غیر یکنواختی توزیع پتانسیل:

۱- وجود خازن‌های موازی ناشی از وجود بخش‌های فلزی کلاهدک و میل مقره

۲- تعداد مقره‌ها (هر چه کمتر باشد توزیع یکنواخت تری داریم).

۳- مشابه بودن مقره‌ها،

عوامل موثر در تعدیل غیر یکنواختی

۱- کاهش تعداد مقره‌ها

۲- افزایش ضریب  $m$

۳- عدم بکارگیری اجزاء فلزی

۴- مقره‌های با ظرفیت خازنی بالا نزدیک به قسمت برقدار باشند.

روشهای اجرایی:

۱- برای افزایش  $m$  می‌بایست فاصله مقره تا دکل بیشتر شود.

۲- استفاده از مقره با ظرفیت خازنی متفاوت

۳- استفاده از مقره‌های بلند و یکپارچه (مشابه مقره‌های کامپوزیت)

۴- استفاده از کلاهدک‌های غیر فلزی

۵- استفاده از رینگ یا حلقه فلزی

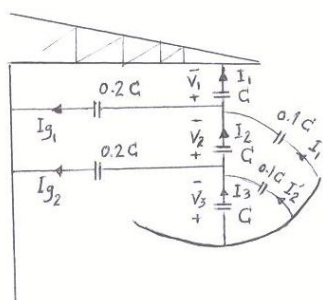
مثال:

تقسیم ولتاژ و راندمان یک زنجیره مقره با سه واحد را بیابید. اگر ظرفیت خازنی بین مقره با زمین 20%

ظرفیت خازنی هر واحد مقره و ظرفیت خازنی بین مقره و سیم رینگ 10% ظرفیت خازنی هر مقره می

باشد.

حل:



$$\begin{cases} I_1 = j\omega V_1 \\ I_{g1} = 0.2j\omega V_1 \\ I'_1 = (V_{ph} - V_1)0.1j\omega \end{cases} \Rightarrow I_2 = I_1 + I_{g1} - I'_1$$

$$I_2 = j\omega(1.3V_1 - 0.1V_{ph})$$

$$V_2 = \frac{1}{j\omega} I_2 \Rightarrow V_2 = 1.3V_1 - 0.1V_{ph}$$

$$I_{g2} = 0.2j\omega(V_1 + V_2) = 0.2j\omega(V_1 + 1.3V_1 - 0.1V_{ph})$$

$$I_{g2} = (2.3V_1 - 0.1V_{ph})j\omega 0.2c = (0.46V_1 - 0.02V_{ph})j\omega c$$

$$I'_2 = 0.1j\omega c V_3$$

$$I_3 = I_2 + I_{g2} - I'_2$$

$$I_3 = j\omega c(1.3V_1 - 0.1V_{ph}) + (0.46V_1 - 0.02V_{ph})j\omega c - 0.1j\omega c V_3$$

$$I_3 = j\omega c(1.76V_1 - 0.12V_{ph} - 0.1V_3)$$

$$V_3 = \frac{1.76V_1 - 0.12V_{ph}}{1.1}$$

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_{ph} \rightarrow \begin{cases} V_1 = 0.31V_{ph} \\ V_2 = 0.303V_{ph} \\ V_3 = 0.387V_{ph} \end{cases}$$

$$\eta = \frac{V_{ph}}{3 \times 0.387V_{ph}} \times 100 = 86.1\% \quad \text{تقریباً اندکی یکنواخت تر شد}$$

عوامل موثر بر تعیین تعداد مقره‌ها:

- ولتاژ سیستم
  - میزان تعداد صاعقه‌هایی که بر خط برخورد می‌کند و قدرت صاعقه
  - اضافه ولتاژهای کلیدزنی که این به توپولوژی و ساختار شبکه بستگی دارد.
  - بطور کلی تغییرات بارهای قابل توجه، خازن‌ها و راکتورها موجب اضافه ولتاژ می‌شوند.
  - عوامل محیطی و میزان آلودگی
- چرا که وجود آلودگی روی مقره جریان خزشی را افزایش می‌دهد لذا باید تعداد و نوع مقره افزایش یابد.
- ارتفاع خط از زمین - نوع و شکل مقره.



آزمایش مفره‌ها: به دو دسته الکتريکال و مکانیکال تقسیم‌بندی می‌شوند. مکانیکال: آزمایش‌های تنش‌های مکانیکی اعم از استقامت کششی، خمشی، تنشی، استقامت تحت فشار و استقامت در برابر ضربات مکانیکی می‌باشند.

الکتريکال: آزمایش ولتاژ ضربه یا صاعقه، کلیدزنی، آزمایش استقامت ولتاژ در فرکانس قدرت و برخی از آزمایشات در شرایط خاص (خشک- مرطوب- انواع آلودگی‌ها)

### بررسی تاثیر آلودگی در عایق‌های الکتريکی:

۱- آلودگی صنعتی: ناشی از وجود کارخانجات

۲- آلاینده‌های کویری: گرد و غبار و شن و طوفان‌ها

۳- آلاینده‌های ساحلی: مه و شبنم و رطوبت

۴- آلاینده‌های کشاورزی: کاه و گیاه خشک در اثر باد.

### انواع آلاینده‌ها از لحاظ چگونگی استقرار بر سطح عایق:

۱- آلودگی با چسبندگی کم مانند دوده

۲- آلودگی با چسبندگی زیاد مانند  $\text{SiO}_2$

### انواع آلاینده‌ها از لحاظ جنس:

۱- دوده: قطر ذره کمتر از یک میکرون

۲- گردوغبار محلی: قطر ذره آنها بین یک تا صد میکرون است.

۳- رطوبت یامر: قطر ذره آنها بین یک تا جهل میکرون است.

### طبقه‌بندی آلودگی:

۱- آلودگی خیلی سنگین: بر اساس آن طول مسیر خیزش را انتخاب می‌کنند  $32 \frac{mm}{kv}$

۲- آلودگی سنگین ←  $26 \frac{mm}{kv}$

۳- آلودگی سبک

۴- آلودگی ضعیف

## روش‌های جلوگیری از استقرار موثر آلودگی‌ها بر روی عایق:

- ۱- افزایش مسیر خیزش: یا با تعداد مقره‌های بیشتر و یا با استفاده از مقره‌های بزرگتر
- ۲- شستشوی دوره‌ای سطح مقره‌ها
- ۳- استفاده از مقره‌های کامپوزیت (سیلیکون را بر)
- ۴- استفاده از مقره بالعب نیمه هادی
- ۵- آغشته کردن مقره‌ها به گریستن سیلیکونی (مانع از دوام آب روی عایق می‌شود)

## عایق‌های مایع:

اهداف اصلی بکارگیری:

- ۱- به عنوان ماده تزریقی در داخل عایق‌های جامد برای پر کردن حفره‌ها یا منافذ (در سلولزها)
- ۲- به عنوان وسیله یا ابزاری برای انتقال حرارت به محیط خارج
- ۳- به عنوان عامل اصلی خاموش کننده جرقه در بریکرها

## شرایط بهره‌برداری از عایق‌های الکتریکی:

- ۱- عدم جذب رطوبت
- ۲- عدم وجود ناخالصی و آلودگی‌های ناشی از تولید گاز و یا مواد جامد
- ۳- عدم افزایش دما نسبت به دمای متعارفی
- ۴- حجم مناسب برای شرایط کاری ایده‌آل

## خواص الکتریکی عایق‌های مایع:

- ۱- استقامت الکتریکی مناسب ( $E_b$ )
- ۲- ضریب گذردهی بالا ( $\epsilon_r$ )
- ۳- قابلیت هدایت الکتریکی کم ( $\rho$ )

پارامترهای موثر در انتخاب نوع عایق مایع:

۱- خواص الکتریکی: ضریب گذردهی ،  $\tan \delta$  و ...

۲- خواص حرارتی ←  $T_{max}$  ، ویسکوزیته ... ، نقطه اشتعال

۳- خواص شیمیایی ← تمامی مسائل مربوط به پایداری شیمیایی

۴- وزن مخصوص روغن  $\rho$

۵- مسائل مربوط به نگهداری و انهدام پس از مصرف (مخصوص روغن های سمی)

۶- ضررهای جانی افراد (بعضی از روغن ها سرطان زا است)

### تصفیه عایق های مایع:

۱- عملیات حرارتی: یعنی گرم کردن روغن جهت تبخیر رطوبت

۲- عملیات تخلیه: یعنی ایجاد خلاء در محفظه روغن به منظور خروج بخار آب و حبابهای گاز موجود در آن

۳- عملیات فیلترینگ: به منظور جداکردن ناخالصی های موجود درون روغن (صاف کردن روغن)

### شکست های عایق های مایع:

نظریه های مختلف در ارتباط با عایق های مایع:

#### ۱- تئوری ذرات معلق :

وجود ذرات معلق ناشی از آلودگی های محیطی یا واکنش های شیمیایی که می توانند به شکل های رشته ای باریک ظاهر شوند و با توجه به شدت میدان الکتریکی به سمت میدان کشیده شوند و در نتیجه ناخالصی ها در الکترودی که شدت میدان الکتریکی بالاتری دارد جذب گردید و ... بای مش فاصله بین الکترودها استقامت الکتریکی عایق را کاهش و شکست الکتریکی به وقوع می پیوندد.

#### تئوری حباب و حفره:

عوامل ایجاد کننده حباب در داخل روغن:

۱- تجزیه شیمیایی عایق تحت تاثیر حرارت

۲- تجزیه شیمیایی عایق تحت تاثیر شدت میدان الکتریکی.

تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است تغییرات فشار روغن باعث تغییر ولتاژ شکست آن می‌گردد. این بدان معناست که حباب‌های تشکیل شده در داخل روغن می‌تواند باعث تشدید شکست آن شود. این حباب‌ها تحت تاثیر میدان الکتریکی به سمت میدان قویتر در بین دو الکترودها کشیده می‌شود پس تحت ولتاژ موجود در صورتیکه از استقامت الکتریکی حباب بیشتر باشد تخلیه الکتریکی موضعی در پی آن شکست الکتریکی عایق رخ می‌دهد.

### تئوری شکست حرارتی:

با توجه به مشاهدات تجربی گرم شدن موضعی عایق مایع ضمن تبخیر عایق و تخلیه ناقص با عبور جریان و کاهش استقامت الکتریکی عایق موجب شکست الکتریکی می‌شود.

### تئوری حجم فشرده:

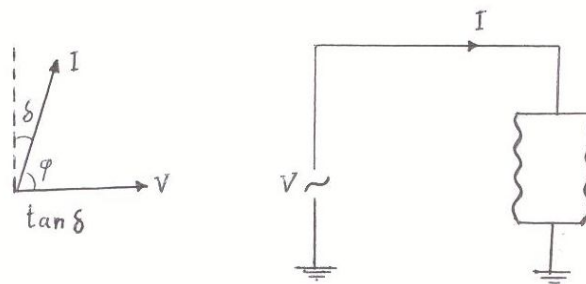
با توجه به این تئوری در میدان‌های الکتریکی غیر یکنواخت قسمتی از عایق مایع که در بین الکترودها قرار دارد در اثر میدان الکتریکی قویتر منجر به افزایش چگالی ناخالصی‌های موجود در محدوده مذکور می‌شود. با افزایش چگالی ناخالصی استقامت الکتریکی عایق کاهش یافته و در نتیجه شکست اتفاق می‌افتد.

### اندازه گیری خواص :

1- استقامت الکتریکی  $v_b$ :

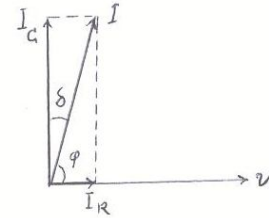
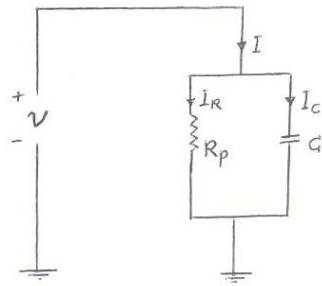
هم در DC هم در AC اعمال می‌شود.

آزمایش محاسبه ضریب تلفات عایقی :  $(\tan \delta)$



چنین ویژگی را باید با مدار معادل نشان داد، دو نوع مدار معادل برای عایق در نظر گرفته می‌شود.

