هماهنگی عایقی در سیستمهای الکتریکی

دکتر محمود پور کرمانی

دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف

مهندس محمود احمدی‌پور

شرکت مشانیر

چکیده

انتخاب استقامت عایقی تجهیزات در سیستمهای الکتریکی با توجه به‌مشخصات وسائل حفاظتی و به‌منظور کاهش احتمال بروز خطا در اثر اضافه ولتاژهایی که در سیستم ظاهر می‌شوند به‌حدی که از نظر اقتصادی و عملیاتی قابل قبول باشد از مهمترین قسمتهای طراحی سیستمهای الکتریکی می‌باشد. در این مقاله ضمن بررسی علل به‌وجود آمدن اضافه‌ولتاژها و چگونگی پیش‌بینی و محاسبه آنها به‌بررسی دو روش متداول در هماهنگی عایقی (روش آماری و روش غیرآماری) پرداخته می‌شود.

Insulation Coordination in Electric Power Systems

M. Pour Kermani, Ph.D.

Elect. Eng. Dept. Sharif Univ. of Tech

M. Ahmadi Pour, M.Sc.

Moshanir Co.

ABSTRACT:

Basic concepts and rules for insulation coordination in electric power systems are discussed in this paper.

At first the nature of the different overvoltages as well as their cause are discussed in details, while the basic procedure for the estimation or calculation of them are also considered.

Then the implementation of different surge protective devices or other techniques for limitting the amplitude of overvoltages are described and compared in detail.

Finally two well known methods for selection of the insulation strength in Electric Power System (Insulation coordination) and their application with respect to different type of insulations are discussed. This two methods are respectively:

– Statistical method.

– Deterministic (conventional) method.

۸۲/۱ میرکبیر

مقدمه

شکست الکتریکی در عایقها . از متداولترین نوع خطاهایی است که باعث اختلال در کار عادی سیستمهای الکتریکی گردیده و بدین ترتیب قابلیت اطمینان سیستم را در رابطه با تعداد و مدت خطاها[1] تحت تأثیر قرار می‌دهد .

شاید اگر فقط در سیستم‌های الکتریکی ، ولتاژهای عادی کار[2] مطرح بودند، این امکان وجود داشت که سیستم عایقی را به‌نحوی طراحی نمود که خطاهائی از این نوع در سیستم وجود نداشته و یا احتمال بروز آنها بسیار ناچیز باشد. اما واقعیت این است که در سیستم علاوه بر ولتاژهای مزبور، اضافه ولتاژهای غیرقابل اجتنابی[3] نیز بوجود می‌آید که عایقهای سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد .

در عمل به‌لحاظ مسائل اقتصادی و تکنیکی این امکان وجودندارد که استقامت عایقی را آن‌چنان بوجود آورد که قطعا" فشارهای ناشی از اضافه ولتاژهای مزبور را تحمل نماید . لذا بایستی به‌وسیله تدابیر خاصی فشارهای ایجاد شده در سیستم را در محدوده‌ای که از نظر فنی و اقتصادی توجیه‌پذیر باشد کنترل و محدود کرده و آن‌گاه سیستم عایقی (حد استقامت عایقی) را با پذیرش یک حد مشخص از احتمال خطا[4] انتخاب نمود . بنابراین هماهنگی عایقی طبق تعریفی که استاندارد IEC71-1 ارائه می‌دهد عبارت است از: انتخاب استقامت عایقی تجهیزات در مقابل ولتاژهایی که می‌تواند در سیستم (سیستمی که تجهیزات مزبور در آن قرار خواهند گرفت) با توجه به‌مشخصات وسائل حفاظتی موجود (محدودکننده اضافه ولتاژها) ظاهر شود ، به‌منظور کاهش احتمال بروز خسارت (یا مختل نمودن تداوم سرویس) در حدی که از نظر اقتصادی و عملیاتی قابل قبول باشد .

اصول هماهنگی عایقی

اصول کلی هماهنگی عایقی را با توجه به‌مطالب فوق می‌توان در سه مرحله زیر خلاصه نمود :

ـ محاسبه و یا پیش‌بینی انواع اضافه ولتاژها در سیستم .

ـ محدود نمودن اضافه‌ولتاژهای پیش‌بینی شده به‌کمک تکنیک‌های خاصی از قبیل استفاده از برقگیرها ـ مقاومت‌های وصل و قطع در کلیدهای قدرت و . . .

ـ تعیین استقامت عایقی تجهیزات به‌منظور محدود نمودن ریسک خطاهای عایقی[4] در حد مشخصی در اثر اضافه ولتاژهای مزبور .

۱ـ محاسبه و یا پیش‌بینی انواع اضافه ولتاژها در سیستم و چگونگی محدود نمودن آنها .

۱ـ۱ـ اضافه ولتاژهای صاعقه[5]

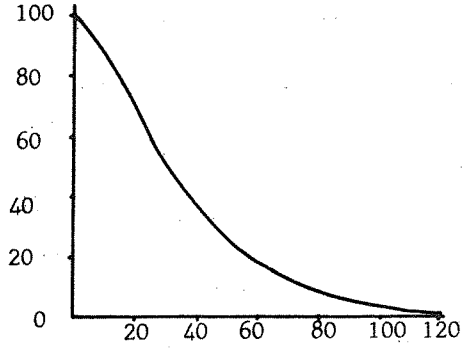
این اضافه ولتاژها از آنجا که منشا تولیدشان خارج از سیستم می‌باشد به‌اضافه‌ولتاژهای خارجی[6] نیز معروف می‌باشند و در اثر برخورد صاعقه به‌هادی[7] یا برخورد صاعقه به‌سیم محافظ و یا اسکلت فلزی خطوط انتقال نیرو[8] و یا از طریق القا به‌شبکه‌های برق تحمیل و توسط خطوط فشار قوی به‌سایر نقاط شبکه انتقال می‌یابند .

در واقع با حرکت ابرها و ایجاد طوفانهای ابری (جابه‌جائی هوای گرم و سرد در یک تکه ابر) پلاریته بارهای الکتریکی نظم پیدا کرده و شدت میدان الکتریکی بین ابر و زمین افزایش می‌یابد و قبل از برخورد صاعقه به‌زمین ، ستونی از بارهای الکتریکی به‌طول کیلومترها از ابر به‌طرف زمین ایجاد شده که نهایتا" این ستون کانال هدایت‌کننده‌ای برای برخورد صاعقه به‌زمین خواهد بود .

