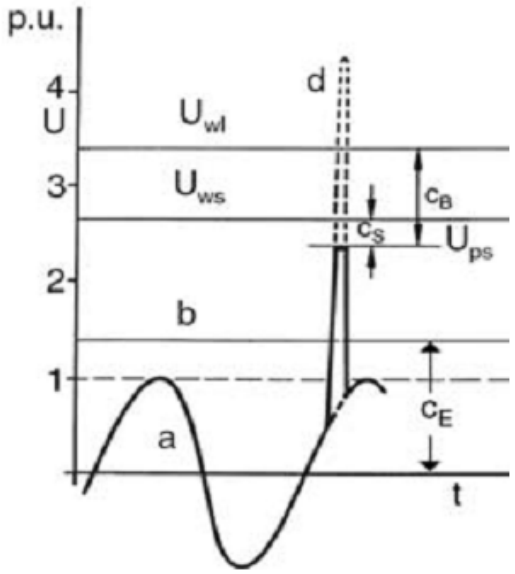
بخش هفتم: برقگیرها

مدرس: دکتر علی کریمی

- اضافه ولتاژهای گذرای بوجود آمده در شبکه قدرت شامل کلیدزنی و صاعقه می باشد و معمولا دارای دامنه به مراتب بزرگتر از ولتاژ نامی شبکه است. این اضافه ولتاژ توسط خط انتقال وارد تجهیزات پست می شود. لذا باید تا حد ممکن آن را توسط برقگیر محدود نمود.
- برقگیر یک مقاومت غیرخطی وابسته به ولتاژ است که در شرایط نرمال مقاومت الکتریکی خیلی زیادی دارد و با افزایش ولتاژ، مقاومت آن کاهش یافته و جریان زیادی از آن می گذرد و به این ترتیب کمک موثری به محدود کردن دامنه اضافه ولتاژ می نماید.
- با اعمال ولتاژ ضربه به برقگیر مقاومت آن کاهش می یابد (صفر نمی شود) و ولتاژی دو سر آن ایجاد می گردد. به ولتاژ دو سر برقگیر در صورت عبور جریان تخلیه نامی از آن، ولتاژ باقیمانده (Residual Voltage) گویند که همواره بزرگتر از ولتاژ حداکثر و کمتر از ولتاژ تحمل عایقی (BIL) است.



a maximum power frequency conductor-ground voltage in the normally operating network (1 p.u. = peak value)

b peak value of the maximum temporary power frequency conductor-ground voltage at earth fault in an adjacent phase

C_E earth fault factor (= 1.4)

d switching impulse overvoltage (limited by arrester to Ups)

U_{ps} switching impulse protection level of the arrester

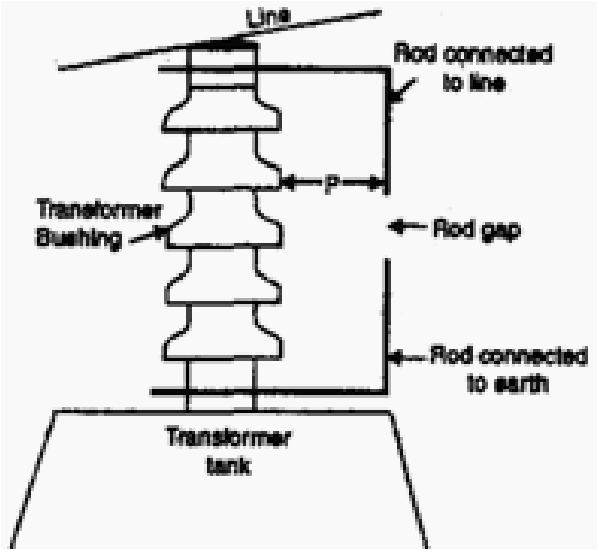
U_{wL} rated lightning impulse voltage for equipment-standardized values

U_{wS} rated switching impulse voltage for equipment-standardized values

❖ شاخک های هوایی:

- ✓ قبل از اختراع برقگیرهای امروزی، از شاخک های هوایی در ابتدای خطوط ورودی به پست استفاده می شد. به این نوع برقگیرهای ساده، جرقه گیر یا برقگیر با فاصله هوایی نیز گفته می شود.
- ✓ این نوع برقگیر به صورت دو الکترود یا دو شاخک هستند که متناسب با ولتاژ، در فاصله معین بین هادی و زمین قرار میگیرد و در صورت بروز اضافه ولتاژ، بین آنها قوس الکتریکی برقرار می شود. این قوس باعث اتصال کوتاه گردیده و از اضافه ولتاژ جلوگیری می کند، البته باعث اختلال در امر برق رسانی نیز می گردد (قطعی کلیدها).
- ✓ امروزه از این نوع برقگیرها فقط در موارد خاصی استفاده می شود که عبارتنداز:

1) برسر بوشینگ های ترانس ها (جهت حفاظت سیم پیچ های ترانس)؛
2) در خطوط انتقال فشار قوی که به شکل حلقه ای هستند که هم نقش برقگیر را بازی می کنند و هم نقش حلقهٔ کرونا؛



❖ برقگیر سیلیکون کاربید (Silicon Carbide Surge Arrester):

- ✓ تا چندی قبل، روش متداول حفاظت در مقابل صاعقه استفاده از برقگیرهای سیلیکون کاربید (SiC) بود. این برقیگرها از ترکیب سری فواصلَ هوایی با مقاومت ساخته می شوند و برخلاف جرقه گیرها، پس از عمل کردن آنها، شبکه قدرت قابلیت بازگشت به حالت اولیه را خواهد داشت (مقاومت مذکور جریان تخلیه را کاهش داده و عملا جریان و ولتاژ به طور تقریبی هم فاز شده و پس از به صفر رسیدن ولتاژ، جریان مجدداً برقرار نمی شود).

- ✓ مقاومت های این نوع از برقگیرها از نوع غیر خطی هستند (مقاومت آن در جریان کم، زیاد و در جریاد زیاد، کم است). این مقاومت ها در ولتاژ های ضربه ای باید به صورتی باشند که در اثر تخلیه جریانهای ضربه ای زیاد، افت ولتاژ دو سر آنها (ولتاژ پسماند) از سطح حفاظتی تجهیزات کمتر شود (نیمه هادی سیلیکون کاربید یا SiC). از طرفی، باید سطح جریان اتصال کوتاه را کاهش دهد تا کلیدها عمل نکند.

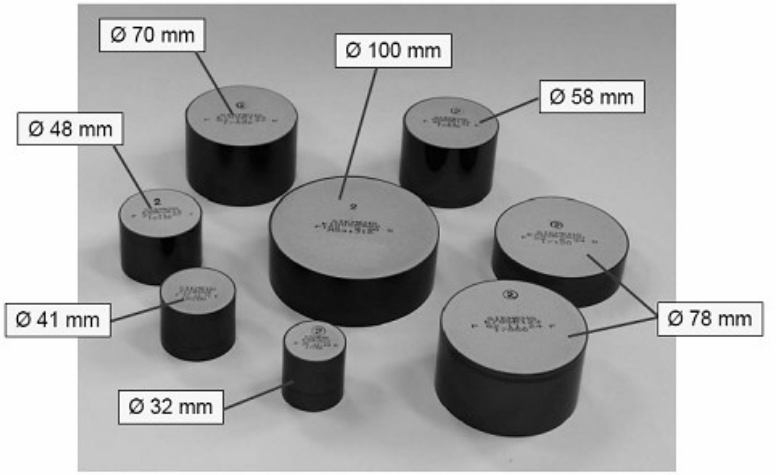
- ✓ اضافه ولتاژ کلید زنی با انرژی بالا که جریان تخلیه زیادی را برای مدت طولانی عمل می کند، ممکن است باعث سوختن الکترودهای برقگیر شود و لذا این مسئله باعث محدودیت در کاربرد این نوع برقیگرها می شود.