### مدل موازی:



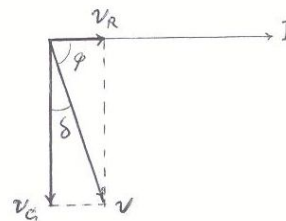
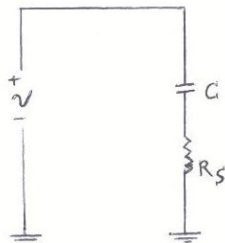
توان مصرفی مدار به صورت زیر است :

$$P = vI \cos \varphi = vI \sin \delta = vI \tan \delta \rightarrow \text{ضریب تلفات عایقی}$$

$\delta$  بسیار کم و در حدود چند درجه است لذا :  $\sin \delta = \delta^{Rad} = \tan \delta$

$$\Rightarrow \tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{v}{R_p}}{C \cdot \omega \cdot v} = \frac{1}{R_p \cdot C \cdot \omega}$$

### مدل سری:

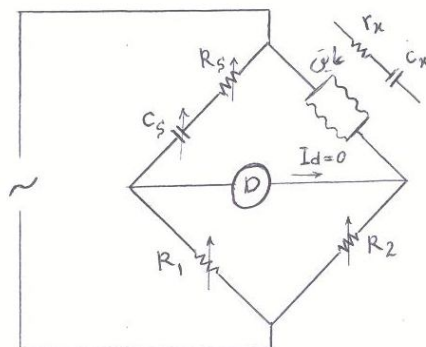


$$P = vI \cos \varphi = vI \sin \delta = vI \tan \delta$$

$$\tan \delta = \frac{v_R}{v_C} = \frac{R_s}{\frac{I}{C \cdot \omega}} \Rightarrow \tan \delta = C \cdot \omega \cdot R_s$$

الف - پل وین :

شکل کلی آن به صورت زیر است:



ولتاژ اعمالی کم و در حد چند ولت است ولی فرکانس بالا و در حدود  $100\text{ kHz}$  است.

پارامترها را آنقدر تغییر می دهیم تا  $I_d$  صفر شود. در کاربرد صنعتی به جای دتکتور یا آمپرتر از

اسیلوسکوپ استفاده می کنند و از طریق منحنی لیسازو ولتاژ دو نقطه را یکسان و هم فاز می کنند.

$$I_d = 0 \rightarrow \left( r_2 - \frac{j}{C_x \cdot \omega} \right) R_1 = R_2 \left( R_s - \frac{j}{C_2 \cdot \omega} \right)$$

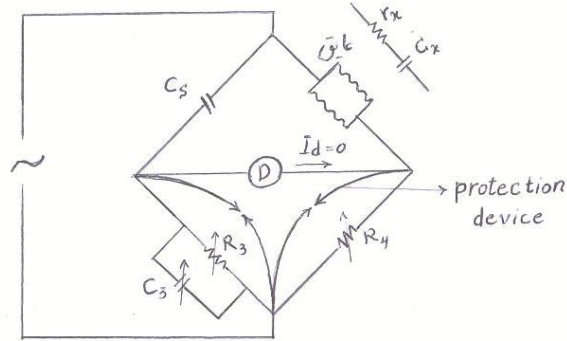
$$R_1 r_2 - j \frac{R_1}{C_x \cdot \omega} = R_2 R_s - j \frac{R_2}{C_s \cdot \omega}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_1 r_x = R_2 R_s \Rightarrow r_x = \frac{R_2 R_s}{R_1} \\ \frac{R_1}{C_x \cdot \omega} = \frac{R_2}{C_s \cdot \omega} \Rightarrow C_x = \frac{R_1 C_s}{R_2} \end{cases}$$

$$\tan \delta = r_x \cdot C_x \cdot \omega = \frac{R_2 R_s}{R_1} \cdot \frac{R_1 C_s}{R_2} \cdot \omega = R_s C_s \omega \quad \text{بنابراین :}$$

تمرین :  $R_p$  مدل موازی را به دست آورید.

ب- پل شرینگ :



در این آزمایش ولتاژ حدود  $10 \text{ kv}$  و فرکانس  $50 \text{ Hz}$  تا  $100 \text{ Hz}$  است.

سعی می شود که اکثر ولتاژ در نیمه بالایی روی عایق بیفتد. لذا نیمه پایینی ولتاژ کمتری دارد و بدای حفاظت آنها دو برفگیر قرار گرفته است که مانع از افزایش زیاد ولتاژ می شود.

$$Z_1 Z_2 = Z_3 Z_4$$

$$Z_3 = R_3 \parallel \frac{-j}{C_3 \omega} = \frac{\frac{-R_3 j}{C_3 \omega}}{R_3 - \frac{j}{C_3 \omega}} = \frac{R_3}{1 + j R_3 C_3 \omega}$$

$$Z_4 = r_x - \frac{j}{C_x \omega}$$

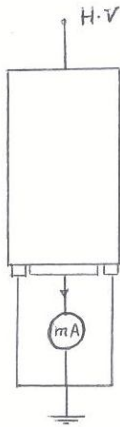
$$\frac{-j}{C_s \omega} \cdot R_4 = \left( \frac{R_3}{1 + j R_3 C_3 \omega} \right) \left( r_x - \frac{j}{C_x \omega} \right)$$

$$\begin{cases} C_x = \frac{R_3}{R_4} \cdot C_s \\ r_x = \frac{C_3}{C_s} \cdot R_4 \end{cases}$$

$$\tan \delta = r_x C_x \omega = \frac{C_3}{C_s} R_4 \frac{R_3}{R_4} C_s \omega \Rightarrow \tan \delta = R_3 C_3 \omega$$

تمرین :  $R_p$  مدل موازی را به دست آورید.

#### ۴- مقاومت عایق :

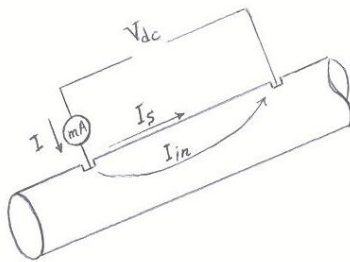


$$R_{in} = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A}$$

$$\rho = R_{in} \frac{A}{l}$$

#### ۵- مقاومت سطحی :

به روش زیر انجام می شود :



$$\begin{cases} I = I_{in} + I_S \\ I_{in} \ll I_S \end{cases} \Rightarrow I \approx I_S, \quad R_S = \frac{V}{I}$$

این  $R_S$  به دست آمده بر حسب طول مورد آزمایش

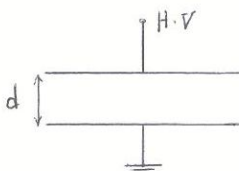
است که مقاومت سطحی کل را باید با نسبت طول به دست آورد.

#### بررسی میدان الکتریکی :

عامل اصلی تخریب عایق شدت میدان الکتریکی بسیار زیاد است لذا باید انواع میدان را بررسی کرده و به

دلیل گستردگی مطلب به تحلیل چند نمونه از میدان های الکتریکی کلاسیک می پردازیم.

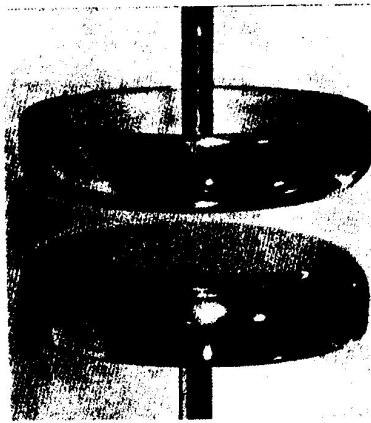
۱- بین دو صفحه موازی :



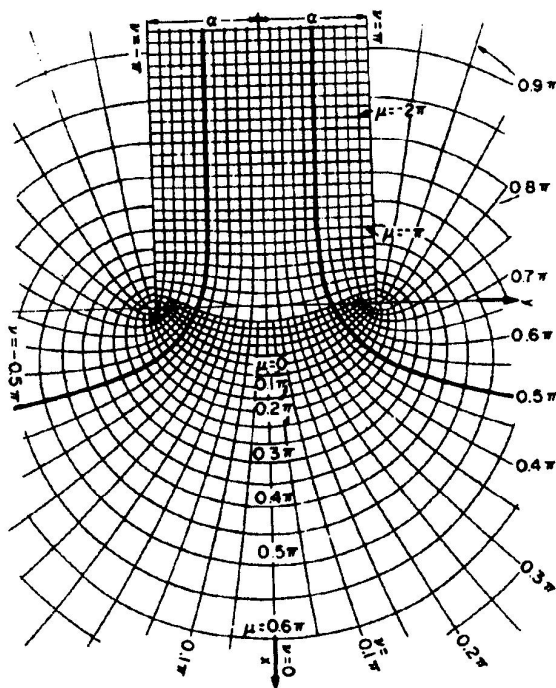
میدان یکنواخت است . شدت میدان  $\mathcal{E} = \frac{v}{d}$  می باشد.



در عمل در نقاط تیز انتهای صفحات شدت میدان چگالی بیشتری دارد که برای جلوگیری از آن به انتهای صفحات یک خم داده می شود تا میدان الکتریکی یکنواختی خود را از دست ندهد.

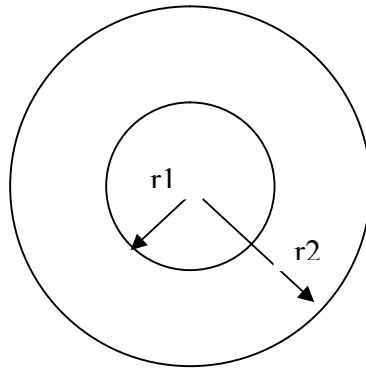


دو الکترود صفحه‌ای با خم روکوفسکی



خطوط میدان و هم‌پتانسیل دو الکترود صفحه‌ای با خم روکوفسکی

۲- دو کره هم مرکز :



برای یک کره فلزی دارای بار  $q$  داریم :

$$E = \frac{D}{\epsilon}$$

$$E_{\max} = \frac{q}{4\pi\epsilon r_0^2}$$

$$D = \frac{q}{4\pi r^2} \Rightarrow E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$$

برای دو کره فلزی داریم :

$$\Delta v = \int E \cdot dr$$

$$\Delta v = v_1 - v_2 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \cdot dr = \left[ \frac{-q}{4\pi\epsilon r} \right]_{r_1}^{r_2} = \frac{-q}{4\pi\epsilon r_2} + \frac{q}{4\pi\epsilon r_1}$$

$$\Rightarrow \Delta v = \frac{q(r_2 - r_1)}{4\pi\epsilon r_1 r_2} *$$

$$C_{12} = \frac{q}{\Delta v} = \frac{q}{\frac{q(r_2 - r_1)}{4\pi\epsilon r_1 r_2}} = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \xrightarrow{*} q = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2 \Delta v}{(r_2 - r_1)}$$

$$\Rightarrow E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2 \Delta v}{(r_2 - r_1) 4\pi\epsilon r^2} = \frac{r_1 r_2 \Delta v}{r^2 (r_2 - r_1)}$$

$r$  فاصله مورد نظر از مرکز می باشد.

$$E_{\max} = \frac{q}{4\pi\epsilon r_1^2} = \frac{4\pi\epsilon r_1 r_2 \Delta v / (r_2 - r_1)}{4\pi\epsilon r_1^2} = \frac{r_2 \Delta v}{r_1 (r_2 - r_1)}$$

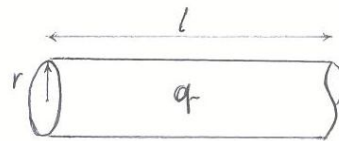
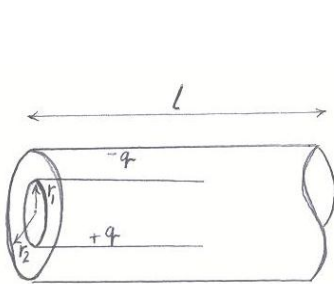
$$E_{\max} = \frac{r_2 \Delta v}{r_1 (r_2 - r_1)}$$

با توجه به مفهوم سطح گاوسی میدان فقط در فاصله  $r_1$  تا  $r_2$  وجود دارد .