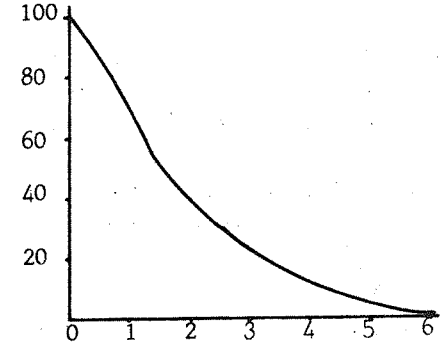
طبق مشاهدات انجام شده طول این کانال به‌صورت پله‌ای و پشت سر هم گسترش می‌یابد و اگرچه مسیر هر پله مستقیم بوده ولی پله‌های متوالی در یک جهت نبوده و پس از رسیدن کانال به‌اطراف زمین (یا وسیله زمین شده) پرش نهائی به‌طرف نزدیک‌ترین نقطه زمین شده انجام می‌گیرد . و نهایتا" مسیر هادی بین ابر و زمین برقرار گشته و جریان بسیار زیادی که به Return Stroke معروف است به‌زمین جاری می‌شود .

براساس اندازه‌گیریهای انجام شده ۹۰% صاعقه‌ها دارای پلاریته منفی می‌باشند . مهمترین مشخصه‌های الکتریکی صاعقه شدت جریان و شکل موج و احتمال وقوع آن[9] می‌باشد . اسیلوگرامهای مربوطه نشان می‌دهند که شدت جریان صاعقه بسته به زمان متغیر و در حدود میکروثانیه به‌مقدار حداکثر خودرسیده، و سپس به‌مرور از شدت آن کاسته می‌شود و در واقع شکل موج آن متشکل از دو منحنی نمائی می‌باشد . از آنجا که شکل موج صاعقه‌ها مشابه و یکسان نبوده و به‌طور آماری با هم متفاوت می‌باشند ، لذا در طراحی سیستم‌های عایقی و آزمایشهای مربوطه مشخصه استانداردی برای شکل موجهای صاعقه تعیین شده که همگان با آن آشنائی دارند . $1.2/50\ \mu s$

توابع توزیع احتمال درمورد دامنه (شکل ۱) و زمان پیشانی (شکل ۲) امواج مزبور از فاکتورهای مهم در طراحی می‌باشند که بستگی به‌ضریب کرونیک[10] (تعداد روزهای رعد و برق در سال) دارد .



شکل ۱ـ دامنهٔ جریان (کیلوآمپر)



شکل ۲ـ زمان پیشانی (میکروثانیه)

درمورد محاسبه تعداد صاعقه‌هائی که به‌وسیله خط گرفته می‌شود روابط تجربی وجود دارد که بر مبنای فرض سایه الکتریکی خطوط انتقال استوار می‌باشد. در واقع چنین تصور می‌شود که هر خط انتقال یک سایه الکتریکی روی زمین ایجاد می‌کند که پهنای آن در حدود ۲ برابر ارتفاع خط از هر طرف خط می‌باشد و اگر صاعقه‌ای در برخورد به‌زمین در محدوده سایه مزبور قرار گیرد به‌وسیله خط انتقال گرفته می‌شود و درغیراین‌صورت اثری روی خط انتقال ندارد. بنابراین رابطه زیر تعداد صاعقه‌های گرفته شده توسط خط را محاسبه می‌نماید.

$$N = L.W.Ng$$

L : طول خط.

W : پهنای سایه خط

Ng : چگالی صاعقه برحسب Flashes/Km–Year

چگالی صاعقه در یک منطقه بخصوص رابطه مستقیم با سطح کرونیک منطقه داشته و براساس تجارب حاصله در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ آن از نظر مقدار می‌باشد.

رابطه تجربی زیر مبین این مسأله است.

$$Ng = 1.1 \frac{KL}{1+1.4\sqrt{KL}}$$

KL : سطح کرونیک منطقه

پهنای سایه خطوط نیز بطور تجربی از رابطه زیر قابل استخراج می‌باشد.

$$W = 2R + b$$

b : پهنای موءثر خط

R : ارتفاع موءثر خط یا شعاع جذب صاعقه

برای محاسبه R نیز فرمول تقریبی زیر وجود دارد

$$R = 16.3Hs^{0.61}$$

Hs : ارتفاع موءثر استراکچر است که درمورد خطوط انتقال از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$Hs = hgw - \frac{2}{3} \text{ Mid Span Sag}$$

hgw : ارتفاع سیم محافظ می‌باشد.

طبق تجربیات Burgsdorf/Kostenkov رابطه زیر نیز درمورد تعداد صاعقه‌های گرفته شده به‌وسیله خطوط انتقال وجود دارد.

$$N = \frac{2.7}{30} Hs.KL \quad \text{Flashes / 100 Km – Year}$$

و فرمول دیگری نیز که خیلی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$N = (4Hs+b).K.KLx10^{-1} \quad \text{Flashes / 100 Km – Year}$$

می‌باشد که در آن K ثابت ارتباط دهنده Ng و KL می‌باشد و در حدود ۰/۰۵ ± ۰/۱۵ است.

بهرحال با برخورد صاعقه به‌خط انتقال امواج ولتاژ و جریان ایجاد می‌شوند که با سرعت نور در هر دو جهت حرکت کرده و ولتاژ ایجاد شده با جریان عبوری (جریان تخلیه تقریبا" به‌دو قسمت می‌شود) به‌وسیله امپدانس مشخصه خط به‌هم ارتباط می‌یابند.

$$U = IZ \quad , \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

این امواج در طول خط انتشار یافته و به‌پستهای فشار قوی می‌رسند و چنانچه در مسیر خود به‌نقطه بازی (کلید باز – ترانسفورماتور ...) برخورد نمایند ضمن انتقال به‌طرف دیگر منعکس شده و برمی‌گردند.

۲–۱ – اضافه‌ولتاژهای کلیدزنی [۱۱]

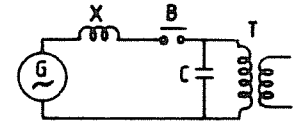
این اضافه‌ولتاژها که پدیده‌های گذرای الکترومغناطیسی می‌باشند در اثر ایجاد ولتاژی به‌نام Recorery Voltage بین کنتاکتهای یک کلید در هنگام عملکرد و ایجاد قوس مجدد [۱۲] به‌وجود می‌آیند.

