



# اضافه ولتاژها و هماهنگی عایقی در شبکه‌های قدرت

مؤلفان:

دکتر احمد غلامی

(عضو هیأت علمی دانشگاه سمنان)

دکتر محسن نیاستی

(عضو هیأت علمی دانشگاه علم و صنعت)



اسم کتاب: اضافه ولتاژها و هماهنگی عایقی در شبکه‌های قدرت  
مؤلفان: دکتر محسن نیاستی - دکتر احمد غلامی  
نوبت چاپ: اول - بهار ۱۳۹۵  
ناشر: انتشارات دانشگاه سمنان

.....  
حق چاپ محفوظ و متعلق به انتشارات دانشگاه سمنان می‌باشد.

تقدیم بہ:

روح پاک



صفحه	عنوان	فهرست مطالب
۱	فصل اول : ضرورت بررسی اضافه ولتاژها و هماهنگی عایقی در سیستمهای قدرت	
۱	۱-۱ مقدمه	
۳	۱-۲ اهمیت مطالعات هماهنگی عایقی در شبکه قدرت	
۶	۱-۳ ساختار کتاب	
۸	فصل دوم : انواع اضافه ولتاژها در شبکههای قدرت	
۸	۲-۱ مقدمه	
۱۲	۲-۲ اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه	
۱۲	۲-۲-۱ فرآیند شکل گیری تخلیه جوی	
۱۳	۲-۲-۲ طبقه بندی تخلیه جوی	
۱۵	۲-۲-۳ بررسی اثرات صاعقه	
۱۶	۲-۲-۴ مشخصات امواج صاعقه	
۱۹	۲-۲-۵ پیش بینی وقوع صاعقه	
۲۱	۲-۲-۶ انواع اضافه ولتاژهای صاعقه	
۲۱	۲-۲-۶-۱ اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه	
۲۲	۲-۲-۶-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه	
۲۵	۲-۲-۷ اضافه ولتاژهای الکترواستاتیکی	
۲۶	۲-۲-۸ تاثیر اضافه ولتاژهای صاعقه بر شبکههای توزیع	
۲۷	۲-۳ اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی	
۲۸	۲-۳-۱ عوامل و شرایط ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی	
۲۹	۲-۳-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از قطع ناگهانی و نوسانات بار	
۲۹	۲-۳-۳ اضافه ولتاژهای ناشی از قطع و وصل خطوط	
۲۹	۲-۳-۴ اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی جریانهای خازنی و سلفی	
۳۰	۲-۳-۵ شکل موج اضافه ولتاژ کلیدزنی	
۳۱	۲-۳-۶ ولتاژ بازیابی گذرا در کلیدهای قدرت	
۳۳	۲-۴ اضافه ولتاژهای موقتی	
۳۴	۲-۴-۱ اضافه ولتاژهای موقتی ناشی از وقوع فرورزونانس	



۴۱	۲-۴-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از خطای عایقی سیستم
۴۲	۲-۴-۳ اضافه ولتاژهای ناشی از قطع خطوط
۴۳	۲-۴-۴ اضافه ولتاژ ناشی از خطوط طویل بی بار
۴۵	۲-۵ سؤال و تمرین
۴۶	<b>فصل سوم : مروری بر امواج سیار</b>
۴۶	۳-۱ مقدمه
۴۷	۳-۲ معادلات امواج سیار
۴۹	۳-۲-۱ خط انتقال بدون تلفات
۵۲	۳-۲-۲ انرژی موج سیار
۵۳	۳-۲-۳ انتشار و انعکاس امواج سیار
۵۷	۳-۳ سؤال و تمرین
۵۸	<b>فصل چهارم : حفاظت شبکه‌های قدرت در برابر اضافه ولتاژها</b>
۵۸	۴-۱ مقدمه
۵۹	۴-۲ روشهای حفاظت در برابر اضافه ولتاژها
۵۹	۴-۲-۱ حفاظت اولیه در برابر صاعقه
۶۰	۴-۲-۱-۱ سیمهای محافظ
۶۱	۴-۲-۱-۲ صاعقه گیرهای میله‌ای
۶۱	۴-۲-۱-۳ سیستم پراکنده کننده صاعقه
۶۲	۴-۲-۲ حفاظت ثانویه در برابر صاعقه
۶۲	۴-۲-۲-۱ تجهیزات محدود کننده صاعقه
۶۳	۴-۲-۲-۲ سیستم حفاظت کابلی تجهیزات
۶۴	۴-۲-۳ زمین کردن نقطه نول سیستم قدرت
۶۵	۴-۲-۳-۱ سیستم با نول زمین نشده
۶۶	۴-۲-۳-۲ سیستم با نول زمین شده مستقیم
۶۶	۴-۲-۳-۳ سیستم با نول زمین شده با مقاومت
۶۷	۴-۲-۳-۴ سیستم با نول زمین شده با راکتور
۶۸	۴-۳ برقگیرها
۶۹	۴-۳-۱ انواع برقگیرها
۶۹	۴-۳-۱-۱ برقگیر میله‌ای یا شاخکی

۷۱	۳-۱-۲-۴ برقگیر سیلیکون کارباید
۷۲	۴-۳-۱-۳ برقگیر اکسید فلزی
۷۴	۴-۳-۱-۴ برقگیر قوس طولانی
۷۵	۴-۳-۲ مشخصات حفاظتی برقگیرها
۷۶	۴-۳-۲-۱ حداکثر ولتاژ کار دایم برقگیر
۷۶	۴-۳-۲-۲ ولتاژ نامی برقگیر
۷۸	۴-۳-۲-۳ جریان نامی برقگیر
۷۸	۴-۳-۲-۴ حداکثر جریان ضربه قابل تحمل
۷۹	۴-۳-۲-۵ ظرفیت انرژی جذب برقگیر
۸۰	۴-۳-۳ انتخاب کلاس برقگیر
۸۲	۴-۳-۴ تست و نگهداری برقگیرها
۸۴	۴-۴ سؤال و تمرین
۸۵	<b>فصل پنجم : اصول هماهنگی عایقی</b>
۸۵	۵-۱ مقدمه
۸۶	۵-۲ مروری بر عایقهای الکتریکی
۸۷	۵-۲-۱ انواع عایقها
۹۳	۵-۲-۲ مقایسه عایقهای الکتریکی
۹۴	۵-۳ مفاهیم و استانداردهای هماهنگی عایقی
۹۵	۵-۳-۱ اصطلاحات و تعاریف
۹۹	۵-۳-۲ استانداردهای هماهنگی عایقی
۱۰۰	۵-۴ روشهای هماهنگی عایقی
۱۰۰	۵-۴-۱ روش احتمالاتی هماهنگی عایقی
۱۰۲	۵-۴-۱-۱ تعیین احتمال وقوع اضافه ولتاژها
۱۰۴	۵-۴-۱-۲ روش قطعی هماهنگی عایقی
۱۰۴	۵-۵ تاثیر شرایط محیطی بر هماهنگی عایقی
۱۰۵	۵-۵-۱ تاثیر دمای محیط
۱۰۶	۵-۵-۲ تاثیر رطوبت محیط
۱۰۷	۵-۵-۳ تاثیر ارتفاع منطقه از سطح دریا

۱۰۸	۶-۵ سوال و تمرین
۱۰۹	<b>فصل ششم : هماهنگی عایقی برای خطوط انتقال نیرو</b>
۱۰۹	۶-۱ مقدمه
۱۱۰	۶-۲ انتخاب عایقهای خطوط هوایی
۱۱۰	۶-۲-۱ مقره‌های سوزنی
۱۱۱	۶-۲-۲ مقره‌های بشقابی
۱۱۵	۶-۲-۳ مقره‌های مهاری
۱۱۶	۶-۲-۴ مقره‌های یکپارچه یا استوانه‌ای
۱۱۷	۶-۲-۵ مقره‌های چرخی
۱۱۸	۶-۳ انواع آرایش مقره‌ها در زنجیره
۱۱۸	۶-۳-۱ زنجیره مقره آویزی
۱۱۹	۶-۳-۲ زنجیره مقره آویزی چندتایی
۱۱۹	۶-۳-۳ زنجیره مقره آویزی V شکل
۱۲۰	۶-۳-۴ زنجیره مقره آویزی V شکل چندتایی
۱۲۱	۶-۳-۵ زنجیره مقره کششی
۱۲۲	۶-۳-۶ زنجیره مقره جامبر
۱۲۳	۶-۴ مشخصات عمومی مقره‌ها
۱۲۴	۶-۵ تعیین فواصل فازی هادی‌های خطوط هوایی
۱۲۴	۶-۵-۱ محاسبه فاصله فازی بر مبنای اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه
۱۲۷	۶-۵-۲ محاسبه فاصله فازی بر مبنای اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی
۱۳۰	۶-۵-۳ محاسبه فاصله فازی بر مبنای آلودگی محیط
۱۳۲	۶-۶ حفاظت خطوط در برابر اصابت مستقیم صاعقه
۱۳۷	۶-۷ برقریب خطوط انتقال
۱۴۰	۶-۸ سوال و تمرین
۱۴۱	<b>فصل هفتم : هماهنگی عایقی در پستها</b>
۱۴۱	۷-۱ مقدمه
۱۴۲	۷-۲ انتخاب عایق پستهای فشارقوی

۱۴۶	۷-۳ تعیین فواصل فازی در پستها
۱۴۷	۷-۳-۱ محاسبه فواصل هوایی فاز به زمین
۱۵۳	۷-۳-۲ محاسبه فواصل هوایی فاز به فاز
۱۵۵	۷-۴ حفاظت پستها در برابر اصابت مستقیم صاعقه
۱۶۶	۷-۵ برقگیرهای پستها
۱۷۲	۷-۶ سؤال و تمرین
۱۷۳	<b>فصل هشتم : اثر آلودگی بر هماهنگی عایقی</b>
۱۷۳	۸-۱ مقدمه
۱۷۴	۸-۲ فرآیند تولید جرقه روی زنجیره مقره
۱۷۶	۸-۳ انواع آلاینده‌ها و منابع تولید آنها
۱۷۸	۸-۳-۱ آلودگی صنعتی
۱۷۸	۸-۳-۲ آلودگی دریایی
۱۷۹	۸-۳-۳ آلودگی کوبری
۱۷۹	۸-۳-۴ آلودگی نواحی کشاورزی
۱۸۰	۸-۴ تعیین سطح آلودگی منطقه
۱۸۳	۸-۵ ارزیابی عایق‌های بیرونی براساس آلودگی محیط
۱۸۴	۸-۵-۱ ارزیابی عایق‌های بیرونی از طریق فاصله خزشی ویژه
۱۸۸	۸-۵-۲ محاسبه عایق‌های بیرونی از طریق ولتاژ استقامت عایقی
۱۹۲	۸-۶ روشهای کاهش تاثیر آلودگی‌ها بر عایقهای بیرونی
۱۹۳	۸-۶-۱ استفاده از مقره با شکلهای بهینه شده
۱۹۳	۸-۶-۲ استفاده از پوشش RTV
۱۹۴	۸-۶-۳ بکارگیری مقره‌های با لعاب نیمه هادی
۱۹۴	۸-۶-۴ شستشوی دوره‌ای
۱۹۵	۸-۶-۵ استفاده از پوشش گریس
۱۹۶	۸-۷ سؤال و تمرین
۱۹۷	<b>فصل نهم : مدلسازی شبکه قدرت برای مطالعاتی حالت گذرا</b>
۱۹۷	۱-۹ مقدمه

۱۹۸	۹-۲ مدل خط انتقال هوایی
۲۰۵	۹-۳ مدل کابلها
۲۰۶	۹-۴ مدل دکل یا برج خط انتقال هوایی
۲۰۹	۹-۵ مدل زنجیره مقره دکل‌های خطوط انتقال
۲۰۹	۹-۶ مدل ترانسفورماتور
۲۱۲	۹-۷ مدل کلیدها
۲۱۳	۹-۸ مدل سیستم زمین
۲۱۶	۹-۹ مدل برقگیر
۲۱۹	۹-۱۰ مدل موج صاعقه
۲۲۲	۹-۱۱ سؤال و تمرین
۲۲۳	<b>فصل دهم : مطالعات هماهنگی عایقی برای یک سیستم قدرت نمونه</b>
۲۲۳	۱۰-۱ مقدمه
۲۲۳	۱۰-۲ بررسی ساختار شبکه تحت مطالعه
۲۲۵	۱۰-۳ مدل‌سازی شبکه
۲۲۶	۱۰-۳-۱ مدل خط انتقال
۲۲۸	۱۰-۳-۲ مدل دکل خط انتقال
۲۲۹	۱۰-۳-۳ مدل زنجیره مقره
۲۳۰	۱۰-۳-۴ مدل صاعقه
۲۳۱	۱۰-۳-۵ مدل سیستم زمین دکل
۲۳۱	۱۰-۳-۶ مدل برقگیر
۲۳۱	۱۰-۳-۷ شبیه سازی خط انتقال
۲۳۶	۱۰-۴ مطالعات هماهنگی عایقی برای یک خط انتقال نمونه
۲۳۷	۱۰-۴-۱ محاسبه استقامت عایقی زنجیره مقره
۲۳۷	۱۰-۴-۱-۱ تعیین استقامت عایقی زنجیره مقره بر مبنای اضافه ولتاژ ناشی از رعد و برق
۲۴۰	۱۰-۴-۱-۲ تعیین حداقل فاصله هوایی هادی در فرکانس قدرت
۲۴۱	۱۰-۴-۱-۳ محاسبات هماهنگی عایقی براساس اضافه ولتاژ کلیدزنی
۲۴۴	۱۰-۴-۱-۴ تعیین تعداد مقره‌ها براساس سطح آلودگی منطقه
۲۴۵	۱۰-۵ سؤال و تمرین

۲۴۶	فصل یازدهم : آزمایشهای فشارقوی مرتبط با هماهنگی عایقی
۲۴۶	۱-۱۱ مقدمه
۲۴۷	۱۱-۲ مشخصات آزمایشهای عایقی براساس استانداردها
۲۴۷	۱۱-۲-۱ انواع شکست در آزمایشهای عایقی
۲۴۸	۱۱-۲-۲ انواع عایقهای تجهیزات فشارقوی
۲۴۹	۱۱-۲-۳ انواع آزمایشهای عایقی
۲۵۰	۱۱-۲-۳-۱ آزمایشهای تحت شرایط خشک
۲۵۰	۱۱-۲-۳-۲ آزمایشهای تحت شرایط مرطوب
۲۵۰	۱۱-۲-۳-۳ آزمایشهای با ولتاژ مستقیم
۲۵۱	۱۱-۲-۳-۴ آزمایشهای با ولتاژ متناوب
۲۵۲	۱۱-۲-۳-۵ آزمایشهای با ولتاژ ضربه صاعقه
۲۵۳	۱۱-۲-۳-۶ آزمایش با ولتاژ ضربه کلیدزنی
۲۵۳	۱۱-۳ آزمایش عایقی کلیدهای قدرت
۲۵۴	۱۱-۳-۱ آزمایش ولتاژ استقامت کوتاه مدت با فرکانس قدرت
۲۵۴	۱۱-۳-۲ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه
۲۵۴	۱۱-۳-۳ آزمایش ولتاژ ضربه کلیدزنی
۲۵۶	۱۱-۴ آزمایش عایقی مقرهها
۲۵۶	۱۱-۴-۱ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه
۲۵۶	۱۰-۴-۲ آزمایش ولتاژ استقامت با فرکانس قدرت در شرایط مرطوب
۲۵۶	۱۱-۴-۳ آزمایش ولتاژ استقامت سوراخ شدگی
۲۵۷	۱۱-۵ آزمایش عایقی مقرههای عبوری
۲۵۷	۱۱-۵-۱ ولتاژ استقامت فرکانس قدرت
۲۵۸	۱۱-۵-۲ آزمایش ولتاژ استقامت ضربه صاعقه
۲۵۹	۱۱-۵-۳ آزمایش ولتاژ استقامت کلیدزنی
۲۶۰	۱۱-۵-۴ آزمایش اندازهگیری ضریب تلفات عایقی
۲۶۱	۱۱-۵-۵ آزمایش اندازهگیری تخلیه جزئی
۲۶۱	۱۱-۶ آزمایش عایقی تجهیزات حفاظتی
۲۶۲	۱۱-۶-۱ آزمایش ولتاژ استقامت ضربه

۲۶۲	۱۱-۶-۲ آزمایش ولتاژ فشار قوی با فرکانس قدرت
۲۶۳	۱۱-۷ آزمایش عایقی ترانسفورماتورها
۲۶۳	۱۱-۷-۱ آزمایش ولتاژ استقامت AC با منبع مجزا
۲۶۳	۱۱-۷-۲ آزمایش ولتاژ AC القایی
۲۶۴	۱۱-۷-۲-۱ آزمایش ولتاژ AC القایی کوتاه مدت برای ترانسفورماتور با سیم پیچی یکنواخت
۲۶۴	۱۱-۷-۲-۲ آزمایش ولتاژ AC القایی کوتاه مدت برای ترانسفورماتور با سیم پیچی غیریکنواخت
۲۶۵	۱۱-۷-۲-۳ آزمایش ولتاژ AC القایی بلند مدت برای ترانسفورماتورهای با سیم پیچی یکنواخت و غیریکنواخت
۲۶۵	۱۱-۷-۳ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه
۲۶۶	۱۱-۷-۴ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه بریده شده
۲۶۶	۱۱-۷-۵ آزمایش ولتاژ ضربه کلیدزنی
۲۶۷	۱۱-۸ آزمایش عایقی کابلها
۲۶۷	۱۱-۸-۱ آزمایش ولتاژ استقامت
۲۶۸	۱۱-۸-۲ اندازه گیری مقاومت عایقی در دمای محیط
۲۶۹	۱۱-۸-۲ آزمایش اندازه گیری مقاومت عایقی در حداکثر دمای کاری هادی
۲۷۰	۱۱-۸-۳ آزمایش ولتاژ ۶۰ دقیقه
۲۷۰	۱۱-۸-۴ آزمایش با ولتاژ ضربه
۲۷۰	۱۱-۸-۵ آزمایش ولتاژ DC غلاف بیرونی کابل
۲۷۱	۱۱-۸-۶ آزمایش عایقی کابل
۲۷۱	۱۱-۹ آزمایش برقیها
۲۷۱	۱۱-۹-۱ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه
۲۷۲	۱۱-۹-۲ آزمایش ولتاژ ضربه کلیدزنی
۲۷۲	۱۱-۹-۳ آزمایش ولتاژ فرکانس قدرت
۲۷۴	۱۱-۱۰ آزمایشهای رایج برای عایق تجهیزات
۲۷۴	۱۱-۱۰-۱ استقامت دی الکتریک
۲۷۶	۱۱-۱۰-۲ آزمایش اندازه گیری مقاومت عایقی یا آزمایش میگر
۲۷۶	۱۱-۱۱ سؤال و تمرین
۲۷۷	مراجع

## فصل ۱

### ضرورت بررسی اضافه ولتاژها و هماهنگی عایقی در شبکه‌های قدرت

#### ۱-۱ مقدمه

عایق الکتریکی در سیستم‌های قدرت نقش مهمی برای طول عمر تجهیزات الکتریکی دارند به طوریکه در عمل، عمر مفید بیشتر تجهیزات الکتریکی، همان عمر مفید عایق آنهاست. عوامل متعددی در تخریب و تضعیف عایق الکتریکی تجهیزات موثرند که یکی از مهمترین و رایجترین آنها تنش‌های الکتریکی وارده بر عایق تجهیزات الکتریکی می‌باشد. از طرفی سیستم‌های قدرت همیشه در معرض اضافه ولتاژهای ناخواسته و مخرب داخلی و خارجی قرار دارند. اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از صاعقه و کلیدزنی و اضافه ولتاژهای موقتی ناشی از وقوع فرورزونانس، وقوع انواع خطاها و کارایی ضعیف سیستم زمین و غیره، به طور پیوسته عایق تجهیزات را مورد تهدید قرار می‌دهند. از اینرو تلاش‌های زیادی جهت جلوگیری از بروز این اضافه ولتاژها و کاهش دامنه آنها صورت گرفته است. با استفاده از تجهیزات حفاظتی مناسب مثل برقگیرها و همچنین افزایش سطح عایقی تجهیزات می‌توان اثرات نامطلوب اضافه ولتاژها را کاهش داد، ولی این امر نیاز به سرمایه‌گذاری زیاد جهت تهیه، نصب و نگهداری تجهیزات حفاظتی و افزایش استقامت عایقی تجهیزات الکتریکی دارد. به طور کلی نمی‌توان یک شبکه قدرت را



بدون حفاظت در مقابل اضافه ولتاژهای داخلی و خارجی سیستم به طور بهینه طراحی نمود. از طرف دیگر از لحاظ اقتصادی و فنی نمی‌توان سیستم را در مقابل تمام تنش‌های ولتاژی حفاظت نمود. لذا در عمل، طراحی سیستم عایقی و انتخاب تجهیزات حفاظتی باید براساس ملاحظات فنی و اقتصادی همزمان انجام شود.

در سیستم‌های قدرت انواع مختلف تنش‌های الکتریکی به صورت اضافه ولتاژهای ناخواسته موقتی و گذرا ایجاد می‌شوند که می‌توانند بر عملکرد عایق تجهیزات سیستم تاثیر نامطلوب بگذارند. به عنوان نمونه، اضافه ولتاژهای ناشی از وقوع صاعقه تاثیر مستقیم بر قابلیت اطمینان شبکه‌های انتقال و توزیع دارند به طوری‌که نتایج مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته در سراسر دنیا نشان می‌دهند که به طور متوسط بیش از ۷۰٪ قطعی‌های مربوط به خطوط انتقال نیرو ناشی از اثرات مستقیم و یا غیر مستقیم صاعقه می‌باشد. بنابراین قابلیت اطمینان سیستم قدرت در هنگام وقوع صاعقه به شدت به عملکرد موثر سیستم حفاظت صاعقه بستگی دارد. بدیهی است که خروج و وقفه خطوط انتقال در اثر صاعقه بر قابلیت اطمینان و عملکرد خطوط و پست‌های پایین دست آن نیز تاثیر مستقیم می‌گذارد. لذا حفاظت خطوط انتقال نیرو در برابر صاعقه از اهمیت بالایی برخوردار است. حفاظت خطوط در برابر اثرات مخرب صاعقه با بکارگیری سیم محافظ، انتخاب درست زنجیر مفره، استفاده از برقگیر خط و اصلاح سیستم زمین پای دکل خطوط میسر می‌باشد.

همچنین یکی از علل اصلی تخریب عایقی سرکابلها، ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ، برقگیرها و سایر تجهیزات مشابه در شبکه‌های فشار متوسط، می‌تواند اضافه ولتاژهای موقتی ناشی از وقوع پدیده فرورزونانس یا رزونانس غیر خطی باشد. احتمال تولید اضافه ولتاژهای ناشی از وقوع پدیده فرورزونانس در شبکه‌های فشارمتوسط کابلی و شبکه‌های توزیع هوایی دارای خطوط کابلی طویل و بانکهای خازنی، در اثر گذرهای کلیدزنی و یا صاعقه بسیار محتمل می‌باشد.

بنابراین انتخاب استقامت عایقی مناسب برای تجهیزات به منظور تحمل تنش‌های ناشی از ولتاژ نامی و اضافه ولتاژهای ایجاد شده در سیستم با توجه به شرایط محیطی و مشخصات تجهیزات حفاظتی، امری ضروری است که هدف اصلی هماهنگی عایقی می‌باشد.

لازم به ذکر است که عایق برخی تجهیزات در سیستم‌های الکتریکی به آسانی قابل

تعمیر و تعویض می‌باشند و عملکرد نامطلوب آنها خسارات اقتصادی و فنی چندانی را ایجاد نمی‌کند. اما تعمیر و تعویض برخی دیگر از تجهیزات الکتریکی که عایق آنها دچار تخریب یا تضعیف شده‌اند، نیازمند به صرف هزینه و زمان زیادی می‌باشد و همچنین ممکن است وقفه طولانی در مسیر تولید، انتقال و توزیع توان ایجاد کند. لذا یکی از اهداف هماهنگی عایقی این است که در صورت ایجاد تنش در سیستم، آسیب کمتری به عایق تجهیزات اصلی و حساس سیستم وارد آید.

به منظور ارزیابی دقیق هماهنگی عایقی بهترین روش استفاده از محاسبات کامپیوتری می‌باشد. ولی استانداردهای زیادی توسط انجمن‌های مختلف علمی همانند IEC و IEEE ارائه شده‌اند که روابط ساده و کاربردی مناسبتری برای هماهنگی عایقی یک سیستم یا تجهیز الکتریکی بیان نموده‌اند.

## ۲-۱ اهمیت مطالعات هماهنگی عایقی در شبکه قدرت

هماهنگی عایقی<sup>۱</sup> عبارت از انتخاب مناسب استقامت عایقی تجهیزات با توجه به اضافه ولتاژهای احتمالی ظاهر شده در سیستم و مشخصه‌های وسائل حفاظت کننده موجود می‌باشد بطوری که احتمال تنشهای الکتریکی مخرب وارده بر تجهیزات که باعث تخریب عایق‌بندی تجهیزات و یا وقفه در تداوم سرویس دهی سیستم می‌شود به یک سطح قابل قبول از نظر اقتصادی و فنی تقلیل یابد. بعبارت دیگر، هدف از هماهنگی عایقی، تعیین مشخصات عایقی تجهیزات مختلف شبکه به منظور بدست آوردن استقامت عایقی لازم تحت ولتاژهای نامی و اضافه ولتاژهای مختلف می‌باشد و هدف نهایی آن حصول اطمینان از ایمنی شبکه و همچنین طراحی یک سیستم قدرت بهینه است. بهینه کردن شبکه، یعنی بدست آوردن بهترین تعادل اقتصادی - فنی ممکن بین عوامل مختلفی که به این هماهنگی بستگی دارند. این عوامل شامل دو گروه زیر می‌باشند:

الف- عوامل اقتصادی شامل:

- هزینه عایقی (مقره‌ها، ترانسفورماتورها، کابلها، ژنراتورها و غیره)

- هزینه تجهیزات حفاظتی (برقگیرها، سیستم حفاظت صاعقه و غیره)
- هزینه ناشی از وقوع خطا شامل هزینه‌های تلفات، تعمیر و نگهداری و وقفه

در سرویس دهی

ب- عوامل فنی شامل:

- اضافه ولتاژهای موجود در سیستم
- مشخصه حفاظتی تجهیزات حفاظت کننده
- استقامت عایقی تجهیزات سیستم قدرت

هدف هماهنگی عایقی در واقع انتخاب حداقل سطح عایقی مورد نیاز برای حصول حداقل هزینه اقتصادی جهت بهره‌برداری از تجهیز مورد نظر می‌باشد. برای انتخاب سطح عایقی ابتدا یک معیار قابلیت اطمینان تعیین می‌گردد و سپس استقامت عایقی تجهیز را با توجه به این معیار و اضافه ولتاژهای موجود در محل نصب تجهیز انتخاب می‌گردد. همچنین اگر بدون تغییر سطح عایقی تجهیزات، معیار قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گیرد، می‌توان اضافه ولتاژها را با استفاده از برق‌گیرها، سیم محافظ و غیره کاهش داد.

بدیهی است که اولین اقدام برای کاهش اثرات مخرب اضافه ولتاژها، جلوگیری از وقوع پدیده‌ها و عوامل تولید کننده آنها در سیستم قدرت می‌باشد. انجام اینکار مخصوصاً برای اضافه ولتاژهای ناشی از وقوع صاعقه همیشه آسان نیست. لذا ضروری است ابتدا نقاط و تجهیزات سیستم با استقامت عایقی ضعیف، مشخص گردیده و سپس نسبت به بالا بردن سطح استقامت عایقی آنها به منظور حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای ناخواسته اقدام گردد. بنابراین بایستی سطح عایقی بخش‌های مختلف سیستم طوری انتخاب شود که جرقه‌های ناشی از تخلیه الکتریکی فقط در نقاط مشخص شده رخ دهند. اهمیت هماهنگی عایقی با افزایش ولتاژ سیستم، افزایش می‌یابد تا هزینه‌های عایقی بهینه شوند.

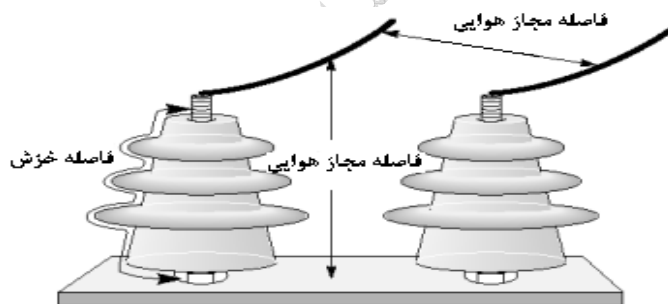
بخش فنی هماهنگی عایقی سیستم قدرت، شامل تعیین فاصله مجاز<sup>۱</sup> و ولتاژ استقامت<sup>۲</sup> تجهیزات می‌باشد.

۱-Clearance

۲-Withstand Voltage

الف) فاصله مجاز

فاصله حد مجاز مطابق شکل (۱-۱) شامل فاصله هوایی یا فاصله جرقه در داخل عایق گازی (هوا، SF6 و ...) و همچنین طول مسیر خزش جرقه روی سطح بیرونی عایق‌های جامد (مقره‌ها، سرکابل) می‌باشد. فاصله مجاز گازی به کوتاهترین فاصله بین دو بخش رسانای سیستم که توسط عایق گازی (هوا، SF6 و ...) از هم جدا شده‌اند، اطلاق می‌گردد. طول خزش، کوتاهترین مسیر بین دو هادی است که بوسیله سطح خارجی مقره بوجود می‌آید. این دو حد مجاز مستقیماً با مفهوم حفاظت در برابر اضافه ولتاژها بستگی دارند ولی مقدار ثابت و یکنواختی نداشته و معمولاً متغیر می‌باشند و این تغییرات به نوع اضافه ولتاژ (سطح ولتاژ، زمان پیشانی، فرکانس، ...) و عواملی مثل فشار گاز و عوامل محیطی (دما، رطوبت، ...) بستگی دارند. فاصله خزش نیز به عواملی همچون فرسایش یا پیری مواد عایقی، شرایط محیطی (رطوبت، آلودگی) و اضافه ولتاژهای موقتی بستگی دارد.