- ✓ در برقگیرهای SiC نوع جدید، برای کاهش تلفات برقگیر (افزایش طول عمر و قدرت تحمل انرژی) و برای خاموش کردن جرقه در فاصله هوایی پس از حذف موج و در نتیجه قطع جریان، از روشهای مغناطیسی استفاده می شود

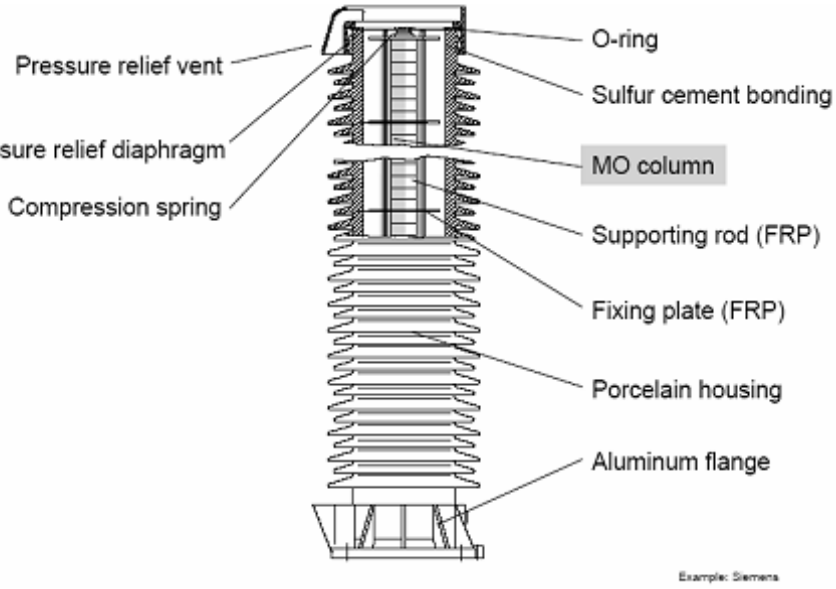
❖ برقگیر اکسید فلزی روی (Zinc Oxide Surge Arrester):

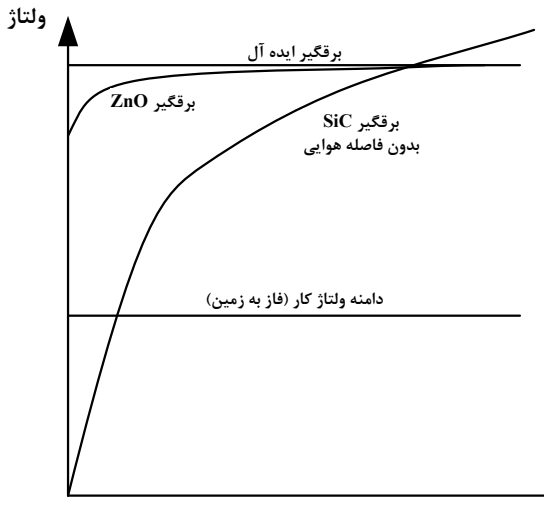
- ✓ نوع جدید برقگیرها دارای بلوکهایی با مقاومت الکتریکی غیر خطی و از جنس اکسید فلزات (Metal Oxide یا MO) می باشند از آنجا که ۹۵ ٪ از مواد تشکیل دهنده بلوک های را اکسید روی (ZnO) تشکیل می دهد، به آنها برقگیرهای ZnO نیز گفته می شود. این برقگیرها مشخصاتشان به یک برقگیر ایده آل نزدیک است.
- ✓ اجزای برقگیر ZnO شامل اکسید روی و مقادیر کمی از اکسید دیگر فلزات از قبیل بیسموت، کبالت، آنتیموان و اکسید منگنز می باشد. ذرات بسیار ریز اکسید روی و اکسید فلزات دیگر پس از فشرده شدن به صورت دیسک و در اندازه های معین شکل می گیرند. سپس این دیسک ها در درجه حرارت بالا پخته شده و به صورت سرامیک درمی آیند. این دیسک ها به صورت سری در محفظه استوانه ای شکل گرفته و برقگیر را تشکیل می دهند.

MO Resistors



Design of a Porcelain Housed High-Voltage Arrester





✓**مقایسه مشخص ولتاژ-جریان:**

(برقگیر در ولتاژ نامی جریانی در حد چند ده میکروآمپر یا چند میلی آمپر ازخود عبور داده اما در ولتاژ عملکرد برقگیر (معمول ۲ تا ۳ برابر ولتاژ نامی)، جریانی درحد چندین کیلوآمپر عبور می‌دهد)

برقگیر SiC حتما به فاصله هوایی نیاز دارند (چرا؟)

برقگیر ZnO

❖ مزایای برقگیر ZnO:

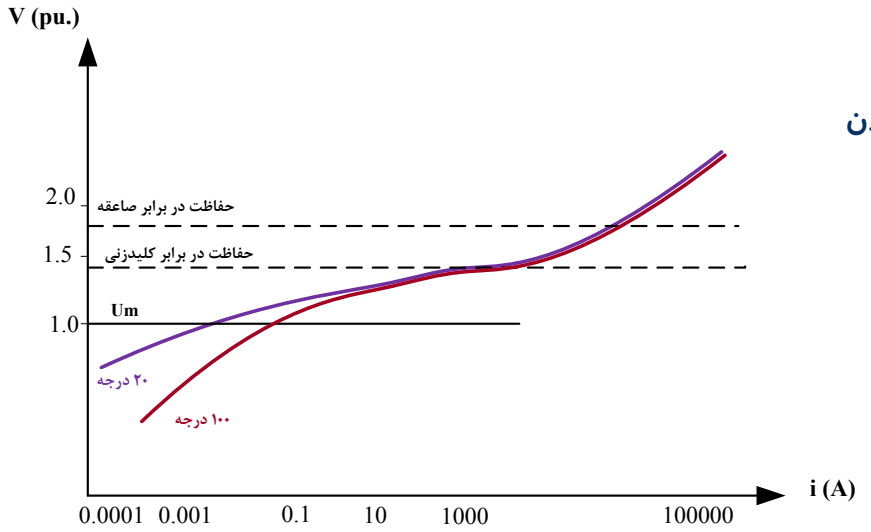
- ✓ دارای تاخیر زمانی خیلی کم (زیرا، مانند SiCها فاصله هوایی ندارد)
- ✓ برگشت طبیعی به وضعیت اولیه یا مدار باز
- ✓ حجم و وزن کم؛
- ✓ دارای سطح حفاظتی نسبتا مناسب
- ✓ دارای جریان های نشتی پائین در شرایط کار نامی سیستم (حداقل تلف توان در شرایط کار عادی)

❖ مشکلات برقگیر ZnO:

- ✓ با تکرار عملکرد برقگیر، لایهٔ عایق بین دانه های اکسید روی می سوزد که باعث افزایش جریان در ولتاژ عادی سیستم می شود (لذا، همواره باید با یک میلی آمپرمتر که با برقگیر به صورت سری قرار می گیرد، جریان عادی آن را اندازه بگیریم).
- ✓ تغییر مقاومت برقگیر در اثر تغییر درجه حرارت

(این تغییر در مقاومت در جریان های کم بیشتر مشهود است)

نکته: با کاهش مقاومت در اثر افزایش دمای محیط، احتمال گرم شدن بیشتر و کاهش مجدد مقاومت وجود دارد.