مسلم است که همواره  $E_{\max}$  را بر روی کره کوچک داریم حال می خواهیم  $r_1$  ای را به دست آوریم که به ازای آن  $E_{\max}$  کمترین مقدار خود را داشته باشد. لذا داریم :

$$\frac{dE_{\max}}{dr_1} = 0 \rightarrow \frac{dE_{\max}}{dr_1} = \frac{0 - (r_2 - 2r_1)r_2\Delta v}{r_1^2(r_2 - r_1)^2} = 0 \Rightarrow r_1 = \frac{r_2}{2} \rightarrow E_{\max}|_{\min} = \frac{4\Delta v}{r_2}$$

۳- بین دو استوانه هم محور :



q: بار واحد طول

Q: کل بار در طول l

$$D = \frac{q}{2\pi r l}$$

$$Q = q.l$$

$$E = \frac{D}{\epsilon} = \frac{Q}{2\pi r \epsilon l} = \frac{q}{2\pi \epsilon r} \Rightarrow E = \frac{q}{2\pi \epsilon r}$$

$$\Delta v = v_1 - v_2 = \int E.dr$$

$$\Delta v = v_1 - v_2 = \int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{2\pi \epsilon r}.dr = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln r \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)$$

$$\Delta v = v_1 - v_2 = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) \rightarrow q = \frac{2\pi \epsilon \Delta v}{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

$$E = \frac{\frac{2\pi \epsilon \Delta v}{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}}{2\pi \epsilon r} \Rightarrow E = \frac{\Delta v}{r \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)}$$

$$E_{\max} = \frac{q}{2\pi\epsilon r_1} = \frac{2\pi\epsilon\Delta v}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \Rightarrow E_{\max} = \frac{\Delta v}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

کمترین مقدار  $E_{\max}$  را به دست می آوریم :

$$\frac{dE_{\max}}{dr_1} = 0 \rightarrow \frac{0 - \left[ \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + r_1 \left( \frac{-r_2}{r_1^2} \right) \right] \times \Delta v}{r_1^2 \left[ \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right]^2} = 0$$

$$\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = 1 \rightarrow \frac{r_2}{r_1} = e \rightarrow r_1 = \frac{r_2}{e}$$

**مثال :**

دو استوانه هم محور به شعاع های ۲ و ۵ cm تحت اختلاف پتانسیل 10 kv قرار دارند. مطلوبست :

۱- محاسبه شدت میدان الکتریکی ماکزیمم

۲- استقامت ولتاژ عایق بین دو استوانه در چه حدی باشد که هیچ گونه شکستی برای عایق رخ ندهد.

۳- شدت میدان الکتریکی می نیمم بر روی استوانه کوچکتر را محاسبه نمایید.

( $r_1$  را می توان تغییر داد)

**حل :**

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon r l} \quad \Delta v = \frac{q}{2\pi\epsilon l} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$E = \frac{\Delta v}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad E_{\max} = \frac{\Delta v}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad E_{\min} = \frac{\Delta v}{r_2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$E_{\max} = \frac{10 \times 10^3}{2 \ln\left(\frac{5}{2}\right)} \left(\frac{v}{cm}\right) = 5.45 \left(\frac{kv}{cm}\right) \quad (1)$$

(2) حد اقل مقدار استقامت الکتریکی عایق باید برابر  $E_{\max}$  حالت قبل باشد .

$$\frac{d E_{\max}}{d r_1} = 0 \rightarrow \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = 1 \quad (3)$$

$$r_1 = \frac{r_2}{e} \rightarrow r_1 = \frac{5}{e} = 1.839 \text{ cm}$$

$$E_{\max}|_{\min} = \frac{10}{1.839 \ln\left(\frac{5}{1.839}\right)} = 5.436 \frac{kv}{cm}$$

**مثال :**

ولتاژ شکست هوا در شرائط متعارفی  $26.6 \frac{kv}{cm}$  است و به خاطر وجود گرد و غبار و آلاینده ها این مقدار تا

$10 \frac{kv}{cm}$  نیز کاهش می یابد. با این شرائط چه کره فلزی ای ( با چه شعاعی ) می توان انتخاب نمود در صورتی

که اختلاف پتانسیل بین دو گوی  $1000 \text{ kv}$  باشد .

**حل:**

برای دو کره فلزی هم مرکز رابطه  $E_{\max}|_{\min}$  شده را به دست می آوریم از آن استفاده می کنیم تا مقدار  $r_1$  به

دست آید و  $r_2 = 2r_1$  نیز می باشد.

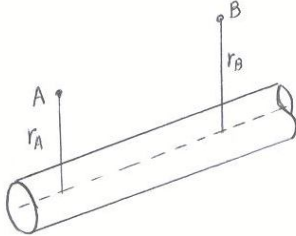
$$E_{\max}|_{\min} = 10 \frac{kv}{cm} \quad \Delta v = 1000 \text{ kv}$$

$$E_{\max}|_{\min} = \frac{4\Delta v}{r_2} \rightarrow r_2 = \frac{4\Delta v}{E} = \frac{4 \times 1000}{10} = 400 \text{ cm} = 4 \text{ m}$$

$$r_1 = \frac{r_2}{2} = 2 \text{ m}$$

### بررسی اختلاف پتانسیل :

الف - بین دو نقطه در پیرامون یک استوانه :



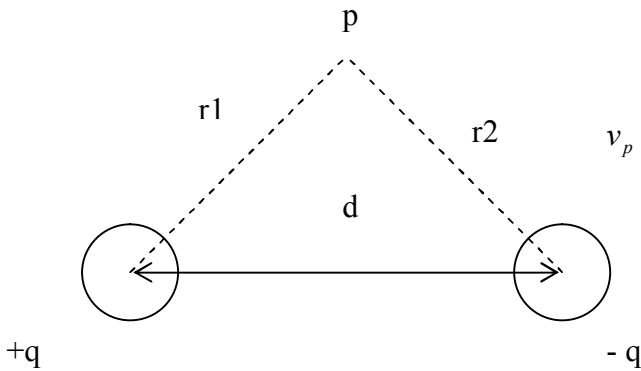
$$\Delta v = v_{AB} = v_A - v_B = \int_{r_A}^{r_B} E \cdot dr = \int_{r_A}^{r_B} \frac{q}{2\pi\epsilon r} \cdot dr$$

$$\Delta v = v_A - v_B = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \ln\left(\frac{r_B}{r_A}\right)$$

$$\text{if } r_B = r_0 \rightarrow \Delta v = v_{AB} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r_0}{r_A}\right) < 0$$

$$v_A - v_B < 0 \Rightarrow v_A < v_B$$

ب - اختلاف پتانسیل بین دو استوانه :

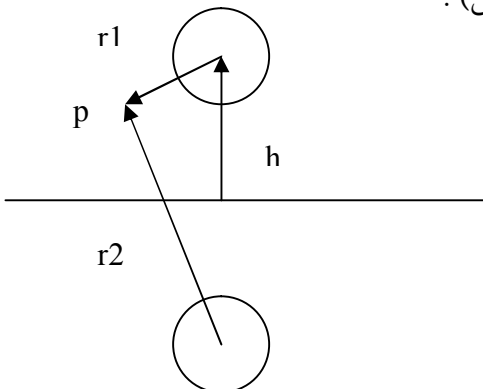


$$v_p = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right) - \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r_0}{r_2}\right) = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

ب - اختلاف پتانسیل دو کره هم مرکز :

$$\Delta v = v_1 - v_2 = \frac{q(r_2 - r_1)}{4\pi\epsilon r_1 r_2} \quad r_2 > r_1$$

ج - اختلاف پتانسیل بین یک استوانه و یک صفحه (زمین) :



حالات مختلف :

با فرض اینکه نقطه p روی استوانه باشد.

$$\text{if } \begin{cases} r_1 = r_0 \\ r_2 = 2h \end{cases} \quad v_p = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$\text{if } r_1 = r_2 = h \rightarrow v_p = 0$$

ضریب تعدیل میدان الکتریکی :

$$\eta = \frac{E_{ave}}{E_{max}}$$

این بهترین حالت است  $\leftarrow \eta = 1$   $\Rightarrow$  در میدان یکنواخت

$\Rightarrow$  در حالت غیر یکنواخت و نا مطلوب  $\eta < 1$

محاسبه ضریب تعدیل برای دو کره فلزی هم مرکز :

$$E_{ave} = \frac{v}{r_2 - r_1} \quad E_{max} = \frac{r_2 v}{r_1(r_2 - r_1)} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{E_{ave}}{E_{max}} = \frac{r_1}{r_2}$$

محاسبه ضریب تعدیل برای دو استوانه مجاور :

$$\eta = \frac{2r \ln\left(\frac{d}{r}\right)}{d}$$

$$E_1 = \frac{q}{2\pi\epsilon r_1} \quad E_2 = \frac{-q}{2\pi\epsilon r_2}$$

$$E = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad E_{max} = \frac{-q}{2\pi\epsilon r}$$

$$E_{ave} = \frac{\Delta v}{d} = \frac{v_1 - v_2}{d} = \frac{2 \times \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{d}{r}\right)}{d}$$

$$\eta = \frac{2r \ln\left(\frac{d}{r}\right)}{d}$$

محاسبه ضریب تعدیل دو کره مجاور هم :

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$$

$$v = \frac{q(r_2 - r_1)}{4\pi\epsilon r_1 r_2} \quad \text{if} \begin{cases} r_2 = d \\ r_1 = r \end{cases} \quad \& \quad d \gg r$$

$$\Delta v_{\max} = v_1 - v_2 = \frac{2qd}{4\pi\epsilon rd} = \frac{2q}{4\pi\epsilon r}$$

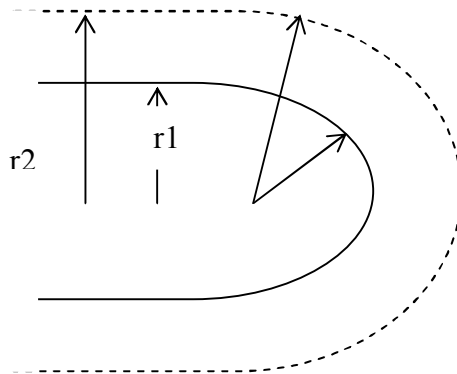
$$E_{ave} = \frac{\Delta v}{d} = \frac{2q}{4\pi\epsilon rd}$$

$$\eta = \frac{\frac{2q}{4\pi\epsilon rd}}{\frac{q}{4\pi\epsilon r^2}} = \frac{2r}{d}$$

برای دو استوانه هم محور:

$$E_{ave} = \frac{v}{r_2 - r_1} \quad E_{\max} = \frac{\Delta v}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{r_2 - r_1}$$

در پستها باس بارهای لوله ای داریم که برای جلوگیری از ایجاد کرنای شدید آنها را به صورت U می سازند.



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

$$\text{if } R_2 \gg R_1 \Rightarrow v_2 = 0 \quad \frac{v_1}{r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{v_1}{R_1} \Rightarrow R_1 = r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$



$$\Delta v = Er \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$\Delta v = E_{\max} r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

$$\frac{d E_{\max}}{d r_1} = 0 \rightarrow r_1 = \frac{r_2}{e} \Rightarrow E_{\max} = \frac{2.71 \Delta v}{r_2}$$

$$E_{\max} = \frac{\Delta v}{r_1 \left(1 - \frac{r_2}{r_1}\right)}$$

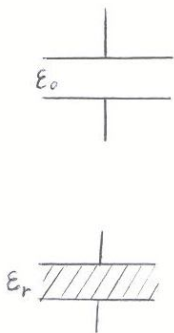
$$\frac{d E_{\max}}{d r_1} = 0 \rightarrow r_1 = \frac{r_2}{2} \Rightarrow E_{\max} = \frac{4 \Delta v}{r_2}$$

حالت بهینه را با فرضهای قبلی به دست می آوریم :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2} \quad \frac{r_2}{r_1} = e \Rightarrow \frac{\Delta v}{r_1} = \frac{\Delta v}{\frac{1}{2} R_1} \Rightarrow r_1 = \frac{1}{2} R_1 \Rightarrow R_1 = 2r_1$$

یعنی شعاع کره دو برابر شعاع استوانه باشد تا میدان الکتریکی می نیمم باشد.