شکل (۱-۱). فاصله مجاز تجهیزات

ب) ولتاژ استقامت تجهیزات

عایق تجهیزات دارای یک منحنی استقامت ولتاژ - زمان می‌باشد که توانایی عایق تجهیز مورد نظر برای تحمل ولتاژهای موجی و گذرا نسبت به زمان را بیان می‌کند. منحنی ولتاژ - زمان هر تجهیز باید بالاتر از منحنی ولتاژ تخلیه برگیر و یا هر وسیله حفاظتی دیگر که وظیفه حفاظت آن تجهیز را دارد قرار بگیرد.

اضافه ولتاژها یکی از مهمترین عوامل مخرب و تهدید کننده عایق تجهیزات شبکه‌های

قدرت بوده و اغلب باعث تخریب عایقی تجهیزات، ایجاد وقفه در سرویس دهی، کاهش کیفیت توان و قابلیت اطمینان سیستم می‌شوند. اضافه ولتاژهای سیستم قدرت به دو گروه کلی، شامل اضافه ولتاژهای موجی یا گذرا و اضافه ولتاژهای موقتی تقسیم می‌شوند. اضافه ولتاژهای گذرا ناشی از صاعقه و کلیدزنی در سیستم قدرت خیلی رایجتر و خطرناکتر بوده و از اهمیت بیشتری در طراحی عایقی (هماهنگی عایقی) سیستم برخوردار می‌باشند. اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی بیشتر در شبکه‌های HV و EHV رایج بوده و اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه مهمترین عامل تهدید و نگرانی در شبکه‌های با سطح ولتاژ زیر HV می‌باشند. البته، در شبکه‌های توزیع و فوق توزیع کلیدزنی خازنی نیز مشکل ساز می‌باشد. اضافه ولتاژهای موقتی غالباً باعث ایجاد جرقه در سطح مقره‌های آلوده می‌شوند. لذا این اضافه ولتاژها در مطالعات هماهنگی عایقی تحت شرایط آلودگی مد نظر قرار می‌گیرند.

### ۳-۱ ساختار کتاب

این کتاب شامل یازده فصل به شرح زیر می‌باشد:

فصل اول با عنوان "ضرورت بررسی اضافه ولتاژها و هماهنگی عایقی در سیستمهای قدرت"، مقدمه‌ای در خصوص مفهوم و ضرورت هماهنگی عایقی در سیستمهای قدرت را بیان می‌نماید.

فصل دوم با عنوان "انواع اضافه ولتاژها در سیستمهای قدرت"، شامل مروری بر انواع و مشخصات اضافه ولتاژهای موقتی و گذرا و عوامل به وجود آورنده آنها در شبکه‌های قدرت می‌باشد.

در فصل سوم با عنوان "مرور امواج سیار"، مشخصات امواج سیار و معادلات حاکم بر آن، مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل چهارم با عنوان "حفاظت سیستمهای قدرت در برابر اضافه ولتاژها" شامل بررسی روشهای حفاظت در برابر انواع اضافه ولتاژهای سیستم قدرت و معرفی تجهیزات حفاظتی مثل برقگیر می‌باشد.

در فصل پنجم با عنوان "اصول هماهنگی عایقی"، مفاهیم و قواعد هماهنگی عایقی در سیستمهای قدرت مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل ششم با عنوان "هماهنگی عایقی خطوط هوایی انتقال نیرو"، حفاظت خطوط انتقال نیرو در برابر اضافه ولتاژها، تعیین فواصل فازی و برقگیر خط بیان شده است.

در فصل هفتم با عنوان "هماهنگی عایقی پستهای فشارقوی"، اصول حفاظت پستهای فشارقوی در برابر اضافه ولتاژها و تعیین فواصل فازی و برقگیر پست بیان شده است.

فصل هشتم با عنوان "اثر آلودگی بر هماهنگی عایقی"، به بررسی آلاینده‌ها و نقش آنها بر هماهنگی عایقی می‌پردازد.

در فصل نهم با عنوان "معرفی مدل‌های کاربردی برای بررسی هماهنگی عایقی در سیستم‌های قدرت"، به بررسی مدل‌های فرکانس بالای تجهیزات اصلی شبکه قدرت به منظور مطالعات حالت گذرای شبکه قدرت تحت شرایط صاعقه و کلیدزنی پرداخته شده است.

فصل دهم با عنوان "آزمایشهای فشارقوی مرتبط با هماهنگی عایقی"، مروری بر انواع آزمایشهای مهم عایقی و استانداردهای مربوطه دارد.

در فصل یازدهم با عنوان "پیاده سازی مطالعات هماهنگی عایقی برای یک سیستم قدرت نمونه"، یک شبکه قدرت نمونه در محیط یک نرم افزار مدلسازی و شبیه سازی شده و رفتار گذرای آن مورد مطالعه قرار گرفته است و همچنین محاسبات عایقی یک خط انتقال ارائه شده است.

امید است مطالب این کتاب که به صورت مختصر و با ادبیاتی آسان نگارش گردیده است مورد استفاده مهندسان، دانشجویان و علاقمندان قرار گرفته، اشتباهات احتمالی موجود جهت اصلاح چاپ بعدی به نویسندگان منعکس شده و پیشنهادات علمی و ساختاری مورد نظر برای درج در متن بازنگری شده نیز در

اختیار مولفین این کتاب قرار گیرد.

مولفان: دکتر محسن نیاستی - دکتر احمد غلامی (انتشارات دانشگاه سمنان)

## فصل ۲

### انواع اضافه ولتاژها در شبکه‌های قدرت

#### ۲-۱ مقدمه

اضافه ولتاژها و گذراها به علت ایجاد تغییرات ناگهانی کمیت‌های الکترومغناطیسی در سیستم قدرت بوجود می‌آیند. اضافه ولتاژها، اغتشاشات ناخواسته‌ای هستند که روی ولتاژ نامی سیستم قدرت قرار گرفته و می‌توانند به صورت حالت تفاضلی (بین مدارها یا فازهای مختلف) و یا به صورت حالت معمولی (بین فازهای خط و زمین) ظاهر شوند. بطور کلی هر ولتاژی که افزایش دامنه آن بیشتر از ۱۰٪ مقدار موثر ولتاژ نامی سیستم باشد، اضافه ولتاژ نامیده می‌شود. اضافه ولتاژها اغلب باعث ایجاد نویز یا اغتشاش، تخریب تجهیزات و تولید جرقه و نهایتاً ایجاد وقفه و قطعی در سرویس دهی سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی می‌شوند و در نتیجه از قابلیت اطمینان و کیفیت توان شبکه‌های قدرت (تولید، انتقال، توزیع و مصرف) می‌کاهند و ممکن است هزینه‌های مالی و زمانی زیادی را به سیستم تحمیل نمایند. ماهیت تصادفی و متغیر اضافه ولتاژها باعث شده که مشخصات آنها را فقط بتوان بصورت آماری جمع آوری کرد. بطور کلی اضافه ولتاژها در سیستم قدرت را می‌توان به انواع مختلف زیر تقسیم بندی نمود:

#### الف - انواع اضافه ولتاژها از لحاظ مدت زمان استمرار

۱- اضافه ولتاژهای موقتی<sup>۱</sup> یا فرکانس قدرت

۱- Temporary Overvoltages (TOV)



اضافه ولتاژهای موقتی اغلب در اثر وقوع ضعف عایقی (اتصال کوتاه) در سیستمهای قدرت با نقطه نول زمین نشده و یا زمین شده با امپدانس بالا، قطع ناگهانی بارهای بزرگ، وقوع پدیده رزونانس و فرورزونانس، اثر فرانتی یا افزایش ولتاژ انتهای خطوط طویل بی بار یا کم بار در اثر تزریق شارژ خازنی خطوط، خازن گذاری بیش از حد تولید می‌شوند.

۲- اضافه ولتاژهای گذرای کند<sup>۱</sup> یا فرکانس متوسط

این نوع اضافه ولتاژها اغلب در اثر کلیدزنی خط تحت بار و قطع و وصل جریان سلفی اتفاق می‌افتند.

۳- اضافه ولتاژهای گذرای سریع<sup>۲</sup> یا فرکانس بالا

اضافه ولتاژهای گذرای سریع بیشتر در اثر وقوع پدیده صاعقه (موج اصلی صاعقه) تشکیل می‌شوند.

۴- اضافه ولتاژهای خیلی سریع<sup>۳</sup> یا فرکانس خیلی بالا

این نوع اضافه ولتاژها اغلب در اثر کلیدزنی در سوئیچگیرهای گازی<sup>۴</sup> و تاثیر صاعقه‌های فرعی بر سیستم تولید می‌شوند.

#### ب- انواع اضافه ولتاژها از لحاظ مکان منبع تولید آنها

۱- اضافه ولتاژهای داخلی<sup>۵</sup>

اضافه ولتاژهایی که منبع ایجاد آنها در داخل سیستم قدرت می‌باشد. از مهمترین آنها اضافه ولتاژهای کلیدزنی<sup>۶</sup> و موقتی هستند.

۲- اضافه ولتاژهای خارجی<sup>۷</sup>

اضافه ولتاژهایی که منبع ایجاد آنها خارج از سیستم قدرت می‌باشد که رایجترین

۱- Slow Transient Overvoltages (STO)

۲- Fast Transient Overvoltages (FTO)

۳- Very Fast Transient Overvoltages (VFTO)

۴- Disconnecter Switch Restrike

۵- Internal Overvoltages

۶- Switching Overvoltages

۷- External Overvoltages

آنها اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه<sup>۱</sup> و تخلیه بارهای الکترواستاتیکی<sup>۲</sup> می‌باشد. البته از دید هر مدار، هر نوع اضافه ولتاژی که محل تولید آن در خارج از آن مدار باشد، اضافه ولتاژ خارجی اطلاق می‌گردد از اینرو اضافه ولتاژهای ناشی از قطع و وصل خطوط، برقدار شدن ترانسفورماتورها، کلیدزنی بار شبکه نیز جزء اضافه ولتاژهای خارجی محسوب شوند.

بنابراین عوامل متعدد خارجی (بروز صاعقه) و داخلی (کلیدزنی و بروز خطاها) و یا شرایط داخلی (وقوع فرورزونانس و ضعف عایقی) باعث ایجاد اضافه ولتاژها در سیستمهای قدرت می‌گردند. به طور کلی اضافه ولتاژها به دو گروه اصلی اضافه ولتاژهای موقتی و اضافه ولتاژهای گذرا تقسیم می‌شوند. بعضی از مهمترین مشخصات انواع اضافه ولتاژها براساس استاندارد IEC 60071 مطابق جدول (۱-۲) می‌باشند.

جدول (۱-۲). مشخصات انواع اضافه ولتاژها براساس استاندارد IEC 60071

نوع اضافه ولتاژ	گذرا				فرکانس پایین
	شیب خیلی تند	شیب تند	شیب کند	موقتی	
شکل موج					
مشخصات شکل موج	$100 \text{ ns} > T_f \geq 3 \text{ ns}$ $30 > f_1 > 100 \text{ MHz}$ $30 > f_2 > 300 \text{ kHz}$ $3 \text{ ms} \geq T_1$	$20 > T_1 > 1 \mu\text{s}$ $300 \mu\text{s} \geq T_2$	$5000 > T_p > 20 \text{ ms}$ $20 \text{ ms} \geq T_2$	$10 < f < 5000 \text{ Hz}$ $36000 \geq T_1 \geq 0.3 \text{ s}$	$f = 50 \text{ یا } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$

<sup>۱</sup>- Lightning Overvoltage

<sup>۲</sup>- Electrostatic Charge Discharge (ECD)

$f=50$ یا $60$ Hz $T_f(*)$	$48 \leq f \leq 62$ Hz $T_f = 10$ s	$T_p = 250$ $\mu$ s $T_2 = 2500$ $\mu$ s	$T_1 = 1/2$ $\mu$ s $T_2 = 50$ $\mu$ s	$(*)$ $(*)$	مشخصات موج استاندارد
-------------------------------	--	---	---	----------------	-------------------------

(\*): با کاربرد مربوطه مشخص می‌شود.

همچنین براساس دسته بندی سیگره<sup>۱</sup>، انواع اضافه ولتاژهای سیستم قدرت برحسب بازه فرکانس و شکل موج آنها مطابق جدول (۲-۲) می‌باشند.

جدول (۲-۲). انواع اضافه ولتاژهای سیستم قدرت برحسب فرکانس (سیگره)

گروه	اضافه ولتاژ	نوع شکل موج	طیف فرکانس	مثال
۱	موقتی	نوسانی فرکانس قدرت	۰/۱ Hz تا ۳ kHz	اثر فرانتی، فرورزونانس، خطای تکفاز، نوسانات الکترومکانیکی ناشی از ناپایداری ماشینهای سنکرون، ...
۲	کند	موجی کند	۵۰ Hz تا ۲۰ kHz	کلیدزنی معمولی، فرورزونانس، قطع بار، برقدار شدن ترانسفورماتور، TRV ناشی از خطای روی ترمینال یا خط کوتاه، برقدار شدن خط، وقوع خطا، حذف خطا، ...
۳	سریع	موجی سریع	۱۰ kHz تا ۳ MHz	صاعقه موج اصلی، کلیدزنی کلید قدرت، ...
۴	خیلی سریع	موجی بسیار سریع	۱۰۰ kHz تا ۵۰ MHz	کلیدزنی سکسیونر در تجهیزات گازی، صاعقه فرعی، ...

اضافه ولتاژهای موقتی غالباً دارای دامنه و فرکانس کم (در محدوده فرکانس قدرت)

می‌باشند. اما اضافه ولتاژهای گذرا ماهیت موجی داشته و با سرعت بسیار بالا و نزدیک به سرعت نور در طول هادی منتشر می‌گردند. این امواج در طی انتشار خود در طول هادی تغییر شکل داده، دامنه آنها با شیب ثابت افزایش می‌یابد. این اضافه ولتاژها، با مشخصاتی مثل سرعت افزایش دامنه، زمان پیشانی، زمان پشت و فرکانس خود مشخص می‌گردند. عموماً اضافه ولتاژهای گذرا به دو صورت اضافه ولتاژهای صاعقه و اضافه ولتاژهای کلیدزنی تولید می‌شوند.

## ۲-۲ اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه

اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم در سیستمهای الکتریکی و الکترونیکی ظاهر می‌شوند. در اثر اصابت مستقیم صاعقه به فازهای سیستم، جریان موجی صاعقه با عبور از هادیهای فاز، ولتاژ موجی صاعقه را تولید می‌کند. دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه می‌تواند از چندین مگاولت نیز بیشتر شود که در این حالت تقریباً هیچ عایقی قادر به تحمل آن نمی‌باشد. اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه اغلب در اثر القاء ناشی از امواج الکترومغناطیسی صاعقه (LEMP)<sup>۱</sup>، از طریق جرقه برگشتی روی زنجیره مقرر، کاپلینگ خازنی و غیره در هادیهای فاز تولید می‌شوند.

### ۲-۲-۱ فرآیند شکل گیری تخلیه جوی

عواملی همچون تغییر شرایط جوی (طوفان) و اصطکاک ابرها با یکدیگر و یا با لایه‌های هوای مجاور، باعث یونیزه شدن مولکول‌های بخار آب و ذرات تشکیل دهنده ابرها شده، بارهای الکتریکی مثبت و منفی و همچنین قطبهای مثبت و منفی را در ابرها بوجود می‌آورند. ابرهای دارای بار الکترواستاتیکی، باعث القاء بارهای از نوع مخالف در سطح زمین می‌شوند. تشکیل بارهای الکتریکی در دو قطب غیر همنام، موجب تولید میدان الکتریکی در فاصله بین آنها گردیده که با افزایش بارها و کاهش فاصله بین آنها، شدت میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. هرگاه شدت میدان الکتریکی بین ابرها و یا ابر و

۱- Lightning Electromagnetic Pulses

زمین از  $5 \text{ kV/cm}$  بیشتر شود (معمولاً بین  $5 \text{ kV/cm}$  تا  $30 \text{ kV/cm}$ )، یونیزاسیون هوای بین قطبها شروع می‌شود. با یونیزه شدن هوا، کانال تخلیه بار و جریانهای پیشرو تولید می‌شود. جریانهای پیشرو از دو جهت مختلف ابر به زمین (پیشروی پایین رونده<sup>۱</sup>) و زمین به ابر (پیشروی بالا رونده<sup>۲</sup>) به صورت مرحله-مرحله با سرعت حدود  $\text{km/s}$   $100$  حرکت کرده تا در یک نقطه (نقطه اصابت<sup>۳</sup>) به یکدیگر برسند و مسیر کانال تخلیه بین ابر و زمین را کامل نمایند. بلافاصله پس از تشکیل کانال تخلیه توسط جریانهای پیشرو، جریان اصلی صاعقه که به صاعقه برگشتی<sup>۴</sup> مشهور است از طریق کانال یونی با سرعت حدود  $10000 \text{ km/s}$  عبور کرده و موج اصلی صاعقه را تولید می‌کند. البته پس از تخلیه موج اصلی صاعقه، با تاخیر بسیار ناچیزی، تخلیه‌های بعدی با جریان کمتر ولی شیب موج بیشتر و با سرعت تا  $10$  برابر سریعتر از موج اصلی، بین ابر و زمین اتفاق می‌افتند که به صاعقه‌های فرعی<sup>۵</sup> معروف می‌باشند و کانال تخلیه صاعقه را پرنورتر می‌کنند. تعداد صاعقه‌های فرعی می‌تواند بسته به میزان و چگونگی بار الکترواستاتیک موجود در ابر تا  $30$  عدد هم برسد بنابراین هر صاعقه (منفی) می‌تواند شامل چندین صاعقه فرعی (حداقل  $3$  صاعقه فرعی) باشد.

لازم به ذکر است ولتاژ آستانه یونیزاسیون هوا تحت شرایط استاندارد در حدود  $30 \text{ kV/cm}$  بوده، در حالی که در روزهای ابری و در داخل ابرها به علت رطوبت، این ولتاژ به  $5 \text{ kV/cm}$  تا  $10 \text{ kV/cm}$  کاهش می‌یابد. به همین علت بروز تخلیه‌ها بین ابرها معمولاً شدیدتر از تخلیه بین ابر و زمین می‌باشد. اما تخلیه بین ابر و زمین دارای اثرات مخرب اولیه و ثانویه بیشتر از تخلیه بین ابرها می‌باشد.

## ۲-۲-۲ طبقه بندی تخلیه جوی

- 
- ۲- Downward Leader
  - ۳- Upward Leader
  - ۴- Strike Point
  - ۱- Return Stroke
  - ۲- Subsequent / dart leader

تخلیه بارهای الکترواستاتیکی ابرها را تخلیه جوی می‌گویند<sup>۱</sup>. تخلیه جوی ممکن است به سه شکل کلی تخلیه داخل ابری<sup>۲</sup>، تخلیه بین ابری<sup>۳</sup> و تخلیه بین ابر و زمین<sup>۴</sup> اتفاق بیافتد. تخلیه داخل ابری بین دو یا چند بخش داخل یک ابر که دارای بارهای الکترواستاتیکی مخالف هم هستند رخ می‌دهد. اما تخلیه بین ابری عملاً بین دو ابر مجاور با بارهای الکترواستاتیک مخالف هم که به یکدیگر نزدیک شده باشند اتفاق می‌افتد. تخلیه‌های جوی داخل ابری و بین ابری را تندر<sup>۵</sup> می‌نامند و بیش از ۹۰٪ تخلیه‌های جوی از نوع تندر هستند. تخلیه جوی بین ابر و زمین (و بالعکس) را آذرخش، رعدوبرق و یا صاعقه<sup>۶</sup> می‌گویند.

به طور کلی، دو معیار اصلی در مطالعه و بررسی صاعقه، جهت و پلاریته آن می‌باشند. پلاریته صاعقه می‌تواند منفی (ابر با بار منفی و زمین با بار مثبت) و یا مثبت (ابر با بار مثبت و زمین با بار منفی) باشد و جهت صاعقه نیز می‌تواند از ابر به طرف زمین (بیشتر در مناطق هموار و دشت) و یا از زمین به طرف ابر (در مناطق کوهستانی و مرتفع) باشد. بنابراین از لحاظ پلاریته و جهت، چهار نوع صاعقه وجود دارد:

- صاعقه منفی از ابر به زمین
- صاعقه منفی از زمین به ابر
- صاعقه مثبت از ابر به زمین
- صاعقه مثبت از زمین به ابر

در شکل (۱-۲) یک صاعقه با پلاریته منفی از سمت زمین به طرف ابر نشان داده شده است. همچنین صاعقه‌ها از لحاظ تعداد کانالهای تخلیه جریان، به صاعقه تک کاناله و چند کاناله تقسیم می‌شوند.

معمولاً بیش از ۹۰ درصد صاعقه‌ها از نوع صاعقه با پلاریته منفی بوده و کمتر از ۱۰ درصد آنها از نوع صاعقه با پلاریته مثبت می‌باشند. ولی صاعقه‌های مثبت نسبت به

۳- صاعقه می‌تواند در اثر تخلیه بارهای الکترواستاتیکی بوجود آمده در توده گرد و غبار و گدازه خارج شده از دهانه آتشفشانها نیز اتفاق بیافتد.

۴- Intra- Cloud Flash

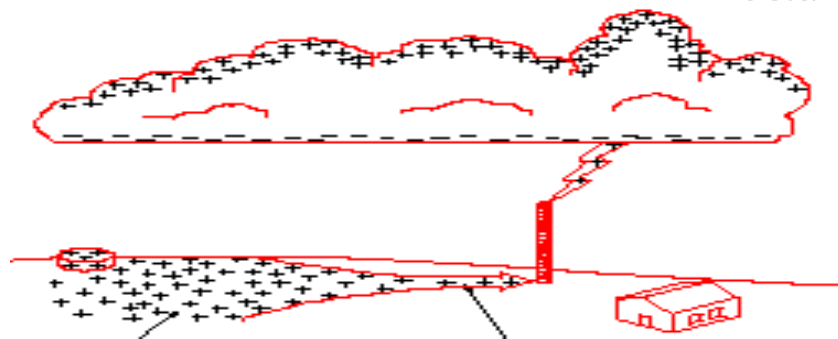
۵- Inter-Cloud Flash

۶- Cloud to Ground Flash

۱- Thunder

۲- Lightning

صاعقه‌های منفی، دارای دامنه جریان بیشتری می‌باشند. لذا اگر در منطقه‌ای احتمال وقوع صاعقه‌های مثبت بیشتر از ۱۰ درصد باشد، باید در طراحی عایقی سیستم‌های قدرت، این نوع صاعقه در نظر گرفته شود. صاعقه‌های مثبت اغلب به صورت صاعقه تکی اتفاق می‌افتند و دارای تعداد صاعقه‌های فرعی بسیار کمتری نسبت به صاعقه‌های منفی می‌باشند.



شکل (۱-۲). صاعقه با پلاریته منفی از زمین به طرف ابر

### ۲-۲-۳ بررسی اثرات صاعقه

وقوع تخلیه جوی باعث خسارات جانی و مالی متعددی می‌شود. به طور کلی مهمترین اثرات منفی وقوع صاعقه در سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی عبارتند از:

- اثر حرارتی (باعث آتش سوزی، ذوب شدن هادی‌ها).
- اثر مکانیکی (اعمال نیروهای الکتروستاتیکی بر هادی‌ها، تجهیزات شبکه قدرت و اتصالات).
- اثر شکست عایقی و دی الکتریکی (ناشی از تولید اضافه ولتاژهای گذرا، ایجاد جرقه روی مقره‌ها، پوشینگها و سرکابلها و عبور جریان از طریق آنها به زمین).
- اثر افزایش پتانسیل زمین (GPR)<sup>۱</sup> (در اثر تخلیه موج گذرای جریان در شبکه

<sup>۱</sup> - Ground Potential Rise

- زمین سیستمهای الکتریکی و الکترونیکی).
- اثر تداخل الکترومغناطیسی فرکانس بالا (تولید امواج الکترومغناطیسی صاعقه (LEMP) باعث ایجاد اغتشاش و اختلال در عملکرد سیستمهای حساس الکترونیکی و مخابراتی در تمام بازه فرکانسی می‌شود).
  - کاهش قابلیت اطمینان سیستم قدرت (بخاطر ایجاد وقفه‌های ناشی از تعمیر و تعویض تجهیزات آسیب دیده در اثر صاعقه و اتصال کوتاه ناشی از وقوع جرقه روی مقره‌ها یا بین فازها).
- وقوع صاعقه از نشانه‌های قدرت خداوند حکیم می‌باشد<sup>۱</sup>. بسیاری از محققان بر این باورند که صاعقه نقش مهمی در وجود حیات و ادامه آن در سطح کره زمین دارد. لذا صاعقه در کنار معایبی که اشاره شد دارای مزایای متعددی نیز می‌باشد. صاعقه باعث افزایش دمای هوا در مسیر کانال تخلیه و محل اصابت تا بیش از ۳۰۰۰۰ درجه سلسیوس می‌گردد. این افزایش دما دارای فوائد زیر می‌باشد:
- تولید ترکیبات نیتروژن در اثر شکسته شدن مولکول نیتروژن هوا و ترکیب آن با آب (به عنوان کود برای رشد و نمو گیاهان و موجودات زنده، کمک به تولید پروتئین در بدن موجودات زنده).
  - تولید گاز ازن و تقویت لایه ازن جو زمین (لایه ازن به عنوان لایه محافظ در برابر تشعشعات کیهانی و جذب کننده پرتوهای فرا بنفش<sup>۲</sup> جو).
  - تولید آب اکسیژنه (میکروب زدایی محیط).

#### ۲-۲-۴ مشخصات امواج صاعقه

از اوایل قرن بیستم تلاش‌های زیادی جهت اندازه‌گیری پارامترهای صاعقه در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. مهمترین آزمایشات برای اندازه‌گیری و ثبت مشخصات صاعقه توسط Berger در کشور سوئد بین سالهای ۱۹۴۳ تا ۱۹۷۱ صورت گرفته است. از نتایج بدست آمده از این آزمایشات به عنوان مبنا در تدوین استانداردهای مهم از جمله IEC۶۲۳۰۵ استفاده شده است. از بین مشخصات صاعقه، دامنه جریان و بار

۱ - "من آیاته یریکم البرق"، سوره مبارکه روم - آیه ۲۴.

۲- Ultra Violet



الکتریکی ذخیره شده در آن به دلیل ایجاد خرابی‌های حرارتی و مکانیکی و همچنین فرکانس و شیب جریان صاعقه بدلیل القای ولتاژ و خرابی در تجهیزات الکترونیکی دارای اهمیت بیشتری می‌باشند.

### الف - دامنه موج صاعقه

دامنه جریان صاعقه می‌تواند از چند صد آمپر تا چند صد کیلو آمپر (بیش از ۵۰۰ کیلوآمپر) متغیر باشد. هر چه دامنه صاعقه بیشتر باشد احتمال وقوع آن کمتر خواهد بود. براساس استاندارد BS۶۲۳۰۵، دامنه صاعقه و احتمال وقوع آن برای موج اصلی صاعقه منفی مطابق جدول (۲-۲) می‌باشد.

جدول ۲-۲. احتمال وقوع صاعقه برحسب دامنه جریان (استاندارد BS۶۲۳۰۵)

دامنه جریان (kA)	۳	۸	۲۸	۸۰	۲۰۰
احتمال وقوع (%)	۹۹	۹۰	۵۰	۱۰	۱

### ب - شیب پیشانی موج صاعقه

شیب پیشانی موج جریان صاعقه ( $di/dt$ ) برحسب نوع صاعقه بسیار متغیر می‌باشد. براساس استاندارد BS۶۲۳۰۵، حداکثر شیب موج جریان صاعقه، ۲۰۰ کیلوآمپر بر میکروثانیه می‌باشد. شیب پیشانی موج صاعقه، سبب القای ولتاژ در هادی‌های حلقه‌ای بسته یا باز در اطراف مکان تخلیه صاعقه می‌گردد. میزان ولتاژ القایی ناشی از شیب جریان صاعقه می‌تواند از چندین مگاولت نیز بیشتر باشد.

### ج - بار الکتریکی موج صاعقه

مقدار متوسط بار الکتریکی صاعقه، چند ده کولن می‌باشد. اما ممکن است در بعضی مواقع از ۳۰۰ کولن هم تجاوز کند. این مقدار زیاد بار الکتریکی سبب تولید انرژی حرارتی بالایی در نقطه تخلیه صاعقه می‌گردد.

## د- فرکانس موج صاعقه

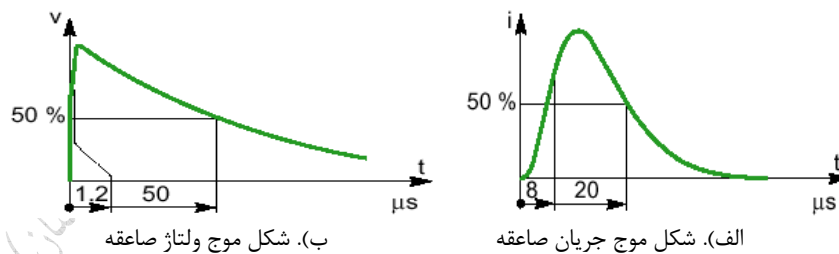
طیف فرکانسی موج صاعقه شامل باند فرکانس بین ۱۰kHz تا چند صد مگاهرتز می‌باشد. بخاطر شکل ضربه‌ای موج صاعقه، طیف فرکانسی آن گسترده و پهن می‌باشد. در نتیجه اثر صاعقه به عنوان نویز و ولتاژ القایی، در اکثر فرکانس‌ها به وضوح مشاهده می‌شود.