شدت این امواج در هنگام قطع مدار بستگی به‌وسائل قطع‌کننده و همچنین پارامترهای مدار دارد ولی در زمان وصل نه‌تنها به‌طرح کلید و پارامترهای مدار بستگی داشته بلکه به‌زاویه ولتاژ نسبت به‌جریان بعد از بسته شدن (زاویه V & I) نیز بستگی دارد و به‌هرحال در سیستم‌هایی که از وسایل محدودکننده استفاده نمی‌شود بین ۲/۵ تا ۴ پریونیت و درصورت استفاده از تکنیک‌های محدودکننده مثل مقاومت وصل در کلیدها بین ۲ تا ۲/۵ پریونیت و درصورت استفاده از تکنیک‌های پیشرفته‌تر (مقاومت‌های چندمرحله‌ای) بین ۱/۵ تا ۲ پریونیت خواهد بود.

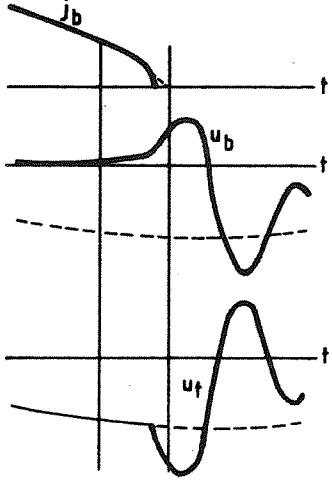
عوامل تولیدکننده این اضافه ولتاژها در سیستم به‌شرح زیرند:

الف: قطع ترانسفورماتور بی‌بار و یا راکتور موازی

در زمان قطع جریانهای اندوکتیو کم درصورتی‌که قبل از صفر شدن جریان اتفاق بیفتد به‌علت تناسب شار مغناطیسی در هسته ترانسفورماتور با جریان مغناطیس‌کننده مقداری انرژی مغناطیسی در ترانسفورماتور باقی می‌ماند که به‌انرژی الکترواستاتیکی در خازنهای پراکندگی که بسیار کوچک می‌باشند تبدیل شده و در آنها ایجاد ولتاژ بالائی می‌نماید. در شکل ۳ این فرآیند نشان داده شده است.



شکل مدار



جریان عبوری از کلید

ولتاژ دوسر کلید

ولتاژ دوسر ترانسفورماتور

شکل ۳

ب : قطع خطوط طولانی باز (قوس مجدد) :

قطع خطوط بی‌بار طولانی باعث قطع جریان زیاد خازنی شده و در هنگام صفر شدن جریان و موقعی‌که ولتاژ در مقدار حداکثر خود می‌باشد کامل می‌گردد . بعد از قطع ، ولتاژ مستقیمی معادل ولتاژ فاز روی خط باقی می‌ماند که به‌کندی از بین می‌رود ولی ولتاژ طرف سیستم طبق فرکانس شبکه تغییر می‌کند و لذا بعد از نیم سیکل ولتاژ دو سر کلید در واقع دو برابر ولتـاژ فاز می‌گردد و اگر در این حالت قوس مجدد در داخل کلید ایجاد شود ، خطاز طریق اندوکتانس شبکه تخلیه خواهد شد و نوسانی با فرکانس اصلی تا چندصد هرتز به‌وجود خواهد آورد . حال اگر جریان تخلیه در موقع صفر قطع شود (که این امکان وجود دارد) ولتاژ مستقیمی با پلاریته مخالف و دامنه تقریبا " دوبرابر قبل روی خط باقی خواهد ماند که بعد از یک نیم سیکل دیگر ولتاژ دو سر کلید به سه برابر ولتاژ فاز خواهد رسید که در چنین صورتی احتمال یک قوس مجدد دیگر و افزایش بیشتر ولتاژ نیز وجود دارد . شکل (۴) این پدیده را نشان می‌دهد .

ج : وصل خطوط بی‌بار :

وقتی یک خط به‌صورت بی‌بار به‌یک شبکه برقدار وصل می‌گردد ولتاژ به‌صورت موج سیار به‌انتهای خط رسیده و منعکس می‌گردد . درصورتی‌که قبل از برقدار کردن ، خط مزبور شارژ شده باشد و عمل وصل در زمانی صورت گیرد که پلاریته ولتاژ سیستم ، مخالف پلاریته ولتاژ شارژ روی خط باشد ، این ولتاژ می‌تواند حتی به‌سه برابر ولتاژ . بعد از برگشت در ته خـط برسد . معمولا " این حالت در موقع وصل مجدد سریع ۱۳ صورت می‌گیرد و درصورتی‌که‌هر سه فاز کلید همزمان بسته نشود حتی ولتاژهای بیشتری نیز می‌توانند به‌وجود بیایند .

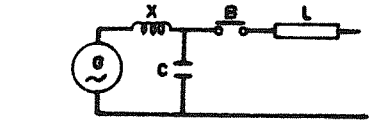
د : قطع جریانهای اتصال کوتاه :

جریانهای اتصال کوتاه دارای یک موءلفه با فرکانس اصلی وموءلفه با فرکانس‌های بالا می‌باشند .

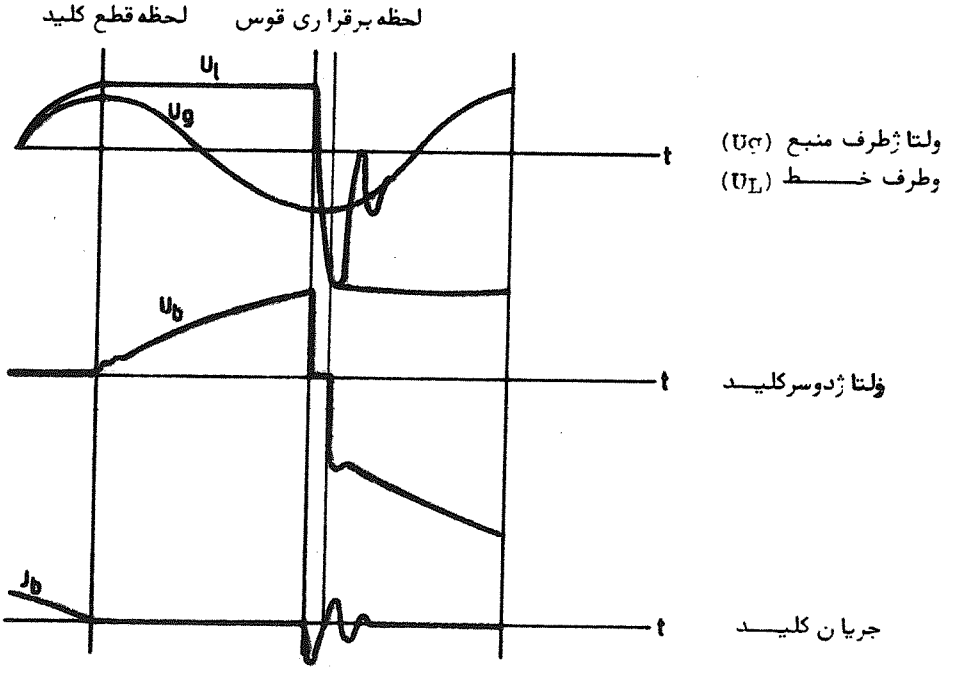
موءلفه‌با فرکانس اصلی درصورت عدم امکان قطع همزمان هر سه فاز و یا عدم تکمیل شدن قطع جریان تا لحظه صفر شدن جریان‌موءلفه با فـرکانس بالا یک فراینـد گذرا را در مـدار شـامل خـازن‌هـا و اندوکتانس‌های شبکه به‌وجود آورده و ولتاژی را دو سر کنتاکتهای کلید به‌وجـود می‌آورد که به Transient Recovery Voltage (T.R.V.) معروف است .