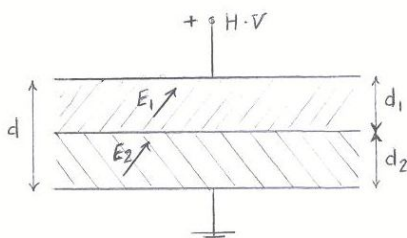
اگر ولتاژ ثابت باشد  $E = \frac{v}{d}$  ثابت است در اینصورت



$$c_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad c = \epsilon_r \epsilon_0 \quad c = \frac{q}{v}$$

$$c_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad \begin{cases} E = E_0 \\ C = \epsilon_r C_0 \\ q = \epsilon_r q_0 \\ D = \epsilon_r D_0 \end{cases} \quad \begin{cases} d = d_0 \\ v = v_0 \end{cases}$$

میدان الکتریکی در عایق های چند گانه (مرکب) :



$$D_1 = D_2 \rightarrow \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2 \Rightarrow \frac{E_2}{E_1} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1 \quad \text{if } \epsilon_1 \ll \epsilon_2 \rightarrow E_2 \downarrow \downarrow$$

$$v_1 + v_2 = v \quad E_1 d_1 + E_2 d_2 = v$$

$$E_1 d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot E_1 d_2 = v \quad \Rightarrow \quad E_1 = \frac{v}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot d_2}$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{v}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot d_2} \quad \Rightarrow \quad E_2 = \frac{v}{d_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot d_1}$$

$$\text{if } \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} E_1 = \frac{v}{d_1 + d_2} \\ E_2 = \frac{v}{d_1 + d_2} \end{cases} \rightarrow E_1 = E_2 = \frac{v}{d} \Rightarrow \begin{cases} v_1 = \frac{d_1}{d_1 + d_2} \cdot v \\ v_2 = \frac{d_2}{d_1 + d_2} \cdot v \end{cases}$$

نکات :

$$\text{if } \varepsilon_1 < \varepsilon_2 \rightarrow \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} < 1 \rightarrow E_{1_{comp.insulation}} > E_1$$

$$\text{if } \varepsilon_1 > \varepsilon_2 \rightarrow \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} > 1 \rightarrow E_{1_{comp.insulation}} < E_1$$

مثال :

در بین دو صفحه با فاصله ۵ cm دو عایق با ضریب نفوذ  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  و با نسبت  $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 0.5$  قرار دارند . در دو

حالت زیر کدام عایق قدرت عایقی کمتری دارد؟

$$d_1 = 0.5 \text{ cm} \quad , \quad d_2 = 4 \text{ cm} \quad (1)$$

$$d_1 = 2.5 \text{ cm} \quad , \quad d_2 = 2 \text{ cm} \quad (2)$$

حل :

$$1) \quad E_1 = \frac{v}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot d_2} = \frac{v}{0.5 + 0.5 \times 4.5} = 0.36v = \frac{v}{2.75}$$

$$E_2 = \frac{v}{d_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot d_1} = \frac{v}{4.5 + 2 \times 0.5} = \frac{v}{5.5}$$

$$2) \quad E_1 = \frac{v}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot d_2} = \frac{v}{2.5 + 0.5 \times 2.5} = 0.26v = \frac{v}{3.75}$$

$$E_2 = \frac{v}{d_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot d_1} = \frac{v}{2.5 + 2 \times 2.5} = \frac{v}{7.5}$$

$$E_1(2) \langle E_1(1) \rangle$$

یعنی در حالت اول باید عایق قویتری نسبت به حالت دوم انتخاب کنیم  $E_2(1) \rangle E_2(2)$

ممکن است این مسئله به این صورت مطرح شود که یک عایق سه قسمتی که مشخصات هر سه نوع عایق را در اختیار داریم با چه ضخامتی از هر عایق برای یک کاربرد خاص مناسب است.

به دست آوردن  $\varepsilon_{eq}$  معادل :

$$D_1 = \varepsilon_1 E_1 \quad , \quad D_2 = \varepsilon_2 E_2$$

$$D = \varepsilon E \quad \quad D = D_1 = D_2$$

$$\varepsilon E = \varepsilon_1 E_1 \quad \quad \varepsilon E = \varepsilon_1 \cdot \frac{v}{d_1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot d_2} \quad \rightarrow \times \frac{1}{\frac{1}{d}} \quad \Rightarrow$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 \frac{1}{\frac{d_1}{d} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d_2}{d}} = \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \right) + \frac{d_2}{d} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} \right)} = \frac{1}{\frac{v_1}{v} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} \right) + \frac{v_2}{v} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} \right)}$$

$$v_{out} = \frac{1}{c\omega} |I| = \frac{1}{c\omega} \cdot \frac{|v_2|}{\sqrt{R^2 + \left( c\omega - \frac{1}{c\omega} \right)^2}} = \frac{v_2}{Rc\omega} \quad \Rightarrow |v_{out}| \gg |v_2|$$

تمرین : بررسی شود که  $\varepsilon$  نسبت به  $\varepsilon_2, \varepsilon_1$  کم است یا زیاد ؟

انواع شکل موج ولتاژ در سیستم قدرت:

۱- ولتاژ سیستم: ولتاژ فشار قوی متناوب HVAC

۲- ولتاژ فشار قوی مستقیم HVDC

۳- انواع اضافه ولتاژها: (Over Voltage)

a - اضافه ولتاژ کلید زنی یا سوئیچینگ Swiching Over Voltage

b - اضافه ولتاژ صاعقه Lighting Over Voltage

۱- ولتاژ سیستم در ایران:  $380v / 20/11/33kv / 63kv / 132kv / 230kv / 400kv$

البته سطح ولتاژهای دیگری هم وجود دارد (برای مثال 6.3 در نیروگاه) که اینها استاندارد نمی‌باشند و سطوح استاندارد در بالا ذکر شدند. در ولتاژهای بسیار بالا هم تجهیزات خاص برای مثال بوشینگ، مقره و ... وجود دارد که این تجهیزات بعد از مرحله ساخت باید تست شوند چون در این ولتاژ باید کار کنند بنابراین در کارخانه باید با این سطوح ولتاژ تولید شود.

۲- HVDC: در خطوط انتقال با ولتاژهای بالا بکار می‌رود چرا که در سیستم DC دیگر راکتانس دیده نمی‌شود. خطوط دو سیمه است، برای کاپلاژ در شبکه بسیار مناسب است برای مسافت طولانی مناسب است.

برق dc در برخی از تجهیزات و کارخانه‌ها یا نیروگاه هم برق dc دارند.

$24v / 48v / 110v / 220v / \dots$

۳- Over Voltage: (کلیدزنی) قطع و وصل بارهای سلفی یا خازنی با اضافه ولتاژ همراه است یعنی اکثر سیستم‌ها که خاصیت اهمی سلفی دارند موقع کلید زنی با اضافه ولتاژ مواجهیم که مقدار این اضافه ولتاژ به توپولوژی شبکه بستگی دارد.

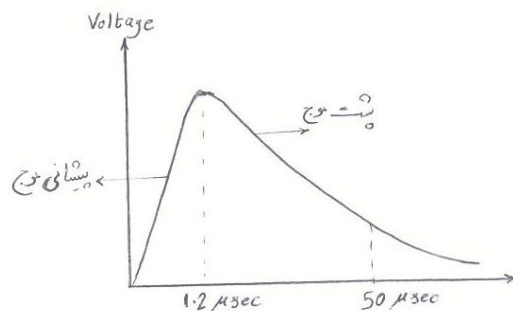
اضافه ولتاژها در اثر قطع ناگهانی خطوط انتقال یا تجهیزات شبکه بوجود می‌آید. میزان این ولتاژ تابعی از پارامترهای سیستم، نوع شبکه، وضعیت نیروگاهها و خطوط انتقال می‌باشد.

(همچنین به قدرت قطع کلیدها با اضافه ولتاژهای کلیدزنی در اثر عملکرد کلیدها و یا با مانیتورهای همچون بردار کردن خطوط انتقال یا قطع آنها، قطع و وصل اتصال کوتاهها، قطع و وصل بارهای سلفی و خازنی بوجوئد می‌آیند)

تداوم اینها  $2500 \mu s$  می‌باشد و بعد از آن میرا شده‌اند مقادیر اضافه ولتاژ زیاد است ولی کمتر از خود سطح ولتاژ خط است. ولی همین اضافه ولتاژ باید در طراحی عایق در نظر گرفته شود.

## اضافه ولتاژ صاعقه:

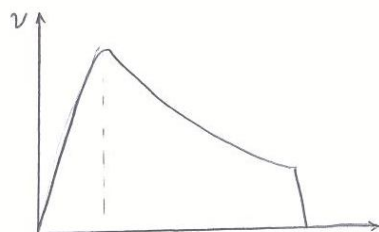
نشستن صاعقه بر روی خط انتقال جریان زیادی در حد چندین کیلوآمپر را در خط ایجاد می کند که این جریان فوق العاده زیاد، اضافه ولتاژ قابل توجهی ایجاد می کند. دامنه ولتاژ صاعقه زیاد است ولی تداوم آن کم است.



شکل آن به صورت روبرو است :

این زمان  $50 \mu sec$  برای انهدام عایق های ضعیف کافی است. این از نظر تست از جمله تست های مخرب است و از نظر تست فقط یکبار انجام شود چرا که عمر عایق را کم می کند. از نظر استاندارد اضافه ولتاژ ضربه به

برش خورده انجام شود

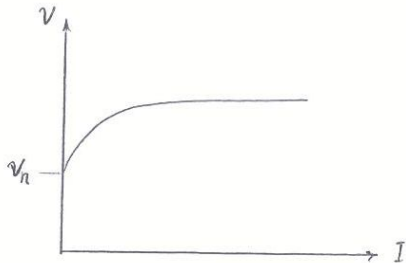


بصورت روبرو:

که این مخرب تر است.

برخورد صاعقه به خطوط انتقال نیرو می تواند باعث ایجاد جریانی تا بیش از یکصد کیلو آمپر شود که این جریان می تواند باعث اضافه ولتاژ بین فازها و یا فاز با زمین گردد. در خطوط میزان اینگونه اضافه ولتاژها و احتمال بروز جرقه در دو سر مقره ها به عواملی همچون ارتفاع دکل، تعداد سیم محافظ، تعداد مقره در هر زنجیره مقره، مقاومت زمین پای برج و جریان صاعقه بستگی دارد. در اثر برخورد صاعقه به برج جریان صاعقه از طریق امپدانس برجها به زمین منتقل می گردد. (کلیه دکل های انتقال به نحوی زمین میشوند).

صاعقه‌هایی که به خطوط نزدیک می‌شوند معمولاً روی سیم گارد می‌نشینند و از طریق دکل تخلیه می‌شود ولی اگر به خود فاز برخورد به شکل موج بسیار به سمت پست می‌رود و در آنها از طریق برقگیر زمین می‌شود.

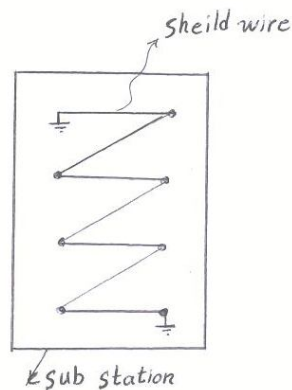


برقگیر مشخصه غیر خطی به صورت روبرو دارد.

مقاوت های غیر خطی با مشخصه روبرو نیز

در حفاظت رله ها بسیار پر کاربرد است.

این حفاظت مربوط به خط است. و در مورد پست گنتری قرار دارد که دو طرف آن دو میله بلند به نام Rod قرار دارد تا صاعقه به آن برخورد کند. روش دیگر روش Sheild Wire است که روی کل پست سیم بندی می‌شود و مانند چتری پست را حفاظت می‌کند.



### اضافه ولتاژهای موقت :

به علت ظرفیت خازنی خطوط با کمتر شدن بار و مصرف مقداری اضافه ولتاژ ایجاد می‌شود (پدیده فرانتی) این را اضافه ولتاژ موقت می‌نامند که مقدار آن کمتر است و شکل موج سینوسی است. این اضافه ولتاژها در اثر عوامل مختلفی نظیر اتصال کوتاه، تغییرات ناگهانی بار، باز شدن برخی خطوط و پدیده فرانتی می‌تواند اتفاق بیفتد. این نوع اضافه ولتاژها شکل نوسانی دارند و در مقایسه با سایر اضافه

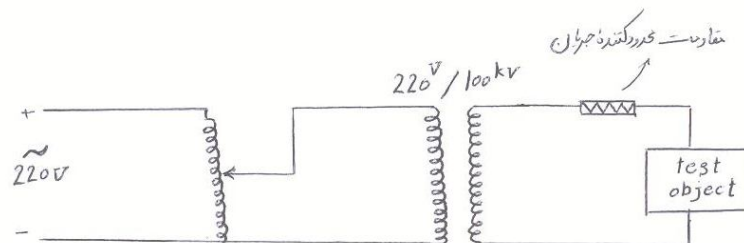
ولتاژها تداوم بیشتری دارند. به عنوان مثال یک اتصال تک فاز می‌تواند اضافه ولتاژی را در فاز سالم بوجود آورد. و یا وصل مجدد ترانس قدرت نمیز می‌تواند اینگونه اضافه ولتاژها را ایجاد کند.

### پدیده فرانتی:

خطوط انتقال بدلیل ظرفیت خازنی خط در اثر کاهش ولتاژ با اضافه ولتاژ همراه است این پدیده را فرانتی گویند.