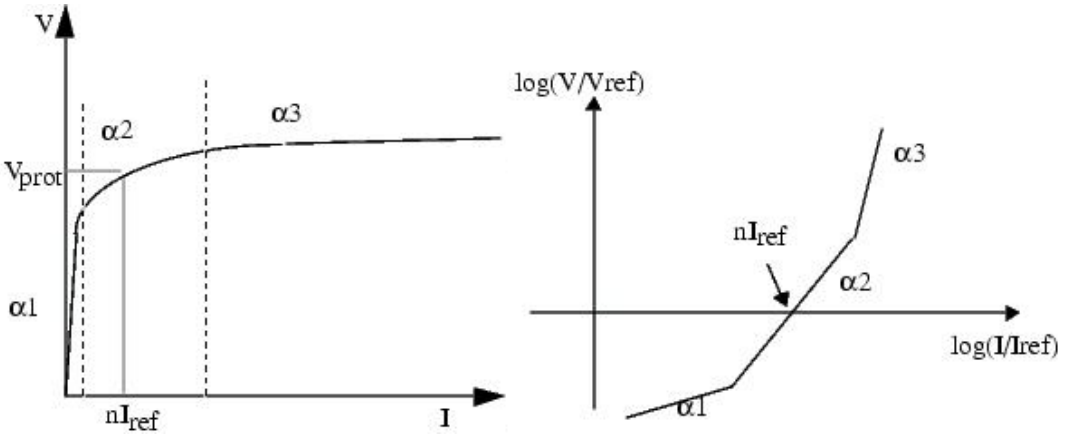
مدل الکتریکی برقگیر ZnO

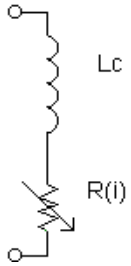
❖ از مدل های ساده و اولیه ZnO،مدل مقاومت غیرخطی است. این مدل که در نرم‌افزار MATLAB در قسمت Simulink/SimPowerSystems بکار گرفته شده، در واقع، مقاومتی غیرخطی است که مشخصه آن از چند قسمت که هریک با تابعی نمایی بصورت زیر تخمین‌زده مدل می‌گردد:

$$\frac{V}{V_{ref}} = K_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{\frac{1}{\alpha_i}}$$

✓ V و I ولتاژ و جریان برقگیر، V_{ref} ولتاژ حفاظت برقگیر، I_{ref} نیز جریان عبوری در ولتاژ V_{ref} می‌باشد. مقادیر α_i و K_i نیز از روی مشخصه برقگیر تعیین می‌گردد.

✓ نحوه تعین مدل مقاومتی:





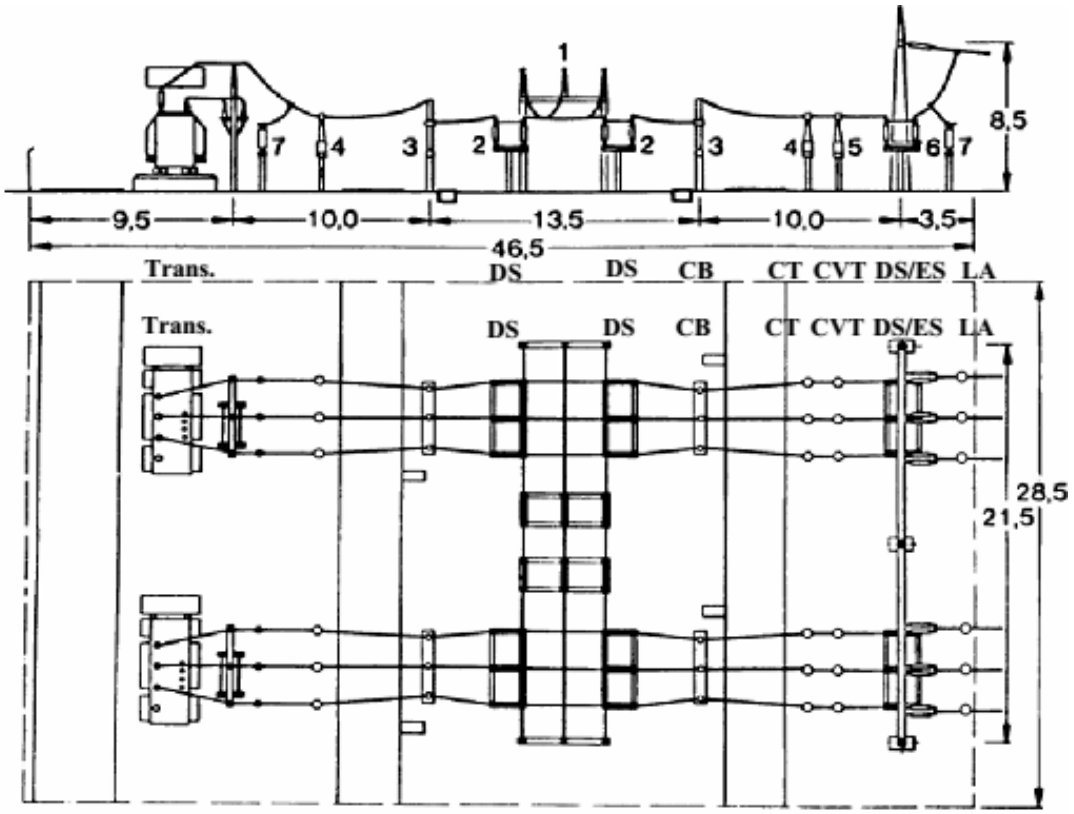
✓ مدل فوق، اثرات دینامیکی برقگیر را لحاظ نمی‌کند.

✓ مدل های دیگری نیز مانند مدل مقاومت غیرخطی سری شده با اندوکتانس نیز وجود دارند که اثرات دینامیکی را لحاظ می کنند.

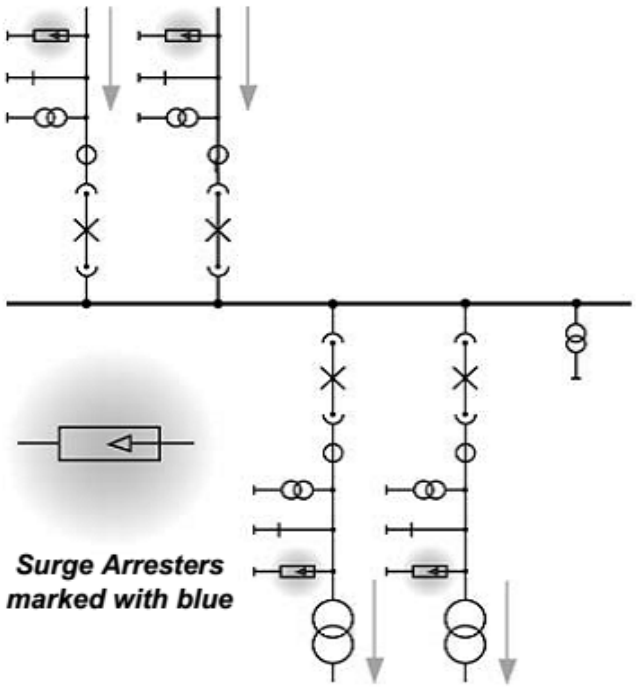
مدل اندوکتانسی Tominaga:

❖ محل نصب برقگیر:

✓ برقگیرهای داخل پست (در ابتدای خطوط، در دو طرف ترانسفورماتور و محافظت راکتور)



لی اوت نمونه پست 63/20kV

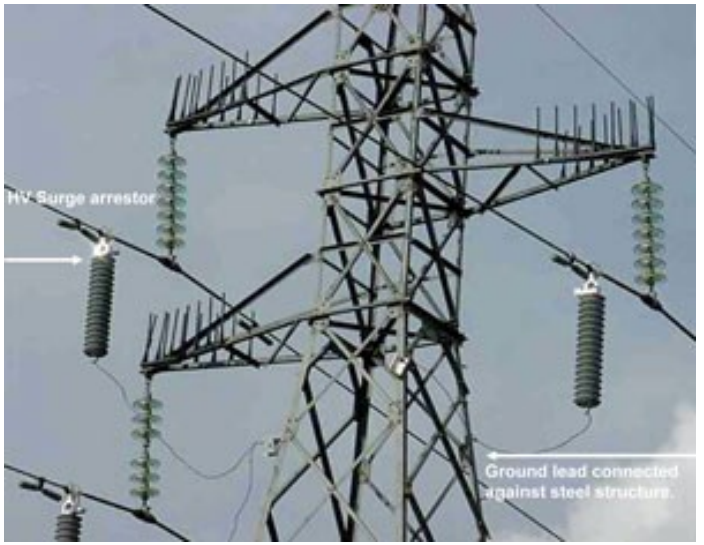


برقگیر در دیاگرام تک خطی

مشخصات نصب برقگیرها

❖ **محل نصب برقگیر:**

✓ برقگیرهای خطوط برای کنترل ولتاژ سوئیچینگ و صاعقه (در موارد خاص ممکن است برقگیر در برخی از برج های خطوط انتقال و یا همه آن نصب گردد)



مشخصات نصب برقگیرها

❖ فاصله مجاز برقگیرها:

- ✓ در صورت اضافه ولتاژ، در محل برقگیر ولتاژ تا سطح حفاظت آن کاهش می یابد؛ ولی هرچه از برقگیر دورتر شویم، دامنهٔ ولتاژ بزرگتر می شود.
- ✓ هرچه شیب موج ورودی بیشتر و فاصله تجهیزات از برقگیر بیشتر باشد، ولتاژ ظاهر شده در ترمینال تجهیزات بزرگتر خواهد بود.