این ولتاژ نهایتا " به‌مقدار ولتاژ شبکه کاهش می‌یابد ولی به‌صورت نوسانی و با فرکانس در حدود چند کیلوهرتز مطابق شکـل ۵ تغییر می‌کند .

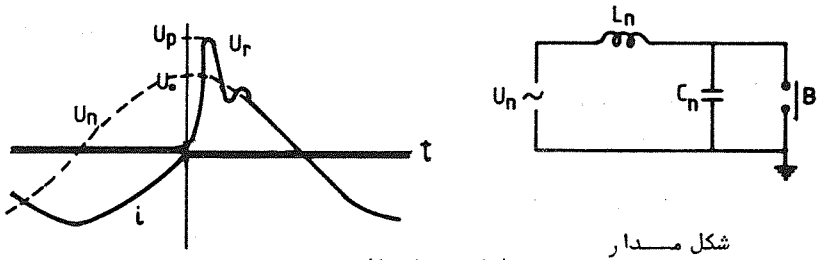
اضافه ولتاژهای کلیدزنی را می‌توان به‌طرق مختلفی که به‌شرح زیر خلاصه می‌گردند محدود نمود



شکل مـدار



شکل ۴



شکل مـــدار

ولتاژوجریان کلید

شکل ۵

الف استفاده از مقاومت‌های حذف‌کننده ضربه:

از متداولترین متدها استفاده از مقاومت در وسائل قطع و وصل می‌باشد و روش تزریق مقاومت در کلید می‌تواند هم در مرحله قطع و هم در مرحله وصل مورد استفاده قرار گیرد. در هنگام قطع ترانسفورماتورها و یا راکتورها پدیده قطع جریان قبل از صفر شدن بوسیله میرا شدن جریان در مدار قوس از طریق مقاومت مزبور عملی می‌گردد و ضمنا" مسیری برای تخلیه انرژی ذخیره شده در ترانسفورماتور بوجود می‌آید. در هنگام برقدار کردن خطوط بی‌بار اگر کلید را به Preinsertion Resistor مجهز نمائیم بصورتی‌که عمل وصل در دو مرحله انجام گیرد یعنی در مرحله اول مقاومت بصورت سری با خط قرار گرفته و در مرحله دوم که مقاومت اتصال کوتاه شده، عمل وصل کامل گردد، این امر باعث جلوگیری از ایجاد اضافه ولتاژ اشاره شده می‌گردد.

ب. *قطع و وصل سنکرون:*

یکی دیگر از متدهای کنترل دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی کنترل زمان قطع و وصل و یا بعبارت دیگر قطع و وصل در زمانی که ولتاژ در نقطه دلخواه بوده، می‌باشد.

ج. متد دیگر استفاده از کلیدهای Restrike-Free می‌باشد که امروزه کلیدهای مدرن تمامی دارای این ویژگی می‌باشند.

د استفاده از سیستم‌های ۹ برقگیر در خطوط انتقال بجای ۶ برقگیر برای محدود نمودن اضافه ولتاژ در وسط خطوط انتقال و حذف مقاومت‌های وصل نیز از تکنیکهای جدیدی است که مطرح می‌باشد. البته بدیهی است که برقگیرهای از نوع اکسید روی در این حالت مناسب‌تر می‌باشند.

۳ـ۱. *اضافه‌ولتاژهای موقت*[۱۴]

این اضافه ولتاژها که "معمولا" با دوره زمانی بیشتر از ۵ سیکل بوجود می‌آیند ناشی از موارد زیر می‌باشند:

الف. رزونانس و فرورزونانس:

اثر متقابل اندوکتانس و کاپاسیتانس شبکه باعث رزونانس می‌گردد. اضافه ولتاژهای ناشی از رزونانس در شبکه اغلب از نوع فرو رزونانس بوده که عمدتا" ناشی از اشباع هسته ترانسفورماتورهای قدرت و یا ترانسفورماتورهای ولتاژ می‌باشد و درصورتی بوجود می‌آید که راکتانس اندوکتیو قبل از اشباع از راکتانس خازنی مدار بیشتر بوده و بدلایلی شرایط گذرا باعث کاهش اندوکتانس و هماهنگی آن با ظرفیت مزبور گردیده و رزونانس را ایجاد نمایند که بفرو رزونانس معروف است. در هر حالت تفاوت رزونانس عادی[۱۵] با فرورزونانس[۱۶] در این است که در حالت اول افزایش ولتاژ بطور پیوسته با تغییر فرکانس صورت می‌گیرد ولی در حالت دوم در ولتاژ سلف یا خازن در اثر افزایش ولتاژ منبع یک جهش ناگهانی بوجود می‌آید.

ب. اتصالیهای فاز بزمین:

اتصال یک فاز بزمین باعث افزایش ولتاژ در دو فاز سالم دیگر می‌گردد که شدت آن بستگی بنحوه زمین شدن سیستم دارد. در سیستمهای بطور مؤثر زمین شده[۱۷]، ضریب اتصال زمین[۱۸] که معرف میزان افزایش ولتاژ مزبور می‌باشد از ۱/۴ کمتر بوده درحالی‌که در سیستمهای بطور غیرمؤثر زمین شده[۱۹] این ضریب به ۱/۷ نیز می‌رسد.