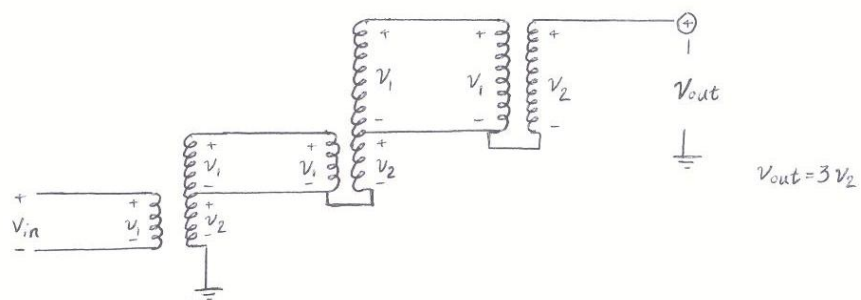
### تولید ولتاژهای فشار قوی متناوب:

۱- استفاده از ترانسفورماتورهای افزایشنده :

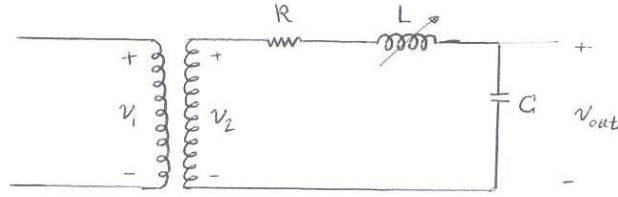


این ترانسفورماتورها در توان های بسیار کم اند و فقط جهت افزایش ولتاژ بکار می روند

۲- استفاده از ترانسفورماتورهای چند طبقه: (cascade)



۳- استفاده از ترانسفورماتورهای رزناس:



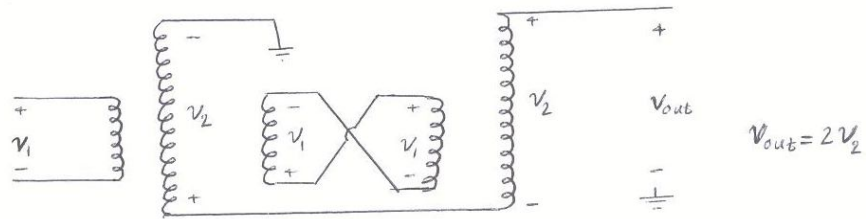
سلف متغیر نزدیک حالت ایده ال بدون تلف است.

*Test object* خاصیت خازنی دارد که در شکل با  $C$  نشان دادیم و  $C$  در حد پیکو نانو است.

$$v_{out} = \frac{1}{c\omega} |I| = \frac{1}{c\omega} \cdot \frac{|v_2|}{\sqrt{R^2 + \left(c\omega - \frac{1}{c\omega}\right)^2}} = \frac{v_2}{Rc\omega} \Rightarrow |v_{out}| \gg |v_2|$$

یعنی سلف متغیر تا رسیدن به رزونانس باید تغییر داد.

۴- ترانسفورماتور مخصوص:

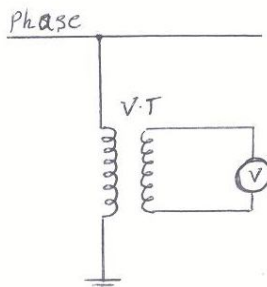


روشهای اندازه گیری ولتاژ فشار قوی:

۱- ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ:

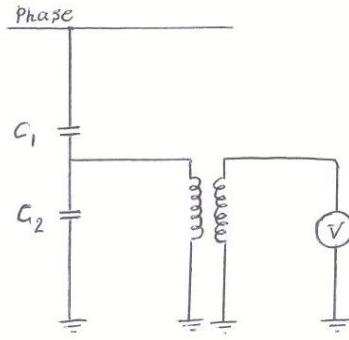
*Voltage Transformer (V.T)*

*Potential Transformer (P.T)*

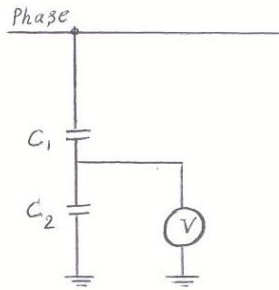


۲- ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ خازنی: (*C.V.T*)

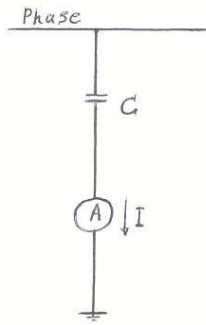




۲- استفاده از مقسم خازنی :



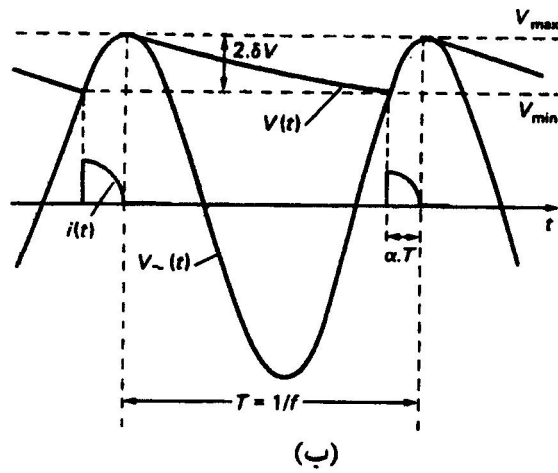
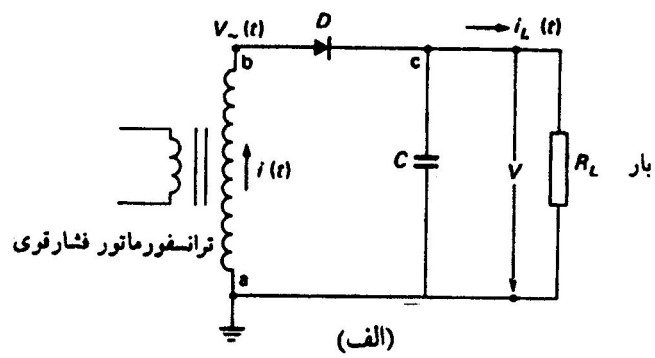
۳- استفاده از سری و آمپر متر :



$$v = \frac{1}{c \cdot \omega} \cdot I$$

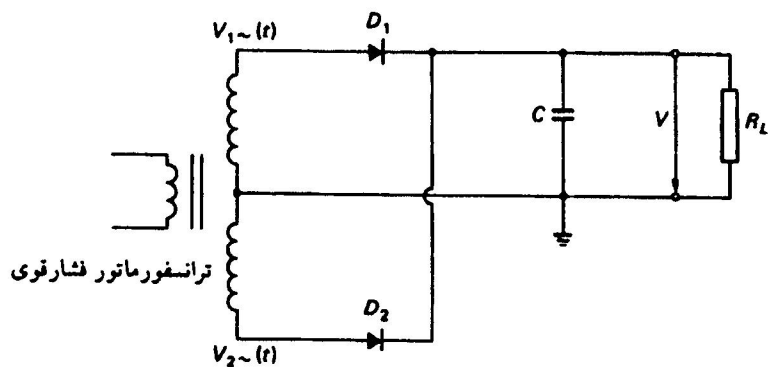
تولید ولتاژ فشار قوی مستقیم :

۱- یکسو سازی نیم موج :



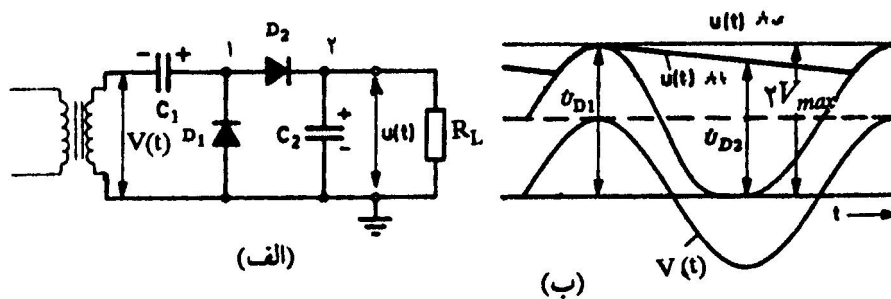
یکسوکننده تک فاز نیم موج

۲- یکسو سازی تمام موج :

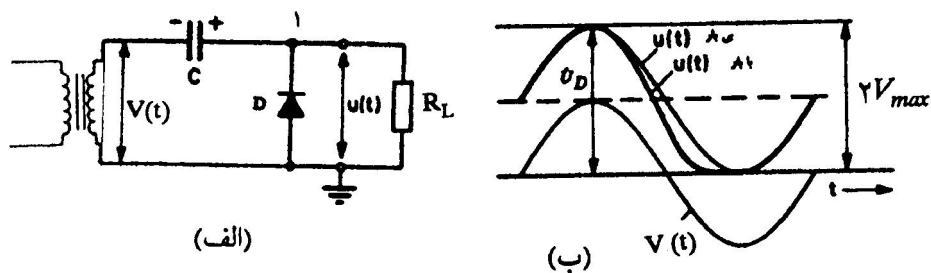


مدار یکسوکننده تمام موج با خازن یکسوساز

۳- یکسو ساز ویلارد Villard

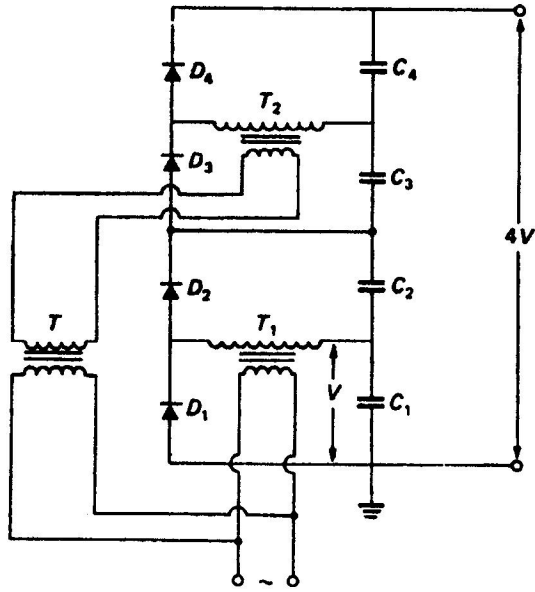


مدار ویلارد و نحوه تغییرات ولتاژ نقاط ۱ و ۲ و ترانسفورماتور



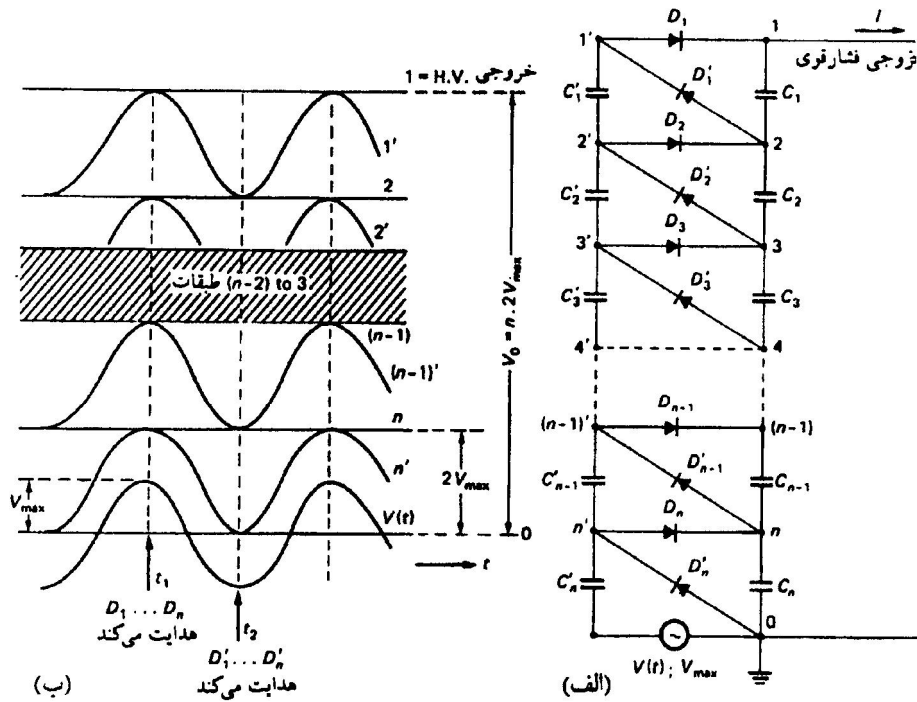
مدار ویلارد و تغییرات ولتاژ نقاط مشخص

۴- مدار آلیبون Alibone



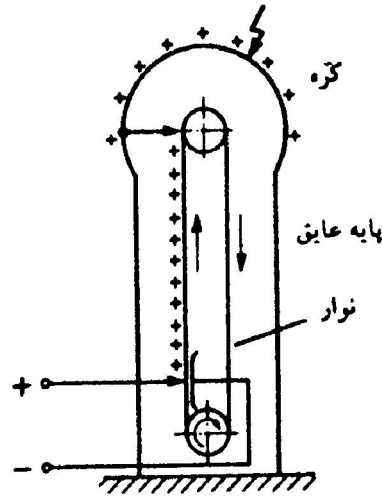
۴- مدار آلیون برای تولید ولتاژ فشار قوی DC :