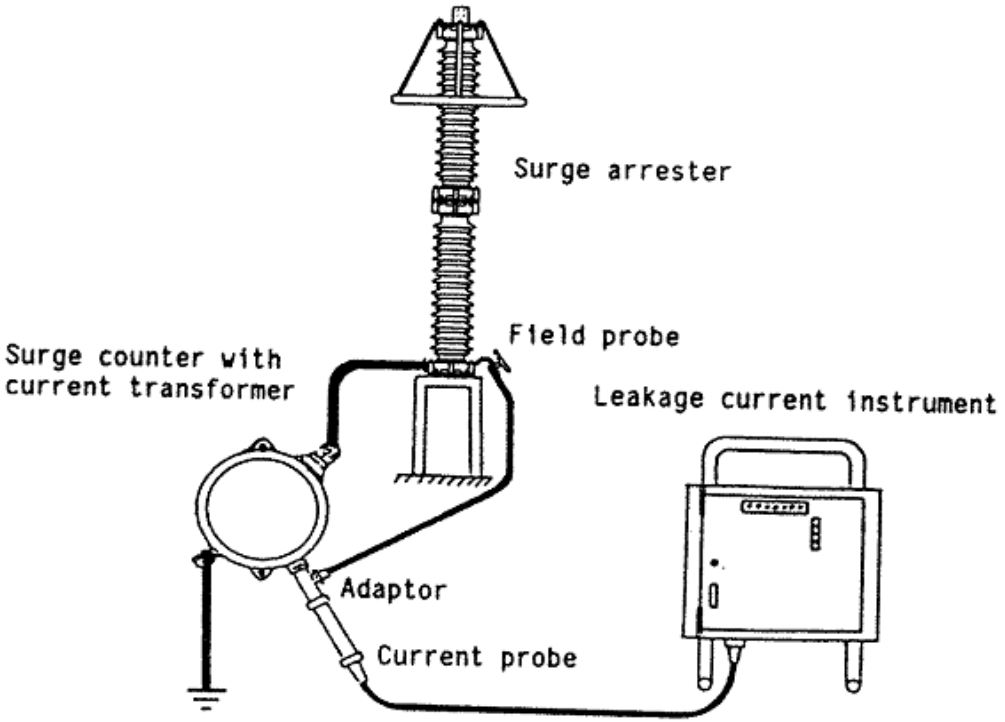
❖ نحوهٔ اتصال برقگیر به زمین:

- ✓ در کوتاه ترین مسیر ممکن باید از طریق سیم اتصال به زمین متصل گردد.
- ✓ سطح مقطع سیم اتصال براساس جریان های عبوری از برقگیر در شرایط اتصالی تعیین می گردد.

❖ کنتور برقگیر:

- ✓ به منظور شمارش تعداد عملکرد برقگیر (در سال یا بازه دلخواه) از کنتور برقگیر استفاده می شود.
- ✓ این کنتور به صورت الکترومکانیکی است و باید تحمل حداکثر جریان تخلیه برقگیر را داشته باشد.
- ✓ محل نصب آن در مسیر سیم اتصال به زمین است و نباید تغییر چندانی در امپدانس سیم ایجاد کند (در زمان تعمیر، از یک سیم ارتباطی استفاده می شود تا برقگیر از مدار خارج نشود).

❖ کنتور برقگیر:



❖ حلقه هماهنگ کننده برقگیر

✓ به منظور یکنواخت کردن میدان الکتریکی و جلوگیری از اثر کرونا

برای انتخاب برقگیرها باید مشخصات الکتریکی آنها موردتوجه قرار گیرد:

❖ حداکثر ولتاژ کار دائم یا MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) یا Uc

✓ برقگیرها بین فاز و زمین نصب می شود و بنابراین، MCOV براساس حداکثر ولتاژ کار تجهیزات (Um) بدست می آید (برحسب rms). حداقل ضریب اطمینان نیز 1.05 لحاظ می شود.

$$MCOV > 1.05 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

$$for\ example: MCOV_{230kV} > 1.05 \times \frac{245kV}{\sqrt{3}} = 148.5kV$$

❖ ولتاژ نامی برقگیر (Ur)

✓ قابلیت اضافه ولتاژ موقت که به چند عامل بستگی دارد:

- اضافه ولتاژ موقتی یا TOV (Temporary Overvoltage) که معمولا در شرایط اتصال کوتاه فاز به زمین، شرایط قطع یک بار در شبکه انتقال و یا هر دو پدید می آید. در هنگام انتخاب برقگیر، عموماً، اضافه ولتاژهای موقت ناشی از اتصال کوتاه فاز به زمین در نظر گرفته می شود.

در شرایط اتصال کوتاه تک فاز به زمین، ولتاژ دو فاز سالم دیگر:

$$U_{TOV} = C_E \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

C_E ضریب اتصال زمین است.

در شرایط قطع بار یک خط انتقال، اضافه ولتاژ موقت:

$$U_{TOV} = C_L \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

C_L ضریب اضافه ولتاژ در اثر قطع بار است که به زمان عملکرد رله ها بستگی دارد.

در شرایط وقوع اتصال کوتاه و قطع بار به صورت همزمان، اضافه ولتاژ موقت:

$$U_{TOV} = C_L \times C_E \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

❖ ولتاژ نامی برقگیر (Ur)

برقگیرها ولتاژ Uc را در حالت دائم، 1.1 تا 1.2 برابر Uc را برای مدت ۳ ساعت، 1.3Uc را به مدت ۱۰ ثانیه و ولتاژ 1.5Uc را به مدت 0.1 ثانیه تحمل می کنند.

- **ضریب قطع بار یا Load Disconnect Factor (C_L): این ضریب به عواملی همچون میزان بار برداشته شده از خطوط، اینرسی توربین-ژنراتور، پاسخ سیستم های کنترلی نیروگاهی، مشخصات خطوط و ترانسفورماتورهای شبکه و نوع رله های حفاظتی بستگی دارد.**
  - **این ضریب برای پست های ترانسفورماتوری بزرگ 1.05، پست های ترانسفورماتوری کوچک 1.2، ترانسفورماتورهای نیروگاهها 1.4 و ترانسفورماتورهای نیروگاه آبی 1.5 لحاظ می شود.**

- **ضریب اتصال زمین یا Earth Fault Factor (C_E): این ضریب از نسبت ولتاژ ظاهر شده در فازهای سالم به ولتاژ نامی در اثر وقوع اتصال کوتاه تک فاز به زمین بدست می آید. مقدار این ضریب، متناسب با مقاومت و راکتانس مولفه های توالی مثبت، منفی و صفر سیستم است.**
  - **این ضریب معمولا بین 1.2 تا 1.7 است. اگر شبکه ای به طور موثر زمین شده باشد این ضریب حدود 1.4 و در شبکه ای که به صورت غیرمستقیم زمین شده باشد و یا زمین نشده باشد برابر 1.7 انتخاب می گردد.**

✓ **نحوه تعیین ولتاژ نامی برقگیر: ولتاژ نامی برقگیر بزرگتر یا مساوی با اضافه ولتاژ موقتی شبکه، قابل تحمل در ۱۰ ثانیه تعیین می شود.**

$$U_r \geq U_{TOV(10\,\mathrm{sec})}$$

$U_{TOV(10\,\mathrm{sec})}$ اضافه ولتاژ موقتی شبکه که قابل تحمل در ۱۰ ثانیه است، می باشد.