## ه- سرعت انتشار موج صاعقه

سرعت حرکت الکترون‌ها در کانال صاعقه براساس اندازه‌گیریهای انجام شده بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ سرعت نور می‌باشد. همچنین سرعت انتشار موج صاعقه در خطوط انتقال از ۱۵۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه و در خطوط کابلی بین ۱۰۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰۰ کیلومتر بر ثانیه است. اما بطور کلی سرعت انتشار امواج گذرا مطابق رابطه (۲-۱)، به مشخصات محیط انتشار بستگی دارد:

$$v = 1/\sqrt{LC} \quad (2-1)$$

در رابطه فوق  $L$  و  $C$  به ترتیب اندوکتانس و کاپاسیتانس در واحد طول مسیر عبور موج گذرا می‌باشند. شکل کلی موجهای جریان و ولتاژ صاعقه براساس استاندارد IEC مطابق شکل (۲-۲) می‌باشد.



شکل (۲-۲). شکل موج جریان و ولتاژ صاعقه طبق استاندارد IEC

به طور کلی، زمان پیشانی موج صاعقه بین ۱ تا ۱۰ میکروثانیه و زمان پشت موج بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکروثانیه می‌باشد. غالباً صاعقه‌های با دامنه بالاتر دارای زمان پیشانی طولانی‌تر می‌باشند.

**و- انرژی موج صاعقه**

انرژی هر صاعقه متناسب با میزان بار الکترواستاتیکی ابر، ولتاژ بین ابر و زمین (یا ابر با ابر) و مقاومت الکتریکی محل اصابت یا تخلیه می‌باشد. به طور مثال، مقدار انرژی یک صاعقه معمولی با ولتاژ بین ابر و زمین  $10\text{ MV}$  و ابر با کل بار الکتریکی  $20\text{ کولن}$ ، حدود  $55\text{ kWh}$  می‌باشد. در عمل مقدار انرژی صاعقه بسیار متغیر است و مقدار متوسط آن حدود  $250\text{ kWh}$  تخمین زده شده است.

**ز- طول کانال تخلیه**

فاصله بین ابر و زمین در مسیر تخلیه (طول کانال تخلیه) متناسب با مقدار شدت میدان الکتریکی هوا می‌تواند بین  $500$  متر تا  $10$  کیلومتر باشد.

**۵-۲-۲ پیش بینی وقوع صاعقه**

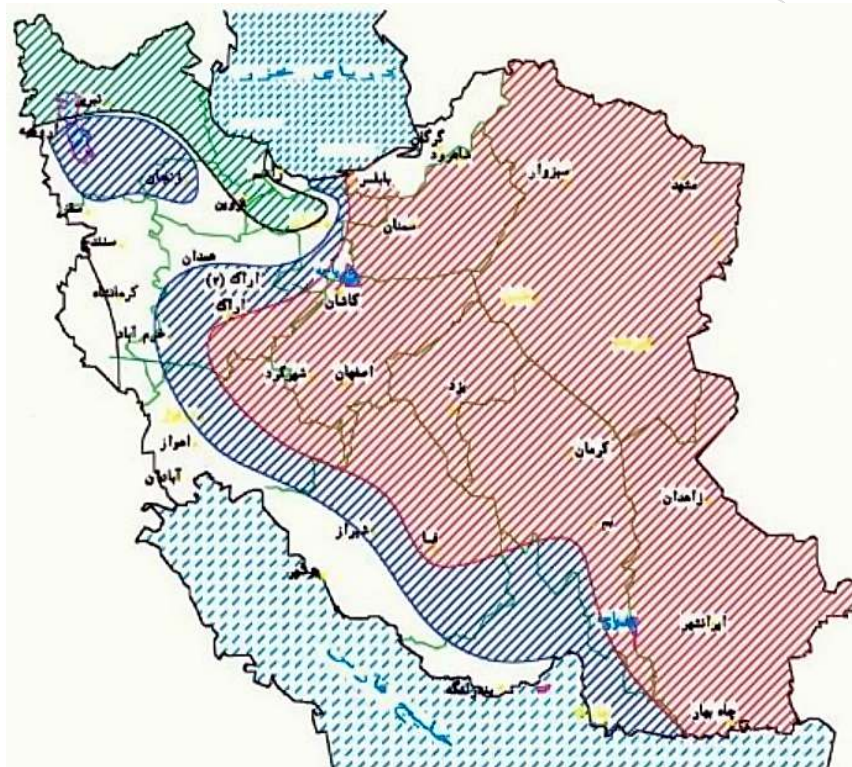
لحظه بروز صاعقه بستگی به میزان افزایش بار ابرها و شدت میدان الکتریکی در فاصله بین ابرها و یا ابرها با زمین دارد. در مطالعات صاعقه از اطلاعات آماری - تجربی استفاده می‌شود و هر صاعقه با اندازه‌گیری اطلاعاتی مانند موقعیت صاعقه، زمان و مدت تخلیه، پلاریته موج و تعداد جرقه‌های صاعقه مشخص می‌شود. با توجه به شرایط بروز تخلیه جوی و تجربیات بدست آمده، احتمال بروز تخلیه جوی بستگی مستقیم به آب و هوا و خصوصیات جغرافیایی منطقه دارد. به همین علت درصد بروز صاعقه در هر منطقه، با توجه به شرایط جغرافیایی آن منطقه مشخص می‌گردد. معمولاً از دو مشخصه سطح کرونیک و چگالی سطحی صاعقه برای پیش بینی و مطالعه صاعقه در هر منطقه استفاده می‌شود.

**الف - سطح کرونیک (Td)**

سطح کرونیک یا عدد کرونیک، تعداد روزهایی از سال که در آن رعد و برق مشاهده یا شنیده می‌شود را مشخص می‌کند. البته عدد کرونیک برحسب تعداد ساعتهای صاعقه

دار در طول سال نیز بیان می‌شود. عموماً مناطقی که دارای عدد کرونیک نسبتاً برابر هستند را با منحنیهای بسته که به منحنیها یا نقشه‌های ایزوکرونیک<sup>۱</sup> معروف می‌باشند، مشخص می‌کنند.

نقشه ایزوکرونیک ایران و طبقه‌بندی سطوح ایزوکرونیک با توجه به اطلاعات ثبت‌شده در دوره‌های یازده ساله، از سال ۱۹۶۵ تا سال ۱۹۷۵ میلادی به ترتیب در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



عنوان گروه	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳	گروه ۴
میانگین تعداد روزهای	کمتر از ۵ روز	۵ تا ۱۰ روز	۱۰ تا ۱۵ روز	بیش از ۱۵ روز

				رعد و برقی در سال
--	--	--	--	-------------------

شکل (۲-۳). نقشه ایزوکرونیک سالانه ایران

### ب- شدت یا چگالی سطحی صاعقه (Ng)

تعداد صاعقه‌هایی که در یک سال به واحد سطح زمین (یک کیلومتر مربع) برخورد می‌کند را چگالی بروز رعد و برق یا چگالی صاعقه زمین (GFD)<sup>۱</sup> می‌نامند. چگالی صاعقه زمین در هر منطقه برحسب عدد کرونیک آن منطقه و از رابطه تقریبی (۲-۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$N_g = 0.04 \times T_d^{1.25} \quad (2-2)$$

رابطه فوق در مناطق گوناگون و با توجه به خصوصیات جغرافیائی منطقه تغییر می‌کند و بصورت تجربی و با رسم منحنی چگالی بروز رعد و برق بر حسب سطح ایزوکرونیک بدست می‌آید. از اینرو اگر نقشه Ng در دسترس نباشد، میزان چگالی صاعقه برای مناطق با آب و هوای معتدل از رابطه (۳-۲) تخمین زده می‌شود:

$$N_g = 0.1 \times T_d \quad (2-3)$$

### ۲-۲-۶ انواع اضافه ولتاژهای صاعقه

تخلیه جوی یا صاعقه به دو شکل کلی اصابت مستقیم و اصابت غیر مستقیم، باعث تولید اضافه ولتاژهای گذرا در سیستمهای قدرت می‌گردد.

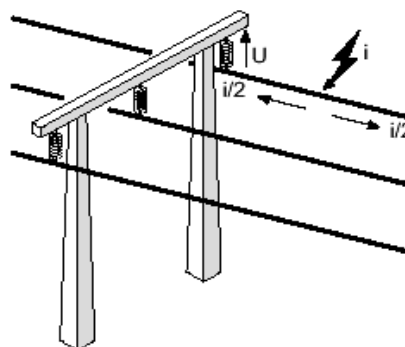
#### ۲-۲-۶-۱ اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه<sup>۲</sup>

وقتی صاعقه مستقیماً به هادی فازها برخورد کند باعث تزریق چندین کیلوآمپر جریان به داخل خط می‌گردد. این موج جریان مطابق شکل (۲-۴)، به دو قسمت نسبتاً مساوی تقسیم شده و در دو جهت مخالف روی خط شروع به حرکت می‌کند. در اینصورت اضافه ولتاژ موجی تولید شده روی خط مطابق رابطه (۴-۲) محاسبه می‌شود:

۱- Ground Flash Density

۲- Direct Lightning

$$U(t) = Z \cdot \frac{I(t)}{2} \quad (2-4)$$



شکل (۲-۴). برخورد مستقیم صاعقه به سیم فاز خط هوایی

به عنوان مثال، اگر دامنه موج جریان صاعقه ۳۰ kA و امپدانس موجی خط ۴۰۰ اهم باشد، آنگاه دامنه موج اضافه ولتاژ ناشی از اصابت صاعقه، در حدود ۶ MV می‌شود که خیلی بیشتر از سطح عایقی تجهیزات سیستم قدرت می‌باشد و هیچ خطی قادر به تحمل آن نیست و احتمال وقوع پدیده شکست در عایقها، مقره‌ها، سرکابلها و پوشینگها بسیار زیاد خواهد بود.

### ۲-۲-۶-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه<sup>۱</sup>

اصابت غیر مستقیم صاعقه به سه صورت کلی زیر می‌تواند اثرات مخرب خود را بر تجهیزات سیستمهای الکتریکی وارد کند:

#### الف- اصابت به سیم محافظ و یا بدنه دکل خطوط انتقال نیرو

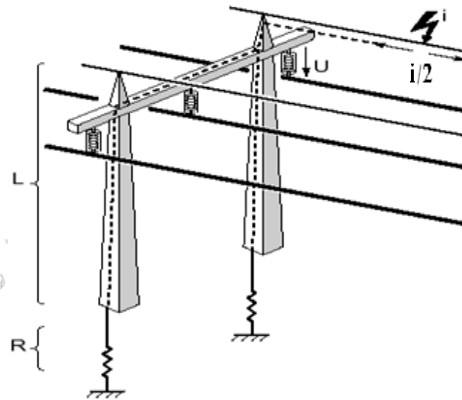
صاعقه می‌تواند به سیم محافظ هوایی یا بدنه دکل به طور مستقیم اصابت کرده و باعث ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای شدید بین بدنه فلزی دکلها و هادی فازها (در دو سر مقره)

۱- Indirect Lightning

شود. اگر دامنه اضافه ولتاژهای ایجاد شده از سطح عایقی تجهیزات و یا مقدار ولتاژ جرقه بحرانی (CFO)<sup>۱</sup> بیشتر شود، نهایتاً منجر به تولید جرقه برگشتی (BFO)<sup>۲</sup> بین بدنه فلزی دکل و هادی‌های فاز (از طریق مقره‌ها) می‌گردد. با تولید جرقه برگشتی، امواج مخرب صاعقه به فازهای خطوط منتقل شده و از طریق این خطوط باعث تخریب تجهیزات الکتریکی منتهی به آنها می‌گردند. در این حالت میزان تخریب تجهیزات، بستگی به فاصله تجهیز تا محل اصابت صاعقه دارد.

مطابق شکل (۲-۵)، اختلاف پتانسیلی که روی مقره‌ها ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه قرار می‌گیرد به اندوکتانس دکل (L) و مقاومت زمین پای دکل (R) و مقدار جریان صاعقه که از طریق بدنه دکل به زمین جاری شده، بستگی دارد:

$$U(t) = RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (۲-۳)$$



شکل (۲-۵). برخورد غیر مستقیم صاعقه به خط

همچنین عبور جریان گذرای صاعقه از سیم محافظ و یا بدنه دکل باعث القاء ولتاژ روی هادیهای فاز می‌شود.

۲- Critical Flashover Voltage

۳- Back Flashover

## ب- افزایش پتانسیل زمین (GPR)

تخلیه جریان صاعقه در زمین مجاور خط باعث افزایش شدید پتانسیل زمین می‌شود. افزایش پتانسیل زمین مجاور تجهیزات می‌تواند از طریق سیستم زمین تجهیزات باعث افزایش ولتاژ بدنه و یا نقطه نول تجهیزات الکتریکی شده و نهایتاً منجر به تخریب آنها گردد. همچنین افزایش پتانسیل زمین از طریق افزایش پتانسیل سازه‌های فلزی دکل و با ایجاد جرقه برگشتی در سر مقره‌ها، به فازهای خطوط منتقل می‌شود. دامنه ولتاژ القایی صاعقه و شکل موج آن بطور مؤثری به پارامترهای موج برگشتی صاعقه (جریان پایه کانال صاعقه و سرعت موج برگشتی)، فاصله و موقعیت محل اصابت صاعقه نسبت به خطوط هوایی، پارامترهای الکتریکی (امپدانس) زمین، ساختار (طول و ارتفاع) خطوط انتقال و سطح عایقی سیستم بستگی دارد. حداکثر فاصله‌ای که یک تخلیه صاعقه ابر به زمین می‌تواند باعث ایجاد ولتاژ القایی قابل ملاحظه روی خطوط هوایی شود، معمولاً در حدود ۲۰۰ m می‌باشد و اصابت صاعقه در فاصله کمتر از ۱۰۰ m از خط، می‌تواند باعث ایجاد جرقه روی مقره‌های خطوط با سطح عایقی ضعیف بشود. دامنه ولتاژ القایی (ناشی از برخورد صاعقه به زمین مجاور خطوط) در یک نقطه معین در طول خط، بستگی به شدت جریان صاعقه، فاصله افقی محل اصابت صاعقه به زمین از خط و ارتفاع هادیهای خط از سطح زمین دارد. هر چه ارتفاع دکل و سیم‌ها از سطح زمین کمتر باشد، دامنه اضافه ولتاژهای القایی کمتر می‌شود. بر اساس مدل راسک<sup>۱</sup>، ولتاژ القایی روی هادیها در اثر اصابت صاعقه در مجاورت خط از رابطه تقریبی زیر بدست می‌آید:

$$V_{\max} = 38.8 \frac{I_s (h + 0.15\sqrt{\rho})}{y} [kV] \quad (2-4)$$

$I_s$  (kA): حداکثر جریان صاعقه در لحظه برخورد،

$h$  (m): ارتفاع هادیهای خط از زمین،

$\rho$  ( $\Omega.m$ ): مقاومت مخصوص خاک،

$y$  (m): فاصله محل برخورد صاعقه از خط،



البته، فرمول فوق برای خطوطی که تنها از یک سیم زمین استفاده می‌کنند معتبر است.

**ج- القاء ولتاژ روی هادیهای فاز از طریق انتشار امواج الکترومغناطیسی صاعقه**  
تخلیه جوی باعث انتشار شدید امواج الکترومغناطیسی صاعقه (LEMP) در هوا می‌شود که می‌تواند از فاصله حتی چند ده کیلومتری از تجهیزات بصورت القاء ولتاژ و جریان شدید در خطوط تغذیه تجهیزات و یا ایجاد نویز شدید در تجهیزات الکترونیکی، اثرات مخرب خود را بر سیستم تحمیل نماید. شدت تخریب بستگی به فاصله تجهیزات و خطوط از محل وقوع صاعقه، مشخصات و نوع خطوط و شدت میدان الکترومغناطیسی صاعقه دارد.

بکارگیری سیم‌های محافظ در بالادست<sup>۱</sup> و پایین دست<sup>۲</sup> هادیهای خطوط انتقال نیرو باعث کاهش دامنه ولتاژ القائی روی فازها می‌شود. همچنین امپدانس سیستم زمین دکل‌ها روی عملکرد سیم محافظ در کاهش دامنه اضافه ولتاژ القائی موثر است. هر چه سیستم زمین دکل دارای امپدانس موجی کوچکتری باشد، کارائی سیم محافظ بهتر می‌باشد. مقاومت زمین تأثیر مهمی روی دامنه و شکل موج اضافه ولتاژهای القائی دارد. مقاومت زمین هم روی میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از اصابت صاعقه و هم روی انتشار موج در طول خط تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، مقاومت زمین می‌تواند باعث تغییر دامنه و یا تغییر پلاریته ولتاژهای القائی صاعقه بشود. علاوه بر موارد فوق، فاصله بین دو دکل مجاور (اسپن) خط نیز در مقدار ولتاژ القائی مؤثر است بطوریکه با کاهش طول اسپن، دامنه ولتاژ القائی نیز کاهش می‌یابد.

### ۲-۲-۷ اضافه ولتاژهای الکترواستاتیکی

اگر چه اغلب امواج القائی از نوع الکترومغناطیسی هستند، ولی امواج القائی از نوع الکترواستاتیکی نیز وجود دارند. در شبکه‌های هوایی بدون سیم محافظ، این نوع امواج

۱- Up-stream shield wire

۲- Down-stream shield wire

القائی بیشتر مشاهده می‌شود. وقتی یک ابر با بار الکتریکی و پتانسیل معین در بالای خط هوایی قرار می‌گیرد، باعث القای بار الکتریکی از نوع مخالف روی خط می‌شود. بنابراین قبل از تخلیه ابرها، یک میدان الکتریکی (E) بین خط و زمین بوجود می‌آید که می‌تواند به مقدار  $30 \text{ kV/m}$  برسد. این میدان خازن کوپلاژ ایجاد شده بین خط و زمین را با پتانسیل حدود  $150 \text{ kV}$  تا  $500 \text{ kV}$  شارژ می‌کند. در نتیجه اختلاف پتانسیل بوجود آمده بین خط و زمین می‌تواند باعث شکست ناقص (غیر فعال) عایق تجهیزات شبکه بشود. وقتی بار ابرها بوسیله وقوع صاعقه تخلیه شود، میدان الکتریکی مذکور تضعیف می‌شود و یا از بین می‌رود و خازن بین خط و زمین تخلیه می‌گردد و در نتیجه، دامنه ولتاژ الکترواستاتیک نیز کاهش می‌یابد.

### ۸-۲-۲ تاثیر اضافه ولتاژهای صاعقه بر شبکه‌های توزیع

هرچند به دلیل ارتفاع کم خطوط توزیع در مقایسه با خطوط انتقال و یا قرار گرفتن آنها در مجاورت ساختمان‌ها و درختان بلند و یا کابلی بودن این نوع شبکه‌ها، احتمال اصابت مستقیم صاعقه به شبکه‌های توزیع کمتر از خطوط انتقال هوایی می‌باشد، ولی همچنان صاعقه برای خطوط توزیع یک عامل اصلی تهدید کننده و مخرب محسوب می‌شود. نحوه تاثیر گذاری اثرات صاعقه بر خطوط توزیع اغلب از نوع ولتاژ القایی و غیر مستقیم می‌باشد. از اینرو نحوه تاثیر گذاری اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در شبکه‌های توزیع تا حدودی متفاوت از خطوط انتقال هوایی می‌باشد. این تفاوت می‌تواند ناشی از ساختار گسترده شبکه‌های توزیع نسبت به خطوط انتقال، نوع پایه‌ها، فواصل عایقی کم، سطوح عایقی پایین، ارتفاع کم خطوط و عدم وجود سیم محافظ باشد. به عبارت دیگر، شبکه‌های توزیع دارای تنوع زیادی در سطح عایقی، ساختار شبکه، پوشش حفاظتی، مقاومت‌های زمین پای تیر، طرح‌های حفاظتی، کیفیت تجهیزات و اتصالات و تنوع مصرف کننده‌ها می‌باشند.

مسئله مهم دیگر در خصوص شبکه‌های توزیع، نوع پایه‌ها یا تیرها می‌باشد. در خطوط توزیع، تیرها عمدتاً از نوع بتونی و یا چوبی می‌باشند. امپدانس موجی پایه‌های بتونی و چوبی به مراتب کمتر از پایه‌های فلزی می‌باشد و این امر می‌تواند احتمال وقوع قوس الکتریکی روی مقره‌های شبکه توزیع را افزایش دهد.

عدم بکارگیری از سیم محافظ یا سیم زمین در شبکه‌های توزیع، باعث افزایش دامنه ولتاژ القایی روی هادی فازها ناشی از امواج الکترومغناطیسی صاعقه خواهد شد. همچنین، پایین بودن سطح عایقی تجهیزات و کم بودن فواصل فازی خطوط توزیع، احتمال تخریب عایقی تجهیزات و وقوع جرقه روی مقره‌ها را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، طول شبکه‌های توزیع در مقایسه با خطوط انتقال بسیار کوچکتر بوده و همچنین شدت پدیده کرونا نیز بسیار ناچیز است. لذا استهلاک موج صاعقه در طول خطوط شبکه توزیع بسیار کم است و موج صاعقه به سرعت به تجهیزات اصلی شبکه توزیع می‌رسد. بنابراین اضافه ولتاژهای صاعقه ظاهر شده در هادی‌های فاز، تهدید عمده برای عایق تجهیزات شبکه‌های توزیع نظیر ترانسفورماتورهای قدرت، کابلها و سرکابلها، ترانسفورماتورهای ولتاژ و خازن‌های اصلاح ضریب توان محسوب می‌گردند. از اینرو حفاظت شبکه‌های توزیع در برابر امواج الکترومغناطیسی صاعقه باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. بکارگیری مناسب وسایل حفاظتی و محدود کننده مثل برگیرها می‌تواند نقش موثری در محافظت از تجهیزات شبکه‌های توزیع در برابر انواع امواج گذرای مخرب داشته باشد.

### ۳-۲ اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی

اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی غالباً بین تیغه‌های یک کلید هنگام عملکرد و ایجاد قوس برگشتی بوجود می‌آیند. این اضافه ولتاژهای گذرای کوتاه مدت<sup>۱</sup> یا پالسهای گذرا در اثر قطع و وصل کلیدها و قطع بارهای القایی (ترانسفورماتور بی‌بار، راکتور موازی و موتورها)، کلیدزنی بانک خازنی، قطع جریان بار خطوط طولانی، وصل خطوط بی‌بار و قطع جریانهای اتصال کوتاه تولید می‌شوند. خصوصیات این نوع اضافه ولتاژها شدیداً به مشخصات الکتریکی شبکه مانند نوع تجهیزات مورد قطع و وصل (نوع بار)، نوع و مشخصات کلید، مدت زمان قطع یا وصل کلید و غیره بستگی دارد.

خطر اضافه ولتاژهای کلیدزنی برای تجهیزات سیستم قدرت با ولتاژهای بالاتر (فشارقوی) و برای سیستم‌هایی مثل کابلها و مدارهای بانک خازنی که در آنها امپدانس

۱- Spike

موجی مؤثری که از طرف مکان نصب برقرگیر دیده می‌شود کم است، افزایش می‌یابد. برای کاهش دامنه این نوع اضافه ولتاژها از ترانسفورماتورهای ولتاژ مغناطیسی (در خطوط)، راکتورهای سنت، برقرگیرها، مقاومت‌های موازی با کلید و غیره استفاده می‌گردد. در سیستم‌هایی که از وسایل محدود کننده استفاده نمی‌شوند، دامنه این اضافه ولتاژها بیش از ۴ پریونیت و در صورت استفاده از تکنیکهای محدود کننده مثل مقاومت قطع و وصل در کلیدها، بین ۲ الی ۲/۵ پریونیت و در صورت استفاده از تکنیکهای پیشرفته‌تر مانند استفاده از مقاومت‌های چند مرحله‌ای در کلیدهای قدرت بین ۱/۵ تا ۲ پریونیت خواهد بود.

### ۱-۳-۲ عوامل و شرایط ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی

ولتاژ گذرای حاصل از قطع و وصل کلید به صورت موج در طول مدار منتشر شده، ولتاژ موجی قطع و وصل را بوجود می‌آورد. لذا دامنه و شکل موج اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی تابع مشخصات ولتاژ ظاهر شده در کلید خواهد بود. مشخصات ولتاژهای گذرای کلیدزنی تابعی از عوامل مختلف مثل نوع مدار، نوع کلید، زمان کلیدزنی و نوع جریان مدار می‌باشند.

شرایط قطع و وصل جریان در محفظه قطع کلیدها که بر شکل موج و دامنه اضافه ولتاژهای گذرا تأثیر می‌گذارد عبارت است از:

- ۱- فاصله زمانی برقراری قوس و سرعت خاموش شدن آن در محفظه کلید.
- ۲- وجود و یا عدم وجود مقاومت موازی در کلید.
- ۳- کنترل و یا عدم کنترل لحظه وصل کلید.
- ۴- وجود و یا عدم وجود ترتیب معین جهت وصل جریانها در سه فاز کلید.

همچنین نوع تجهیزات مورد قطع و وصل نیز در ایجاد اضافه ولتاژهای موجی و دامنه آنها مؤثر می‌باشد. دامنه اضافه ولتاژها با توجه به خصوصیات تجهیزات مورد قطع و وصل و نحوه قطع جریان در کلید، تعیین می‌گردد. به عنوان مثال، تجهیزات با جریانهای خازنی خالص نظیر خطوط انتقال انرژی و کابل‌های بی‌بار یا بانکهای خازنی سری یا موازی در خطوط انتقال، شکل و دامنه اضافه ولتاژهای قطع و وصل را صرف نظر از نوع کلید تحت تأثیر قرار می‌دهند. همچنین تجهیزات الکتریکی با جریانهای القاء کننده و مغناطیس کننده ناچیز نظیر راکتورها و ترانسفورماتورها، در ردیف عوامل ایجاد

اضافه ولتاژهای گذرا قرار می‌گیرند.

انواع مختلف کلیدزنی در سیستم قدرت شامل کلیدزنی جریان اهمی، کلیدزنی جریان خازنی، کلیدزنی جریان سلفی، کلیدزنی جریان اهمی-سلفی، کلیدزنی جریان اهمی-خازنی می‌باشند. در میان انواع کلیدزنی‌ها، کلیدزنی خازنی تبعات منفی بیشتری برای شبکه قدرت به همراه دارد.

### ۲-۳-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از قطع ناگهانی و نوسانات بار

بار معمولی شبکه، اصولاً مقاومتی است یعنی ضریب توان آن بالاتر از  $0.7$  است. در این مورد قطع و وصل جریانهای بار (مقاومتی)، مسأله مهمی برای شبکه‌های با سطوح ولتاژ پایین بوجود نمی‌آورد و ضریب اضافه ولتاژ (نسبت دامنه ولتاژ گذرا به دامنه ولتاژ نامی) بین  $1/2$  تا  $1/5$  می‌باشد. اضافه ولتاژهای ناشی از قطع یا تغییر ناگهانی بار دارای فرکانس قدرت بوده و عملاً برای ولتاژهای بالای  $300 \text{ kV}$  مهم می‌باشند.

### ۲-۳-۳ اضافه ولتاژهای ناشی از قطع و وصل خطوط

در شرایطی که خطوط بدون بار قطع و وصل شوند، اضافه ولتاژهای با فرکانس زیاد بصورت موج گذرا تولید خواهند شد. این نوع کلیدزنی مشابه کلیدزنی جریان خازنی می‌باشد. این پدیده در عمل مخصوصاً وقتی یک خط بطور ناگهانی بی‌بار می‌شود بسیار متداول است. این اضافه ولتاژها اصولاً در خطوط فشارقوی (بالای  $300 \text{ kV}$ ) قابل توجه می‌باشند که باید در طراحی عایقی تجهیزات در نظر گرفته شوند.

### ۲-۳-۴ اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی جریانهای خازنی و سلفی

در شبکه‌های فشارمتوسط و فشارضعیف، کلیدزنی جریانهای سلفی و یا خازنی سبب افزایش ولتاژ در شبکه شده و نیز باعث آسیب رساندن به تجهیزات الکتریکی سیستم قدرت می‌شود. فرکانس این اضافه ولتاژها معمولاً خیلی بالاتر از فرکانس قدرت است و دامنه آنها چندین ( $2$  تا  $5$ ) پرینیت، می‌باشد. این نوع اضافه ولتاژها ممکن است به

دلایل زیر در شبکه ایجاد شوند:

- ۱- قطع جریان راه اندازی موتور.
- ۲- قطع جریان سلفی مانند جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتورها و راکتورها.
- ۳- قطع و وصل کوره‌های القاء مستقیم همراه با ترانسفورماتور آنها در حالت برش (قطع) جریان.
- ۴- قطع و وصل کابل‌ها و خطوط بدون بار و مدارات خازنی.
- ۵- قطع جریان توسط فیوزهای فشارقوی.