۴- مدار چند برابر کننده والتن



شکل (۸-۸): مدار چند برابر کننده والتن و تغییرات ولتاژ نقاط مختلف

۵- مدار الکترو استاتیکی :



ساختمان ژنراتور الکترواستاتیک واندوگراف

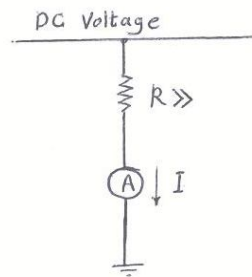
$$\rho_s = \frac{dq}{bdx} \rightarrow dq = b\rho_s dx$$

$$F = E \cdot q \rightarrow df = E \cdot dq$$

$$F = \int E \cdot dq = \int_0^l E \cdot b\rho_s dx = \rho_s b \int_0^l E dx = \rho_s b \cdot v_{dc}$$

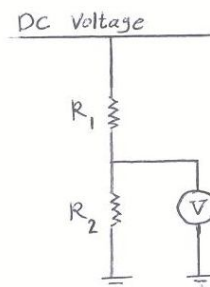
### روش اندازه گیری ولتاژ DC

۱- استفاده از مقاومت و آمپر متر سری :



$$v = RI$$

۲- استفاده از مقسم مقاومتی :



$$v = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_{dc}$$

$$v_{dc} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot v$$

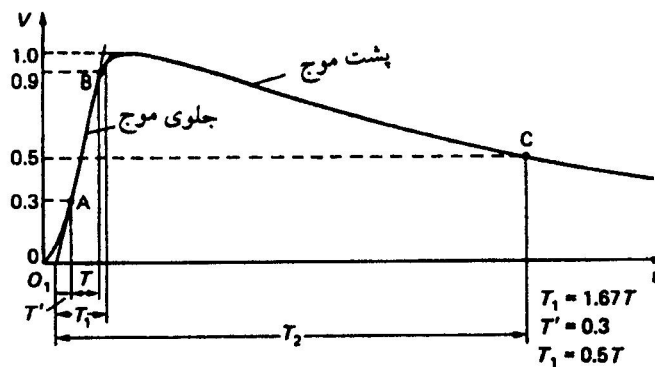
۳- استفاده از ولت متر الکترو استاتیکی:

۴- استفاده از گوی های فلزی:

با تغییر فاصله  $d$  به حالتی می رسیم که بین گوی ها جرقه زده شود. در این حالت از روی نمودار  $v_{dc} = f(d)$  می توان ولتاژ را بدست آورد.

### اضافه ولتاژ صاعقه:

در اصل جریان است ولی بر حسب امپدانس مشخصه سیستم به ولتاژ تبدیل می شود.



شکل موج ولتاژ ضربه

پیشانی موج :  $T_f = 1.2 \mu \text{ sec} \pm 30\%$

زمان پیشانی موج :

یک خط راست از 90% و 30% رسم میکنیم تا خط افقی 100% را در زمان A قطع کند. امتداد خط نیز

$$T_f = (A - B) \pm 30\% \text{ در این صورت}$$

پشت موج :

زمان 50% موج را C مینامیم و داریم :

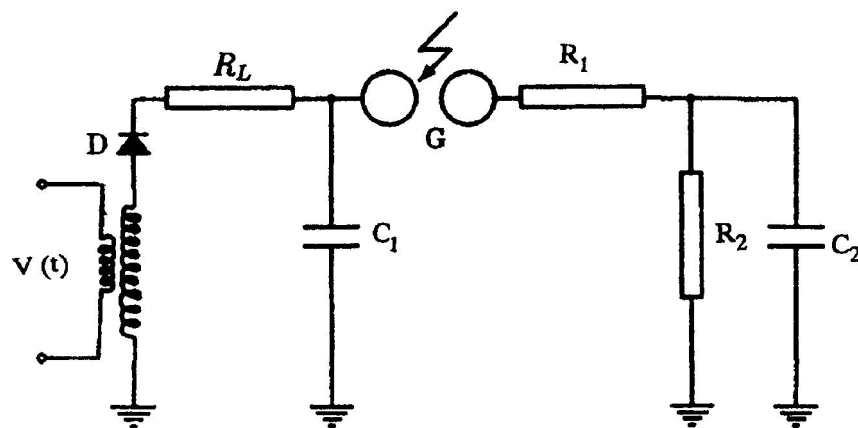
$$T_f = \text{زمان پشت موج} = C - B = 50 \mu\text{sec} \pm 20\%$$

استاندارد فوق بر اساس IEC می باشد.  $1.2 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}$

استاندارد BS این را  $1 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}$  تعریف می کند.

استاندارد آمریکا این را  $1.5 \mu\text{s}/40 \mu\text{s}$  تعریف می کند.

تولید ولتاژ ضربه صاعقه:

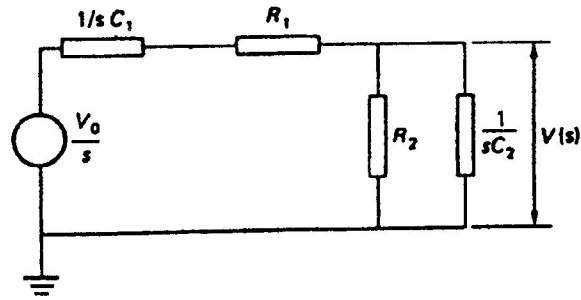


مدار معادل مولد ولتاژ ضربه

$$R_1 \ll R_2 \quad \& \quad C_1 \gg C_2$$

$C_2$  می تواند همان *Test object* باشد.

در لحظه ای که جرقه زده میشود باید مدار تحلیل شود تا  $V_{out}$  بدست آید.



مدار معادل مولد ولتاژ ضربه، پس از جرقه زدن گوی‌های فلزی G

برای تحلیل مدار را در حوزه لاپلاس رسم می‌کنیم:

$$Z_2(s) = R_2 \parallel \frac{1}{C_2 S} = \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 S} \quad Z_1(s) = R_1 + \frac{1}{C_1 S}$$

$$I(s) = \frac{\frac{V_0}{S}}{Z_1(s) + Z_2(s)}$$

$$V_{out}(s) = Z_2(s) \cdot I(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \cdot \frac{V_0}{S}$$

$$V_{out}(s) = \frac{\frac{V_0}{S}}{R_1 C_2 S + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{R_2 C_1 S} + 1}$$

$$V_{out}(s) = \frac{V_0}{R_1 C_2 \left[ S^2 + \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} \right) S + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right]}$$

$$R_1 C_2 = k \quad \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1}{R_1 C_2} = a \quad \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} = b$$

$$V_{out}(s) = \frac{V_0}{k(S^2 + aS + b)}$$

$$\Delta = a^2 - 4b \quad S_{1,2} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4b}}{2} = \alpha_1, \alpha_2$$

$$V_{out}(s) = \frac{V_0}{k(S - \alpha_1)(S - \alpha_2)} = \frac{A}{S - \alpha_1} + \frac{B}{S - \alpha_2}$$

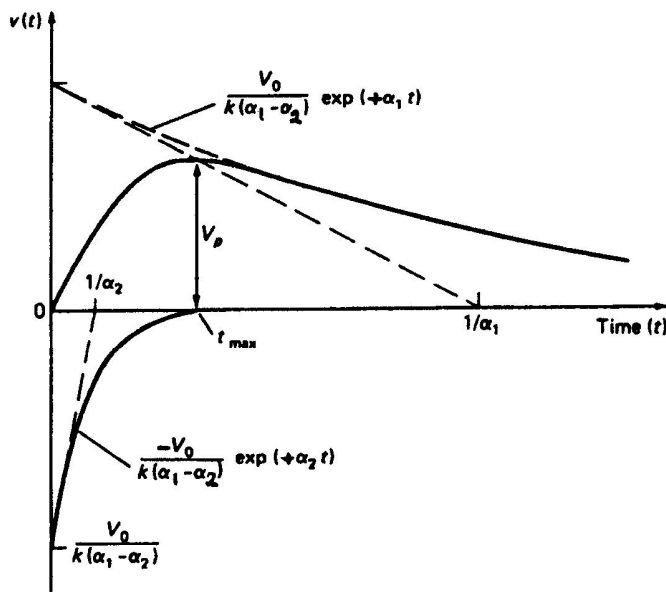


$$A = \frac{V_0}{k(S - \alpha_2)} \Big|_{S=\alpha_1} = \frac{V_0}{k(\alpha_1 - \alpha_2)} \quad , \quad B = \frac{V_0}{k(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

$$v_{out}(t) = Ae^{\alpha_1 t} + Be^{\alpha_2 t} \quad . \quad \alpha_2, \alpha_1 \text{ عددی منفی اند.}$$

$$v_{out} = \frac{V_0}{k(\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \quad |\alpha_2| > |\alpha_1|$$

$$\tau_1 = \frac{1}{\alpha_1} \quad , \quad \tau_2 = \frac{1}{\alpha_2} \quad \Rightarrow \quad \tau_2 < \tau_1$$



شکل (۸-۲۸): موج ولتاژ ضربه تولید شده

باید با استفاده از عناصر زمان پیشانی موج ، زمان پشت موج و پیک ان را کنترل کنیم و در محدوده استاندارد نگهداریم.

$$\frac{dV_0}{dt} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{V_0}{k(\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) = 0$$

$$\alpha_1 e^{\alpha_1 t} = \alpha_2 e^{\alpha_2 t} \quad \rightarrow \quad \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{e^{\alpha_2 t}}{e^{\alpha_1 t}} = e^{(\alpha_2 - \alpha_1)t}$$

$$\ln\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right) = (\alpha_2 - \alpha_1)t \quad \rightarrow \quad t_m = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad \Leftarrow \quad \text{زمان پیک}$$

با جایگذاری \$t\_m\$ داریم

$$V_{peak} = \frac{V_0}{k(\alpha_1 - \alpha_2)} \left[ \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} - \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}} \right]$$

$$\eta = \frac{v_p}{v_o} \times 100 \leftarrow \text{ضریب بهره یا راندمان}$$

با زدن جرقه ( اتصال کوتاه) خازن  $C_2$  شروع به شارژ می کند . در این حالت یک ثابت زمانی برای این مرحله شارژ بدست می آوریم:

$$\tau_2 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = R_1 \frac{C_2}{1 + \frac{C_2}{C_1}} \cong R_1 C_2$$

$\tau_2$  به نوعی به زمان پیشانی ربط دارد بنابراین با توجه به اینکه  $C_2$  عایق مورد تست می باشد و  $C_2$  دست ما نیست بنابراین تنظیم پیشانی با  $R_1$  است که عدد بسیار کوچکی باید باشد.

در مرحله تخلیه خازن ها اگر فرض کنیم  $R_1 \approx 0$  است چون دو خازن هم ولتاژ شده اند بنابراین  $C_1$  با  $C_2$  موازی است و از  $R_2$  تخلیه می شود.

$$\tau_1 = R_2 (C_1 + C_2) \cong R_2 C_1$$

بنابراین ثابت زمانی دشارژ که به زمان پشت موج ربط دارد را از طریق  $C_1$  می توان تنظیم کرد

$$\tau_2, \tau_1 \text{ به دست آمده همان } \frac{1}{\alpha_2}, \frac{1}{\alpha_1} \text{ است ( از طریق شکل به راحتی می توان دید)}$$

بنابراین  $\alpha_1, \alpha_2$  به دست آمده و با رعایت شرائط عناصر می توان مقادیر را به دست آورد.