❖ ولتاژ نامی برقگیر (Ur)

✓ **نحوه تعیین ولتاژ نامی برقگیر:**

نحوه بدست آوردن $U_{TOV(10\sec)}$ از اضافه ولتاژ موقتی شبکه در t ثانیه (غیر از ۱۰ ثانیه):

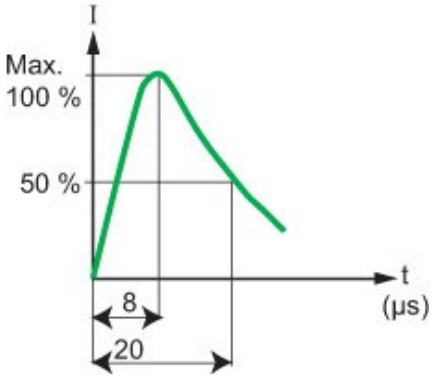
$$U_{TOV(10\sec)} = U_{TOV(t\ \sec)} \times \left(\frac{t}{10}\right)^{0.02}$$

به طور مثال، در شبکه 20kV، اضافه ولتاژ موقتی 45kV به مدت 0.5 ثانیه قابل تحمل است. بنابراین برای مدت ۱۰ ثانیه، داریم:

$$U_{TOV(0.5\ \sec)} = \frac{45}{\sqrt{3}} = 25.98 \Rightarrow U_{TOV(10\ \sec)} = 25.98 \times \left(\frac{0.5}{10}\right)^{0.02} \simeq 24.5kV$$

نکته: ولتاژ 24.5kV در مدت ۱۰ ثانیه همان تلفاتی را در برقگیر ایجاد می کند که ولتاژ 25.98kV در مدت ۰/۵ ثانیه ایجاد میکند.

بنابراین، ولتاژ نامی برقگیر در شبکه ای که اضافه ولتاژ 25.98kV در مدت ۰/۵ محتمل باشد، باید بزرگتر یا مساوی 24.5kV باشد.



❖ جریان تخلیه نامی برقگیر (I_N)

✓ **مقدار پیک جریان ضربه ای صاعقه با مشخصات $8/20\mu s$ (۸ میکروثانیه زمان رسیدن به پیک و ۲۰ میکروثانیه زمان نزول به نصف مقدار پیک است)**

طراحی مشخصات برقگیرها

❖ جریان تخلیه نامی برقگیر (I_N)

✓ به طور معمول، برقگیرهای استاندارد در شبکه های قدرت در چهار رنج ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوآمپر ساخته می شوند.

✓ در شبکه های توزیع و فوق توزیع عموماً از برقگیر 5kA استفاده می شود (البته، اگر سطح ایزوکرونیک منطقه ای بالا باشد از برقگیر 10kA استفاده می شود)؛

✓ در شبکه های 132، 230 و 400kV از برقگیرهای 10، 15 و 20kA استفاده می شود.

❖ حداکثر جریان ضربه ای قابل تحمل ($4/10\mu s$)

✓ برابر حداکثر جریان موج ضربه با زمان صعود ۴ میکروثانیه و زمان نیم موج ۱۰ میکروثانیه است. در واقع، برقگیر باید بتواند در شرایطی که قرص های داخلی آن تا ۶۰ درجه سانتیگراد گرم شده اند، این جریان را تحمل کند و سپس به مدت ۱۰ ثانیه ولتاژ نامی (Ur) و پس از آن به مدت نیم ساعت، ولتاژ کار دائم (Uc) را تحمل کند و تخریب نشود:

✓ براساس استاندارد IEC، این جریان برای برقگیرهای 5kA برابر 65kA و برای برقگیرهای 10kA برابر 100kA توصیه می شود.

❖ حداکثر جریان قابل تحمل با زمان زیاد

✓ در شرایطی که خطوط انتقال شارژ شده اند، در هنگام سوئیچینگ، ممکن است جریانی از برقگیری که در انتهای خط باز قرار دارد، عبور کند. دامنه جریان متناسب با ولتاژ شارژ خط و زمان عبور جریان متناسب با طول خط است.

✓ براساس استاندارد IEC، این جریان برای برقگیرهای 5kA برابر 75Aبا زمان تحمل 1msو برای برقگیرهای 10kA برابر 125A با زمان تحمل 2ms توصیه می شود.

❖ قابلیت تحمل جذب انرژی (W)

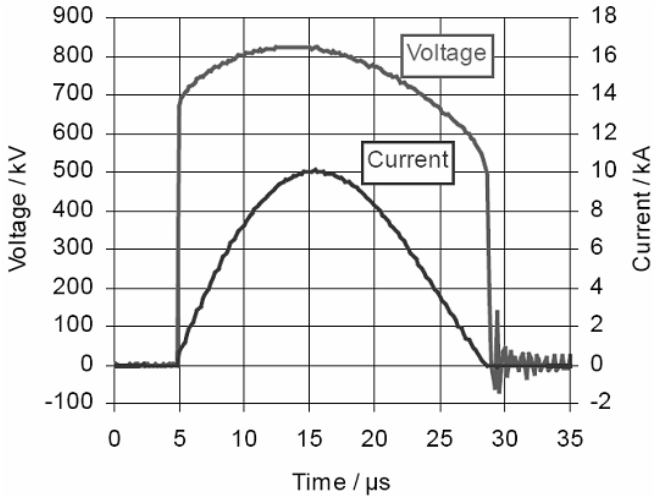
✓ به طور معمول، قابلیت تحمل جذب انرژی مربوط به شرایط وصل کلید در انتهای خطوط باز بلند است. در واقع، برقگیر انتهای خط باز باید قابلیت جذب شارژینگ خط را داشته باشد.

✓ درصورتی که I جریان تخلیه عبوری از برقگیر و U ولتاژ دو سر برقگیر در زمان عبور جریان باشد، مقدار انرژی تلف شده در برقگیر:

$$W = \int U.I.dt = UIt \quad , \quad U = U_{res} \quad , \qquad I = \frac{U_1 - U_{res}}{Z_C} \quad , \qquad t = 2T \quad , \begin{cases} T_{(\mu s)} = \dfrac{l_{(km)}}{0.3} & for\ overhead\ line \\ T_{(\mu s)} = \dfrac{l_{(km)}}{0.15} & for\ cable \end{cases}$$

✓ با توجه به اینکه زمان موج سوئیچینگ طولانی و شبه مربعی است، رابطه انتگرالی ساده شده است.

Residual Voltage of an MO Arrester



✓ U_{res} ولتاژ باقیمانده یا ولتاژ تخلیه در حالت عبور جریان برقگیر است که البته برای جریان های مختلف متفاوت است (بر حسب پیک)؛

✓ برای محاسبه I از U_1 (پیک ولتاژ خط در شرایط سوئیچینگ برحسب kV و در شرایط عدم برقگیر)، U_{res} (برحسب kV) و Z_C (امپدانس موجی خط) استفاده شده است؛

✓ زمان عبور موج سوئیچینگ (t) دو برابر زمان انتشار موج لحاظ می شود. در خطوط هوایی سرعت انتشار موج تقریبا برابر سرعت نور است (3×10^8 m/s) و سرعت انتشار موج در کابل ها تقریباً نصف آن است (1.5×10^8 m/s) .

❖ قابلیت تحمل جذب انرژی (W)

✓ Typical Surge impedance of OHL and Switching Overvoltage:

System Voltage U_m (kV)	Surge Impedance (ohm)	Prospective overvoltage without arrester U_1 (pu.)
Under 145	450	3.0
145 to 345	400	3.0
362 to 525	350	2.6
765	300	2.2

✓ نکته: U_1 در جدول فوق بر حسب مقدار پیک U_m پریونیت شده است:

$$1pu. = \frac{\sqrt{2}.U_m}{\sqrt{3}}$$

✓ ظرفیت جذب انرژی: برابر است با انرژی تلف شده در برقگیر برحسب kJ تقسیم بر ولتاژ نامی برقگیر برحسب kV:

$$W' = \frac{W}{U_r} \qquad kJ / kV_{rating}$$

مثال: در یک خط 230kV با طول 150km یک برقگیر با ولتاژ نامی 200kV نصب شده است. در شرایطی که در هنگام کلیدزنی خط تا ولتاژ ۳ پریونیت شارژ گردد، تلفات انرژی پس از هربار کلیدزنی را محاسبه کنید (ولتاژ باقیمانده را در هنگام عبور جریان از برقگیر، 1.4 برابرِ ولتاژ نامی برقگیر لحاظ کنید).