ج. قطع بار:

وقتی باری در نقطه‌ای از شبکه قطع می‌گردد و یا از دست می‌رود، افت ولتاژهای ناشی از جریان بار در مقاومت و اندوکتانس شبکه از بین رفته و در عوض اضافه ولتاژ ناشی از جریان خازنی خطوط بی‌بار ایجاد می‌گردد که می‌تواند بمقادیر بیشتری در اثر افزایش سرعت ژنراتورها و خودتحریکی آنها برسد.

بدترین حالت این نوع اضافه ولتاژها در شرایطی که یک شبکه ضعیف با خطوط طولانی بارهای بزرگی را تغذیه نماید اتفاق می‌افتد. این نوع اضافه ولتاژها می‌توانند در حد معقولی با افزایش سطح اتصال کوتاه در شبکه، جبران خطوط توسط راکتورهای موازی و یا خازنهای سری و یا کنترل مناسب ژنراتورها کاهش داده شوند.

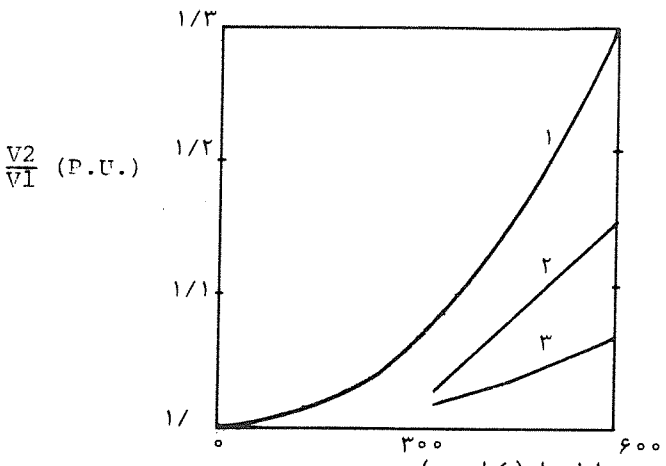
د. اثر فرانتی:

در خطوط جبران نشده در حالت بی‌باری ولتاژ خطوط افزایش یافته که این ولتاژ نسبت بولتاژ مبدا طبق فرمول تقریبی زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$\frac{V2}{V1} = \frac{1}{\cos\beta L}$$

که در آن β طول الکتریکی خط بوده که برای هر ۱۰۰ کیلومتر در حدود ۶° می‌باشد. در خطوط جبران شده فرمول کمی پیچیده‌تر می‌باشد.

شکل (۶) میزان اضافه‌ولتاژها را در جبران‌های مختلف نشان می‌دهد.



۱ـ جبران نشده

۲ـ 50% جبران شده با خازن سری

۳ـ 50% جبران شده با خازن سری و 70% با راکتورموازی

شکل ۶

نحوه محاسبات اضافه‌ولتاژها :

امروزه با استفاده از امکانات و قابلیت‌های بسیار زیادی که برنامه کامپیوتری "EMTP"[20] دارد به‌سادگی می‌توان اضافه ولتاژهای مطرح شده را محاسبه نموده و به‌طور کلی حتی هماهنگی عایقی را انجام داد ولی بدیهی است که داشتن اطلاعات و آمار دقیق از شبکه و مدل‌سازی صحیح از اساسی‌ترین کارهایی است که محاسبات دقیق و صحیح را ممکن می‌سازد . لازم به‌توضیح است که این برنامه کامپیوتری در حال حاضر در وزارت نیرو و سازمانهای تابعه آن (شرکت توانیر ـ شرکت مشانیر ـ مرکز تحقیقات نیرو) و برخی از دانشگاهها موجود و قابل استفاده می‌باشد .

۲ـ تعیین استقامت عایقی تجهیزات به‌منظور محدود نمودن ریسک خطاهای عایقی

با فرض آشنائی خواننده به‌مفهوم استقامت عایقی و چگونگی تعیین (آزمایش) استقامت عایقی تجهیزات الکتریکی و همچنین سطوح استاندارد استقامت عایقی و بدون وارد شدن در مباحث مربوط به‌شرح دو روش متداول در هماهنگی عایقی می‌پردازیم :

الف . روش آماری[21] که در آن خصوصیات آماری اضافه‌ولتاژها و استقامت‌های عایقی مورد بررسی قرار گرفته و براساس احتمال خطای مشخص[4] تصمیم‌گیری می‌شود .

ب . روش معمولی[22] : که در آن حداکثر اضافه ولتاژ و حداقل استقامت عایقی مورد توجه قرار گرفته و فاصله مشخصی[23] بین آنها قرار داده می‌شود . انتخاب هریک از دو روش فوق بستگی به‌نوع عایقها و اضافه ولتاژها دارد .

۱ـ۲ ـ روش آماری :

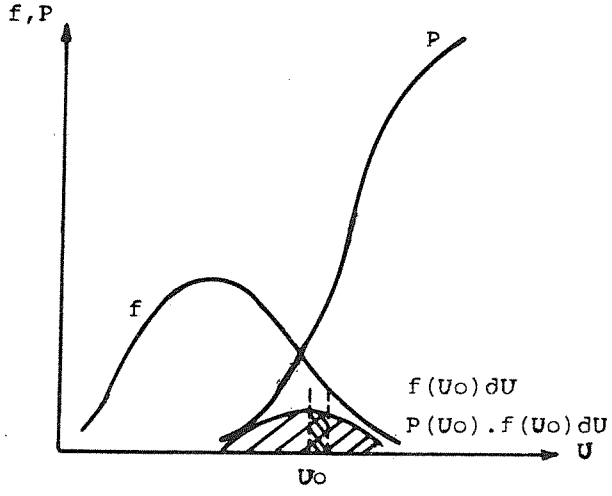
استفاده از روش آماری شامل محاسبات احتمال خطا[4] براساس توزیع آماری اضافه ولتاژها و احتمال شکست عایقها می‌باشد . بنابراین عمدتا" درمورد عایقهای بازگشت‌پذیر که مقادیر آماری سطوح تحمل آنها از روش آزمایشهای شکست قابل استخراج است ، قابل اعمال می‌باشد .

منحنی توزیع احتمالی اضافه‌ولتاژها می‌تواند به‌وسیله محاسبات تئوریکی و یا اندازه‌گیری‌ها در سیستم تعیین گردد . با داشتن منحنی توزیع فرکانسی اضافه ولتاژها و منحنی احتمال تحمل عایقی ، احتمال خطا[4] از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد .

$$R = \int_0^{\infty} P(Uo)\, f(Uo)\, .\, dU$$

که $f(Uo)dU$ احتمال ایجاد اضافه‌ولتاژ با دامنه بین Uo و $Uo + dU$ و $P(Uo)$ احتمال ایجاد شکست در عایق تحت اضافه ولتاژ Uo می‌باشد .