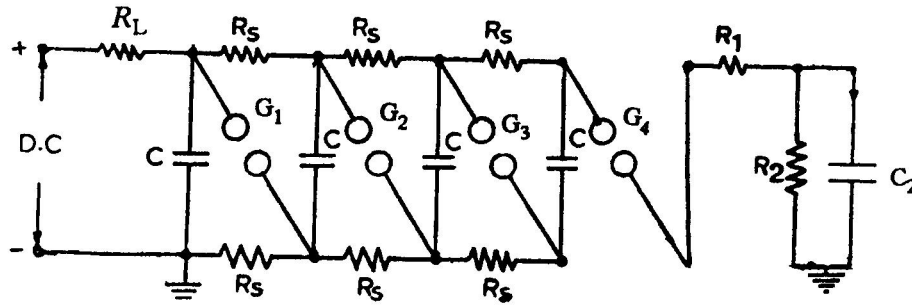
خازن در 3 برابر ثابت زمانی اول به 90% می رسد.  $T_f = 3T_1$

خازن در 0.67 برابر ثابت زمانی دوم به 50% نزول می کند.

$$\begin{cases} \alpha_1 \cong -0.0146 \\ \alpha_2 \cong -2.467 \end{cases} \text{ : مقادیر را داریم}$$

**تمرین: یک مولد موج ضربه چند طبقه بکشید.**

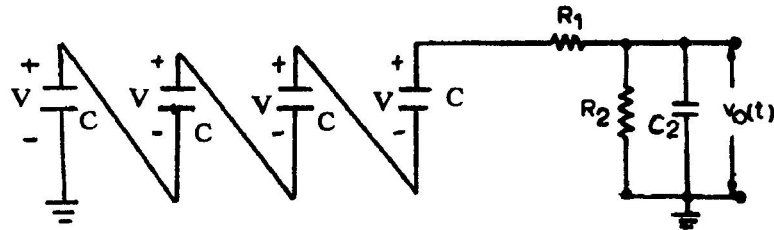
حل: برای مثال یک ژنراتور ضربه سه طبقه بصورت زیر است:



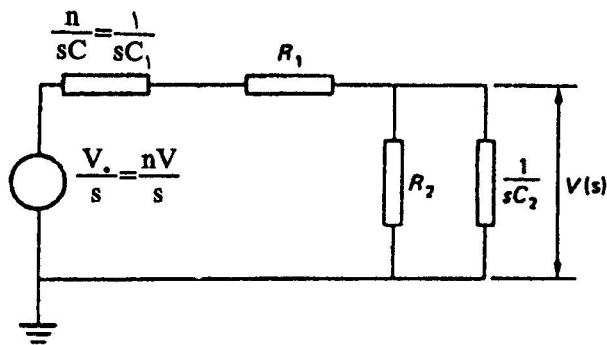
نمایی از طرح مدار مارکس  
برای مولد ضربه چند طبقه

تحلیل :

در حالت تخلیه مدار به صورت زیر است :



مدار معادل اولیه مولد ضربه چهار طبقه :



$$v_{0eq} = 3v_0$$

$$C_{eq} = \frac{C_3}{3}$$

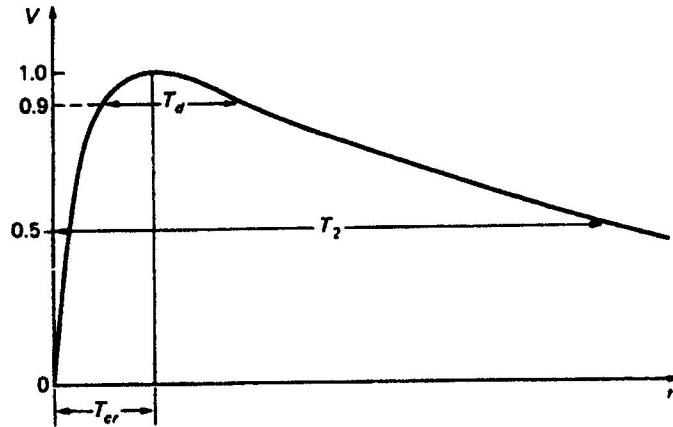
$$R_{eq} = 2R_d$$

شکل (۸-۳۳): مدار معادل نهایی مولد ضربه n طبقه

حال مشابه حالت یک طبقه با فرض  $v_{0eq}, C_{eq}, R_{eq}$  به جای  $v_0, C_1, R_1$  مدار تحلیل می شود.

### تولید اضافه ولتاژ سوئیچینگ:

شکل موج آن  $250 \mu s / 2500 \mu s$  نامیده می شود و بصورت زیر است :

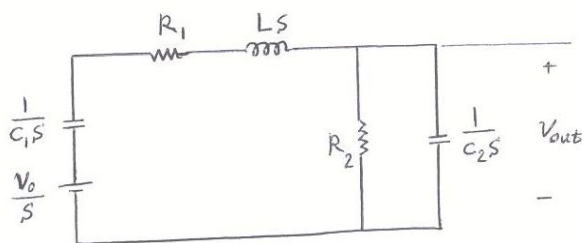
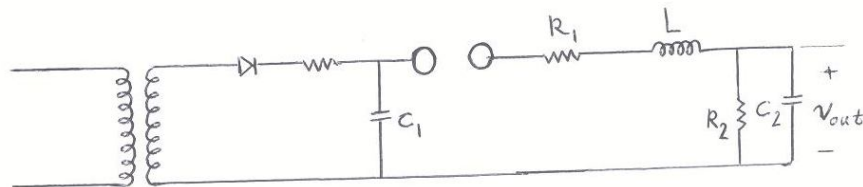


مشخصات موج ضربه سوئیچینگ

$$T_f = 250 \pm 20\% \mu s$$

$$T_r = 500 \pm 60\% \mu s$$

مدار تولید این شکل موج بصورت زیر است:



$$Z_2(s) = \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 s}$$

$$Z_1(s) = \frac{1}{C_1 s} + R_1 + LS$$

$$V_{out}(s) = \frac{Z_2(s)}{Z_1(s) + Z_2(s)} \times \frac{V_0}{s}$$

با توجه به اینکه  $\gg R_2$  و آن را بی نهایت می گزیم ، معادله مشخصه به صورت زیر حاصل می شود:

$$LS^2 + R_1 S + \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = 0 \quad , \quad \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C}$$

$$\lambda^2 + \frac{R_1}{L}\lambda + \frac{1}{LC} = 0 \quad \rightarrow \quad \lambda_{1,2} = \frac{-R_1}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

$$\left(\frac{R_1}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC} \quad \rightarrow \quad \text{میرایی نوسانی}$$

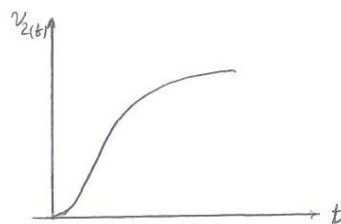
$$\left(\frac{R_1}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC} \quad \rightarrow \quad \text{میرایی بحرانی}$$

$$\left(\frac{R_1}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC} \quad \rightarrow \quad \text{میرایی بدون نوسان}$$

در حالت بحرانی  $\lambda = \frac{1}{\tau}$  است پس  $\lambda = \frac{1}{\tau} = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  اگر  $R_1 = 0$  باشد  $\lambda = j\sqrt{\frac{1}{LC}}$  است و داریم:

$$v_2(t) = \frac{1}{C_2} \int i(t) dt = v_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \left[ 1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}\right) e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right]$$

از طریق محاسبات فوق پیشانی موج را ساختیم که بصورت زیر است (با مقدار  $L$  تنظیم می کنیم)



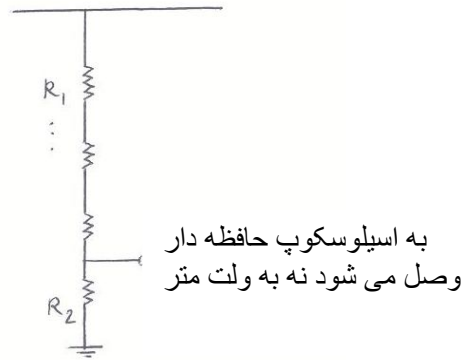
پشت موج نیز باید بررسی گردد.

### روش اندازه گیری ولتاژ ضربه صاعقه:

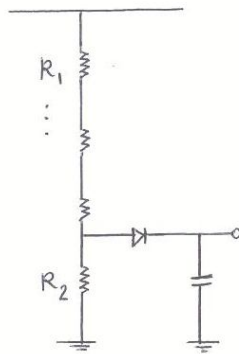
۱- استفاده از گوی های کروی: با توجه به فاصله جرعه زدن و رجوع به جداول می توان مقدار ولتاژ را

بدست آورد.

۲- استفاده از مقسم های مقاومتی:



۳- استفاده از مقسم مقاومتی و دیود و خازن:



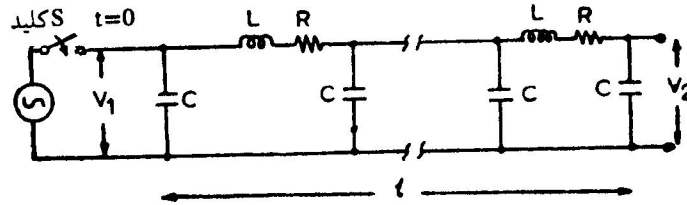
۴- استفاده از مقسم خازنی: مشابه مقسم مقاومتی است و با اسکوب حافظه دار خوانده می شود.

### امواج سیار:

با زدن کلید در ابتدای خط مدت زمانی طول می کشد که  $V_R$  بالا برود. این زمان کوتاه همان زمان سیر امواج سیار است که در درس بررسی مشاهده شد که این امواج با سرعت تقریبی نور سیر می کنند.

در این درس بررسی می کنیم که با برخورد صاعقه به خط افزایش ولتاژها و جریان های سایر نقاط خط به چه صورت است.

مدل گسترده یک خط انتقال:



مناصر توزیع شده خط انتقال

از رسانائی ها صرف نظر کردیم. که نشان دهنده جریان های نشتی خط از مقره ها و تلفات کرونا می باشد.

در مورد شکل فوق داریم:

$$L \left[ \frac{H}{m} \right] \quad , \quad C \left[ \frac{F}{m} \right]$$

$$-v(x) + L \Delta x \frac{\partial i(x)}{\partial t} + v(x + \Delta x) = 0$$

$$\frac{v(x + \Delta x) - v(x)}{\Delta x} = -L \frac{\partial i(x)}{\partial t}$$

$$\frac{v(x + \Delta x, t) - v(x, t)}{\Delta x} = -L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad \Delta x \rightarrow 0$$

$$\boxed{\frac{\partial v(x, t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}} \quad *$$

$$i(x) = C \Delta x \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + i(x + \Delta x)$$

$$\frac{i(x + \Delta x, t) - i(x, t)}{\Delta x} = -C \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad \Delta x \rightarrow 0$$

$$\boxed{\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C \frac{\partial v(x, t)}{\partial t}} \quad **$$

$$v(x, t) = z i(x, t)$$

$$z \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} \quad *$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C z \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} \quad **$$

$$\text{تقسیم روابط} \rightarrow z = \frac{L}{Cz} \rightarrow z^2 = \frac{L}{C} \Rightarrow z = \pm \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$v(x,t) = \pm \sqrt{\frac{L}{C}} i(x,t)$$

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}$$

$$\pm \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t}$$

$$\text{سرعت موج} \rightarrow V = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} = \frac{\frac{\partial i}{\partial t}}{\frac{\partial i}{\partial x}} = \frac{\pm \sqrt{\frac{L}{C}}}{L} = \pm \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

**نکته:**

امپدانس مشخصه خطوط بین 250 تا 500 اهم است ولی در کابل ها حدود 50 تا 100 اهم است.

سرعت موج سیار در خطوط در حدود سرعت نور می باشد و در کابل ها حدود نصف آن است.