حل:

$$U_{res} = 1.4 \times 200 = 280kV \ , \quad U_m = 245kV \ , \quad I = \frac{U_1 - U_{res}}{Z_C} = \frac{3 \times \frac{\sqrt{2} \times 245}{\sqrt{3}} - 280}{400} = 0.8\,kA$$

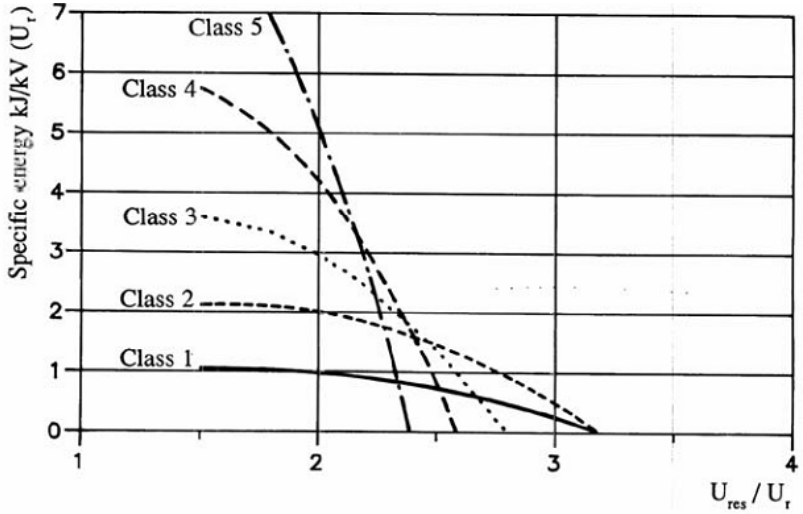
$$t = 2T = 2 \times \frac{l}{0.3} = 2 \times \frac{150}{0.3} = 1000\,\mu s$$

$$\Rightarrow W = U.I.t = 280kV \times 0.8kA \times 1000\,\mu s = 224kJ \quad \Rightarrow \quad W' = \frac{224}{200} = 1.12 \quad kJ / kV_{rating}$$

❖ کلاس تخلیه خط در برقگیر

✓ توانایی تحمل تنش های ناشی از انرژی جذب شده یا تخلیه شده در برقگیر است. برای تعیین کلاس تخلیه از موج های سوئیچینگ استفاده می شود که شرایط سخت تری را به برقگیر تحمیل می کنند (زمان موج ها طولانی است).

✓ براساس استاندارد IEC، برقگیرها به ۵ کلاس تقسیم بندی می شوند. با داشتن ظرفیت جذب انرژی (W') و نسبت U_{res}/U_r و براساس شکل روبرو می توان تشخیص داد که چه کلاس تخلیه ای نیاز است.



✓ نکته: با تعیین نقطه موردنظر در شکل روبرو، اولین کلاس تخلیه بالاتر انتخاب می شود.

✓ مقادیر U_{res} براساس استاندارد IEC برحسب ولتاژ نامی برقگیر (U_r) برای برقگیرهای با کلاس ۲:

Rated Voltage U_r (kV)	Residual voltage of the arrester for lighting (kV)	Residual voltage of the arrester for switching (kV)
306	796	673
324	842	712.8
342	889	752.4
360	936	792
378	983	831.6

✓ مقادیر جدول فوق، به ازای هر کلاس بالاتر، ۷درصد از سطح ولتاژ حفاظتی برقگیر در مقابل موج صاعقه و ۴درصد از سطح حفاظتی برقگیر در مقابل موج سوئیچینگ کاهش می یابد.

✓ نکته ۱: برای برقگیرهای 5kA و پایین تر کلاس تخلیه تعیین نمی شود؛ ولی برای برقگیرهای 10، 15 و 20kA براساس قابلیت جذب انرژی دسته بندی می شوند.

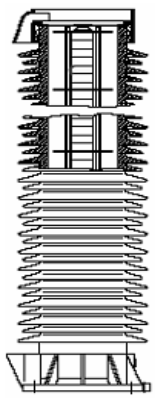
✓ نکته ۲: برقگیرهای سیستم های توزیع حداکثر دارای کلاس ۱ هستند و کلاس های بالاتر مخصوص برقگیرهای سطوح ولتاژ بالاتر است.

❖ کلاس دریچه اطمینان برقگیر (Pressure Relief Class)

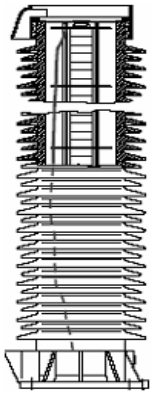
✓ به منظور جلوگیری از انفجار ناگهانی برقگیرها در شرایط خطای داخلی آنها، برقگیرها به سیستم دریچه اطمینان (سوپاپ) مجهز می شوند. ظرفیت این دریچه اطمینان براساس جریان اتصال کوتاه محل برقگیر تعیین می شود.

✓ براساس استاندارد IEC جریان اتصال کوتاه باید حداقل به مدت 0.2 ثانیه استمرار داشته باشد.

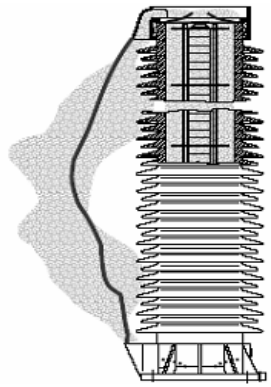
Pressure Relief of an Arrester



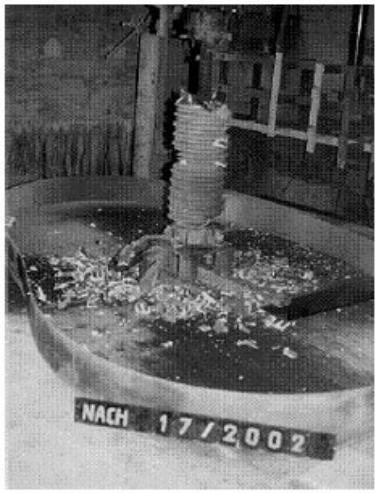
1) Puncture and flashover of individual MO resistor(s)



2) Internal arc along the full length of the unit

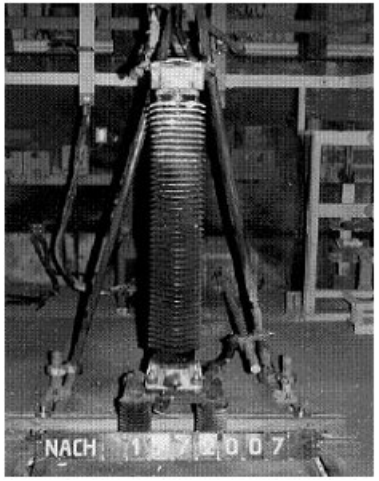


3) Opening of pressure relief devices and venting of the unit



Fail in Pressure Relief Test at 63 kA/0.2sec on porcelain housed arrester

Fail in Pressure Relief Test at 20 kA/0.2sec on polymer housed distribution arrester



Successful Pressure Relief Test at 63 kA/0.2sec on porcelain housed arrester

Successful Pressure Relief Test at 20 kA/0.2sec on polymer housed distribution arrester

طراحی مشخصات برقگیرها

❖ فاصله مجاز برقگیر

✓ در صورتی که فاصله برقگیر از تجهیزات شبکه زیاد باشد، اثر حفاظتی برقگیر برای آنها کاهش می یابد. در محل برقگیر، دامنهٔ ولتاژهای تخلیه تا سطح حفاظت کاهش می یابد و سپس، در دو طرف آن و با افزایش تدریجی فاصله از محل برقگیر، فزونی می یابد.

✓ ولتاژ ظاهر شده (U_p) در ترمینال تجهیزات تحت حفاظت بر حسب kV(peak):

$$U_p = U_{res} + \frac{2 \times S \times X}{v}$$

در رابطه فوق، U_{res} ولتاژ باقیمانده بر حسب کیلوولت پیک، S شیب موج ولتاژ ورودی (برحسب kV/μs)، X فاصله برقگیر و تجهیز مورد حفاظت (برحسب متر) و v سرعت انتشار موج (برحسب m/μs) است.