شکل ۷ مبین این روش می‌باشد .



شکل ۷

که در آن :

f : توزیع اضافه ولتاژ

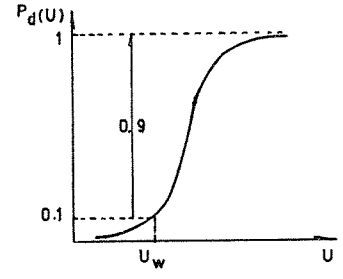
P : احتمال شکست مخرب

U : ولتاژ آزمایش و

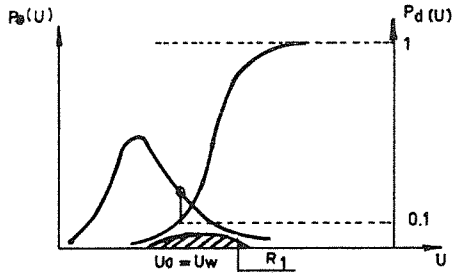
R معرف ریسک خطا می‌باشد .

محاسبه ریسک خطا

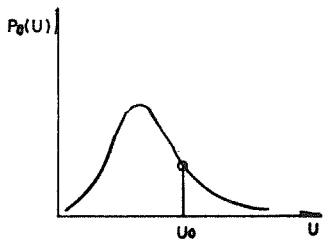
این روش مقدار نسبی احتمال خطا[4] را برای عملیات و تجهیزات مختلف به‌دست می‌دهد و بنابراین امکان مقایسه طرحهای مختلف وجود دارد . ریسک خطا می‌تواند به‌وسیله محدود کردن اضافه‌ولتاژها و یا افزایش استقامت الکتریکی عایقها کاهش داده شود . افزایش استقامت الکتریکی باعث شیفت منحنی توزیع فرکانسی اضافه‌ولتاژها به‌سمت راست و کاهش R می‌گردد . اشکال ۸ الی ۱۳ که از استاندارد IEC استخراج شده این موضوع را نشان می‌دهد .



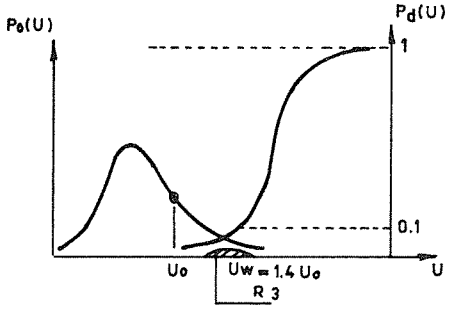
شکل ۱۰



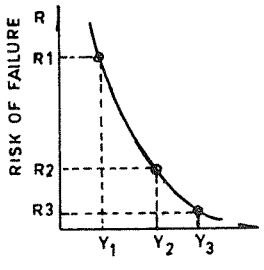
شکل ۹



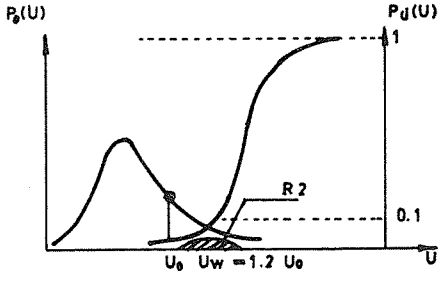
شکل ۸



شکل ۱۳



شکل ۱۲



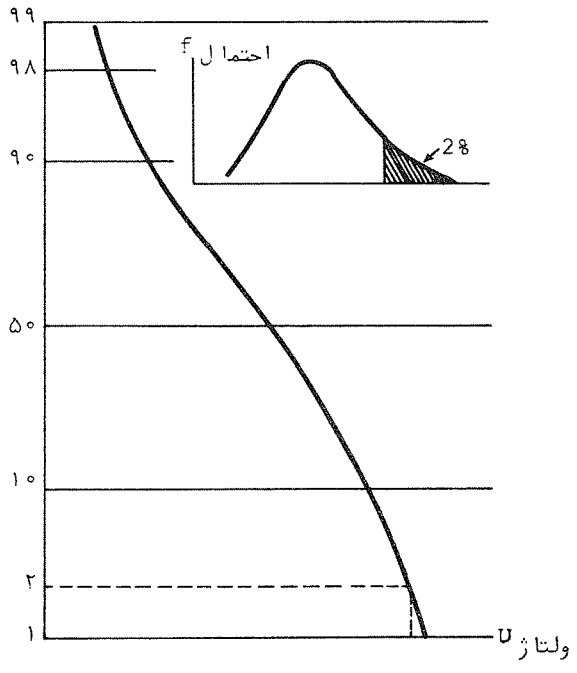
شکل ۱۱

برای یک بررسی دقیق و محاسبه ریسک خطا فاکتورهای زیادی از قبیل شکل سیستم ــ شکل موج اضافه ولتاژها ــ شرایط جوی و غیره بایستی مورد توجه و بررسی قرار گیرند.

ولی با توجه به‌این‌که‌از نقطه‌نظر عملی این‌کارها غیرممکن به‌نظر می‌رسد لذا بایستی فرضهای ساده‌کننده‌ای، بدون این‌که دقت کل محاسبات را در حد قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند، مورد توجه قرار داد. طبق توصیه استاندارد IEC – 71 می‌توان چنین فرض کرد که منحنی توزیع احتمال اضافه‌ولتاژها از نوع تابع گوسی (نرمال) می‌باشد. با این فرض هر منحنی احتمال می‌تواند به‌وسیله یک نقطه که معرف احتمال مشخص می‌باشد و انحراف استاندارد مربوطه σ مشخص شود.

منحنی توزیع احتمال اضافه ولتاژها طبق توصیه استاندارد IEC –71 به‌وسیله اضافه ولتاژهای آماری با احتمال ایجاد مرجع (۲%) و منحنی توزیع احتمال تحمل در عایقها نیز با احتمال مرجع (۹۰%) تعیین می‌گردد.