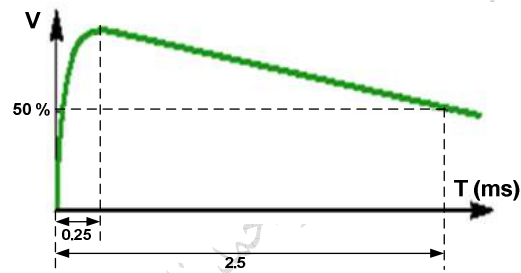
مشخصات اضافه ولتاژهای فوق به عواملی همچون مشخصات کلید قدرت (خصوصیات دی الکتریکی، توانایی قطع جریان‌های فرکانس بالا و غیره)، امپدانس مشخصه خط یا کابل، فرکانس‌های طبیعی بار و شبکه بستگی دارند. در ولتاژهای ۷۲/۵ تا ۲۴۵ کیلوولت قطع جریان خازنی (جریان شارژ خط) ناشی از کلیدزنی خطوط هوایی و کابل‌های بدون بار عملاً خطرناکتر از سایر حالتها می‌باشد، لذا در این شرایط نمی‌توان از کلیدهای با عملکرد معمولی جهت این کار استفاده نمود.

### ۵-۳-۲ شکل موج اضافه ولتاژ کلیدزنی

شکل کلی این امواج، شبیه امواج صاعقه بوده ولی زمان پیشانی و زمان پشت موج آنها حدود چند میلی‌ثانیه می‌باشد. خصوصیات موجها شامل شکل، دامنه و فرکانس برحسب مشخصات شبکه و نوع و نحوه عملکرد کلید قطع و وصل و شرایط انتشار موج از محل نصب کلید، متغیر می‌باشد. دامنه موج‌های اضافه ولتاژ قطع و وصل به مشخصات شبکه، مشخصات کلید و نوع تجهیزات تحت قطع و وصل بستگی دارد. مهمترین عامل در افزایش دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی، ولتاژ نامی شبکه می‌باشد بطوریکه در ولتاژهای پایین، دامنه این اضافه ولتاژها کم بوده و از سطح استقامت عایقی پیش بینی شده در شبکه تجاوز نمی‌کند. در ولتاژهای کمتر از ۲۳۰ kV دامنه اضافه ولتاژهای قطع و وصل و احتمال بروز آنها بسیار محدود بوده بطوریکه تمهیدات خاصی جهت کاهش آن مورد نیاز نمی‌باشد. در ولتاژهای بالاتر از ۳۰۰ kV دامنه و احتمال بروز گذراهای کلیدزنی بطور قابل توجه افزایش یافته، بطوریکه در این سطوح ولتاژ، خطر اضافه ولتاژهای

کلیدزنی بیش از اضافه ولتاژهای ناشی از رعد و برق، ایزولاسیون شبکه را تهدید می‌نماید.

به منظور تعیین استقامت عایقی تجهیزات سیستم قدرت در برابر گذراهای قطع و وصل، از شکل موج‌های استاندارد برای گذراهای ولتاژ و جریان کلیدزنی استفاده می‌شود. شکل موج کلیدزنی با سه مشخصه اصلی حداکثر دامنه، زمان پیشانی ( $T_1$ ) و زمان پشت موج ( $T_2$ ) مشخص می‌گردد. حدود مقادیر  $T_1$  و  $T_2$  در استانداردهای مختلف مشخص شده است. مطابق استاندارد IEC و شکل (۲-۶)، مقدار زمان پیشانی و زمان پشت موج ولتاژ کلیدزنی به ترتیب ۲۵۰ و ۲۵۰۰ میکروثانیه می‌باشد.



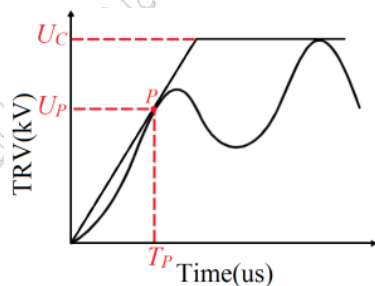
شکل (۲-۶). شکل موج ولتاژ استاندارد کلیدزنی

### ۲-۳-۶ ولتاژ بازیابی گذرا در کلیدهای قدرت

هنگامی که جرقه بین کلید در موقع باز شدن از بین می‌رود و جریان سیستم قطع می‌شود سیستم به دو بخش بالادست کلید و پایین‌دست کلید تقسیم می‌شود. در این هنگام هر بخش به علت داشتن مقاومت داخلی، سلف و خازن پراکندگی ناشی از خطوط انتقال و دیگر تجهیزات، تشکیل مدار RLC سری می‌دهند که فرکانس طبیعی و ضریب میرایی هر طرف کلید متفاوت می‌باشد. این تفاوت باعث ایجاد ولتاژ دو سر کلید با فرکانس‌های بالا می‌گردد که اصطلاحاً به آن ولتاژ بازیابی گذرا (TRV)<sup>۱</sup> گفته می‌شود. مقدار پیک این ولتاژ و نرخ افزایش آن دو مشخصه اصلی کلیدهای قدرت به

<sup>۱</sup> - Transient Recovery Voltage

حساب می‌آیند که در کنار جریان اتصال کوتاه توانایی قطع کلید را مشخص می‌کنند. نوع خطا و ضریب اثر سیستم زمین از عوامل تأثیرگذار بر شکل موج ولتاژ بازیابی گذرا و مقادیر مشخصه‌های آن به حساب می‌آیند به طوری که مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بدترین حالت مربوط به خطای سه‌فاز زمین نشده یا سیستم‌های با نول زمین نشده می‌باشد. اما به علت اینکه احتمال رخ دادن خطای سه‌فاز زمین نشده بسیار کم است، استاندارد IEEE خطای سه‌فاز زمین شده را برای مطالعات ولتاژ بازیابی گذرای کلیدزنی پیشنهاد می‌کند. همچنین خطاهایی که در فواصل نزدیک به ترمینال رخ می‌دهند (SLF)<sup>۱</sup>، به دلیل ایجاد امواج سیار<sup>۲</sup> با شکل موج دندانه اره‌ای و فرکانس بالا، معمولاً در لحظات اولیه بعد از خاموش شدن جرقه، نرخ افزایش ولتاژ بازیابی گذرا (RRRV)<sup>۳</sup> را تحت تأثیر قرار می‌دهند. شکل (۷-۲)، شکل موج کلی ولتاژ بازیابی گذرا در دو سر کلید در لحظه باز شدن تیغه‌ها را نشان می‌دهد که در آن UC معرف مقدار حداکثر TRV و شیب خط OP معرف مقدار نرخ افزایش ولتاژ بازیابی می‌باشد. شکل موج ولتاژ بازیابی همچنین بسته به موقعیت خطا می‌تواند به صورت سینوسی، نمایی، دندانه اره‌ای و یا ترکیبی از آنها باشد.



شکل (۷-۲). شکل موج TRV و پارامترهای آن

مطابق استاندارد IEC ۶۲۲۷۱، دامنه موج دوم ولتاژ<sup>۴</sup> و مقدار نرخ افزایش ولتاژ بازیابی

- 
- ۱- Short Line Fault
  - ۲- Travelling Waves
  - ۳- Rate of Rise of Recovery Voltage
  - ۴- Second reference voltage



آن برای ولتاژ برگشتی گذرا کلیدهای قدرت از رابطه‌های (۲-۵) و (۲-۶) بدست می‌آید:

$$V_{TRV} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times k_{af} \times k_{pp} \times V_r \quad (2-5)$$

$$RRRV = \frac{V_{TRV}}{t_{TRV}} \quad (2-6)$$

$k_{af}$ : ضریب دامنه (برای خطای ترمینال و اتصال کوتاه: ۱/۴، برای قطع بار ۱/۲۵)،  
 $k_{pp}$ : ضریب FPC کلید (برای کلید فشار ضعیف: ۱/۳، کلید فشار متوسط ۱/۵)،  
 $V_r$ : ولتاژ نامی سیستم،  
 $t_{TRV}$ : زمان رسیدن به پیک ولتاژ  $V_{TRV}$

همچنین، دامنه موج اول ولتاژ<sup>۱</sup> و مقدار نرخ افزایش ولتاژ بازیابی آن از رابطه‌های (۲-۷) و (۲-۸) بدست می‌آید:

$$V_1 = 0.75 \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times k_{pp} \times V_r \quad (2-7)$$

$$RRRV = \frac{V_1}{t_1} \quad (2-8)$$

$t_1$  ( $\mu s$ ): زمان رسیدن به پیک ولتاژ  $V_1$

مقدار مجاز TRV و RRRV برای شبکه‌های مختلف در استانداردهای مربوطه مشخص شده است. به طور مثال مقدار مجاز TRV و RRRV برای شبکه ۲۰kV طبق استاندارد IEC ۶۰۲۷۱ به ترتیب ۴۵/۳kV و ۱/۰۵kV/ $\mu s$  می‌باشد. از روشهای کاهش مقادیر TRV و RRRV می‌توان به موازی کردن برقییر با کلید و نصب خازن موازی بین دو سر کلید اشاره نمود.

۱- First reference voltage

#### ۲-۴ اضافه ولتاژهای موقتی

اضافه ولتاژهای موقتی شامل نوساناتی با میرائی کم و اغلب همراه با هارمونیک می‌باشند و معمولاً با پریودی در حدود چند صد میلی ثانیه (بیش از ۵ سیکل) تداوم می‌یابند. اضافه ولتاژهای موقت اغلب در پی تغییر ساختار شبکه بوجود می‌آیند و فاقد کیفیت موجی بوده و تا برگشت شبکه به وضعیت عادی خود، ادامه خواهند داشت. از اینرو اضافه ولتاژهای موقت به طور مرتب در سیستم‌های قدرت بوجود می‌آیند. این اضافه ولتاژها اغلب دارای فرکانس شبکه قدرت می‌باشند. از مهمترین شرایط و علل ایجاد اضافه ولتاژهای موقتی در سیستم‌های قدرت می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- وقوع پدیده رزونانس و فرورزونانس،
- وقوع خطای تکفاز به زمین (خطای عایقی)،
- قطع هادی‌های فاز (در سیستم زمین نشده و یا زمین شده با امپدانس بالا) و یا قطع سیم نول در سیستم با بار نامتعادل (شبکه‌های فشار ضعیف و متوسط)،
- خطوط انتقال طولانی جبران نشده بی‌بار یا کم بار (اثر فرانتی)،
- قطع و پس زدن بارهای بزرگ،
- برقرار کردن ترانسفورماتورهای بی بار یا کم بار (جریان هجومی)،
- کلیدزنی خطوط بلند بی بار،
- برقرار کردن غیر همزمان فازهای خطوط انتقال سه فاز،

اضافه ولتاژهای با زمان کوتاه که برای چند ثانیه دوام دارند رایجترین نوع اضافه ولتاژهای موقتی در شبکه‌های فشار ضعیف و فشار متوسط می‌باشند. عموماً تجهیزات محدود کننده و حفاظت کننده (برقگیرها) که برای حذف و کاهش دامنه اضافه ولتاژهای صاعقه و کلیدزنی مورد استفاده قرار می‌گیرند قادر به حذف اضافه ولتاژهای موقتی نمی‌باشند.

#### ۲-۴-۱ اضافه ولتاژهای موقتی ناشی از وقوع فرورزونانس

پدیده فرورزونانس<sup>۱</sup> یا رزونانس غیر خطی (جهشی) یک پدیده مخرب شناخته شده در شبکه‌های قدرت دارای راکتانس غیر خطی (هسته اشباع پذیر)، تجهیزات با خاصیت خازنی و دارای تلفات پایین، می‌باشد.

فرورزونانس یک پدیده نسبتاً رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد زیرا در این شبکه‌ها ترانسفورماتورهای با هسته اشباع پذیر و خطوط توزیع با ماهیت خازنی وجود دارد. خاصیت خازنی سیستم به خاطر وجود فیدهای کابلی، خطوط هوایی، بانک خازنی، ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ با مقسم خازنی، کلیدهای قدرت مجهز به خازن، تجهیزات ایزوله کننده (خازن بوشینگ) و غیره می‌باشد. همچنین وجود سیستم‌های مقاومت پایین (ترانسفورماتورهای با تلفات کم، ترانسفورماتورهای بی بار، شبکه با تلفات کم) باعث افزایش احتمال وقوع پدیده فرورزونانس می‌شود. به عنوان مثال، ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ که دارای بار کم بوده و فقط تجهیزات حفاظتی و یا اندازه گیری را تغذیه می‌کنند اغلب در معرض تهدید فرورزونانس قرار دارند.

پدیده فرورزونانس غالباً بعد از وقوع یک اغتشاش گذرا (مثل اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه و کلیدزنی، خطای موقتی، ...) یا یک عمل کلیدزنی (برق‌دار کردن ترانسفورماتور، خط و یا بانک خازنی، و یا حذف خط) اتفاق می‌افتد. فرورزونانس باعث تولید اضافه ولتاژها و اضافه جریانهای شدید خطرناک با زمان استمرار نسبتاً بالا می‌شوند که منجر به تولید اغتشاش پایدار در شکل موج جریان و ولتاژ سیستم می‌گردد. از اینرو وقوع پدیده فرورزونانس در شبکه‌های قدرت با افزایش ولتاژ و صدمه به عایق برقگیرها ، کابلها، سرکابلها و ترانسفورماتورهای قدرت و ولتاژ همراه است. علاوه بر این، وقوع فرورزونانس باعث افزایش جریان نشتی در برقگیرهای غیر خطی می‌شود و از عمر و کارایی آنها می‌کاهد.

به طور کلی، وقوع پدیده فرورزونانس به پارامترها و شرایط متعددی مثل شرایط اولیه سیستم، مشخصه اشباع هسته ترانسفورماتورها، شار پسماند هسته

<sup>۱</sup> - Ferroresonance

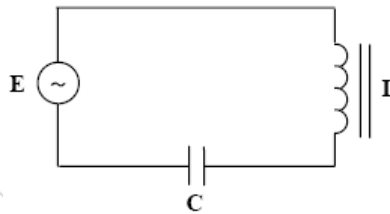
ترانسفورماتورها، نحوه اتصال سیم پیچ ترانسفورماتورها، موقعیت و زمان کلیدزنی، کل تلفات سیستم، ظرفیت خازنی شبکه و مدار، نوع و چگونگی وقوع پدیده‌های گذرا و عوامل دیگر بستگی دارد. سطوح ولتاژ بالا، خطوط طولانی و کابل‌های دفنی این پدیده را تشدید می‌کنند.

فرورزونانس با توجه به تغییرات راکتانس مدار، ممکن است در باند فرکانسی وسیع رخ دهد. دامنه این نوع اضافه ولتاژها به  $1/5$  تا  $2$  پریونیت می‌رسد ولی ممکن است در سیستم‌های توزیع حتی به  $4$  پریونیت نیز برسد. در سیستم‌های ستاره - مثلث زمین نشده، پدیده فرورزونانس بیشتر دیده می‌شود و برای ترانسفورماتورهای توزیع با بار زیاد عملاً وقتی که فقط یک فاز شبکه برقرار می‌شود (به سبب عمل کردن فیوز و یا هر علتی که باعث برقرار شدن یک فاز شود) اتفاق می‌افتد. همچنین در ترانسفورماتورهای ولتاژ متصل به شینه‌ای که بوسیله یک کلید قدرت از سیستم جدا شده باشد، اتفاق می‌افتد. موارد دیگر مانند قطع و وصل یک بار مقاومتی در ثانویه ترانسفورماتور، یا تغییر در عمل کلیدزنی می‌تواند سبب ایجاد پدیده فرورزونانس شود. در سیستم‌های توزیع، متداولترین حالتی که باعث ایجاد فرورزونانس می‌شود، قطع و وصل یک فاز از ترانسفورماتور سه فاز تغذیه شده بوسیله کابل زیر زمینی است. اگر اولیه ترانسفورماتور سه فاز نباشد، در هنگام قطع و وصل یک فاز، یک مدار رزونانس سری بوسیله کاپاسیتانس کابل در فاز باز و راکتانس مغناطیس‌کنندگی غیرخطی ترانسفورماتور تشکیل می‌شود. در ولتاژهای بالا، به لحاظ کاپاسیتانس داخلی ترانسفورماتور وقتی عمل قطع و وصلی در ترمینال‌های آن صورت می‌گیرد احتمال وقوع فرورزونانس وجود دارد. رایجترین نوع فرورزونانس در ترانسفورماتورهای با هسته پنج ستونه و با سیم پیچ اولیه ستاره زمین شده می‌باشد. به طور کلی، اضافه ولتاژهای ناشی از وقوع فرورزونانس می‌تواند خطراتی مثل شکست دی الکتریکی تجهیزات، ایجاد هارمونیک، کاهش عمر مفید تجهیزات، تولید نویز صوتی و عملکرد ناخواسته رله‌ها را به همراه داشته باشد. هرگاه در یک مدار خطی مقدار راکتانس خازنی با مقدار راکتانس سلفی برابر باشد آنگاه در یک فرکانس مشخص مطابق رابطه (۲-۹)، پدیده رزونانس یا تشدید اتفاق می‌افتد.

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \dots \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2-9)$$

اما اگر در مدار فوق راکتانس سلفی دارای خاصیت غیر خطی (اشباع پذیر) باشد، پدیده رزونانس در چندین فرکانس بوجود می‌آید. این نوع رزونانس به رزونانس غیر خطی و یا فرورزونانس مشهور می‌باشد. این پدیده بیشتر در شبکه‌های توزیع کابلی و پستهای فشارقوی دارای ترانسفورماتورهای ولتاژ با مقسم خازنی و یا کلیدهای قدرت مجهز به مسیر موازی خازنی اتفاق می‌افتد.

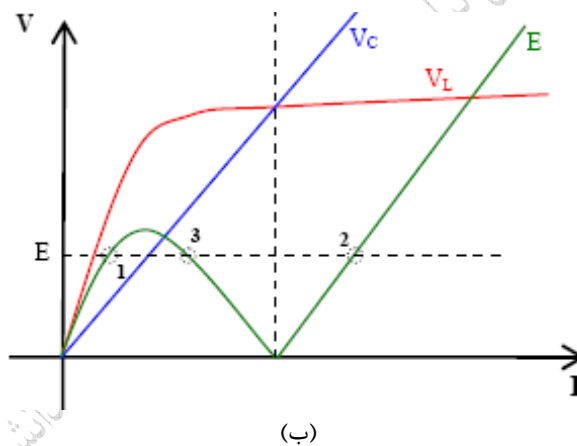
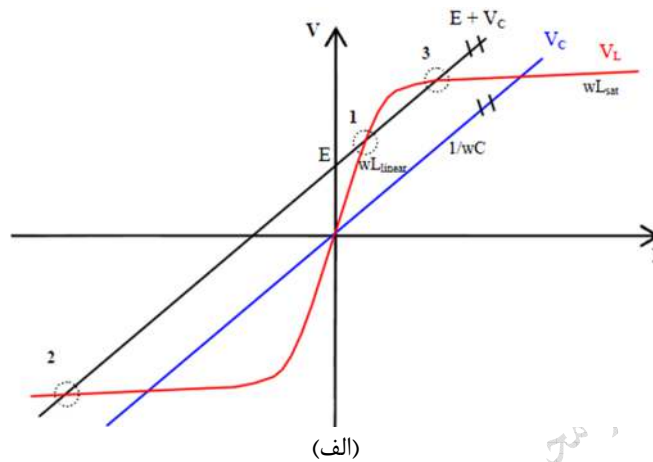
راکتانس غیر خطی نه تنها به فرکانس بلکه به چگالی شار مغناطیسی هسته ترانسفورماتورها یا راکتور نیز بستگی دارد. خاصیت غیر خطی راکتانس سلفی را می‌توان بصورت منحنی اشباع یک هسته مغناطیسی و با دو ناحیه خطی  $(X_{L-linear} = \omega L_{Linear})$  و ناحیه اشباع  $(X_{L-Sat} = \omega L_{Sat})$  بیان نمود. همانند رزونانس، فرورزونانس نیز به دو صورت سری و موازی بوجود می‌آید. مطابق شکل (۸-۲)، در فرورزونانس سری رابطه (۲-۱۰) برقرار است.



شکل (۸-۲). مدار فرورزونانس سری

$$\vec{E} = \vec{V}_L + \vec{V}_C \quad (2-10)$$

قسمت الف شکل (۹-۲)، حل گرافیکی یک مدار فرورزونانس سری را نشان می‌دهد. نقاط کاری ممکن از تقاطع خطوط  $V_L$  و  $E + V_C$  بدست می‌آیند.  $E$  ولتاژ منبع،  $V_L$  ولتاژ دو سر اندوکتانس و  $V_C$  ولتاژ دو سر خازن می‌باشد. روش دیگر برای بیان این راه حل گرافیکی مطابق قسمت ب شکل (۹-۲) می‌باشد.



شکل (۲-۹). حل گرافیکی یک مدار فرورزونانس سری

هر دو روش تحلیلی مذکور، سه نقطه کار مختلف زیر را ارائه می‌دهند.

- نقطه کار ۱، یک نقطه کار پایدار غیر فرورزونانس می‌باشد. در این نقطه راکتانس سلفی از راکتانس خازنی سیستم بزرگتر می‌باشد:

$$X_{L-Linear} > X_C \Rightarrow E = V_L - V_C$$

- نقطه کار ۲، یک نقطه کار پایدار فرورزونانس می‌باشد. در این نقطه راکتانس خازنی از راکتانس سلفی بزرگتر می‌باشد:

$$X_{L-Sat} < X_C \Rightarrow E = V_C - V_L$$

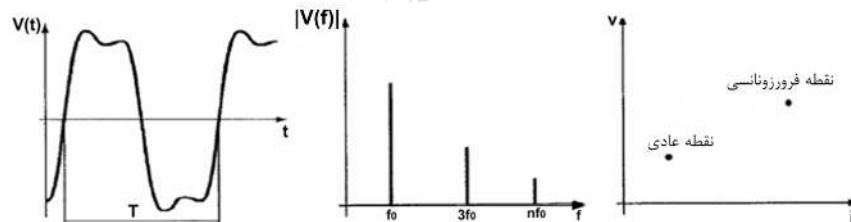
- نقطه کار ۳، یک نقطه کار ناپایدار می‌باشد.

بنابراین، مشخصه اصلی مدار فرورزونانس، شامل حداقل دو نقطه کار پایدار و جهش‌های ناگهانی بین این دو موقعیت می‌باشد.

برای پیش‌بینی و تشخیص اولیه مشخصه نوسانات جریان در اندوکتانس غیرخطی و یا نوسانات ولتاژ دو سر آن در هنگام وقوع پدیده فرورزونانس، آن را به چهار نوع نوسانات پایدار به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

#### الف- فرورزونانس پایه

در حالت فرورزونانس پایه<sup>۱</sup> یا فرورزونانس با فرکانس اصلی، نوسانات با فرکانس شبکه (فرکانس قدرت) و با دامنه متفاوت اتفاق می‌افتد. در این حالت تنها یک نقطه کار عادی و یک نقطه کار فرورزونانسی برای مدار وجود دارد. در این حالت شکل موج فرورزونانس پایه، پاسخ فرکانسی آن و نقاط کار سیستم در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۰-۲). مشخصات زمانی و فرکانسی فرورزونانس در حالت پایه

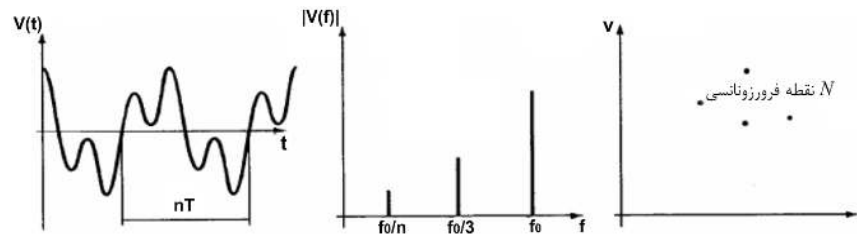
#### ب- فرورزونانس زیرهارمونیک

در حالت فرعی یا فرورزونانس با فرکانس زیر هارمونیکها<sup>۲</sup>، نوسانات با فرکانس فرد پائین‌تر یا بالاتر از فرکانس قدرت ایجاد می‌شوند. در این حالت شکل موج فرورزونانس

۱- Fundamental Frequency Ferroresonance

۲-Subharmonic Ferroresonance

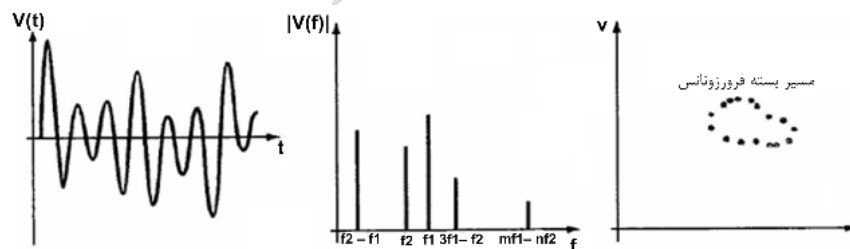
زیرهارمونیک، پاسخ فرکانسی آن و نقاط کار سیستم در شکل (۱۱-۲) ارائه شده است.



شکل (۱۱-۲). مشخصات زمانی و فرکانسی فرورزونانس در حالت زیرهارمونیک

### ج- فرورزونانس شبه متناوب<sup>۱</sup>

با تغییر شرایط اولیه شبکه، رفتار سیستم در شرایط فرورزونانس از حالت متناوب فاصله گرفته و وارد شبه پریودیک می‌شود در این حالت ولتاژ و جریان دارای آشفتگی‌هایی با پریود معین می‌باشند و نقاط کار مدار یک مسیر بسته را تشکیل می‌دهند. شکل موج فرورزونانس شبه پریودیک، پاسخ فرکانسی آن و نقاط کار سیستم در این حالت در شکل (۱۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۲). مشخصات زمانی و فرکانسی فرورزونانس در حالت شبه پریودیک

### د- فرورزونانس حالت آشفته<sup>۲</sup>

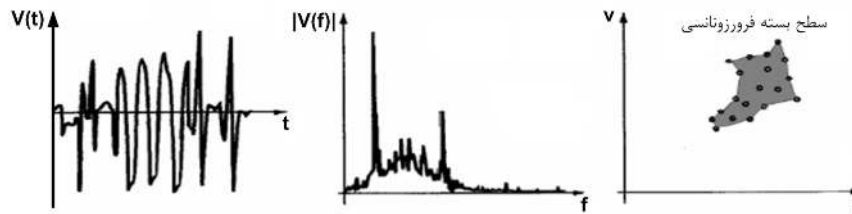
مداری که در حالت شبه پریودیک است در یک شرایط خاص با تغییر بعضی پارامترهای

۱- Quasi-periodic Ferroresonance

۲- Chaotic Ferroresonance



سیستم، رفتار آشوب گونه و بی نظم را از خود نشان می‌دهد. در این حالت، نوسانات کاملا اتفاقی بوده و دارای پریود خاصی نمی‌باشد و نقاط کار مدار یک سطح بسته را تشکیل می‌دهند. شکل موج فرورزونانس حالت آشفته، پاسخ فرکانسی آن و نقاط کار سیستم در این حالت در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۳). مشخصات زمانی و فرکانسی فرورزونانس در حالت آشفته

### ۲-۴-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از خطای عایقی سیستم

این نوع اضافه ولتاژها در شبکه‌های سه فاز با نقطه خنثی (نول) زمین نشده یا زمین شده با امپدانس، یا در اثر تخریب کابل زیرزمینی و تجهیزات سیستم بوجود می‌آیند. وقتی یک خطای عایقی فاز به زمین در سیستم‌های با نقطه نول زمین نشده اتفاق می‌افتد، ولتاژ نقطه نول تقریباً برابر با ولتاژ فاز خطا دیده می‌شود در نتیجه دو فاز دیگر در وضعیت اضافه ولتاژ قرار می‌گیرند، به طوری که نسبت ولتاژ فازهای سالم به ولتاژ خطا افزایش می‌یابد. مقدار نسبت اضافه ولتاژ فازهای سالم در لحظه خطای تکفاز به ولتاژ نامی سیستم را با ضریب تاثیر زمین ( $C_e$ ) بیان می‌کنند. مقدار ضریب  $C_e$  تحت شرایط مختلف شبکه و نحوه زمین شدن نقطه نول سیستم، از رابطه (۲-۱۱) محاسبه می‌شود. انواع روشهای مختلف زمین شدن نقطه خنثی (نول) سیستم قدرت، در پیوست شماره ۲ ارائه شده است.

$$C_e = \frac{\sqrt{3(k^2 + k + 1)}}{k + 2} \quad , \quad k = \frac{X_0}{X_d} \quad (2-11)$$

$X_d$  : راکتانس مستقیم شبکه از دید نقطه خطا.

$X_0$  : راکتانس توالی صفر.

به عنوان مثال، برای شرایط مختلف زمین شدن نقطه نول، مقدار اضافه ولتاژ فازهای سالم تحت شرایط وقوع خطای تکفاز، مطابق جدول زیر می‌باشد.

جدول (۲-۶). مقدار اضافه ولتاژ فازهای سالم تحت شرایط مختلف شبکه

$C_e$	$K$	$X_d (\Omega)$	$X_0 (\Omega)$	نوع زمین شدن نقطه نول سیستم
۱/۷۳	$\infty$	-	$\infty$	زمین نشده
۱	۱	-	$X_d$	زمین شده موثر
۱/۱۸	۲/۳	۵۲	۱۲۰	زمین شده غیر موثر (پست ۴۰۰ کیلوولت)
۱/۲	۲/۵	۸۵	۲۱۰	زمین شده غیر موثر (وسط خط ۴۰۰ کیلوولت)

بطور کلی عوامل تاثیر گذار بر دامنه اضافه ولتاژهای موقتی هنگام وقوع خطای فاز به زمین عبارتند از:

- ساختار شبکه زمین.
- نوع یا نحوی زمین شدن نقطه نول شبکه قدرت.
- نحوه برطرف کردن یا حذف خطای فاز به زمین (زمان طولانی برای سیستم زمین نشده، زمان کوتاه برای سیستم زمین شده با امپدانس، زمان بسیار کوتاه برای سیستم زمین شده).