S یا شیب موج ولتاژ ورودی بستگی به سطح ایزوکرونیک منطقه، نحوهٔ حفاظت از صاعقه خط (خصوصا در نزدیکی پست)، مقاومت پایه برج ها و ... دارد. براساس استاندارد IEC، مقادیر ۶۰۰kV/μs و ۱۰۰۰kV/μs به ترتیب، برای پست های ۲۳۰ و ۴۰۰ استفاده می شود.

✓ نکته: با استفاده از رابطه فوق می توان فاصله مجاز برقگیرها تا تجهیزات مورد حفاظت یا Protective Distance را محاسبه کرد (با این فرض که U_p از سطح استقامت عایقی تجهیزات بیشتر نشود).

❖ افت ولتاژ القایی در برقگیر

✓ با توجه به وجود اندوکتانس هادی برقگیر (L_c)، افت ولتاژی ناشی از این اندوکتانس در شرایط تخلیه وجود دارد. در محاسبات عملی، معمولا اندوکتانس هادی برقگیر برابر 1.22μH/m شیب جریان تخلیه (di/dt) برابر 5kA/μs فرض می شود.

این ولتاژ در تعیین سطح حفاظتی برقگیر باید لحاظ شود.

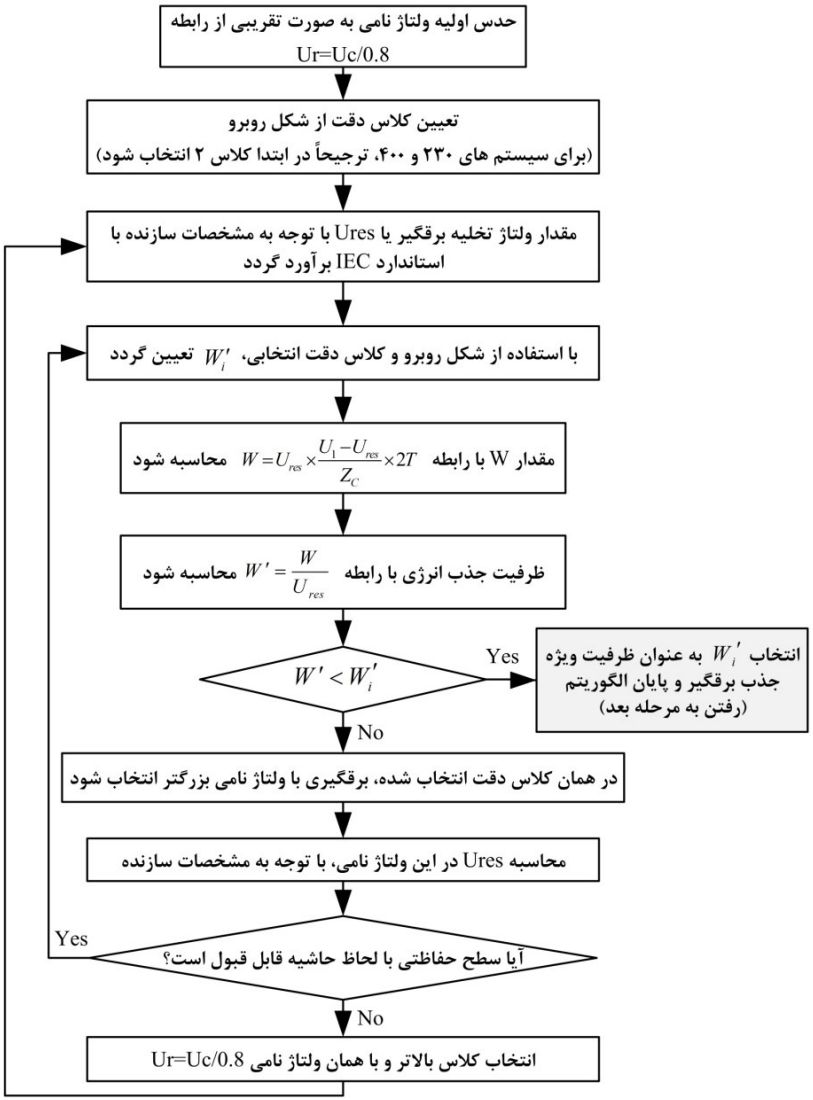
$$\Rightarrow V = L_c . \frac{di}{dt} = 1.22 \times 5 = 6.1\ kV / m$$

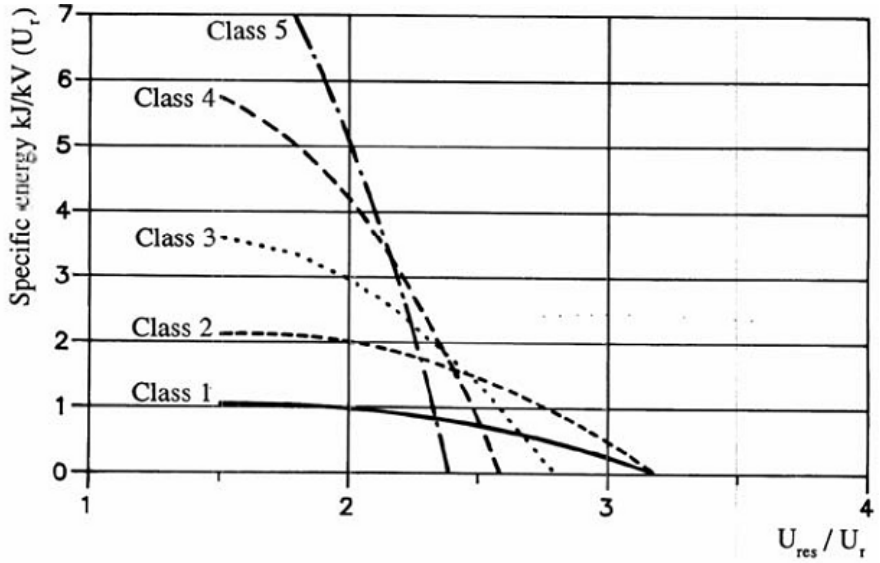
روش گام به گام در طراحی مشخصات برقگیرها

$$MCOV > 1.05 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

1. انتخاب ولتاژ کار دائم برقگیر (Uc)
2. تعیین قابلیت جذب انرژی ویژه برقگیر ('W)

✓ این پارامتر در ارتباط با امواج کلیدزنی است. در صورتی که نتوان تخمین مطلوبی برای آن زد، از الگوریتم زیر می توان استفاده کرد:





روش گام به گام در طراحی مشخصات برقگیرها

3. **انتخاب ولتاژ نامی برقگیر (U_r)**

✓ با توجه به مقدار W' بدست آمده از مرحله دوم (از الگوریتم و یا تخمین زده شده توسط طراح)، مراحل زیر برای انتخاب U_r باید طی شود:

- ولتاژ نامی انتخاب شده در مرحله دوم همان $1.25MCOV$ است (چرا؟) و در این مرحله استفاده می شود.
- با توجه به اتصالی فاز به زمین و ضریب C_E، باید TOV_E محاسبه شود:

$$TOV_E = C_E \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

مدت زمان استمرار ولتاژ از روی مشخصات شبکه (سیستم زمین) و رله ها تعیین می گردد
(به طور معمول، برای شبکه انتقال یک ثانیه و شبکه توزیع سه ثانیه)

- سایر اضافه ولتاژهای موقت موجود در سیستم (TOV_1، TOV_2 و .... TOV_n) به همراه زمان استمرار آنها شناسایی شود.
به عنوان مثال، اگر یک خط طولانی متصل به یک نیروگاه باشد، اضافه ولتاژ TOV باید برای این حالت، براساس تنظیمات رله های اضافه ولتاژ و اضافه فرکانس ژنراتور، محاسبه شود.
- ولتاژ نامی برقگیر (که بزرگتر یا مساوی با اضافه ولتاژ موقت ۱۰ ثانیه ای است)، براساس زمان استمرار (T_r) اضافه ولتاژها از رابطه زیر بدست می آید:

$$U_r \geq \max\left\{1.25MCOV, \frac{TOV_E}{T_{rE}}, \frac{TOV_1}{T_{r1}}, \ldots, \frac{TOV_n}{T_{rn}}\right\}$$