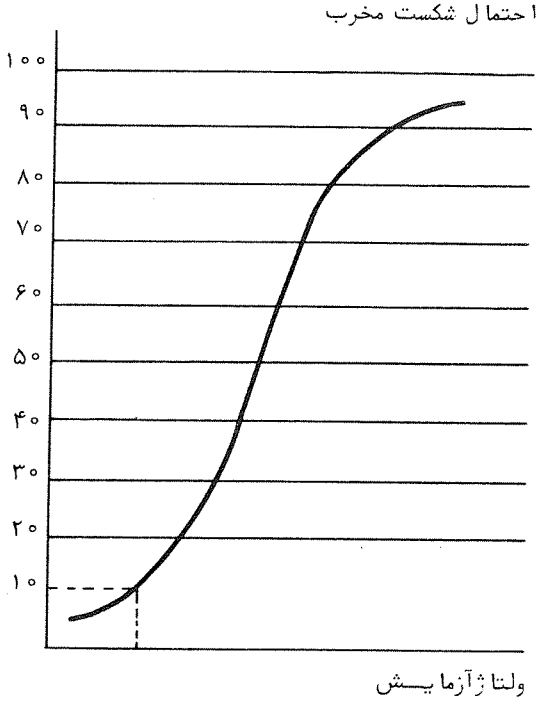
اشکال ۱۴ و ۱۵ این منحنی‌ها را نمایش می‌دهند.



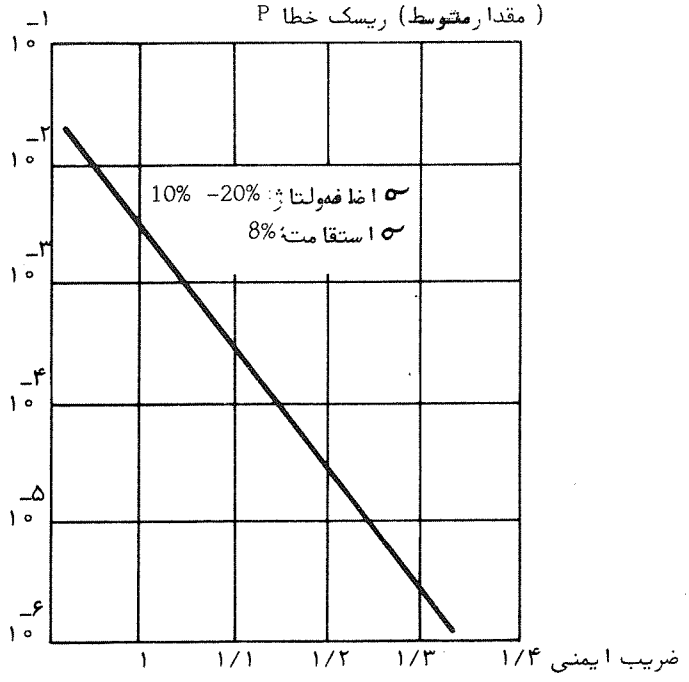
شکل ۱۴ــ اضافه‌ولتاژهای آماری

نسبت بین تحمل آماری ولتاژ و اضافه ولتاژ آماری را طبق تعریف IEC–71 ضریب ایمنی آماری[۲۴] می‌گویند. این ضریب می‌تواند معرف ریسک خطا باشد، زیرا با فرضهای فوق یک رابطه مشخص بین ضریب مزبور و ریسک خطا به‌دست خواهد آمد. البته این رابطه به‌مقدار انحراف استاندارد σ بستگی دارد. شکل ۱۶ این رابطه را برای σ های مشخص نشان می‌دهد.

استفاده از این منحنی کار هماهنگی عایقی را بسیار ساده می‌کند. بدین‌ترتیب که با یک ریسک خطای مشخص مقدار ضریب ایمنی مشخص می‌شود و این ضریب می‌تواند حداقل استقامت الکتریکی عایقها را محاسبه نماید و براساس آن طبق توصیه استاندارد IEC–71 اولین



شکل ۱۵ــ استقامت آماری در مقابل ضربه



شکل ۱۶ــ رابطه بین ضریب ایمنی آماری و ریسک خطا

محدوده سطوح عایقی استاندارد که کمتر از مقادیر مزبور نباشد به‌عنوان سطوح نامی عایقها انتخاب می‌گردد.

۲ــ۲ــ روش معمولی (غیرآماری):

این روش نسبتاً ساده‌تر از روش آماری بوده زیرا فقط کافی است یک فاصله مشخص بین حداکثر اضافه ولتاژهای سیستم با سطوح تحمل عایق‌ها انتخاب گردد. درمورد تجهیزات حفاظت نشده، ماکزیمم اضافه ولتاژی که در سیستم می‌تواند ظاهر شود بایستی محاسبه و یا حدس زده شود و ملاک عمل قرار گیرد ولی درمورد تجهیزات حفاظت شده خصوصیات وسائل حفاظتی حداکثر اضافه ولتاژها را با ایجاد یک سطح حفاظتی تعیین می‌نماید. حد فاصله موردنظر که اساساً براساس تجربه تعیین می‌گردد عدم قطعیت‌های اجتناب‌ناپذیر را در تعیین اضافه ولتاژهای واقعی در سیستم و همچنین سطوح تحمل عایقها می‌پوشاند. این حد درمورد اضافه ولتاژهای کلیدزنی در حدود ۱۰% تا ۲۰% (معمولاً ۱۵%) و درمورد اضافه‌ولتاژهای صاعقه در حدود ۲۰% تا ۴۰% می‌باشد. رقم ۲۰% تا ۲۵% درمورد اخیر درصورتی که اضافه‌ولتاژهای واقعی ناشی از انعکاس‌ها در پستها نیز در نظر گرفته شده باشند قابل اعمال می‌باشد. روش معمولی معمولاً درمورد سیستم‌های با ولتاژ حداکثر کمتر از ۳۰۰ کیلوولت که هزینه عایق‌بندی نسبتاً پایین می‌باشد قابل اعمال بوده ولی در ولتاژهای بالا جنبه اقتصادی در کاهش سطوح عایقی بسیار مهم بوده و لذا روشهای آماری که روش دقیق‌تری در طراحی عایقها می‌باشد، درصورتی که قابل اجرا باشد، اعمال می‌گردد.

ولی در هر صورت برای عایقهای برگشت‌ناپذیر[25] هیچ روش آماری وجود نداشته و لذا الزاماً از روش معمولی استفاده می‌شود.