### ۳-۴-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از قطع خطوط

قطع کلیدهای خطوط نیرو با برنامه قبلی (برای تعمیرات، تغییر فیذر، ...) و یا در اثر وقوع خطا اتفاق می‌افتد. در قطع کلیدها با برنامه قبلی، اغلب پیش بینی‌های لازم جهت محدود سازی اضافه ولتاژهای موقتی صورت می‌گیرد. برای این کار ابتدا بار خط را به تدریج کاهش می‌دهند و سپس کلید آن قطع می‌گردد. همچنین در این حالت، اضافه

ولتاژ موقتی ناشی از کاهش بار را با تنظیم تپ ترانسفورماتور می‌توان کنترل نمود. اما اغلب مشکل اصلی در هنگام قطع ناگهانی خطوط می‌باشد. در حالت قطع ناگهانی خطوط پربار یا حذف ناگهانی بخشی از بارهای اکتیو و راکتیو خط، اضافه ولتاژ موقتی در طول خط تولید می‌شود. مقدار اضافه ولتاژ موقتی ایجاد شده در خط، به عواملی مثل طول خط، بار خط در لحظه قطع کلید، قدرت اتصال کوتاه شبکه‌های تغذیه کننده خط و غیره بستگی دارد.

#### ۴-۲ اضافه ولتاژ ناشی از خطوط طویل بی بار

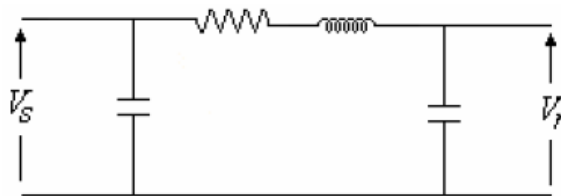
در خطوط طویل هوایی یا کابلی با بار کم یا بدون بار، به خاطر افزایش خاصیت خازنی خط نسبت به خاصیت سلفی آن، توان راکتیو تزریق شده به خط ناشی از خازنهای پراکندگی یا شارژ خط افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش ولتاژ انتهای خط نسبت به ولتاژ ابتدای خط (یا ولتاژ منبع متصل به خط) می‌شود. به افزایش ولتاژ در انتهای خطوط انتقال نیروی بی بار یا کم بار، اضافه ولتاژ ناشی از اثر فرانتی<sup>۱</sup> می‌گویند. این امر در واقع ناشی از بی بار بودن خطوط طویل برقدار در اثر قطع کلید انتهای خط و وصل بودن کلید ابتدای خط یا کاهش شدید بار خط می‌باشد به طوری که خط به صورت بی بار یا کم بار تحت ولتاژ قرار می‌گیرد. در این شرایط ظرفیت خازنی بین هادیهای فاز و زمین و همچنین ظرفیت خازنی بین فازها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر خطوط طویل بدون بار و یا با بار سبک، دارای جریان سلفی کم می‌باشند. بنابراین با افزایش ظرفیت خازنی خطوط، توان راکتیو تزریقی به خط افزایش می‌یابد و نهایتاً باعث افزایش ولتاژ در انتهای خط (نسبت به ابتدای آن) می‌شود. توان راکتیو خط در شرایط بی باری با توجه به ظرفیت خازنی (C)، طول خط (L) و ولتاژ اسمی آن (U)، از رابطه (۲-۱۲) تعیین می‌گردد:

$$Q_c = U^2 LC\omega \quad (2-12)$$

۱- Ferranti effect

با افزایش طول و ولتاژ خطوط انتقال نیرو، جریان خازنی خط (شارژ خازنی) افزایش می‌یابد. ظرفیت خازنی (جریان شارژ) در خطوط کوتاه ناچیز می‌باشد ولی در خطوط با طول متوسط و بلند قابل ملاحظه است. بنابراین اثر فرانتی در خطوط متوسط و طویل بیشتر اتفاق می‌افتد.

برای خط با طول متوسط، رابطه ولتاژ انتهای خط برای مدار معادل مدل پی مطابق شکل (۲-۱۴)، بصورت زیر بدست می‌آید.



شکل (۲-۱۴). مدار معادل مدل پی خط با طول متوسط

$V_r$ : ولتاژ انتهای خط

$V_s$ : ولتاژ ابتدای خط

$I_r$ : جریان بار خط

$$V_s - \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_r + ZI_r \quad (2-13)$$

برای حالتی که خط بی بار یا کم بار باشد مقدار جریان  $I_r$  تقریباً برابر صفر است در این صورت:

$$V_s = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_r$$

یا:

$$V_s - V_r = \frac{YZ}{2} V_r = \frac{(j\omega Cl)(r + j\omega L)l}{2} V_r$$

با صرفنظر کردن از مقاومت خط:

$$V_s - V_r = \frac{-\omega^2 l^2 Cl}{2} V_r \quad (2-14)$$

برای خطوط انتقال سرعت انتقال امواج الکترومغناطیسی تقریباً برابر سرعت نور می‌باشد و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 3 \times 10^8 \text{ (km/s)}$$

بنابراین با جایگذاری مقدار  $LC$  در رابطه (۲-۱۴) و ساده سازی، نهایتاً مقدار ولتاژ انتهای خط از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_s = \left[ 1 - \frac{\omega^2 l^2 \times 10^{-10}}{18} \right] V_r = k V_r \quad (2-15)$$

در رابطه فوق مقدار  $k$  کوچکتر از یک می‌باشد بنابراین مقدار ولتاژ انتهای خط از مقدار ابتدای خط بیشتر خواهد بود. این رابطه که برای خطوط طویل بی بار صادق است همان اثر فرانتی می‌باشد.

جهت کاهش دامنه اضافه ولتاژهای فرانتی، می‌توان از رآکتور موازی قابل نصب در پستهای دو سمت خطوط، استفاده نمود. در خطوط انتقال با ولتاژ زیاد، رآکتور موازی در سیم پیچ سوم ترانسفورماتورهای موجود در پست‌ها پیش بینی می‌گردد. قطع همزمان کلیدهای دو سمت خطوط انتقال نیرو یکی دیگر از راه کارهای موثر جهت کاهش افزایش ولتاژ در خطوط بلند بی بار می‌باشد.

## ۲-۵ سؤال و تمرین

۱. اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه بر خطوط انتقال از چه راه‌هایی ایجاد می‌گردند؟
۲. چرا اکثر صاعقه‌ها از نوع صاعقه با پلاریته منفی می‌باشد؟ همچنین چرا دامنه صاعقه‌های با پلاریته مثبت، بسیار بیشتر از صاعقه‌های با پلاریته منفی می‌باشد؟
۳. شرایط محفظه کلید چه تاثیری بر دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی دارد؟
۴. نقش امپدانس سیستم زمین بر دامنه اضافه ولتاژهای گذرا و موقتی در سیستمهای قدرت به چه نحوی می‌باشد؟

## فصل ۳

### مروری بر امواج سیار

#### ۳-۱ مقدمه

در بررسی حالت ماندگار، سیستم قدرت یک سیستم بزرگ و پیچیده می‌باشد که طول موج ولتاژ و جریان آن در مقایسه با ابعاد سیستم بسیار بزرگتر می‌باشد. از اینرو برای تحلیل حالت ماندگار سیستم از مدار معادل فشرده استفاده می‌گردد. در این مدل میدان الکتریکی هادی با خازن و میدان مغناطیسی آنها با سلف مدل می‌گردند. ولی در تحلیل حالت گذرا به دلیل فرکانس بالای موج‌ها، طول موج ولتاژ یا جریان در مقایسه با ابعاد سیستم کوچکتر است لذا لازم است مدت زمان انتشار و تضعیف موج‌ها در تحلیل مدار در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر نمی‌توان از مدار معادل فشرده  $\pi$  خطوط انتقال برای تحلیل حالت گذرای سیستم در فرکانسهای بالا استفاده نمود.

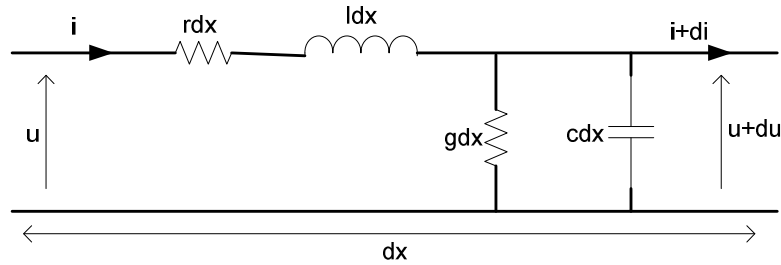
اگر یک خط انتقال با استفاده از مدار معادل  $\pi$  مدل گردد، یک اختلال کوچک در یک طرف خط انتقال سریعاً به انتهای دیگر خط منتقل می‌گردد، در حالیکه در عمل انتقال هر تغییری در خطوط نیاز به زمان مشخصی دارد. در واقع تغییر جریان سلف و ولتاژ خازن در خطوط انتقال نیاز به زمان دارد. بنابراین نمی‌توان از مدار معادل فشرده  $\pi$  در بررسی‌های حالت گذرا به دلیل کوچک بودن طول موج سیگنال‌های اعمالی استفاده نمود. در این حالت اگر قرار باشد مدل انتشار و تضعیف موج در نظر گرفته شود، باید از مقادیر توزیع شده خازن و سلف در مدار معادل استفاده نمود.

وقتی امواج گذرای صاعقه یا کلیدزنی به یک خط انتقال برخورد کنند با سرعت نزدیک به سرعت نور در طول خط (بدون تلفات) انتشار می‌یابند. اختلالات ایجاد شده توسط برخورد امواج صاعقه و کلیدزنی را می‌توان توسط آنالیز امواج سیار بررسی نمود. این امواج طی چند میکروثانیه به مقدار حداکثر خود می‌رسند در حالیکه هیچ کلید قدرتی قادر به قطع آنها پیش از این زمان نمی‌باشد. لذا باید از تجهیزات حفاظتی برای محدود کردن دامنه و انرژی این امواج قبل از رسیدن به تجهیزات اصلی قدرت استفاده نمود. برقررها مهم‌ترین تجهیزات حفاظتی در پست‌ها و خطوط انتقال برای جلوگیری از صدمات ناشی از اضافه ولتاژهای گذرا می‌باشند.

در تحلیل حالت ماندگار (فرکانس پایین)، نوع مدار معادل خطوط انتقال متناسب با طول آنها به خطوط کوتاه (خطوط با طول کمتر از ۸۰ کیلومتر)، خطوط متوسط (خطوط با طول بین ۸۰ و ۲۴۰ کیلومتر) و خطوط بلند (خطوط با طول بیش از ۲۴۰ کیلومتر) تقسیم می‌شوند و برای تحلیل فرکانس پایین این خطوط به ترتیب از مدل‌های متمرکز سلف و مقاومتی، مدل‌های  $\pi$  و  $T$  و مدل توزیع شده خازن و سلف استفاده می‌گردد. اما این مدل‌ها برای تحلیل گذرای سیگنال‌های با فرکانس بسیار بالا کارایی ندارند.

## ۲-۳ معادلات امواج سیار

امواج گذرای تولید شده در خطوط انتقال فشارقوی (ناشی از صاعقه یا کلیدزنی)، می‌توانند با سرعت نزدیک به سرعت نور در طول خطوط هوایی حرکت نمایند. این امواج هنگامی که به انتهای خط یا انشعابی در طول خطوط انتقال می‌رسند، براساس قوانین انتشار و انعکاس امواج سیار رفتار می‌نمایند. چگونگی رفتار امواج سیار را می‌توان به روش تحلیلی بررسی نمود. در تحلیل رفتار این امواج به روش المان‌های توزیع شده، بخش کوچکی از خط انتقال در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۳-۱)، مقادیر مقاومت سری، مقاومت موازی، خازن و سلف خط در این بخش کوچک به ترتیب با  $gdx$ ،  $rdx$  و  $ldx$  نشان داده می‌شوند.



شکل (۱-۳). مدار معادل بخشی از خط انتقال

در شکل (۱-۳)،  $u$  ولتاژ لحظه‌ای (متغیر با فاصله و زمان)،  $i$  جریان لحظه‌ای (متغیر با فاصله و زمان)،  $r$  مقاومت سری خط در واحد طول،  $l$  اندوکتانس خط در واحد طول،  $c$  ظرفیت خازنی خط در واحد طول و  $g$  رسانایی خط در واحد طول می‌باشد. با اعمال قوانین ولتاژ حلقه و جریان گره در شکل (۱-۳)، معادلات (۱-۳) و (۲-۳) بدست می‌آیند.

$$u = -\frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx = r dx \cdot i + l dx \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (۳-۱)$$

$$i = -\frac{\partial i}{\partial x} \cdot dx = g dx \cdot u + c dx \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (۳-۲)$$

با حذف  $dx$  از معادلات فوق، معادلات دیفرانسیل جزئی بدست می‌آیند:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = r \cdot i + l \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \quad (۳-۳)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = g \cdot u + c \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \quad (۳-۴)$$

با اعمال تبدیل لاپلاس به معادلات مذکور، روابط (۳-۳) و (۳-۴) حاصل می‌گردند:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = (r + Sl)i \quad (۳-۵)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = (g + Sc)u \quad (۳-۶)$$

با جایگزینی  $Y = g + Sc$  و  $Z = r + Sl$  معادلات مشتق جزئی مرتبه دوم زیر حاصل



می گردند.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = \gamma^2 \cdot u \quad (3-7)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \gamma^2 \cdot i \quad (3-8)$$

در معادله بالا  $\gamma = (1/v)\sqrt{(S+\alpha)^2 - \beta^2}$  می باشد که در آن،  
 $\alpha = 0.5 \times [(r/l) + (g/c)]$  ضریب تضعیف دامنه موج در مدت عبور از خط انتقال،  
 $\beta = 0.5 \times [(r/l) - (g/c)]$  ضریب فاز و  $v = \sqrt{1/lc}$  سرعت موج سیار در خط می-  
 باشند. جواب معادله (3-7) در حوزه زمان به صورت رابطه (3-9) می باشد.

$$u = e^{\gamma x} f_1(t) + e^{-\gamma x} f_2(t) \quad (3-9)$$

همچنین جریان نیز از رابطه (3-10) حاصل می گردد.

$$i = -\frac{1}{Z} [e^{\gamma x} f_1(t) - e^{-\gamma x} f_2(t)] \quad (3-10)$$

$f_1(t)$  و  $f_2(t)$  توابع اختیاری بوده و  $Z' = \sqrt{Z/Y}$  به عنوان امپدانس موجی یا امپدانس  
 مشخصه خط شناخته می شود که به ابعاد خط و مشخصات مواد عایقی بکار رفته در  
 خط انتقال بستگی دارد. در مورد امواج صاعقه که بصورت جریان می باشند، با حرکت  
 موج سیار جریان در طول خط، موج گذرای ولتاژ در خط ایجاد می شود.  
 برای تحلیل امواج سیار در خطوط انتقال، دو حالت مختلف خط انتقال بدون تلفات و  
 خط انتقال با تلفات مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۳-۲-۱ خط انتقال بدون تلفات

عملا در خطوط انتقال توان، مقدار مقاومت خط ( $r$ ) در مقابل اندوکتانس خط ( $l$ )  
 ناچیز بوده و همچنین رسانایی خط ( $g$ ) قابل صرف نظر کردن می باشد در این صورت  
 معادلات مذکور به صورت رابطه (3-11) خواهند بود.

$$r = g = 0 \Rightarrow \gamma = S\sqrt{lc} = S/v, \quad Z' = \sqrt{l/c} \quad (3-11)$$

امپدانس موجی  $Z'$ ، نسبت ولتاژ به جریان را نشان می‌دهد که برای خط بدون تلفات مقدار آن حقیقی می‌باشد، بدین معنی که بین موج سیار ولتاژ و جریان اختلاف فازی وجود ندارد و انرژی موج در حین عبور از خط انتقال کاهش نمی‌یابد. ولی اگر مقدار مقاومت سری و موازی خط در نظر گرفته شود آنگاه موج سیار در حین عبور مقداری از انرژی خود را بصورت حرارت تلف خواهد نمود.

مقدار امپدانس مشخصه و سرعت عبور موج، به ظرفیت خازن و سلف در واحد طول بستگی دارد که برای یک خط انتقال تک سیمه بدون تلفات از رابطه (۳-۱۲) بدست می‌آید.

$$Z' = 60 \ln \frac{2h}{r} \quad (3-12)$$

که در آن،  $h$  و  $r$  به ترتیب ارتفاع و شعاع هادی خط انتقال می‌باشند. عموماً در خطوط هوایی سرعت موج برابر سرعت نور بوده و مقدار امپدانس مشخصه بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ اهم برای خطوط مختلف تغییر می‌کند.

مقدار امپدانس مشخصه و سرعت حرکت موج در یک کابل انتقال بدون تلفات از رابطه (۳-۱۳) بدست می‌آید.

$$Z' = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad v = \frac{300}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ m}/\mu\text{s} \quad (3-13)$$

که در آن،  $r_1$  شعاع هادی،  $r_2$  شعاع عایق و  $\epsilon_r$  ضریب نفوذپذیری نسبی عایق کابل (بین ۲/۴ تا ۴) می‌باشد. عموماً برای کابلها، مقدار امپدانس مشخصه از ۳۰ تا ۶۰ اهم و سرعت انتشار موج بین ۰/۳۳ تا ۰/۵ سرعت نور متغیر می‌باشد.

با حذف مقاومت سری و موازی برای خط بدون تلفات، معادلات ولتاژ و جریان به صورت زیر تغییر خواهند کرد.

$$u = e^{Sx/v} f_1(t) + e^{-Sx/v} f_2(t) \quad (3-14)$$

$$i = -\frac{1}{Z} [e^{Sx/v} f_1(t) - e^{-Sx/v} f_2(t)] \quad (3-15)$$

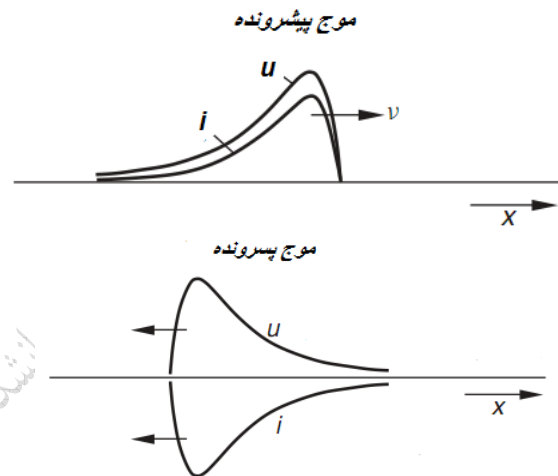
با اعمال سری تیلور و تبدیل لاپلاس معکوس روابط ولتاژ و جریان در حوزه زمان

بصورت روابط (۱۶-۳) و (۱۷-۳) بدست خواهند آمد.

$$u = f_1 \left( t + \frac{x}{v} \right) + f_2 \left( t - \frac{x}{v} \right) \quad (3-16)$$

$$i = -(1/Z') \left[ f_1 \left( t + \frac{x}{v} \right) - f_2 \left( t - \frac{x}{v} \right) \right] \quad (3-17)$$

$f_1$  و  $f_2$  در واقع امواج رونده در دو جهت مخالف هم و با سرعتهای یکسان می‌باشند.  $f_2$  موج پیش رونده (در جهت مثبت محور  $x$ ) و  $f_1$  موج پسرونده (در جهت منفی محور  $x$ ) می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌گردد امواج سیار ولتاژ و جریان بدون هیچ تضعیفی با سرعت  $v$  از خط انتقال عبور خواهند کرد. علامت منفی در موج پسرونده جریان به دلیل منفی بودن موج انرژی در حالت پسرونده می‌باشد. شکل (۲-۳) موج‌های پیشرونده و پسرونده ولتاژ و جریان را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳). امواج پیشرونده و پسرونده ولتاژ و جریان

برای یک خط انتقال با هادی‌های به شعاع  $r$  و به فاصله  $d$  از همدیگر، مقدار اندوکتانس ( $l$ ) و کاپاسیتانس ( $c$ ) خط مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$l = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \frac{\mu_r}{4} + \log_e \frac{d}{r} \right] \quad H/m \quad (3-18)$$

از آنجائیکه شار نشتی داخلی کوچک می‌باشد، می‌توان از آن صرف‌نظر کرد:

$$l = \frac{\mu_0}{2\pi} \log_e \frac{d}{r} \quad (H/m) \quad (3-19)$$

کاپاسیتانس خط:

$$c = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\log_e \frac{d}{r}} \quad (F/m) \quad (3-20)$$

برای هوا  $\epsilon_r = 1$  می‌باشد، در این صورت سرعت موج در هوا از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$l.c = \mu_0\epsilon_0 = \frac{1}{v^2} \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 3 \times 10^8 (m/s) \quad (3-21)$$

بنابراین سرعت انتشار موج در هوا برابر سرعت انتشار نور می‌باشد. البته اگر مقاومت خط انتقال قابل صرف‌نظر کردن نباشد، در آن صورت سرعت انتشار موج (۵ تا ۱۰ درصد) کمتر از سرعت نور می‌باشد.

### ۲-۳-۳ انرژی موج سیار

انرژی ذخیره شده در یک موج سیار برابر مجموع انرژی‌های ذخیره شده در موج ولتاژ و موج جریان است.

یک موج سیار الکترومغناطیسی در میدان الکتریکی و مغناطیسی حامل انرژی می‌باشد. انرژی الکتریکی در خازن خط انتقال که به اندازه  $u$  شارژ شده و انرژی مغناطیسی در سلف خط که از آن جریان  $i$  عبور می‌کند ذخیره می‌گردد. انرژی ذخیره شده در بخش  $dx$  از خط انتقال برابر است با:

$$E = 0.5 \times cdxu^2 + 0.5 \times ldx i^2 \quad (3-22)$$

اگر خط انتقال بدون تلفات باشد آنگاه انرژی الکتریکی خازن و انرژی مغناطیسی سلف برابر خواهد شد.

$$u = \sqrt{l/c} \cdot i \Rightarrow cu^2 = li^2 \Rightarrow 0.5 \times cdxu^2 = 0.5 \times ldx i^2 \Rightarrow E = cdxu^2 = ldx i^2$$

همانطور که مشاهده می‌شود بخشی از انرژی موج در میدان الکترواستاتیکی خازن و

بخش دیگر در میدان الکترومغناطیسی سلف ذخیره شده است. انرژی عبوری از خط انتقال در واحد زمان که توان حاصل از موج الکترومغناطیسی سیار نامیده می‌گردد از رابطه زیر حاصل می‌شود.

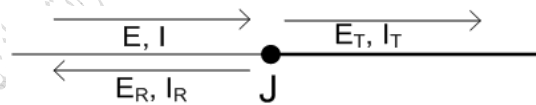
$$P = \frac{E}{dt} = \frac{E}{(dx/v)} = cu^2 \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{u^2}{Z'}$$

$$= li^2 \frac{1}{\sqrt{lc}} = i^2 Z' \quad (3-23)$$

امواج الکترومغناطیسی صاعقه و کلیدزنی توان بالایی دارند. هرچند زمان تداوم این امواج در حدود میکرو ثانیه یا میلی ثانیه می‌باشد، ولی انرژی آنها ممکن است به چند مگاژول نیز برسد که می‌تواند به تجهیزات سیستم قدرت آسیب برساند.

### ۳-۲-۳ انتشار و انعکاس امواج سیار

هنگامی که یک موج متحرک روی یک خط انتقال به نقطه اتصال با یک خط دیگر یا به انتها می‌رسد، بخشی از این موج در محل اتصال منعکس می‌شود و بخش دیگر وارد محیط دوم (طرف دوم نقطه اتصال انتقال) می‌شود. در این حالت برای سه نوع موج (موج اصلی، موج منعکس شده و موج انتقال یافته)، قانون گره در نقطه اتصال صدق می‌کند و همچنین معادله دیفرانسیل خط نیز حاکم می‌باشد.



شکل (۳-۳). برخورد موج در نقطه اتصال دو خط انتقال

مطابق شکل (۳-۳)، از آنجاییکه در نقطه اتصال ( $J$ ) هیچ ناپیوستگی بین امواج ولتاژ و جریان وجود ندارد می‌توان نوشت:

$$E + E_T = E_R \quad (3-24)$$

$$I + I_T = I_R \quad (3-25)$$

$$E = Z_1 I, \quad E_T = Z_2 I_T, \quad E_R = -Z_1 I_R \quad (3-26)$$

که در آن،  $E$  و  $I$  دامنه موج ولتاژ و جریان (اصلی)،  $Z_1$  و  $Z_2$  امپدانس موجی دو خط در طرفین محل اتصال،  $E_T$  و  $I_T$  موج ولتاژ و جریان انتقال یافته و  $E_R$  و  $I_R$  موج ولتاژ و جریان منعکس شده می‌باشند.

با جایگزین کردن و ساده سازی روابط مذکور، روابط (۳-۲۷) و (۳-۲۸) حاصل می‌گردند.

$$E_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot E \quad (3-27)$$

$$E_T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot E \quad (3-28)$$

بنابراین امواج منعکس شده و انتقال یافته بر حسب موج اصلی محاسبه می‌گردند. از آنجاییکه این امواج بخشی از موج اصلی می‌باشند، ضریب انتقال  $\alpha$  و ضریب انعکاس  $\beta$  را می‌توان بصورت زیر تعریف نمود.

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \alpha = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3-29)$$

با توجه به ضرایب انعکاس و انتقال هنگامی که مشخصات دو خط انتقال یکسان باشند ( $Z_1 = Z_2$ ) هیچ انعکاسی وجود ندارد و ضریب انعکاس صفر است. هنگامی که انتهای خط اول ( $Z_1$ ) باز است، در این حالت موج به صورت کامل منعکس می‌شود و ضریب انعکاس یک می‌باشد. همچنین هنگامی که انتهای خط اول اتصال کوتاه باشد، هیچ ولتاژی نمی‌تواند ظاهر شود و همه موج به صورت منفی منعکس می‌شود.

### ۱-۳-۲-۳ خطوط مدار باز

اگر خط انتقال بدون تلفات توسط یک منبع ایده‌ال با ولتاژ پله تغذیه شود و انتهای آن مدار باز باشد، در این حالت  $Z_2 = \infty$  و  $\beta = 1$  است.



شکل (۳-۴). انعکاس امواج جریان و ولتاژ برای خط مدار باز با منبع ایده‌آل

مطابق شکل (۳-۴)، هنگامی که موج ولتاژ  $E$  به نقطه اتصال  $J$  می‌رسد، جایی که مدار باز است، بدون تغییر علامت منعکس می‌شود. همچنین یک موج جریان  $I$  مخالف علامت موج اصلی  $I$  منعکس می‌شود، به طوری که جریان منتقل شده صفر است. اگر خط از منبع ولتاژ ثابت  $E$  تغذیه شود، پس از آن هنگامی که موج منعکس شده  $E$  به انتهای ژنراتور می‌رسد، ژنراتور ولتاژ را در همان ولتاژ  $E$  نگه می‌دارد، ژنراتور ولتاژ  $-E$  را به خط می‌فرستد تا ولتاژ را در سطح  $E$  نگاه دارد. به عبارت دیگر، می‌توان این طور برداشت کرد که منبع ولتاژ ثابت دارای امپدانس داخلی صفر است و ضریب انعکاس

می‌تواند بر اساس  $Z_2 = 0$  محاسبه شود.

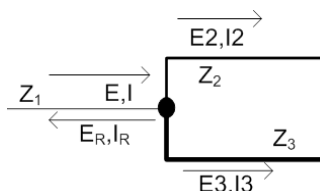
در ابتدا، ولتاژ منبع  $E$  با جریان گذرای  $I$  همراه می‌باشد. وقتی موج ولتاژ  $E$  به نقطه اتصال باز  $J$  می‌رسد، بدون تغییر در علامت منعکس شده و با جریان  $I$  همراه می‌شود تا جریان انتقال صفر را دوباره بسازند. بار دیگر این ولتاژ و جریان به ژنراتور می‌رسند، ولتاژ و جریان لحظه‌ای صفر خواهند شد و خط بار دیگر شارژ نشده می‌شود. ژنراتور اکنون یک موج ولتاژ  $E$  همراه با جریان موجی  $I$  را می‌فرستد، که این فرایند دوباره تکرار می‌شود.

### ۲-۳-۲ خطوط اتصال کوتاه

در این حالت خط انتقال بدوت تلفات که توسط یک منبع ایده‌آل پله‌ای تغذیه می‌شود و در انتها اتصال کوتاه شده در نظر گرفته شده است. برای این حالت  $Z_2 = 0$  و  $\beta = -1$  است. هنگامی که موج ولتاژ  $E$  به نقطه  $J$  با حالت اتصال کوتاه می‌رسد، با یک تغییر در علامت منعکس می‌شود، تا موج وارد شونده را خنثی کند. همچنین یک جریان موجی  $I$  با همان علامت موج اصلی منعکس می‌شود تا اینکه جریان انتقال یافته دو برابر شود.

### ۳-۳-۳ خطوط انشعابی

در این حالت بیش از دو خط انتقال در یک نقطه به هم برخورد می‌کنند. نمونه‌ای از برخورد سه خط انتقال در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل (۵-۳). برخورد موج در نقطه اتصال سه خط انتقال

هنگامی که یک موج از یک خط انتقال با امپدانس موجی  $Z_1$  به دو خط انتقال دیگر با امپدانس‌های  $Z_2$  و  $Z_3$  برخورد می‌کند، امواج منعکس شده و انتقال یافته در نقطه اتصال



ایجاد می‌گردند. رابطه امواج ولتاژ و جریان برای این خطوط بصورت زیر ارائه می‌گردد.

$$E = Z_1 I, \quad E_R = -Z_1 I_R, \quad E_2 = Z_2 I_2, \quad E_3 = Z_3 I_3 \quad (3-30)$$

با توجه به این نکته که امواج انتقال یافته ولتاژ در نقطه اتصال با هم برابرند، می‌توان رابطه بین امواج اصلی، منعکس شده و انتقال یافته را به صورت (۳-۳۱) بیان نمود.

$$E_2 = E_3 = E_T = E_R + E, \quad I_R + I = I_2 + I_3 \quad (3-31)$$

بنابراین می‌توان رابطه بین امواج انتقال یافته و منعکس شده با موج اصلی برای سه خط انتقال مذکور را به صورت زیر ارائه نمود.

$$E_T = \frac{2/Z_1}{1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_3} \cdot E \quad (3-32)$$

$$E_R = \frac{1/Z_1 - 1/Z_2 - 1/Z_3}{1/Z_1 + 1/Z_2 + 1/Z_3} \cdot E \quad (3-33)$$

این روش قابل تعمیم برای محاسبه امواج منعکس شده و انتقال یافته برای بیش از سه خط دارای یک نقطه مشترک می‌باشد.