4. **کلاس دریچه اطمینان برقگیر** (Pressure Relief Class)
5. **تعیین فاصله مجاز برقگیر از تجهیزات مورد حفاظت**
6. **محاسبه افت ولتاژ القایی در هادی برقگیر**

روش گام به گام در طراحی مشخصات برقگیرها

مثال: در یک پست 400kV، برقگیر مناسب در ورودی خطوط 400kV، با فرضیات زیر، تعیین کنید:

- ✓ طول بزرگترین خط 400kV وارد شده به پست برابر 300km با امپدانس موجی ۳۵۰ اهم؛
- ✓ C_L برابر 1و و C_E برابر 1.4؛
- ✓ مدت زمان مجاز استمرار اتصال کوتاه برابر یک ثانیه؛
- ✓ ولتاژ تخلیه برقگیر U_{res}=850kV؛
- ✓ پیک ولتاژ شارژ خط در حالت کلیدزنی برابر ۳ پریونیت؛

حل:

- ✓ در خط 400kV، Um=420kV است و کلاس تخلیه اولیه را برابر ۲ انتخاب می کنیم؛
- ✓ حدس اولیه ولتاژ نامی برقگیر:

$$U_r = \frac{U_C}{0.8} = \frac{1.05 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}}{0.8} = 318kV$$

- ✓ براساس جدول اسلاید ۲۰، نزدیکترین ولتاژ استاندارد به مقدار 318kV، 324kV است. بنابراین، Ures در مقابل موج سوئیچینگ برابر 712.8kV می باشد.
- ✓ براساس منحنی های کلاس تخلیه برقگیرها (شکل اسلاید ۲۳):

$$\frac{U_{res}}{U_r} = \frac{712.8}{324} = 2.2 \xrightarrow{for\ "Class\ 2"} W_i' = 1.9\ kJ/kV$$

ادامه حل:

✓ محاسبه ظرفیت جذب با رابطه موردنظر:

$$T_{(\mu s)} = \frac{l_{(km)}}{0.3} = \frac{300}{0.3} = 1000\,\mu s\ ,\quad U_1 = 3pu = 3\times\frac{420\times\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1029\,kV$$

$$W' = \frac{U_{res}.\dfrac{U_1 - U_{res}}{Z_C}.2T}{U_r} = \frac{712.8.\dfrac{1029-712.8}{350}.2000}{324} = 3.975\ kJ/kV > W_i'$$

✓ با توجه به اینکه W' از مقدار مجاز آن یعنی W'_i بیشتر است، پس باید براساس جدول اسلاید ۲۰، Ur را افزایش داد. نزدیکترین ولتاژ استاندارد 342kV است. در این مورد، برای حالت سوئیچینگ ولتاژ باقیمانده برابر 752.4kV و برای حالت صاعقه، ولتاژ باقیمانده برابر 889kV است. با توجه به اینکه ولتاژ باقیمانده حالت صاعقه از ولتاژ تخلیه برقگیر صورت مسئله بیشتر است، کلاس ۲ قابل قبول نیست.

✓ طراحی برای کلاس تخلیه ۳

✓ در کلاس تخلیه ۳، ۷درصد از سطح ولتاژ حفاظتی برقگیر در مقابل موج صاعقه و ۴درصد از سطح حفاظتی برقگیر در مقابل موج سوئیچینگ کاهش می یابد:

$$U_r = 324kV \Rightarrow U_{res} = 0.96\times 712.8 = 684.3kV$$

$$\frac{U_{res}}{U_r} = \frac{684.3}{324} = 2.1 \xrightarrow{for\ "Class\ 3"} W_i' = 2.98\ kJ/kV$$

✓ محاسبه ظرفیت جذب با رابطه:

$$W' = \frac{U_{res}.\dfrac{U_1 - U_{res}}{Z_C}.2T}{U_r} = \frac{684.3\times\dfrac{1029-684.3}{350}\times 2000}{324} = 4.16\ kJ/kV > W_i'$$

روش گام به گام در طراحی مشخصات برقگیرها

ادامه حل:

- با توجه به اینکه W' از مقدار مجاز آن یعنی W'_i بیشتر است، پس باید Ur را افزایش داد. نزدیکترین ولتاژ استاندارد 342kV است. در این مورد، برای حالت سوئیچینگ ولتاژ باقیمانده برابر $752.4\times0.96=722.3kV$ و برای حالت صاعقه، ولتاژ باقیمانده برابر $889\times0.93=826.8kV$ است. با توجه به اینکه ولتاژ باقیمانده حالت صاعقه از ولتاژ تخلیه برقگیر صورت مسئله کمتر است، کلاس ۳ همچنان قابل قبول است:

$$\frac{U_{res}}{U_r}=\frac{722.3}{342}=2.1 \xrightarrow{for\ "Class\ 3"} W_i'=2.98\ kJ/kV$$

- محاسبه ظرفیت جذب با رابطه:

$$W'=\frac{722.3\times\frac{1029-722.3}{350}\times2000}{342}=3.7\ kJ/kV>W_i'$$

- با توجه به اینکه W' از مقدار مجاز آن یعنی W'_i بیشتر است، پس باید Ur را افزایش داد. نزدیکترین ولتاژ استاندارد 360kV است. در این مورد، برای حالت سوئیچینگ ولتاژ باقیمانده برابر $792\times0.96=760.3kV$ و برای حالت صاعقه، ولتاژ باقیمانده برابر $936\times0.93=870.5kV$ است. با توجه به اینکه ولتاژ باقیمانده حالت صاعقه از ولتاژ تخلیه برقگیر صورت مسئله بیشتر است، کلاس ۳ قابل قبول نیست.

- طراحی برای کلاس تخلیه ۴:

$$U_r=324kV \Rightarrow \begin{cases} U_{res}=0.96\times0.96\times712.8=656.9kV & for\ Switching \\ U_{res}=0.93\times0.93\times842=728.2kV & for\ Lighting \end{cases}$$

$$\frac{U_{res}}{U_r}=\frac{656.9}{324}=2.027 \xrightarrow{for\ "Class\ 4"} W_i'=4.2\ kJ/kV$$

ادامه حل:

✓ محاسبه ظرفیت جذب با رابطه:

$$W' = \frac{656.9 \times \frac{1029 - 656.9}{350} \times 2000}{324} = 4.31\ kJ/kV > W_i'$$

✓ با توجه به اینکه W' از مقدار مجاز آن یعنی W'_i بیشتر است، پس باید Ur را افزایش داد. نزدیکترین ولتاژ استاندارد 342kV است. در این مورد، برای حالت سوئیچینگ ولتاژ باقیمانده برابر $752.4 \times 0.96 \times 0.96 = 693.4kV$ و برای حالت صاعقه، ولتاژ باقیمانده برابر $889 \times 0.93 \times 0.93 = 768.9kV$ است. با توجه به اینکه ولتاژ باقیمانده حالت صاعقه از ولتاژ تخلیه برقگیر صورت مسئله کمتر است، کلاس ۴ همچنان قابل قبول است:

$$\frac{U_{res}}{U_r} = \frac{693.4}{342} = 2.027 \xrightarrow{for\ "Class\ 4"} W_i' = 4.2\ kJ/kV$$

$$W' = \frac{693.4 \times \frac{1029 - 693.4}{350} \times 2000}{342} = 3.89\ kJ/kV < W_i' \qquad OK$$

✓ پس برقگیر با کلاس تخلیه ۴ و ولتاژ نامی 342kV انتخاب می گردد.

✓ از طرفی داریم:

$$U_r \geq \max\left\{1.25MCOV, \frac{TOV_E}{T_{rE}}, 342kV\right\} = \max\left\{318kV, \frac{1.4 \times \frac{420}{\sqrt{3}}}{1}, 342kV\right\} = 342$$

✓ در نهایت ولتاژ نامی برقگیر همان 342kV خواهد بود.