۳ــ هماهنگی عایقی به‌وسیله وسائل حفاظتی:

۱ــ۳: فواصل هوائی[26]

یکی از وسائل حفاظتی ساده، Spark Gap بوده که بسیار ارزان و قابل تعمیر می‌باشد ولی درصورت عملکرد قادر به‌برگشت دادن سیستم به شرایط اولیه بدون قطعی برق نمی‌باشد و لذا در این نوع هماهنگی عایقی بایستی تنظیم فواصل هوائی به‌نحوی انجام گیرد که منجر به عملکرد زیادی در هنگام عملیات قطع و وصل[27] و یا عملیات دیگر در سیستم نشود و آنگاه سطوح تحمل عایقی با فاصله مشخص و کافی نسبت به‌سطح حفاظتی به‌دست آمده انتخاب گردد. حال با توجه به‌این‌که سطح حفاظتی این وسائل تابع شرایطی از قبیل شکل موج و شرایط محیطی می‌باشد، لذا گستردگی بیشتری نسبت به‌سطح حفاظتی برقگیر داشته و ضمناً مشخصه ولتاژ ــ زمان آنها در امواج با پیشانی تند تغییرات نامشخص دارد. بهرحال در این نوع هماهنگی عایقی سطوح عایقی انتخاب شده معمولاً بیشتر از حالتی است که هماهنگی به‌کمک برقگیر انجام گیرد. ناگفته نماند که در ولتاژهای پایین که سطوح عایقی بالائی انتخاب می‌شود کاربرد این وسائل بسیار مناسب می‌باشد. نکته دیگر قابل ذکر این است که در این حالت با بریده شدن شکل موج[28] و به‌صفر رسیدن یکباره آن نسبت به‌حالتی که از برقگیر استفاده شود به‌مراتب فشارهای نامناسب‌تری را به‌بعضی از قسمتهای سیستم از قبیل سیم‌پیچهای فشار قوی وارد می‌آورد.

۲ـ۳ ـ هماهنگی عایقی بوسیله برقگیرهای معمولی

کاربرد برقگیرهای معمولی که به‌هیچوجه نبایستی در اضافه‌ولتاژهای با فرکانس قدرت عمل نمایند (زیرا باعث اتصال کوتاه و تخلیه انرژی بسیار زیادی در خود شده که باعث اتصال کوتاه سیستم و نابود شدن برقگیر می‌گردد) به‌این منظور انجام می‌گیرد که سطوح اضافه ولتاژ صاعقه و کلیدزنی در حد مشخص کاهش داده شوند. همین شرایط باعث می‌گردد تا یک ولتاژ نامی مشخص برای برقگیرها انتخاب گردد که مبنای هماهنگی عایقی قرار خواهد گرفت.

برقگیرهای معمولی براساس اضافه ولتاژهایی که در هنگام خطای فاز به‌زمین اتفاق می‌افتد انتخاب می‌گردند و بنابراین انتخاب ولتاژ نامی برقگیر به‌نحوهٔ زمین شدن سیستم ویا فاکتورزمین[18] بستگی دارد.

برای سیستم‌های با ولتاژ بیشتر از ۱۳۲ کیلوولت که در کشور ایران معمولا" به‌طور موثر زمین می‌شوند فاکتور زمین ۱۸ و در نتیجه اضافه‌ولتاژهای موقت ناشی از اتصال زمین کم خواهد بود (معمولا" کمتر از ۱/۴ برابر ولتاژ در حالت عادی) در حالی‌که در سیستم‌های با ولتاژ کمتر از ۱۳۲ کیلوولت که به‌طور غیرموثر زمین می‌شوند (در مواردی از طریق Arc Suppression Coil و یا ترانسفورماتور زمین) فاکتور اتصال زمین می‌تواند به‌مقدار $\sqrt{3}$ نیز برسد.

اضافه ولتاژهای کلیدزنی با انرژی بالا (زمان زیاد) که جریان تخلیه زیادی را برای مدت زیادی اعمال می‌نماید، ممکن است باعث سوختن الکترودهای برقگیر بشود و لذا این امر محدودیتی در کاربرد برقگیرهای معمولی محسوب می‌گردد.

در چنین حالتی معمولا" سعی می‌شود برقگیری با ولتاژ نامی بالاتر انتخاب گردد تا در ولتاژهای کلیدزنی مزبور عمل ننمایند و همین امر باعث انتخاب سطوح عایقی بالاتری می‌گردد.

۳ـ۳ـ هماهنگی عایقی با برقگیرهای اکسید روی

این برقگیرها حتی می‌توانند اضافه‌ولتاژهای با فرکانس شبکه را برای مدت مشخصی تحمل نمایند که با در نظر گرفتن این ویژگی حتی در سیستم‌های زمین‌نشده می‌توان سطح عایقی کمتری را به‌دست آورد. توانائی جذب انرژی برقگیرهای معمولی به‌وسیله فواصل هوائی ۲۹ محدود می‌شود، ولی برقگیرهای بدون فاصله هوائی توانائی جذب انرژی زیاد را داشته و لذا می‌توانند سطح حفاظتی کمتری را نسبت به برقگیرهای معمولی ایجاد نمایند. از این روست که امروزه کاربرد برقگیرهای اکسید روی بخصوص در ولتاژهای بالا بسیار متداول گشته و این امکان را به‌وجود آورده که بتوان هزینه عایق‌کاری در سیستمها را بدون افزایش ریسک خطا تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داد.

منابع

1. Surge Protection of Power Systems Westinghouse Electric CORP. 1975.
2. Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Westtinghouse Electric Corp. 1976.
3. Transmission Line Reference Book 345 KV and Above, Electric Power Research Institute 1975.
4. Mechanism of Lightning Flashover on High Voltage Transmission Line. (ELECTRA No. 27, 1973 ER Whithead & D.W. Gilman).
5. IEC Standards:
   IEC 71–1 to 71–3 Insulation Coordination
   IEC 60 High Voltage Test Techniques
   IEC 99 Lightning Aresters
6. Insulation Coordination and Selection of Surge Arresters BBC Review NO.4, 1979
7. Standard Hand Book for Electrical Engineers, Donald G. Fink MC. GRAW HILL

پاورقی

1. Frequency & Duration
2. Normal Voltages
3. Over Voltages
4. Risk of Failure
5. Lightning Overvoltages
6. External Overvoltages
7. Direct Strokes
8. Back Floshover
9. Frequency of Occurence
10. Kraunic Level
11. Switching Overvoltages
12. Restrike
13. Rapid Reclosing
14. Temporary Overvoltages
15. Linear Resonance
16. Non Linear Resonance
17. Effectively Earthed
18. **Fault Factor**
19. Non **Effective Earthed**
20. Electro Magnetic Transient Program
21. Statistical
22. Determinestic "Conventional"
23. Safety Margin
24. Statistical Safety Factor
25. Non–Self Restoring
26. Insulation Coordination by Spark Gap
27. Switching
28. Chopping
29. Spark Gaps