### ۳-۳ سؤال و تمرین

۱. امپدانس موجی یک هادی به شعاع ۲ سانتی متر که در ارتفاع ۲۰ متری از زمین قرار دارد را محاسبه کنید.
۲. یک خط انتقال به امپدانس موجی ۳۵۰ اهم و طول ۳ کیلومتر به یک کابل با امپدانس موجی ۵۰ اهم و ضریب نفوذپذیری الکتریکی عایق ۳ به طول ۱ کیلومتر متصل می‌باشد. اگر اتصال کوتاهی در انتهای کابل رخ دهد دامنه امواج سیار در نقطه اتصال بین کابل و خط هوایی را پس از سه بار رفت و برگشت امواج محاسبه کنید.
۳. تاثیر فرکانس بر مولفه‌های امپدانس موجی هادی‌ها یا سیستم زمین چگونه می‌باشد؟
۴. روش حفاظت کابلی تجهیزات در برابر امواج گذرا را بیان کنید.
۵. تاثیر امپدانس برگیر موازی با خط روی موج گذرا را به صورت تحلیلی بررسی نمایید.

## فصل ۴

### حفاظت شبکه‌های قدرت در برابر اضافه ولتاژها

#### ۴-۱ مقدمه

همانطور که قبلاً ذکر شد، عموماً طول عمر مفید تجهیزات الکتریکی و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت مستقیماً بستگی به کیفیت عایق الکتریکی آنها دارد. لذا در سیستم‌های واقعی حفاظت تجهیزات در برابر اضافه ولتاژها مهمتر از حفاظت آنها در برابر اضافه جریان‌ها می‌باشد. از روشها و تجهیزات مختلف برای حفاظت سیستم‌های قدرت در برابر اضافه ولتاژها استفاده می‌شود. یک وسیله حفاظتی و محدودکننده اضافه ولتاژ باید سطح اضافه ولتاژهای مخرب را به سطح مجاز و ایمن کاهش دهد. بطور کلی از وسایل حفاظتی مختلفی مثل جذب کننده‌ها و دورکننده‌های صاعقه (حفاظت تجهیزات خطوط انتقال و پست‌ها در برابر برخورد مستقیم صاعقه)، برقگیرها، خازن‌های موجی، مقاومت‌های زمین‌کننده، وریستورها (ZnO, SiC)، دیودهای بهمنی (تغییر و دگرگونی شکل موج اضافه ولتاژها)، فیلترهای RC (حذف موج ضربه) برای حفاظت تجهیزات در برابر اضافه ولتاژها استفاده می‌شود. صاعقه گیرها<sup>۱</sup> و برقگیرها<sup>۲</sup> نسبت به سایر وسایل حفاظتی بیشترین کاربرد را برای حفاظت در برابر گذراهای ولتاژ

---

۱- Air Terminals

۲ - Surge Arresters

دارند.

## ۲-۴ روشهای حفاظت در برابر اضافه ولتاژها

حفاظت تجهیزات سیستم قدرت در برابر اضافه ولتاژهای مخرب با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی بسیار مهم می‌باشد. به طور کلی اضافه ولتاژها به دو دسته داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند. حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای خارجی (صاعقه)، در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول باید از برخورد مستقیم صاعقه به سیستم قدرت جلوگیری به عمل آید که به حفاظت اولیه معروف می‌باشد. اما اگر به علت خطای ناشی از سیستم حفاظت اولیه و یا در اثر القای ناشی از امواج الکترومغناطیسی صاعقه، اضافه ولتاژهای گذرا در سیستم قدرت تولید شود، باید با استفاده از تجهیزات محدود کننده، دامنه آنها به زیر مقدار مجاز کاهش یابد. حفاظت تجهیزات در برابر اضافه ولتاژهای القایی صاعقه به حفاظت ثانویه معروف است. اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از کلیدزنی نیز با تغییر نوع کلید، شرایط کلیدزنی و به کمک برقگیرها قابل کنترل می‌باشند. در این فصل روش‌ها و تجهیزات مناسب برای حفاظت سیستم‌های قدرت در برابر اضافه ولتاژها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۱-۲-۴ حفاظت در برابر اصابت مستقیم صاعقه

صاعقه عامل مهم وقوع خطا در شبکه‌های قدرت می‌باشد و می‌تواند باعث ایجاد وقفه‌های گذرا یا دراز مدت در سرویس دهی سیستم قدرت گردد. ۵ تا ۱۰ درصد خطاهای ناشی از صاعقه باعث تخریب دائمی تجهیزات شبکه شده و نهایتاً منجر به ایجاد وقفه‌های طولانی می‌شوند. حفاظت کامل سیستم قدرت در برابر اثرات مخرب صاعقه، بخاطر وسعت حوزه نفوذ امواج الکترومغناطیسی صاعقه، شدت جریان صاعقه و ولتاژ ناشی از آن و همچنین ماهیت تصادفی بودن صاعقه، مشکل می‌باشد.

دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات بسیار بالا (در حدود چندین MV) می‌باشد در حالیکه عایق تجهیزات سیستم دارای استقامت الکتریکی

بسیار کمتر می‌باشد. از اینرو، عملاً سعی می‌گردد تا از برخورد مستقیم صاعقه به تجهیزات شبکه‌های قدرت جلوگیری به عمل آید. برای این منظور از دو دسته کلی تجهیزات حفاظتی شامل تجهیزات جذب کننده<sup>۱</sup> صاعقه (تجهیزاتی همانند میله‌های ساده، قفس فارادی و سیم‌های معلق) و تجهیزات پراکنده کننده (DAS / CTS)<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد. این تجهیزات مانع برخورد مستقیم صاعقه به تاسیسات سیستم می‌شود. هر سیستم حفاظت اولیه دارای سه بخش اصلی ترمینال هوایی، هادی میانی و سیستم زمین می‌باشد. ترمینال هوایی وظیفه جذب (پراکنده کردن) صاعقه را به عهده دارد و هادی میانی ارتباط بین ترمینال هوایی و سیستم زمین را برقرار می‌کند. سیستم زمین نیز باعث جریان صاعقه را در جرم بی نهایت زمین توزیع می‌کند.

#### ۱-۲-۴ سیمهای محافظ

مهمترین روش محافظت هادیها و تجهیزات خطوط انتقال هوایی در برابر اصابت مستقیم صاعقه، استفاده از سیم محافظ یا سیم زمین می‌باشد. نصب مناسب سیمهای محافظ در بالای هادیهای خطوط انتقال هوایی، احتمال برخورد مستقیم صاعقه به فازهای خطوط را کاهش می‌دهد. همچنین سیمهای محافظ نقش موثری بر کاهش ولتاژ القایی و ولتاژ الکترواستاتیکی ابرها در هادیهای فازها دارند. سیمهای محافظ مستقیماً به بدنه فلزی دکل‌های خطوط انتقال متصل شده و از طریق آنها به شبکه زمین خطوط انتقال متصل می‌باشند. کارایی سیمهای محافظ در برابر صاعقه به عوامل متعددی مثل ابعاد دکل (ارتفاع و پهنا)، تعداد و موقعیت سیمهای محافظ، امپدانس موجی دکل و امپدانس موجی شبکه زمین پای دکل، طول اسپین و چگالی صاعقه بستگی دارد.

حفاظت پستهای فشارقوی در برابر صاعقه و اثرات آن به خاطر تمرکز و استقرار تجهیزات اصلی سیستم قدرت در پستها و همچنین نقش کلیدی پستها در شبکه قدرت، بسیار مهم می‌باشد. عموماً از سیمهای معلق و میله‌های نوک تیز برای حفاظت

۱- Air Terminal

۲- Dissipation Array System / Charge Transfer System

تجهیزات پستهای فشارقوی در برابر اصابت مستقیم صاعقه استفاده می‌شود.

### ۲-۱-۲-۴ صاعقه‌گیرهای میله‌ای

از میله‌های فلزی نوک تیز برای جذب صاعقه در پستها و بعضاً روی دکل‌های خطوط انتقال استفاده می‌شود. این میله‌ها در ارتفاع بالاتر از تجهیزات و تاسیسات نصب می‌شوند و با یونیزاسیون نقطه‌ای هوای اطراف محل نصب، باعث انحراف صاعقه به سمت خود و نهایتاً جذب آن می‌شوند و از برخورد صاعقه به سایر تجهیزات تحت پوشش خود جلوگیری می‌کنند.

هر چند استفاده از سیمهای محافظ در پستهای فشارقوی مرسوم می‌باشد ولی بعضاً از میله‌های فلزی نوک تیز که در نقاط مختلف محوطه پست و روی پایه‌های فلزی بلند و یا روی گنتریهای پست نصب می‌گردند نیز استفاده می‌شود.

### ۳-۱-۲-۴ سیستم پراکنده کننده صاعقه

سیستمهای پراکنده کننده صاعقه (DAS) که از سال ۱۹۷۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفتند باعث کاهش احتمال وقوع صاعقه در اطراف محل نصب خود می‌گردند. به عبارت دیگر، در این روش محل تخلیه جریان صاعقه از اطراف سازه تحت حفاظت دور می‌شود. در سیستم پراکنده کننده صاعقه از تجهیزات یونیزه کننده هوا و یا از سیستم انتقال بار استفاده می‌شود. سیستم پراکنده کننده صاعقه به خاطر داشتن قسمت‌های فلزی متعدد نوک تیز، باعث افزایش یکنواخت سطح یونیزاسیون هوای اطراف محل نصب خود می‌گردد و در نتیجه، با کاهش میدان الکتریکی محیط اطراف، کاهش تجمع بارهای الکتریکی در سطح سازه تحت حفاظت و تضعیف و حذف کانالهای الکتریکی بالارونده (استریمر) از سمت تجهیزات تحت حفاظت، مانع بروز صاعقه در آن منطقه خواهد شد.

سیستم پراکنده کننده صاعقه و صاعقه‌گیرهای الکترونیکی (ESE)<sup>۱</sup> جزء تجهیزات غیر متعارف می‌باشند و عملکرد آنها به طور علمی و عملی مورد تایید قرار نگرفته است.

### ۲-۲-۴ حفاظت ثانویه در برابر صاعقه

حفاظت ثانویه برای سیستمهای قدرت (پست‌ها و خطوط انتقال نیرو) شامل کاهش یا محدود کردن دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد مستقیم صاعقه یا اضافه ولتاژهای القایی ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه و همچنین اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی می‌باشد.

براساس مطالعات انجام شده، حداکثر دامنه اضافه ولتاژهای القایی روی خطوط هوایی ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه، کمتر از ۳۰۰kV می‌باشد. در نتیجه، حفاظت در برابر این نوع اضافه ولتاژها (بخصوص برای شبکه‌های HV و EHV) آسانتر می‌باشد. اما حفاظت شبکه‌های توزیع در برابر اضافه ولتاژهای القایی (بخاطر سطح عایقی پایین تجهیزات) دارای اهمیت بیشتری می‌باشد.

عموماً از روش‌های متعددی برای حفاظت در برابر اصابت غیر مستقیم صاعقه استفاده می‌شود که مهمترین آنها عبارتند از:

- ۱- افزایش سطح عایقی خطوط
- ۲- نصب برقگیرها در مکان‌های معین و با فواصل مشخص
- ۳- نصب برقگیرها روی دکل‌هایی دارای استقامت عایقی کمتر (دارای عایق ضعیف)
- ۴- نصب سیم زمین

همچنین برای جلوگیری از ورود امواج گذرا از طریق خطوط انتقال به داخل پستهای فشارقوی، در محل ورودی خطوط به پست، برقگیر نصب می‌گردد. علاوه بر برقگیرها، از سایر تجهیزات حفاظت نیز برای محدود نمودن دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه استفاده می‌گردد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

#### ۴-۲-۲-۱ تجهیزات محدود کننده صاعقه

بهترین روش جهت کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه و کلیدزنی و جلوگیری

۱- Early Streamer Emission

از وقوع اتصال کوتاه تکفاز به زمین در انتهای خطوط، استفاده از برقگیرهای خط می‌باشد. معمولاً برقگیرها در ابتدای خطوط و در محل ورود و خروج آنها به پستها (قبل از سکسیونر و کلید قدرت) نصب می‌شوند.

ساده‌ترین نوع برقگیر که برای محدود نمودن اضافه ولتاژها استفاده می‌شود شاخک‌های جرعه زن می‌باشد. شاخکهای جرعه زن یا میله‌های حفاظتی معمولاً شامل دو الکتروود با فاصله معین از همدیگر می‌باشند و بین فاز و زمین و یا موازی تجهیز تحت حفاظت نصب می‌شوند. الکتروودها در اندازه‌ها و اشکال مختلف و عموماً از جنس مواد تشکیل دهنده میله‌های صاعقه‌گیر ساخته می‌شوند. از شاخکها بیشتر برای حفاظت تجهیزات پست و در محل اتصال با خطوط یا روی پوشینگ تجهیزات استفاده می‌شود. فاصله بین الکتروودها براساس هماهنگی مشخصات حفاظتی شاخکها با دیگر تجهیزات حفاظتی مثل برقگیرهای پست تعیین می‌شود. در بعضی تاسیسات، از شاخکها بعنوان وسیله حفاظتی اولیه استفاده می‌شود. برای حفاظت کاملتر باید فاصله بین شاخکها بطور دقیق تنظیم شود و خود شاخکها نیز باید تمیز و بدون آلودگی نگه داشته شوند.

همچنین از خازن‌های موجی برای تضعیف دامنه و تغییر شکل موج اضافه ولتاژ گذرای استفاده می‌گردد. همچنین از خازنهای موجی بصورت موازی با برقگیر برای حفاظت پشت به پشت عایق موتورها یا ژنراتورها استفاده می‌گردد.

مقاومت غیرخطی نوع دیگری از تجهیزات حفاظتی می‌باشد که مقاومت الکتریکی آن با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد و باعث عبور جریان گذرا به زمین می‌شود. معمولاً از مقاومتهای غیرخطی برای حفاظت پشت به پشت عایق سیم‌پیچ‌های سری تجهیزات مثل رگولاتورهای ولتاژ، اتوترانسفورماتورها و راکتورها استفاده می‌شود. همچنین برای کاهش اضافه ولتاژهای کلیدزنی در خطوط انتقال نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

## ۲-۲-۲-۴ سیستم حفاظت کابلی تجهیزات

وقتی امواج گذرا از یک محیط وارد محیط دیگر با امپدانس موجی متفاوت می‌شوند، قسمتی از موج منعکس شده و قسمتی نیز در خط جدید انتشار می‌یابد. میزان انتشار این امواج به امپدانس موجی محیط اول و محیط دوم بستگی دارد.

در شبکه‌های توزیع احتمال برخورد غیرمستقیم صاعقه و القا ولتاژ همواره مطرح می‌باشد. موج گذرا در خط توزیع، پس از رسیدن به ترانسفورماتور، به دلیل وجود تزویج خازنی بین سیم پیچهای آن، به سمت فشار ضعیف نفوذ نموده و ممکن است باعث تخریب تجهیزات فشار ضعیف گردد.

با نصب کابل بین خط هوایی و ترانسفورماتور توزیع، اندازه و شکل موج اضافه ولتاژهای گذرا که به ترمینال ترانسفورماتور میرسند، به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد. به خاطر اختلاف قابل ملاحظه امپدانس موجی کابل و خط هوایی، دامنه امواج گذرای که از طریق خط هوایی وارد کابل می‌شوند، شدیداً کاهش می‌یابد. مقدار حداکثر دامنه اضافه ولتاژ گذرای پیشرونده (در داخل کابل)، به طول خط، امپدانس موجی خط و کابل و شکل موج گذرای اولیه بستگی دارد. در صورت عدم وجود کابل بین خط هوایی و ترانسفورماتور، موج گذرا پس از برخورد به انتهای خط، کاملاً منعکس شده و باعث افزایش ولتاژ در سر ترمینال ترانسفورماتور (یا هر تجهیز دیگر) تا دو برابر دامنه موج اصلی می‌شود.

### ۳-۲-۴ زمین کردن نقطه نول سیستم قدرت

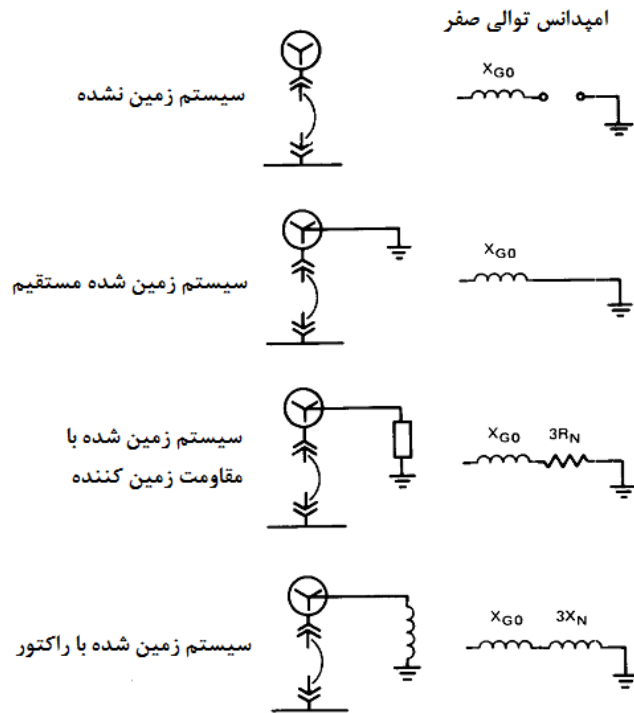
جهت جلوگیری از افزایش ولتاژ فازهای سالم در صورت وقوع اتصال کوتاه تکفاز به زمین، نقطه ستاره یا نول سیستم‌های قدرت باید به زمین متصل می‌گردد. منظور از نوع سیستم زمین، نحوه اتصال نقطه خنثی یا نول ترانسفورماتورها و ژنراتورها به زمین می‌باشد.

انتخاب نوع سیستم زمین به عوامل متعدد از جمله سطح ولتاژ، سطح حفاظت در برابر اضافه ولتاژ صاعقه، جریان خطای فاز به زمین، میزان حساسیت رله‌های حفاظتی فاز به زمین و سطح امنیت لازم در سیستم بستگی دارد.

انواع روشهای زمین شدن نقطه نول سیستم قدرت به دو دسته کلی زمین شدن مستقیم یا موثر و زمین نشده تقسیم می‌گردد. انتخاب بین این دو نوع سیستم زمین به عوامل اقتصادی و شرایط بهره‌برداری سیستم بستگی دارد. سیستم زمین شده شامل سه دسته، سیستم زمین شده مستقیم، سیستم زمین شده با مقاومت و سیستم زمین شده با راکتور می‌باشد.



در حقیقت، نوع زمین شدن نقطه نول سیستم قدرت به امپدانس توالی صفر تجهیز زمین شده بستگی دارد. به عبارت دیگر، تفاوت مشخصات الکتریکی انواع روشهای زمین کردن سیستم قدرت، بوسیله اندازه امپدانس‌های توالی مثبت، منفی و صفر آنها بیان می‌شود. امپدانس توالی صفر انواع روشهای زمین کردن نقطه نول سیستم قدرت، مطابق شکل (۱-۴) می‌باشد.



شکل (۱-۴). مدار معادل انواع روشهای زمین کردن نقطه نول سیستم قدرت

### ۱-۳-۲-۴ سیستم با نول زمین نشده

در سیستم‌های با نول زمین نشده، هیچ اتصال مستقیمی بین نقطه نول ترانسفورماتورها

و ژنراتورها با شبکه زمین وجود ندارد. به عبارت دیگر، در این نوع سیستمها، اتصال بین نقطه نول و زمین از طریق خازنهای نشتی بین فازها و زمین برقرار می‌گردد. در این حالت مقدار ضریب اتصال زمین (COG)<sup>۱</sup> براساس رابطه (۴-۱) بیشترین مقدار خود را دارد، که در شرایط خاصی ممکن است به ۱۲۰٪ نیز برسد. لازم به ذکر است به سیستم‌هایی که مقدار COG آنها بیشتر از ۸۰٪ باشد، سیستم زمین نشده اطلاق می‌گردد.

$$\text{COG} = \frac{E_{Lgf}}{E_{LL}} \times 100 \quad (۴-۱)$$

که در آن  $E_{Lgf}$  مقدار موثر ولتاژ فازهای سالم هنگام وقوع خطای فاز به زمین و  $E_{LL}$  مقدار موثر ولتاژ خط به خط قبل از وقوع خطا می‌باشد. مزیت اصلی سیستم زمین نشده، حداقل بودن سطح جریان خطاهای فاز به زمین می‌باشد.

### ۲-۳-۲-۴ سیستم با نول زمین شده به طور مستقیم

در سیستم زمین شده موثر، نقطه خنثی سیستم (ترانسفورماتور / ژنراتور) با حداقل امپدانس ممکن و به طور موثر به شبکه زمین متصل می‌باشد. این نوع زمین شدن، متداول‌ترین نوع سیستم زمین در شبکه‌های قدرت و سیستم‌های صنعتی می‌باشد. البته لازم به ذکر است که در مدل‌سازی سیستم قدرت با زمین موثر مقاومت سیستم زمین صفر نمی‌باشد، بلکه برابر امپدانس توالی صفر تجهیز زمین شده است. حداکثر مقدار ضریب اتصال زمین برای سیستم زمین شده موثر برابر ۸۰٪ می‌باشد. نقطه نول در سیستم‌های انتقال و توزیع عموماً بطور موثر زمین می‌شوند، تا علاوه بر کاهش قیمت عایقی تجهیزات، جریان خطای فاز به زمین براحتی توسط رله‌های حفاظتی قابل تشخیص و حفاظت باشد.

### ۲-۳-۳-۴ سیستم با نول زمین شده با مقاومت

در این نوع سیستم یک مقاومت بین نقطه خنثی (ترانسفورماتور یا ژنراتور) و زمین قرار

۱- Coefficient of grounding

می‌گیرد. مقدار مقاومت زمین کننده نقطه نول می‌تواند کم یا خیلی زیاد باشد. در مقایسه با سیستم با نول زمین شده مستقیم، اضافه ولتاژهای تولید شده در این نوع سیستم دارای دامنه کوچکتر می‌باشند. در این حالت ولتاژ فازهای سالم در هنگام خطای فاز به زمین از ولتاژ خط به خط بیشتر نخواهد شد.

اگر با مقاومت بسیار زیاد نقطه نول ترانسفورماتور یا ژنراتور زمین شود مقدار جریان خطا به شدت کاهش می‌یابد، که سبب تاخیر در جدا شدن خطا از سیستم می‌گردد. در این حالت برای عملکرد رله و کنترل اضافه ولتاژها مقدار مقاومت باید مطابق رابطه (۴-۲) انتخاب شود:

$$R_n = \frac{V_{ph}}{3I_c} \quad (۲-۴)$$

که در آن،  $V_{ph}$  پیک ولتاژ فاز به زمین و  $I_c$  جریان خازن‌های پراکنده در هر هادی فاز می‌باشند. عملکرد دیر هنگام رله‌ها در این حالت سبب ماندگاری اضافه ولتاژ در فازهای سالم می‌گردد که عایق تجهیزات را در تنش قرار می‌دهد. لذا باید در هماهنگی عایقی تجهیزات مد نظر قرار بگیرد.

#### ۴-۳-۲-۴ سیستم با نول زمین شده با راکتور

در این نوع سیستم زمین، نقطه نول ترانسفورماتورها یا ژنراتورها بوسیله یک سلف یا راکتور به زمین متصل می‌شود. همچنین می‌توان با افزایش راکتانس توالی صفر تجهیز زمین شونده، مقدار امپدانس سیستم زمین را به حالت سلفی نزدیک‌تر نمود. امپدانس توالی صفر در این حالت، از دید محل وقوع خطا سلفی خواهد بود که مانع افزایش ولتاژ فازهای سالم در هنگام وقوع خطای فاز به زمین به میزان بیشتر از ولتاژ خط به خط سیستم خواهد شد. این نوع سیستم عموماً در زمین کردن ژنراتورهای کوچک کاربرد بیشتری دارد.

در جدول (۴-۱) کاربرد انواع سیستم زمین، جریان خطا و اضافه ولتاژهای گذرای سیستم در هنگام وقوع خطا بیان شده است.

جدول (۴-۱). مشخصات انواع سیستم زمین کردن

کاربرد	جریان خطا (درصدی از جریان خطای سه فاز)	اضافه ولتاژ تکفاز (درصدی از ولتاژ فاز)	نوع زمین کردن
سیستم‌های قدرت (به ندرت)	$< 8$	$\leq 3$	سیستم زمین نشده
سیستم‌های قدرت با تمام سطوح ولتاژی	$> 95$	$< 1/5$	سیستم زمین شده مستقیم
سطوح ولتاژ متوسط و سیستم‌های صنعتی	$< 25$	$< 2/5$	سیستم زمین شده با مقاومت کم
سطوح ولتاژ متوسط و ضعیف و سیستم‌های صنعتی	$< 1$	$\leq 2/73$	سیستم زمین کننده مقاومت زیاد
ژنراتورهای صنعتی	$< 25$	$\leq 2/73$	سیستم زمین شده با راکتور

### ۳-۴ برقی‌ها

برقی‌ها نوعی وسیله حفاظتی برای محدود کردن اضافه ولتاژهای گذرا روی تجهیزات می‌باشند که بصورت موازی با وسایل تحت حفاظت و یا بین فاز و زمین قرار می‌گیرند و انرژی موج اضافه ولتاژ گذرا را به زمین منتقل می‌کنند. یک برقی‌ها مناسب باید دارای مشخصه‌های زیر باشد:

- ۱- تحت ولتاژ نامی شبکه (به منظور کاهش تلفات) دارای امپدانس بینهایت باشد.
- ۲- تحت شرایط اضافه ولتاژهای گذرا، به منظور محدود سازی سطح ولتاژ، دارای امپدانس کم باشد.
- ۳- توانایی دفع یا عبور انرژی موج اضافه ولتاژ را بدون آنکه خود صدمه ببیند، داشته

باشد.

۴- پس از حذف و عبور اضافه ولتاژها، بتواند به شرایط مدار باز (حالت کار عادی) برگردد.

### ۱-۳-۴ انواع برقگیرها

جرقه‌گیرها یا شاخکهای جرقه زن ساده‌ترین و ابتدائی‌ترین نوع برقگیرها می‌باشند و بیشتر برای حفاظت زنجیره مقره‌ها، پوشینگ ترانسفورماتورها و خازن‌ها استفاده می‌شود. مشکل اصلی این نوع برقگیرها ایجاد خطای اتصال کوتاه به زمین پس از تولید جرقه می‌باشد که باعث عملکردن تجهیزات حفاظتی (رله‌های جریان) شبکه قدرت و در نتیجه ایجاد وقفه می‌شود. اما این مشکل در برقگیرهای با مقاومت غیر خطی وجود ندارد.

### ۱-۳-۱-۱ برقگیر میله‌ای یا شاخکی

برقگیرهای میله‌ای دارای دو الکتروود یا دو شاخک فلزی که در فاصله معینی از هم قرار گرفته‌اند می‌باشند. فاصله بین میله‌های برقگیر شاخکی متناسب با سطح ولتاژ تجهیزات تحت حفاظت انتخاب می‌شود. در صورت بروز اضافه ولتاژ با دامنه بزرگتر از سطح تحمل فاصله هوایی شاخکهای برقگیر، در فاصله هوایی بین الکتروودها قوس الکتریکی تولید می‌شود و موج گذرا از طریق جرقه تولید شده بین شاخکها به زمین منتقل می‌گردد. از معایب اصلی برقگیر میله‌ای، عدم توانایی در خاموش نمودن جرقه است. به عبارت دیگر هنگامیکه بر اثر اعمال اضافه ولتاژ بین شاخکهای این نوع برقگیر، جرقه تولید شود، این جرقه تا زمانی که رله‌های حفاظتی عمل نکنند استمرار خواهد داشت. بطور کلی معایب برقگیرهای شاخکی عبارتند از:

- ۱- استمرار عبور جریان از فاز به زمین پس از حذف اضافه ولتاژ (در نتیجه باعث عملکردن وسایل حفاظتی و ایجاد وقفه در سیستم می‌شود).
- ۲- ایجاد افت شدید ولتاژ فاز بخاطر اتصال کوتاه شدن فاز در لحظه عبور جریان از جرقه‌گیر.

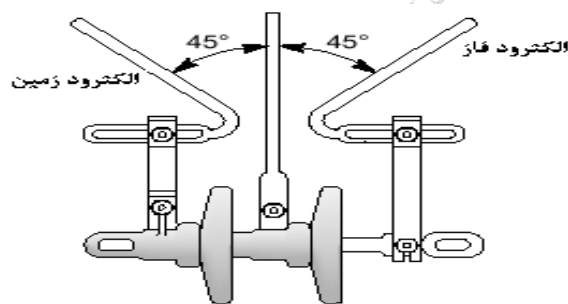
۳- ایجاد موج بریده شده که می‌تواند سیم پیچی دستگاه‌ها (ترانسفورماتورها) را تهدید کند.