**مثال:**

برای یک خط هوایی  $C = 0.0067 \frac{\mu F}{km}$  ،  $L = 1.67 \frac{mH}{km}$  می باشد . امپدانس مشخصه خط و سرعت

مسیر موج را حساب کنید.

$$z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1.67 \times 10^{-3}}{0.0067 \times 10^{-6}}} = 500 \Omega$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1.67 \times 10^{-3} \times 0.0067 \times 10^{-6}}} = 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$$

**مثال:**

در یک کابل فشار قوی ظرفیت خازنی  $0.133 \frac{\mu F}{km}$  و اندوکتانس  $0.33 \frac{mH}{km}$  می باشد. مطلوبست امپدانس

مشخصه و سرعت موج در این کابل.

$$\text{جواب : } \begin{cases} z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 49.81 \Omega \\ v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 1.5 \times 10^8 \frac{m}{sec} \end{cases}$$



$$\frac{\partial v}{\partial x} = -L \frac{\partial i}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -L \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} = -C \frac{\partial^2 v}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases}$$

$$t = 0 \quad \rightarrow \quad v(x, t) = f(x)$$

$$t = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = h(x)$$

$$v(x, t) = \frac{g(x + vt) + g(x - vt)}{2} \quad \text{با استفاده از دالامیر}$$

$$g(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{l} + b_n \sin \frac{n\pi x}{l} \right)$$

حال اگر موج رونده فاصله  $\Delta x$  در زمان  $\Delta t$  طی کند :

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \Rightarrow \quad \Delta x = v \cdot \Delta t$$

$$\frac{1}{2} g(x - vt) = \frac{1}{2} g[(x + \Delta x) - v(t + \Delta t)] = \frac{1}{2} g[x + \Delta x - vt - v\Delta t]$$

حال اگر موج رونده فاصله  $\Delta x$  را در فاصله زمانی  $\Delta t$  طی کند :

$$v = -\frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \rightarrow \quad \Delta x = -v \cdot \Delta t$$

$$\frac{1}{2} g(x + vt) = \frac{1}{2} g[(x + \Delta x) + v(t + \Delta t)] = \frac{1}{2} g[x + \Delta x + vt + v\Delta t] = \frac{1}{2} g(x + vt)$$

$$\begin{cases} v(x, t) = \frac{1}{2} g(x + vt) + \frac{1}{2} g(x - vt) \\ v(x, 0) = f(x) \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{2} g(x) + \frac{1}{2} g(x) = f(x) \Rightarrow g(x) = f(x)$$

$$v(x, t) = \frac{1}{2} f(x + vt) + \frac{1}{2} f(x - vt) \quad \Rightarrow \quad v = v_i + v_r$$

$$z = \frac{v(x, t)}{i(x, t)} \quad \Rightarrow \quad i(x, t) = \frac{v(x, t)}{z}$$

$$i(x, t) = \frac{f(x + vt)}{2z} + \frac{f(x - vt)}{2z} \quad \Rightarrow \quad i = i_i + i_r$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) - C\Delta x \cdot \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial i}{\partial x} = -C \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\frac{f'(x+vt)}{2z} + \frac{f'(x-vt)}{2z} = -C \left( \frac{v}{2} f'(x+vt) - \frac{v}{2} f'(x-vt) \right)$$

تابش :  $\frac{1}{2z} = \frac{Cv}{2} \rightarrow \frac{1}{z} = Cv \quad z > 0; C > 0; v > 0$

بازتابش :  $\frac{1}{2z} = -\frac{Cv}{2} \rightarrow \frac{1}{z} = -Cv \quad z < 0$

$$\frac{v_i}{i_i} = z \rightarrow v_i = z \cdot i_i \rightarrow i_i = \frac{v_i}{z} \quad v = v_i + v_r$$

$$\frac{v_r}{i_r} = -z \rightarrow v_r = -z \cdot i_r \rightarrow i_r = -\frac{v_r}{z} \quad i = \frac{v_i}{z} - \frac{v_r}{z}$$

### قوانین انعکاس امواج سیار :

$$v_1 = v_2 \quad i_1 = i_2$$

$$kvl \rightarrow v_i + v_r = v_t, \quad kcl \rightarrow i_i + i_r = i_t \Rightarrow \frac{v_i}{z_i} - \frac{v_r}{z_r} = \frac{v_t}{z_t}$$

$$\begin{cases} \frac{v_i}{z_i} + \frac{v_r}{z_r} = \frac{v_t}{z_t} \\ \frac{v_i}{z_i} - \frac{v_r}{z_r} = \frac{v_t}{z_t} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_t = \frac{2z_t}{z_t + z_i} \cdot v_i \\ v_r = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} \cdot v_i \end{cases}, \begin{cases} k_t = \frac{2z_t}{z_t + z_i} \\ k_r = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} \end{cases}$$

$k_t$ : ضریب انتقال یا ضریب عبور

$k_r$ : ضریب انعکاس یا بازتاب

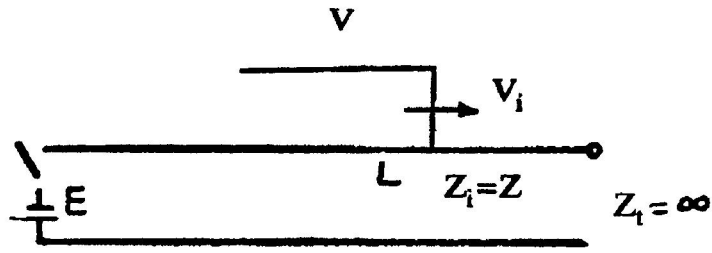
$$i_i = \frac{v_i}{z_i}$$

$$i_t = \frac{v_t}{z_t} = \frac{1}{z_t} \left[ \frac{2z_t}{z_t + z_i} \right] v_i = \frac{2}{z_t + z_i} \cdot v_i$$

$$i_r = \frac{v_r}{-z_r} = \frac{-1}{z_i} \left[ \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} \right] \cdot v_i = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} \cdot \frac{v_i}{z_i} = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} \cdot i_i$$

### بررسی حالات مختلف:

۱- بررسی یک خط انتقال با انتهای باز:



موج انتقالی سیار، روی خط با انتهای باز

می خواهیم بررسی کنیم اگر کلید بسته یا باز باشد چه اتفاقی می افتد؟ (موج چگونه انتقال می یابد)

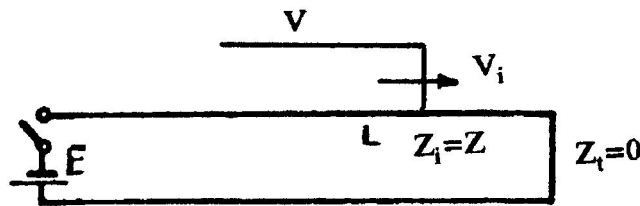
$$\begin{cases} k_t = \frac{2z_t}{z_t + z_i} = 2 & \rightarrow v_t = 2v \\ k_r = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} = 1 & \rightarrow v_r = v \end{cases}$$

$$v = v_i + v_r = 2v$$

$$\begin{cases} i_i = \frac{v_i}{z_i} \rightarrow i_i = \frac{v}{z} \\ i_t = \frac{2}{z_t + z_i} \cdot v_i \rightarrow i_t = 0 \\ i_r = \frac{z_i - z_t}{z_i + z_t} \cdot i_i = -\frac{v}{z} \end{cases}$$

$$i = i_i + i_r = \frac{v}{z} + \left(-\frac{v}{z}\right) = 0$$

۲- بررسی یک خط انتقال با انتهای اتصال کوتاه شده:



موج انتقالی روی خط با انتهای اتصال کوتاه شده

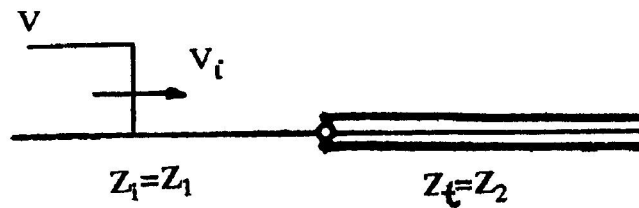
$$k_t = \frac{2z_t}{z_t + z_i} = 0 \rightarrow v_t = k_t \cdot v_i = 0$$

$$k_r = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} = -1 \rightarrow v_r = k_r \cdot v_i = -v$$

$$v = v_i + v_r = v - v = 0$$

$$\begin{cases} i_t = \frac{2}{z_t + z_i} \cdot v_i = \frac{2v}{z} \\ i_r = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} \cdot \frac{v_i}{z_i} = \frac{v}{z} \end{cases} \Rightarrow i = i_t + i_r = \frac{2v}{z}$$

۳- اتصال دو خط به یکدیگر:



اتصال دو خط با امپدانس های مختلف :

اگر خط اول هوایی و خط دوم کابلی باشد :

$$z_1 > z_2$$

$$v_t = \frac{2}{1 + \frac{z_1}{z_2}} \cdot v \quad \rightarrow \quad 0 < k_t < 1 \quad \Rightarrow \quad v_t < v$$

$$v_r = \frac{1 - \frac{z_1}{z_2}}{1 + \frac{z_1}{z_2}} \cdot v \quad \Rightarrow \quad k_r < 0$$

اگر دو خط مشابه باشند :

$$z_1 = z_2$$

$$\begin{cases} k_t = 1 & \Rightarrow & v_t = v \\ k_r = 0 & \Rightarrow & v_r = 0 \end{cases}$$

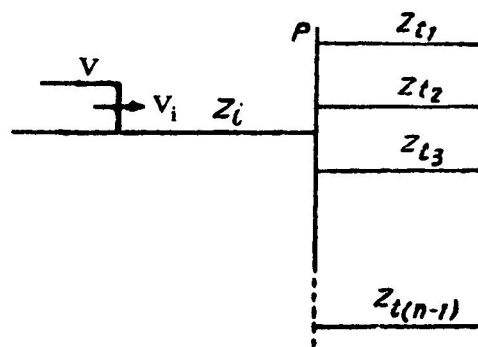
اگر خط اول کابلی و خط دوم هوایی باشد :

$$z_2 > z_1$$

$$v_t = \frac{2 \frac{z_2}{z_1}}{1 + \frac{z_2}{z_1}} \cdot v \quad \rightarrow \quad k_t > 1 \quad \Rightarrow \quad v_t > v$$

$$v_r = \frac{\frac{z_2}{z_1} - 1}{\frac{z_2}{z_1} + 1} \cdot v \quad \rightarrow \quad 0 < k_r < 1$$

۴- اتصال چند نقطه در یک نقطه:

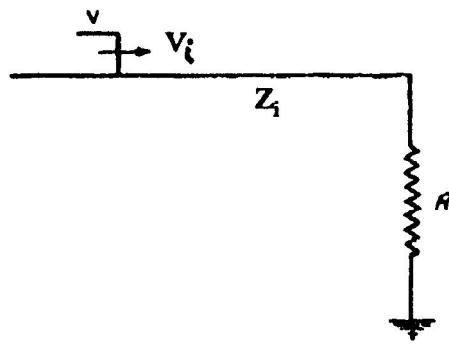


اتصال n خط در یک نقطه

$$\frac{1}{z_t} = \frac{1}{z_{t1}} + \frac{1}{z_{t2}} + \dots + \frac{1}{z_{tm}}$$

$$\begin{cases} v_t = k_t \cdot v_i \quad \rightarrow \quad k_t = \frac{2z_t}{z_t + z_i} \\ v_r = k_r \cdot v_i \quad \rightarrow \quad k_r = \frac{z_t - z_i}{z_t + z_i} \end{cases} \quad \begin{cases} i_{t1} = \frac{v_t}{z_{t1}} \\ i_{t2} = \frac{v_t}{z_{t2}} \\ \vdots \\ i_{tm} = \frac{v_t}{z_{tm}} \end{cases}$$

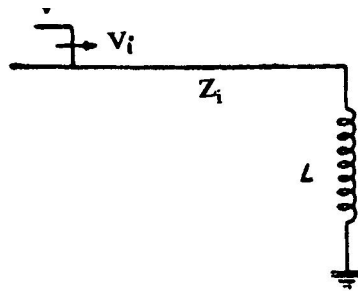
۵- اتصال مقاومت خالص در انتهای خط:



اتصال مقاومت در انتهای خط

$$\left\{ \begin{array}{l} v_t = k_t \cdot v_i = \frac{2R}{z+R} \cdot v \Rightarrow i_t = \frac{v_t}{R} = \frac{2v}{z+R} \\ v_r = k_r \cdot v_i = \frac{R-z}{R+z} \cdot v \Rightarrow i_r = -\frac{v_r}{z} = \frac{z-R}{z+R} \cdot i_t \quad ; \quad i_i = \frac{v}{z} \end{array} \right.$$

۶- اتصال سلف در انتهای خط:



اتصال سلف در انتهای یک خط:

$$v_t = k_t \cdot v_i \rightarrow k_t = \frac{2z_t}{z_t + z_i} = \frac{2LS}{LS + Z} \quad v_i = \frac{V}{S}$$

$$\Rightarrow V_t(s) = \frac{2LV}{LS + Z} \rightarrow v_t(t) = 2ve^{-\frac{z}{L}t}$$

$$V_r(s) = K_r \cdot V_i \rightarrow K_r = \frac{Z_t - Z_i}{Z_t + Z_i} = \frac{LS - Z}{LS + Z} \Rightarrow v_r(t) = v \left[ 2e^{-\frac{z}{L}t} - 1 \right]$$

$$i_t(s) = \frac{V_t(s)}{LS} \rightarrow \begin{cases} i_t(t) = \frac{2v}{z} \left[ 1 - e^{-\frac{z}{L}t} \right] \\ i_r(t) = \frac{v}{z} \left[ 1 - e^{-\frac{z}{L}t} \right] \end{cases}$$

پایان