۴- تحت تاثیر قرار گرفتن عملکرد آن با شکل موج اضافه ولتاژ و همچنین شرایط محیطی (فشار، آلودگی، رطوبت، ...).

۵- دارای تأخیر زمانی متناسب با اضافه ولتاژ (عملکرد نامناسب در برابر اضافه ولتاژهای با شیب پیشانی تند مثل موج صاعقه).

۶- پراکندگی زیاد ولتاژ جرقه (بیش از ۴۰٪).

جرقه‌گیرها فقط دو شرط اول یک برقگیر خوب را دارا می‌باشند. در شکل (۲-۴) یک نوع از برقگیرهای شاخکی نشان داده شده است که از آن برای حفاظت مقره‌های خطوط استفاده می‌شود.



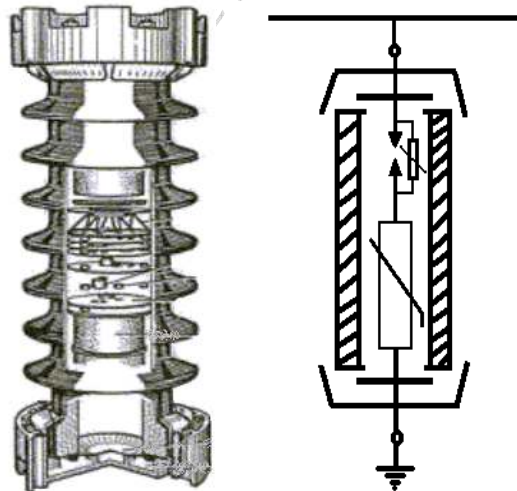
شکل (۲-۴). یک نوع از برقگیر شاخکی

نوع خاصی از برقگیرهای شاخکی، برقگیر لوله‌ای می‌باشد که شامل یک فاصله هوایی برای تولید جرقه در هوا و یک فاصله هوایی دیگر در داخل یک محفظه مخصوص بوده که با هم بطور سری قرار دارند. این نوع برقگیرها به منظور کوتاه کردن زمان عبور جریان جرقه و پرهیز از وقوع اتصال کوتاه، طراحی شده‌اند. در برقگیر لوله‌ای جریان هدایت شونده پس از یک یا چند سیکل در اثر گازی که خود برقگیر در هنگام جرقه زدن تولید می‌کند از بین می‌رود و از اینرو می‌توان آنرا "جرقه خاموش کن" نیز نامید. جریان سریع گاز، الکترونهای موجود بین دو الکتروود را با خود بخارج منتقل می‌کند و طول قوس را بحدی زیاد می‌کند که پیوستگی قوس از بین رفته و جرقه خنک می‌شود

و نهایتاً جرقه قطع می‌گردد.

### ۲-۱-۳-۴ برقیگر سیلیکون کارباید (SiC)

برقیگرهای سیلیکون کارباید تا قبل از تولید برقیگرهای اکسید فلزی، رایجترین نوع برقیگرها بودند. این نوع برقیگرها از ترکیب سری فواصل هوایی با مقاومت غیرخطی ساخته می‌شوند و برخلاف برقیگرهای شاخکی، در این نوع برقیگرها پس از عبور موج گذرا به زمین، شبکه قدرت قابلیت بازگشت به حالت اولیه را خواهد داشت. زیرا مقاومت مذکور جریان تخلیه را کاهش داده و به لحاظ هم فاز بودن تقریبی جریان و ولتاژ پس از به صفر رسیدن شکل موج ولتاژ نامی سیستم، جریان مجدداً برقرار نمی‌شود. برقیگر SiC مطابق شکل (۳-۴) شامل یک مقاومت سیلیکون کارباید با مشخصه غیرخطی V-I بصورت سری با یک فاصله هوایی می‌باشد. فاصله هوایی جرقه که به آن فاصله جرقه اکتیو نیز گفته می‌شود، طوری طراحی می‌گردد که بعد از چند بار جرقه زدن در اثر اضافه ولتاژ، جرقه مسدود گردد.

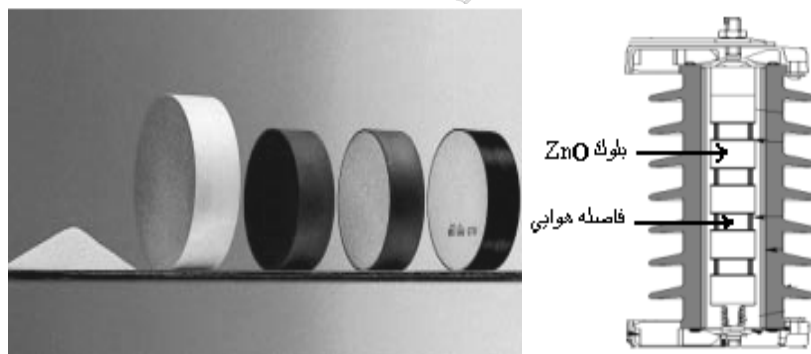


شکل (۳-۴). برقیگر SiC با شاخک جرقه‌گیر

برقگیرهای SiC به هیچ عنوان نباید تحت اضافه ولتاژهای با فرکانس قدرت (شبکه) عمل کنند زیرا باعث ایجاد اتصال کوتاه به زمین و عبور انرژی زیاد از خود شده و دچار تخریب شدید می‌شوند.

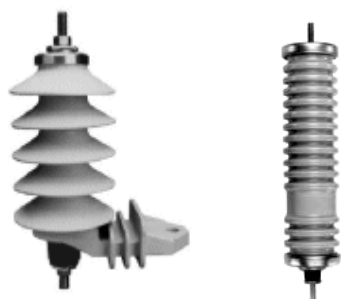
### ۳-۱-۳-۴ برقگیر اکسید فلزی (MOV)

نوع جدید برقگیرها دارای مقاومت الکتریکی غیرخطی و از جنس اکسید فلزات (MOV) می‌باشند. از آنجا که حدود ۹۵٪ از مواد تشکیل دهنده مقاومتهای MOV را اکسید فلز روی (ZnO) تشکیل می‌دهد، به آنها برقگیرهای ZnO نیز گفته می‌شود. قرصهای ZnO از اکسید روی و مقادیر کمی از اکسید دیگر فلزات از قبیل بیسموت، کبالت، آنتیموان و اکسید منگنز تشکیل می‌شوند. این دیسکها بصورت سری در داخل محفظه استوانه‌ای شکل قرار گرفته و برقگیر ZnO را تشکیل می‌دهند.



شکل (۴-۴). برش طولی برقگیر ZnO و قرصهای ZnO





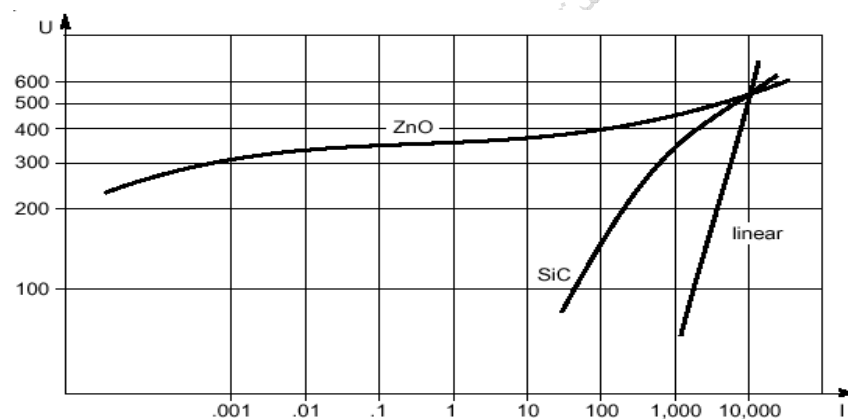
شکل (۴-۵). چند نمونه از برقگیرهای ZnO

برقگیرهای ZnO دارای قابلیت بالا در جذب انرژی موج هستند و جریان نشتی آنها در شرایط نامی بسیار کم می‌باشد. همچنین استمرار جریان در این نوع برقگیرها وجود ندارد یعنی جریان با کاهش دامنه اضافه ولتاژ گذرا کاهش می‌یابد و با ولتاژ متناوب (ولتاژ نامی سیستم) ادامه پیدا نمی‌کند، در نتیجه عملاً کمتر از برقگیرهای با فاصله هوایی گرم می‌شوند و تکرار عملکرد آنها راحت‌تر صورت می‌گیرد. از دیگر مزایای این نوع برقگیرها، سرعت عملکرد در پیشانی موج است و تأخیری که در برقگیرهای با فاصله هوایی وجود دارد، در این نوع برقگیرها خیلی کمتر می‌باشد.

با توجه به عدم وجود فاصله هوایی، امکان موازی کردن برقگیر ZnO وجود دارد. برقگیرهای ZnO می‌توانند اضافه ولتاژهای با فرکانس قدرت را برای مدت مشخص تحمل کنند و با در نظر گرفتن این ویژگی، حتی در سیستم‌های زمین نشده (که هنگام اتصال کوتاه یک فاز به زمین، ولتاژ فازهای دیگر می‌تواند تا ولتاژ خط افزایش یابد) می‌توان سطح عایقی کمتری را برای این نوع برقگیرها انتخاب نمود.

یکی از مشکلات برقگیرهای ZnO، جریان نشتی در فرکانس قدرت می‌باشد. این جریان در حد میلی آمپر است ولی ممکن است با افزایش تعداد عملکرد برقگیر، لایه عایق بین دانه‌های اکسید روی سوخته شود و باعث افزایش جریان نشتی گردد. مسأله دیگر، تغییر مقاومت بر اثر درجه حرارت است. این تغییر در جریان‌های کم بیشتر می‌باشد. ولی به‌رحال با کاهش مقاومت تحت ولتاژ نامی شبکه، احتمال گرم شدن بیش از حد برقگیر وجود دارد. در شکل (۴-۶) مشخصه‌های ولتاژ - جریان برقگیرهای ZnO، SiC و خطی نشان داده شده است.

- بخاطر مزایای متعدد برقگیرهای ZnO نسبت به سایر برقگیرها، استفاده از برقگیرهای ZnO بسیار متداول می‌باشد. بعضی از مزایای برقگیرهای ZnO عبارتند از:
۱. عملکرد بهتر در کنترل اضافه ولتاژها نسبت به سایر برقگیرها.
  ۲. پراکندگی کم ولتاژ پسماند و همچنین دارای ولتاژ پسماند خیلی کم.
  ۳. سرعت عمل بالا در هدایت موج گذرا از فاز به زمین.
  ۴. برگشت طبیعی به وضعیت اولیه یا مدار باز.
  ۵. دارای مشخصه ولتاژ - جریان خطی تر از برقگیر SiC.
  ۶. دارای سطح حفاظتی بالا.
  ۷. دارای جریان نشستی پایین تحت ولتاژ نامی سیستم (حداقل تلف توان در شرایط کار عادی).



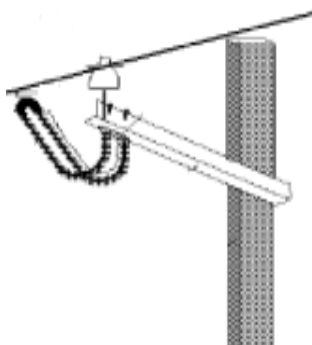
شکل (۴-۶). مشخصات ولتاژ - جریان چند نوع برقگیر

از مهمترین عیب‌های برقگیرهای ZnO می‌توان به قیمت بالای آنها نسبت به سایر برقگیرها و وجود جریان نشستی دائمی اشاره نمود.

#### ۴-۱-۳-۴ برقگیر قوس طولانی (LFA)<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>- Long Flash-Over Arrester

برقگیرهای قوس طولانی می‌توانند بین هادی و زمین و یا بصورت سری با مقره نصب بشوند. ساختار این برقگیرها بسیار ساده بوده و در نتیجه نسبت به سایر برقگیرها ارزانتر می‌باشند. یکی از مزایای عمده این نوع برقگیرها عدم جاری شدن جریان با فرکانس شبکه (PAF)<sup>۲</sup> پس از اتمام تخلیه جریان گذرا و بروز قوس بر روی مقره می‌باشد. در شکل (۷-۴) یک نوع از برقگیرهای قوس طولانی نشان داده شده است.



شکل (۷-۴). یک نمونه از برقگیرهای قوس طولانی

### ۲-۳-۴ مشخصات حفاظتی برقگیرها

انتخاب مشخصات برقگیرها با توجه به نوع سیستم قدرت، اهمیت و ملاحظات اقتصادی آن صورت می‌گیرد به نحوی که احتمال آسیب رساندن به دستگاه مورد حفاظت را به حداقل برساند و ضمن اینکه برقگیر بطور کامل از عهده حفاظت سیستم و تجهیز برآید، خود نیز سالم بماند.

پارامترهای مهم در انتخاب برقگیر مناسب عبارتند از:

۱- ماکزیمم ولتاژ کار دائم (MCOV)<sup>۱</sup>

۲- ولتاژ نامی ( $U_r$ )<sup>۲</sup>

۲- Power Arc Follow

۱- Maximum Continuous Voltage.

۳- جریان تخلیه نامی  $(8/20 \mu\text{sec})$

۴- حداکثر جریان ضربه قابل تحمل  $(4/10 \mu\text{sec})$

۵- قابلیت تحمل جذب انرژی

#### ۴-۳-۲-۱ حداکثر ولتاژ کار دائمی برقگیر (MCOV)

از آنجا که برقگیرها عموماً بین فاز و زمین قرار می‌گیرند ولتاژ کار دائمی برقگیرها باید از ولتاژ فاز سیستم بزرگتر انتخاب شود. مقدار MCOV بر حسب «کیلو ولت مؤثر» مطابق رابطه (۳-۴) محاسبه می‌شود.

$$MCOV > 1.05 \times \frac{U_i}{\sqrt{3}} \quad (4-3)$$

#### ۴-۳-۲-۲ ولتاژ نامی برقگیر ( $U_r$ )

مقدار ولتاژ نامی برقگیر به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- اضافه ولتاژ موقتی<sup>۱</sup> ناشی از اتصال کوتاه تکفاز به زمین یا قطع بار و در نتیجه افزایش ولتاژ شبکه.

۲- ضریب اتصال زمین (Ce).

۳- زمان قطع شدن خطاهای اضافه ولتاژ.

با توجه به عوامل مذکور، مقدار ولتاژ نامی برقگیر از رابطه (۴-۴) محاسبه می‌شود:

$$U_r = 1.25 MCOV \quad (4-4)$$

در صورت وقوع خطای تکفاز به زمین، ولتاژ فازهای سالم با توجه به نحوه و کیفیت زمین شدن نقطه نول شبکه، از رابطه (۴-۵) بدست می‌آید:

$$U = Ce \frac{U_i}{\sqrt{3}} \quad (4-5)$$

که Ce ضریب اتصال زمین می‌باشد.

۲- Rated Voltage.

۳- Nominal Discharge Current

۴- High Current Impulse.

۵- Single Shot Energy Absorption Capability.

۱- Temporary Over Voltage.

در حالت قطع بار<sup>۲</sup>، ضریب اضافه ولتاژ در زمان عملکرد رله از جدول (۴-۲) بدست می‌آید.

جدول (۴-۲). ضریب اضافه ولتاژ در حالت قطع بار

زمان پاک شدن یا رفع خطا (ثانیه)	ضریب اضافه ولتاژ در اثر قطع بار ( $C_1$ )	تغذیه خط
۶۰-۱۰	۱/۰۵	پست تبدیل ولتاژ با قدرت اتصال کوتاه زیاد
۶۰-۱۰	۱/۲۰	پست تبدیل ولتاژ با قدرت اتصال کوتاه کم
۳	۱/۴۰	ترانسفورماتور نیروگاه توربینی
۳	۱/۵۰	ترانسفورماتور نیروگاه آبی

در صورتیکه احتمال وقوع اتصال کوتاه و قطع بار بطور همزمان وجود داشته باشد:

$$TOV = C_1 \cdot C_e \frac{U_i}{\sqrt{3}} \quad (4-6)$$

بطور معمول برقگیرها، دائماً ۱/۱ تا ۱/۲ برابر MCOV را به مدت ۳ ساعت، ۱/۳ برابر MCOV را به مدت ۱۰ ثانیه و ۱/۵ برابر MCOV را به مدت ۰/۱ ثانیه و اضافه ولتاژ را برای مدت کوتاهی تحمل می‌کنند.

مشخصه حفاظتی یک برقگیر به مجموعه ولتاژهای تخلیه آن به ازای جریان‌های تخلیه استاندارد (موج جریان صاعقه یا موج با شیب تند و موج جریان کلیدزنی) اطلاق می‌شود. براساس ولتاژهای تخلیه، در برقگیرها دو سطح حفاظتی<sup>۱</sup> LIPL (سطح حفاظتی در برابر امواج صاعقه) و<sup>۲</sup> SIPL (سطح حفاظتی در برابر امواج کلیدزنی) تعریف می‌شود. برای یک حفاظت موثر، مشخصه‌های حفاظتی برقگیر (SIPL, LIPL) باید پایین‌تر از

۲- Load Rejection.

۱- Lightning impulse protection level

۲- Switching impulse protection level

مشخصه‌های استقامت عایقی تجهیزات ( $LIWL^2 \cdot SIWL^1$ ) قرار گیرند. بدین منظور در استاندارد IEC 60071-2 دو ضریب اطمینان بصورت روابط (۴-۷) و (۴-۸) تعریف شده است.

$$C_{PL} = LIWL / LIPL \quad (4-7)$$

$$C_{PS} = SIWL / SIPL \quad (4-8)$$

در جدول (۴-۳) مقادیر پیشنهادی برای ضرایب مذکور و براساس استاندارد بیان شده است.

جدول (۴-۳). ضریب ایمنی مشخصه‌های حفاظتی برقگیر

Um ≥ 300 (kV)	52 (kV) ≤ Um < 300 (kV)	Um < 52 (kV)	رده ولتاژی
			ضریب ایمنی
> 1/25	> 1/2	1/4	CPL
> 1/15	-	-	CPS

### ۴-۳-۲-۳ جریان نامی برقگیر

جریان تخلیه نامی، جریان صاعقه با زمان پیشانی موج ۸ میکروثانیه و زمان پشت موج ۲۰ میکروثانیه است و برقگیر بایستی به دفعات قادر به تحمل آن باشد. طبق استاندارد، برقگیر بایستی ۲۰ موج ضربه را در ۶ گروه سه پالس و هر پالس به فاصله زمانی ۱ دقیقه را تحمل کرده و آسیبی نبیند.

برقگیرهای خطوط توزیع و انتقال با ۴ محدوده جریان نامی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ کیلوآمپر ساخته می‌شوند. در سیستم توزیع، عموماً برقگیر ۵kA و ۱۰kA (برای مناطق پر صاعقه) استفاده می‌شود. مناطق با توجه به عدد ایزوکرونیک آنها به نواحی کم صاعقه یا پر صاعقه تقسیم می‌شوند. برای عدد ایزوکرونیک بالاتر از ۱۲ منطقه پر صاعقه نامیده می‌شود. برقگیرهای ۱۰kA بالاتر از کلاس ۱ و همچنین برقگیرهای ۱۵kA و ۲۰kA در خطوط انتقال بکار می‌روند.

۳- Lightning impulse withstand level

۴- Switching impulse withstand level

#### ۴-۳-۲-۴ حداکثر جریان ضربه قابل تحمل (۴/۱۰μ sec)

حداکثر جریان ضربه با زمان پیشانی ۴ میکروثانیه و زمان پشت موج ۱۰ میکروثانیه است که برقگیر بایستی در حالی که قرصهای داخلی آن تا ۶۰ درجه سلسیوس گرم شده‌اند یکبار قادر به تحمل آن باشد و سپس به مدت ۱۰ ثانیه ولتاژ نامی و بعد از آن به مدت نیم ساعت ولتاژ MCOV را باید بتواند تحمل نماید و در اثر افزایش دما تخریب نشود تا پایداری حرارتی آن تضمین گردد. این جریان طبق استاندارد IEC برای برقگیرهای ۵kA به میزان ۶۵kA و برای برقگیرهای ۱۰kA به میزان ۱۰۰kA تعیین شده است.

#### ۴-۳-۲-۵ ظرفیت جذب انرژی برقگیر

به حداکثر مقدار مجاز انرژی برحسب کیلوژول که برقگیر قادر است حین عبور یک موج ضربه با یک دوره زمانی مشخص جذب کند، ظرفیت جذب انرژی برقگیر (W) اطلاق می‌شود. این پارامتر برای قابلیت جذب انرژی موج (ناشی از وصل کلید در انتهای باز خطوط انتقال طویل) مطرح می‌باشد. برقگیری که در انتهای باز خط نصب می‌شود می‌بایست توانایی جذب بارهای انباشته شده روی خط انتقال را داشته باشد. انرژی تلف شده در برقگیر از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$W = \int U \cdot I \cdot dt \quad (J) \quad (4-9)$$

که در آن I جریان تخلیه بوده که از طریق برقگیر به زمین منتقل می‌گردد و U ولتاژ دو سر برقگیر در حالتی است که جریان از آن عبور می‌نماید. چنانچه این ظرفیت انرژی برحسب واحد ولتاژ نامی برقگیر ( $U_r$ ) بیان شود، ظرفیت جذب انرژی ویژه برقگیر ( $W'$ ) بدست می‌آید.

$$W' = \frac{W}{U_r} \quad (4-10)$$

که در آن  $U_r$  ولتاژ نامی برقگیر بر حسب kV و W بر حسب kJ بوده و  $W'$  بر حسب kJ/kV بدست می‌آید. مقدار انرژی که انتظار می‌رود یک برقگیر تحمل نماید به طول خط، ولتاژ سیستم و امپدانس موجی خط بستگی دارد که توسط رابطه (۴-۱۱) بیان

می‌گردد.

$$W' = \frac{U_{res}}{U_r} \times \frac{U_i - U_{res}}{Z} \times 2T \quad (4-11)$$

$W'$ : قابلیت جذب انرژی بر حسب kJ/kV

$U_{res}$ : ولتاژ تخلیه برقی در حالت عبور موج کلیدزنی بر حسب kV

$U_r$ : ولتاژ نامی برقی (rms) بر حسب kV

$U_i$ : ولتاژ نامی شارژ خط در حالت کلیدزنی بر حسب kV

$Z$ : امپدانس خط بر حسب  $\Omega$

$L$ : طول خط بر حسب کیلومتر

$T$ : زمان انتشار موج در خطوط هوایی (متناسب با سرعت حرکت موج در هادی و طول خط).

مقادیر  $Z$  و  $U_i$  برای خطوط مختلف با از جدول (۴-۴) بدست می‌آیند. مقدار  $U_i$  بصورت p.u نسبت به  $U_m$  داده شده است و مقدار p.u از رابطه (۴-۱۲) بدست می‌آید:

$$U_{i p.u} = \frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{3}} \quad (4-12)$$

جدول (۴-۴). مقادیر  $Z$  و  $U_i$  برای خطوط مختلف

۷۶۵-۵۲۵	۵۲۵-۴۲۰	۴۲۰-۳۰۰	۳۰۰-۲۴۵	<۲۴۵	$U_m [kV]$
۳۰۰	۳۲۵	۳۵۰	۴۰۰	۴۵۰	$Z[\Omega]$
۲/۲	۲/۶	۲/۸	۳	۳	$U_i [p.u]$

### ۳-۳-۴ انتخاب کلاس برقی

اصولاً برقی‌ها به چهار نوع برقی پست، میانی، توزیع و ثانویه تقسیم می‌شوند. سطح انرژی این برقی‌ها با هم متفاوت است. برای استفاده صحیح از برقی باید حداکثر ولتاژ سیستم، اندازه و مدت زمان اضافه ولتاژهای گذرا (TOV) مشخص گردد. با داشتن قابلیت جذب انرژی برقی و همچنین نسبت  $U_{res}/U_r$  می‌توان تشخیص داد که چه کلاس تخلیه‌ای لازم است و سپس اولین کلاس تخلیه بالاتر را انتخاب نمود. عموماً برای



برقگیرهای  $5kA$  و پایین‌تر کلاس معین نمی‌شود ولی برقگیرهای  $10$ ،  $15$  و  $20$  کیلوآمپری را بر حسب قابلیت تحمل انرژی دسته بندی می‌نمایند. برقگیرهای سیستم توزیع حداکثر کلاس  $1$  می‌باشند و کلاس بالاتر از  $2$  مخصوص برقگیرهای نوع پست و خطوط انتقال است.

استاندارد IEC جریان تخلیه کلیدزنی را برای برقگیر با جریان نامی  $5kA$  حداقل  $75A$  و زمان آن را  $1msec$  و همچنین برای برقگیرهای  $10kA$  کلاس  $1$  به میزان  $125A$  و زمان آن را  $2msec$  پیشنهاد نموده است. برقگیرها بر اساس جریان نامی طبقه بندی می‌شوند. جریانهای تخلیه نامی برقگیرهای معمولی طبق استاندارد IEC 60099-1 عبارتند از  $1/5kA$ ،  $2/5kA$ ،  $5kA$  و  $10kA$ .

برقگیرهای با جریان تخلیه نامی  $10kA$  برای پست بکار می‌روند و ولتاژ نامی این برقگیرها از  $3kV$  به بالاست. برقگیرهای با جریان تخلیه نامی  $5kA$  به دو سری A و B تقسیم می‌شوند:

الف- برقگیرهای سری A برای پستهای فوق توزیع که دارای اهمیت و حساسیت چندانی نیستند بکار می‌روند و ولتاژ نامی آنها بین  $3kV$  تا  $38kV$  است و مشخصه عملکرد آنها برای تمامی کشورها مناسب می‌باشد. سطح حفاظتی این برقگیرها  $10kA$  است.

ب- برقگیرهای سری B برای شبکه‌های توزیع بکار می‌روند و مشخصه آنها هماهنگ با شبکه‌های کشورهای آمریکا و کانادا است. ولتاژ نامی این برقگیرها بین  $3kV$  تا  $39kV$  است. این برقگیرها نسبت به برقگیرهای سری A دارای سطح حفاظتی بالاتری هستند یعنی به ازای اضافه ولتاژهای بالاتری عمل می‌کنند.

برقگیرهای  $2/5kA$  نیز برای شبکه‌های توزیع بکار می‌روند و ولتاژ نامی آنها از  $175V$  تا  $39kV$  است. سطح حفاظتی این برقگیرها نظیر برقگیرهای  $10kA$  و  $5kA$  سری A است. برقگیرهای  $1/5kA$  فقط برای ولتاژهای فشار ضعیف تا حدود  $660V$  بکار می‌روند. تجربه نشان داده است که برای ایجاد یک سطح حفاظتی متوسط یا پایین، برقگیرهای با مقاومت غیرخطی و با جریان تخلیه  $10kA$  بهترین سطح حفاظتی را تأمین می‌کنند و برقگیرهای  $5kA$  سری A در مرحله بعدی و برقگیرهای با جریان تخلیه  $2/5kA$  در

آخرین مرحله قرار دارند. به عنوان یک قانون کلی بهترین (پایین ترین سطح) حفاظت با برقی‌های ۱۰kA (برقی‌های نوع پست) بدست می‌آید که برای ولتاژهای بالای kV ۱۰۰ و یا پستهای با ولتاژ پایین تر که دارای اهمیت و حساسیت زیادی هستند مناسب است.

#### ۴-۳-۴ تست و نگهداری برقی‌ها

بطور کلی همیشه احتمال عملکرد نامناسب توسط برقی‌گیر وجود دارد و ممکن است برقی‌گیر تحت شرایط نامی شبکه عمل کند و یا در حضور اضافه ولتاژها نتواند عملکرد مناسب از خود نشان داده و دامنه آنها را محدود کند. احتمال وقوع خطا در برقی‌ها به عوامل مختلفی بستگی دارد که از مهمترین آنها می‌توان به فاصله محل برخورد صاعقه تا برقی‌گیر، شکل موج اضافه ولتاژ (صاعقه)، نوع و مشخصات برقی‌گیر و ساختار شبکه قدرت اشاره نمود.

عملاً عوامل زیادی در آسیب دیدگی برقی‌ها نقش داشته و می‌توانند بر کارایی آنها تأثیر گذار باشند و حتی منجر به ترکیدن برقی‌ها شوند. مهمترین عوامل آسیب دیدگی برقی‌ها عبارتند از:

- ۱- نفوذ رطوبت و آلودگی به داخل برقی‌گیر.
- ۲- اضافه ولتاژهای گذرا و موقتی سیستم.
- ۳- استفاده نامناسب از برقی‌ها.
- ۴- عدم انطباق شرایط بهره برداری با مشخصه برقی‌گیر (انتخاب نادرست).
- ۵- عوامل ناشناخته.

#### الف - نفوذ رطوبت و آلودگی

آلودگی‌ها ممکن است باعث عملکرد برقی‌گیر در ولتاژ کار و ترکیدن آن گردند. نفوذ رطوبت همراه با آلودگی سبب توزیع غیر یکنواخت ولتاژ بر روی فواصل هوایی شده و در بعضی مواقع سبب عملکرد برقی‌گیر در شرایط ولتاژ نامی سیستم می‌شود. همچنین تراکم آلودگی به همراه رطوبت در سطح بیرونی محفظه برقی‌گیر، مقاومت طول خزش را کاهش داده و سبب ایجاد جرقه در سطح برقی‌گیر می‌شود. نشستن املاح ناشی از خشک شدن رطوبت بر روی دو قاعده قرص برقی‌گیر، سبب اکسیداسیون و افزایش مقاومت داخلی

برقگیر می‌شوند. در کل اثر رطوبت و آلودگی محیطی در برقگیرهای ZnO چندین برابر کمتر از برقگیرهای SiC می‌باشد بطوری که ۸۰ تا ۹۰ درصد عامل تخریب برقگیرهای SiC ناشی از رطوبت و آلودگی‌های محیطی می‌باشد. وجود رطوبت، آلودگی، درجه حرارت زیاد، موجب بالا رفتن جریان نشتی برقگیرها شده و همراه با کاهش عمر آنها، بعضا سبب انفجار آنها می‌شود. برای جلوگیری از این امر می‌توان توصیه‌های زیر را بکار بست.

- ۱- افزایش طول خزش مقره برقگیر
- ۲- انتخاب ولتاژ نامی بالاتر ضمن حفظ سطح حفاظتی برقگیر
- ۳- شستشوی دوره‌ای برقگیرهای مناطق آلوده که می‌تواند رسوبات سطحی آن را از حد خطرناک بودن پایین تر نگهدارد.
- ۴- پوشانیدن سطح برقگیر توسط مواد دافع آب، مانند سیلیکان، گریس و یا هیدروکربن که این عمل سبب می‌شود که آب سطح پوشینگ برقگیر بصورت قطرات ریز در آمده و بدین ترتیب از تشکیل لایه مرطوب و عبور جریان ناشی از آن جلوگیری شود.

#### ب- اضافه ولتاژهای سیستم

انتخاب برقگیر اکسید روی باید به نحوی باشد که ولتاژ آستانه هدایت به قدر کافی بالاتر از سطح اضافه ولتاژهای موقت (TOV) شبکه در محل نصب برقگیر باشد. در غیر این صورت با وقوع چنین اضافه ولتاژهایی انرژی بسیار بالایی در برقگیر تخلیه می‌شود که خرابی آن را به همراه خواهد داشت. به خصوص با توجه به اضافه ولتاژهای بزرگ ناشی از فرورزنانس در شبکه‌های فعلی باید برقگیرها به نحوی انتخاب شوند که بتوانند این اضافه ولتاژهای پایدار روی شبکه را بدون وقوع ناپایداری حرارتی تحمل نمایند.

#### پ- استفاده نامناسب از برقگیر

بررسیهای انجام شده در خصوص ترکیدن برقگیرها نشان می‌دهند که همه علت‌های آسیب دیدن و ترکیدن برقگیرها، به جنس و مشخصات ساختاری خود برقگیر بستگی ندارد بلکه به نحوه بکارگیری و استفاده برقگیرها مربوط می‌شود که می‌تواند بعلت عدم

شناخت کافی از دامنه اضافه ولتاژهای دائمی یا موقت شبکه قدرت باشد. برقگیرهای SiC بوسیله ولتاژ تخلیه و ولتاژ شروع کار عادی انتخاب می‌شوند ولی برای انتخاب برقگیرهای ZnO، علاوه بر مشخصات مذکور، باید حداکثر ولتاژ کار دائم و اضافه ولتاژ موقتی را نیز در نظر گرفت. اگر این دو مشخصه اخیر در انتخاب برقگیرهای ZnO نادیده گرفته شود، می‌تواند باعث تخریب و ترکیدن این برقگیرها شود. به همین دلیل در مواردی که شبکه در اکثر مواقع با نوسانات دائمی و قابل ملاحظه ولتاژ روبروست، بکارگیری برقگیرهای SiC مطمئن‌تر از برقگیرهای ZnO می‌باشد. همچنین اگر سطح مقطع و قابلیت تحمل انرژی ورستور، با توجه به سطح صاعقه در منطقه مورد نظر به اندازه مناسب انتخاب نشده باشد، برقگیر دچار خرابی زود رس خواهد گردید. زیرا با توجه به تنزل کیفیت آن پس از تخلیه صاعقه، جریان نشتی بالاتری پیدا کرده و لذا در دمای بالاتری کار خواهد کرد. چنین برقگیری هر چند که در ظاهر مشکل ندارد ولی ممکن است به تدریج به سر حد ناپایداری حرارتی رسیده و بعد از اصابت یک صاعقه سنگین دچار خرابی و ترکیدن گردد.

#### ت - عدم انطباق شرایط بهره برداری با مشخصه برقگیر

گاهی شرایط بهره برداری پیش بینی نشده‌ای در شبکه ظاهر می‌شود که در طراحی سیستم و در نتیجه در انتخاب مشخصات فنی برقگیرها در نظر گرفته نشده است. گاهی هم برقگیر در طول بهره برداری مشخصات فنی خود را از دست داده و دچار آسیب دیدگی شده است. این موارد بستگی به مشخصات فنی برقگیرها و شرایط سیستمی دارد که به طور کامل و درست مورد بررسی قرار نگرفته باشد. عوامل فوق می‌توانند باعث آسیب دیدگی برقگیرها (به‌خصوص برقگیر ZnO) شوند.

#### ۴-۴ سؤال و تمرین

۱. مزایا و معایب انواع روشهای زمین کردن نقطه نول شبکه قدرت را توضیح دهید.
۲. انواع برقگیرهای سیستم قدرت را با یکدیگر مقایسه کنید.
۳. مشخصه‌های مهم در انتخاب برقگیر را نام ببرید.
۴. برقگیر مناسب برای حفاظت پست ۲۳۰ kV را در شرایطی که سیستم بطور مستقیم

---

زمین شده و طول خط هوایی متصل به آن ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد انتخاب نمایید.

مؤلفان: دکتر محسن نیاستی - دکتر احمد غلامی (انتشارات دانشگاه سمنان)

## فصل ۵

### اصول هماهنگی عایقی

#### ۱-۵ مقدمه

هماهنگی عایقی<sup>۱</sup> عبارت از هماهنگی استقامت عایقی تجهیزات الکتریکی با اضافه ولتاژهای قابل انتظار در سیستم و مشخصه‌های وسائل حفاظت کننده و از طرف دیگر هماهنگی با شرایط محیطی و آلودگی‌ها می‌باشد. بطوری که احتمال تنش‌های ولتاژی تحمیل شده به تجهیزات که باعث معیوب شدن عایق‌بندی آنها و یا وقفه در تداوم سرویس دهی سیستم می‌شود به یک سطح قابل قبول از نظر اقتصادی و فنی کاهش یابد. برای بررسی هماهنگی عایقی نیاز به شناخت کامل اضافه ولتاژهای شبکه، وسائل حفاظتی و عایق‌های الکتریکی می‌باشد. در فصول قبل اضافه ولتاژها و وسائل حفاظتی مورد بررسی قرار گرفتند. در این میان عایق‌های الکتریکی نقش تعیین کننده‌ای در هماهنگی عایقی ایفا می‌کنند. در واقع هدف هماهنگی عایقی انتخاب یک سطح عایقی مناسب برای تجهیز جهت حصول میزان قابلیت اطمینان مناسب می‌باشد. لذا در ابتدا بایستی شناخت مناسبی از انواع عایق‌های الکتریکی و مشخصات آنها بدست آید. بطور کلی دو روش آماری و قطعی برای تعیین هماهنگی عایقی سیستم قدرت وجود

---

۱- Insulation Co-ordination

دارد. هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارا می‌باشند که در ادامه به ارزیابی آنها پرداخته شده است.

تمام محاسبات هماهنگی عایقی عموماً در شرایط استاندارد محیطی بررسی می‌گردد. این در حالی است که سیستم‌های قدرت در مسیر عبور خود برای تامین انرژی الکتریکی از مکان‌های مختلف با شرایط آب و هوایی متفاوتی نسبت به شرایط استاندارد عبور می‌کنند. این امر لزوم بررسی تاثیر شرایط محیطی بر انتخاب سطوح عایقی مناسب جهت هماهنگی عایقی را بیان می‌کند. لذا در بخش انتهایی به بررسی تاثیر شرایط نامتعارف بر هماهنگی عایقی پرداخته شده است.

## ۲-۵- مروری بر عایق‌های الکتریکی

عایق‌های الکتریکی به عنوان یکی از تجهیزات مهم در شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی بکار گرفته می‌شوند. افزایش قابلیت اطمینان، ایمنی سیستم و تداوم برق‌رسانی به عملکرد صحیح عایق‌ها بستگی مستقیم دارد. در شبکه‌های توزیع و انتقال، طراحی مطلوب و مناسب ایزولاسیون ضرورت دارد، بگونه‌ای که هر گونه سهل‌انگاری در طراحی ایزولاسیون، ممکن است منجر به بهره‌برداری نامطلوب از شبکه و بروز خسارات پرهزینه گردد. مهمترین عایق الکتریکی در سیستم‌های قدرت مقره‌ها می‌باشند، وظایف مقره‌ها در شبکه‌ها را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

(۱) تحمل وزن هادی‌های خطوط انتقال و توزیع برای نگهداری سیم‌های هوایی روی پایه‌ها و دکل‌ها در بدترین شرایط یعنی موقعی که ضخامت یخ و برف تشکیل شده روی سیم‌ها در حداکثر مقدار باشد یا تحت شرایط طوفان شدید، اصولاً عایق‌ها باید بتوانند بیشترین نیروهای مکانیکی وارد شده را تحمل کنند.

(۲) عایق بندی بین هادی‌ها و زمین و هادی‌ها با یکدیگر بر عهده مقره است. یعنی مقره باید از استقامت الکتریکی کافی برخوردار باشد تا بتواند بین فازهای شبکه و دکل‌ها که متصل به زمین هستند ایزولاسیون کافی برای تحمل ولتاژ فازها را داشته باشد. استقامت الکتریکی مقره‌ها باید در حدی باشد که در بدترین شرایط (یعنی در حضور رطوبت، باران، آلودگی و بروز صاعقه با ولتاژ بالا) دچار شکست کامل الکتریکی نشوند.

بطور کلی مقره‌ها باید دارای خصوصیات زیر باشند:

- (۱) استقامت الکتریکی بالا.
- (۲) استقامت مکانیکی بالا.
- (۳) عاری از ناخالصی و حفره های داخلی.
- (۴) استقامت در برابر گرما و عدم تغییر شکل در اثر تغییر دما (با توجه به ضریب انبساط حرارتی که بایستی کم باشد).
- (۵) ضریب اطمینان بالا.
- (۶) ضریب تلفات عایقی کم.
- (۷) مقاوم در برابر نفوذ آب و آلودگیها.

### ۱-۲-۵ انواع عایقها

مقره‌ها از لحاظ جنس به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند.

#### الف - مقره‌های چینی

مقره چینی یا پرسلین از سه ماده مختلف تشکیل شده است:

- (۱) کائولین یا خاک چینی  $AL_2O_3-2SiO_2-2H_2O$  به مقدار ۴۰ تا ۵۰ درصد.
- (۲) سیلیکات آلومینیوم (فلداسپات)  $K_2O-AL_2O_3-6SiO_2$  به مقدار ۲۵ تا ۳۰ درصد.
- (۳) خاک کوارتز  $SiO_2$  به مقدار حداکثر ۲۵ درصد.

این سه نوع ماده به ترتیب برای بالا بردن استقامت حرارتی، الکتریکی و مکانیکی به کار می‌روند. به عبارت دیگر خواص الکتریکی، مکانیکی و حرارتی چینی بستگی به درصد فراوانی این سه جزء دارد. چینی دارای استقامت بیشتری (نسبت به شیشه) در مقابل تغییرات ناگهانی دما بوده و لعاب خارجی، آن را در مقابل ضربه محافظت می‌نماید. استقامت الکتریکی چینی در حدود  $(12-28) \text{ kV/mm}$  می‌باشد.

از آنجا که بسیار ضروری است یک مقره بدون هرگونه حفره هوا و یا ناخالصی باشد روش و مراحل ساخت آن از حساسیت خاصی برخوردار است. مقره‌های چینی معمولاً به دو روش مرطوب و خشک تولید می‌شوند. در طی روش مرطوب مقره چینی قالب‌گیری می‌شود ولی در روش خشک، مواد تشکیل دهنده با فشار درون قالب فولادی قرار می‌گیرند تا به شکل مطلوب درآیند. مقره‌هایی که با استفاده از روش خشک ساخته



می‌شوند، دارای قدرت مکانیکی و دی‌الکتریکی کمتری بوده ولی هزینه تولید کمتری دارند. این نوع از مقره‌ها تحت فشار الکتریکی بیش از ولتاژ شکست<sup>۱</sup>، مستعد سوراخ شدن هستند. به هر حال مقره‌های تولید شده از طریق روش خشک، مقرون به صرفه‌تر بوده و استفاده از آنها عموماً به ولتاژهای پایین محدود می‌شود. در شکل (۵-۱) نمونه‌ای از مقره‌های چینی ارائه شده است.



شکل (۵-۱). نمونه‌ای از مقره‌های چینی بشقابی

مقره‌های چینی علیرغم داشتن مزایایی از قبیل ارزان بودن، تکنولوژی ساخت ساده‌تر و استقامت مکانیکی مناسب، معایبی نیز دارند که در ذیل به برخی از آنها اشاره شده است.

- رشد قارچی سیمان در مناطق مرطوب که ابتدا به ایجاد ترک در قسمت عایق و در نهایت به پنچری مقره در داخل کلاهک<sup>۲</sup> منجر می‌گردد و بدون استفاده از تجهیزات خاص تشخیص آنها از طریق کنترل چشمی میسر نمی‌باشد.
- ترک برداشتن بر اثر عوامل مختلف و توسعه ترک‌های موئی به ترک‌های بزرگتر و در نهایت پنچری مقره (باقی ماندن مقره‌ایی که از داخل کلاهک پنچر شده در زنجیره مقره خطر گسیختگی را در بر دارد).
- در مناطق کویری با طوفان شن، لعاب مقره می‌تواند به تدریج دچار آسیب دیدگی شده و کارایی خود را از دست بدهد.
- فواصل کم بین شیارها در مقره‌های ضد مه<sup>۳</sup>، موجب جمع شدن آلودگی در عمق

۱- Flashover Voltage

۲- Cap

۳- Anti-Fog

- شیارها شده بطوریکه بعضاً با شستن مقره نیز مقداری از آلودگیها همواره در عمق شیار باقی مانده و موجب تضعیف مقره می شود.
- وزن مقره‌های چینی نسبت به مقره‌های شیشه‌ای بدلیل داشتن کلاهک فلزی بیشتر است.
- زنگ زدن میله یا سوزن<sup>۱</sup> مقره در بیرون کلاهک، پس از مدتی به کاهش قطر آن و در نتیجه کاهش تحمل مکانیکی سوزن و گسیختن آن می انجامد.
- زنگ زدن سوزن مقره در داخل کلاهک و اضافه شدن حجم سوزن، منجر به فشار اضافی جدار عایق و شکستن آن شده و در نهایت به پنچر شدن مقره ختم می گردد.
- نرخ شکستگی مقره‌های چینی در مراحل حمل و نقل، انبارداری و نصب، زیاد است.
- بر اثر اصابت صاعقه و شکست عایقی ناشی از آن، ترکهای مویی در این مقره‌ها ایجاد می شود.

### ب- مقره‌های شیشه‌ای

شیشه از ذوب مواد متشکله شامل سیلیس یا شن، سود، سنگ آهن و منیزیم در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد بدست می آید که پس از قالب‌ریزی دوباره پخته و گرم می شود و سپس آن را سرد می کنند.

در گذشته بعلت استقامت کمتر آنها در برابر ضربه‌های مکانیکی نسبت به مقره‌های چینی و ضریب انبساط طولی بالا، در ولتاژهای کمتر از ۷۵ کیلوولت استفاده می شد، ولی نوع جدید این مقره‌ها از شیشه سخت بوده و در ولتاژهای بالا تا ۷۶۵ کیلوولت نیز بکار می رود. این مقره‌ها در برابر لب‌پریدگی و قوس الکتریکی نسبت به چینی مقاومتر هستند. شیشه نسبت به چینی جاذب آلودگی بیشتری بوده ولی از نظر قیمت ارزانتر می باشد و اگر هم بشکند از روی زمین قابل مشاهده است و چنانچه در هنگام بازدید، مقره سالم بنظر برسد میتوان مطمئن بود که مقره هم از نظر الکتریکی و هم از نظر مکانیکی سالم است و کارایی لازم را دارد.

استقامت عایقی شیشه ممکن است به  $120 \text{ kV/mm}$  هم برسد. بنابراین، استقامت الکتریکی آن بیشتر از چینی است. همچنین مقاومت فشاری شیشه بیشتر از چینی بوده و استقامت کششی آن معادل چینی است، اما در مقابل ضربات مکانیکی شکننده تر است. در شکل (۲-۵) نمونه‌ای از مقره‌های شیشه‌ای ارائه شده است.



شکل (۲-۵). نمونه‌ای از مقره‌های شیشه‌ای

- برخی معایب مقره‌های شیشه‌ای عبارتند از :
- بر اثر ضربات مکانیکی که قدرت شکستن عایق مقره را داشته باشند، کل عایق مقره متلاشی شده و فرو میریزد.
  - در صورت پایین بودن کیفیت مقره‌های شیشه‌ای، نرخ شکستگی آنها در مراحل مختلف کار بشدت افزایش می‌یابد و حتی به هنگام نگهداری در انبارهای سر باز، بر اثر تغییرات سریع دما می‌شکنند.
  - چنانچه در مراحل نصب، مقره بر روی زمین کشیده شود و به زمین سنگی یا صخره‌ای برخورد نماید احتمال وقوع پریدگی‌های پولکی شکل از سطح مقره وجود دارد. وجود این نوع صدمه در مقره می‌تواند بهنگام مرطوب شدن سطح

مقره و تغییرات شدید دما به شکستن احتمالی مقره منجر گردد.

- در مقره‌های شیشه‌ای نیز همانند مقره‌های چینی، زنگ‌زدگی سوزن می‌تواند موجب اعمال فشار زیاد به جدار قسمت داخلی کلاهک شده و به شکستن مقره بیانجامد. همچنین زنگ‌زدن سوزن در بیرون از کلاهک منجر به کاهش مقاومت مکانیکی آن می‌شود.

### ج- مقره‌های کامپوزیتی

در سالهای اخیر افزایش ولتاژ خطوط انتقال انرژی، ایجاب کرده است تا مقره‌های مربوط به این خطوط، از ابعاد بزرگی برخوردار باشند که طبعاً وزن زیادتر و هزینه‌های بیشتر را به همراه دارد. از اینرو مقره‌های سبکتر مثل مقره‌های کامپوزیت که دارای مشخصه‌های بهتری می‌باشند مطرح شده‌اند. مقره‌های کامپوزیت حداقل از دو ماده عایقی یکی برای تامین خواص الکتریکی در روکش مقره و دیگری برای تامین خواص مکانیکی در هسته کامپوزیتی، تشکیل می‌شوند. اجزای اصلی یک مقره کامپوزیت عبارت از هسته<sup>۱</sup>، پوشش<sup>۲</sup> و اتصالات انتهایی<sup>۳</sup> می‌باشد. در شکل (۵-۳) سه قسمت مختلف یک مقره کامپوزیت ارائه شده است.



شکل (۵-۳). اجزای اصلی تشکیل دهنده مقره کامپوزیت

هسته کامپوزیت که میله پلیمری تقویت شده (FRP<sup>۴</sup>) نیز نامیده می‌شود، وظیفه تحمل

۱- Core

۲- Housing

۳- End Fitting

۴- Fiber Reinforced Polymeric

بار کششی وارد شده از هادی به آن و همچنین انتقال آن به دکل را بر عهده دارد و استقامت الکتریکی لازم را نیز تامین می‌نماید. به عبارت دیگر، هسته کامپوزیت از دو لحاظ حائز اهمیت است؛ یکی از لحاظ رفتار الکتریکی که به عنوان اصلی‌ترین جزء عایقی عمل می‌کند و دیگری از لحاظ رفتار مکانیکی که بار مکانیکی را تحمل می‌نماید. روکش پلیمری مقرر به منظور حفاظت هسته از هوازدگی و اثرات مخرب رطوبت و شرایط جوی و افزایش ولتاژ لازم برای شکست الکتریکی و ایجاد جرقه، روی هسته را می‌پوشاند. امروزه پوشش‌های مورد استفاده در مقره‌های کامپوزیت شامل EPDM<sup>۱</sup>، PTFE<sup>۲</sup>، SIR<sup>۳</sup>، پلی اتیلن و غیره می‌باشد. در حال حاضر لاستیک سیلیکونی و لاستیک اتیلن پروپیلن متداولترین نوع پوشش‌های لاستیکی هستند که در مقره‌های کامپوزیتی استفاده می‌شوند.

شایان ذکر است نتایج تست‌های بلند مدت در شرایط مختلف روی انواع مقره‌های کامپوزیت، مشخص کرده است که خانواده لاستیک سیلیکونی نسبت به خانواده اتیلن پروپیلن دارای خواص بهتری می‌باشند. دلیل این امر، پایداری بلند مدت لاستیک سیلیکونی در برابر شرایط آب و هوایی مختلف و خاصیت آبریزی آن و همچنین توانایی انتقال این خاصیت به لایه‌های دارای آلودگی است.

دسته‌بندی دیگری برای عایق‌های الکتریکی از لحاظ استقامت در برابر آزمایش‌های فشار قوی وجود دارد که در فصل دهم به آن پرداخته شده است. بر حسب کاربرد، مقره‌ها به سه دسته کلی شامل مقره‌های خطوط هوایی، مقره‌های اتکایی و مقره‌های عبوری یا پوشینگ‌ها تقسیم می‌شوند. مقره‌های خطوط برای عایق کردن هادی‌ها نسبت به پایه (دکل) و نسبت به یکدیگر و نگهداری هادی‌ها توسط دکل‌ها استفاده می‌شوند. برای عایق کاری و مهار تجهیزات پست‌های فشارقوی مثل ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ، تله موج، شینه‌ها کلیدها و همچنین مهار شین تابلوها از مقره‌های اتکایی استفاده می‌شود. پوشینگ‌ها نیز برای عبور باس بارها از دیواره‌ها یا ورود و خروج هادی‌ها به تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱- Ethylene Propylene Monomer

۲- Ethylene Propylene Diene Monomer

۳- Poly Tetra Fluor Ethylene

۴- Silicone Rubber

همچنین می‌توان عایق‌ها را از لحاظ مکان مورد نصب به عایق‌های بیرونی و داخلی دسته‌بندی کرد. عایق‌های جامدی که سطح خارجی آنها در تماس مستقیم با هوای بیرونی می‌باشد و تحت تاثیر شرایط محیطی نظیر آلودگی، رطوبت و نزولات آسمانی قرار دارند، عایق بیرونی نامیده می‌شوند. عایق‌های داخلی شامل عایق‌های جامد، مایع و یا گازی هستند که درون محفظه قرار دارند و بدون تاثیر از شرایط محیطی می‌باشند.

## ۲-۲-۵ مقایسه عایق‌های الکتریکی

بی تردید شرایط محیطی و محل بهره‌برداری بر عمر مقره‌ها و میزان کارایی آنها، اثر مستقیم دارند. در جدول (۵-۱) شرایط مختلف کاری به همراه نقاط ضعف و قوت مقره‌ها با توجه به تجربیات مختلف کارایی مقره‌های سرامیکی (چینی و شیشه‌ای) و غیرسرامیکی ارائه شده است.

جدول (۵-۱). مقایسه مقره‌های سرامیکی و غیرسرامیکی

مقره‌های غیرسرامیکی	مقره‌های سرامیکی	ردیف
کاهش وزن نسبت به سرامیکی (پایه‌های سبکتر و ارزان‌تر)	وزن سنگین (پایه‌های سنگین‌تر و گران‌تر برای خطوط)	۱
هزینه حمل و نصب پایین	هزینه حمل و نصب بالا	۲
مقاومت بالا در برابر خرابکاری عمدی	مقاومت ضعیف در برابر خرابکاری عمدی	۳
عملکرد نسبتاً بهتر در مناطق آلوده (سطح آبگریز) نیاز به نگهداری کمتر	عملکرد ضعیف در مناطق با انواع آلودگی (سطح آبدوست) نیاز به نگهداری بیشتر	۴
مقاومت بهتر در برابر تنشهای مکانیکی	مقاومت ضعیفتر در برابر تنشهای مکانیکی	۵
توزیع ولتاژ بهتر و تداخل رادیویی و تلویزیونی کمتر نسبت به زنجیره مقره‌های چینی	توزیع ولتاژ نامناسب و تداخل رادیویی و تلویزیونی (زنجیره مقره)	۶

۷	عدم وجود مواد ارگانیک و در نتیجه عدم پیرشدگی	پیرشدگی و از دست رفتن خواص آبگریزی در طولانی مدت (بدلیل مواد ارگانیک تشکیل دهنده: لاستیک و فایبرگلاس)
۸	پروفیل‌ها و چترکهای پیچیده (مراحل ساخت و تولید پیچیده‌تر) برای بدست آوردن فاصله خزشی بیشتر	پروفیل و ساختار چترک ساده، افزایش فاصله خزشی به سهولت
۹	با طول اتصال یکسان (بین هادی و بازوی دکل) فاصله قوس خشک بیشتر روی زنجیره مفره	با طول اتصال یکسان فاصله قوس خشک کوتاه‌تر روی زنجیره مفره
۱۰	مقاومت خوب سرامیک در برابر اشعه UV، باران، آلودگی، مه رقیق، کرونا و میدانهای الکتریکی	پیر شدن لاستیک و فایبرگلاس مفره‌های غیرسرامیکی در برابر اشعه UV، باران، آلودگی، مه رقیق، کرونا و میدانهای الکتریکی و کاهش خواص دی‌الکتریک آنها (سفیدک، ترک خوردگی، شکنندگی و پارگی)
۱۱	بیش از ۹۰ سال تجربه بهره‌برداری	تجربه بهره‌برداری کمتر
۱۲	عملکرد ضعیف در آزمون‌های جرقه	عملکرد مناسب در آزمون‌های جرقه
۱۳	عدم سقوط خط بدلیل سوراخ‌شدگی هسته یک مفره در یک زنجیره	سقوط خط بدلیل شکستن هسته مفره‌های غیرسرامیکی
۱۴	عدم تغییر عملکرد در برابر آلودگی نسبت به زمان	تغییر عملکرد در برابر آلودگی نسبت به زمان
۱۵	مواد اولیه ارزان‌تر و قابل دسترس‌تر	مواد اولیه گران‌تر
۱۶	حجم و اندازه بزرگتر	حجم و اندازه کوچکتر

### ۳-۵ مفاهیم و استانداردهای هماهنگی عایقی

در این قسمت به بیان مفاهیم کاربردی در هماهنگی عایقی در سیستم‌های قدرت و استانداردهای ارائه شده در این زمینه پرداخته شده است.

### ۱-۳-۵ اصطلاحات و تعاریف

بعضی از اصطلاحات و تعاریف رایج در مبحث هماهنگی عایقی سیستم‌های قدرت عبارتند از:

فاصله مجاز<sup>۱</sup>:

کوتاه ترین فاصله بین دو قسمت برقدار (هادی) از طریق عایق گازی.

فاصله نشستی<sup>۲</sup>:

کوتاه ترین فاصله از روی سطح یک عایق الکتریکی محصور بین دو هادی.

ولتاژ کاری<sup>۳</sup>:

بالا ترین مقدار موثر ولتاژ ac یا dc که ممکن است به دو سر یک عایق تحت ولتاژ نامی در حالت مدار باز یا شرایط عادی اعمال گردد (بجز حالت گذرا).

اضافه ولتاژ<sup>۴</sup>:

ولتاژ بین هادی فاز و زمین و همچنین بین هادی‌ها که مقدار آن از حداکثر مقدار ولتاژ سیستم بیشتر باشد.

اضافه ولتاژ موقتی<sup>۵</sup>:

اضافه ولتاژ بین فاز به زمین، فاز به نول و یا فاز به فاز که برای مدت نسبتاً طولانی (چندین ثانیه) در سیستم ظاهر شود.

اضافه ولتاژ گذرا<sup>۶</sup>:

اضافه ولتاژ کوتاه مدت، کمتر از چند میلی ثانیه که به صورت نوسانی یا غیر نوسانی ناشی از کلیدزنی و وقوع صاعقه ظاهر شود.

۱- Clearance

۲- Creepage distance

۳- Working voltage

۴- Overvoltage

۵- Temporary overvoltage

۶- Transient Overvoltage



اضافه ولتاژ کلیدزنی<sup>۱</sup> :

اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی یا وقوع خطا.

اضافه ولتاژ صاعقه<sup>۲</sup> :

اضافه ولتاژ ناشی از وقوع صاعقه با اصابت مستقیم یا اصابت غیر مستقیم.

ولتاژ استقامت ضربه<sup>۳</sup> :

حداکثر مقدار ولتاژ ضربه که یک عایق تحت شرایط خاص آزمایش، قادر به تحمل آن برای مدت زمان معین باشد.

ولتاژ استقامت فرکانس قدرت<sup>۴</sup> :

مقدار موثر ولتاژ ac که تحت شرایط آزمایش، یک عایق قادر به تحمل آن باشد.

آلودگی<sup>۵</sup> :

هر ماده خارجی (محیطی) مثل ذرات جامد، مایع و گاز که بر استقامت عایقی یا مقاومت سطحی یک عایق تاثیر بگذارد.

هماهنگی عایقی<sup>۶</sup> :

هماهنگی بین سطح استقامت عایقی تجهیزات یا سیستم حفاظت شده با مشخصات حفاظتی برگیرها بطوریکه به طور اقتصادی عایق تجهیزات در برابر اضافه ولتاژها حفاظت شوند و به سطح مطلوبی از احتمال آسیب برسند.

نسبت حفاظت<sup>۷</sup> :

نسبت حداقل سطح استقامت عایقی تجهیز به حداکثر دامنه اضافه ولتاژ اعمالی ممکن. به منظور جبران عدم قطعیت حداکثر اضافه ولتاژ و حداقل استقامت عایقی تجهیزات (ضریب اطمینان برای جبران خطر خطاهای عایقی غیر قابل پیش بینی)، بازه حفاظتی

- 
- ۱- Switching Overvoltage
  - ۲- Lightning Overvoltage
  - ۳- Impulse withstand voltage
  - ۴- Power frequency withstand voltage
  - ۵- Pollution
  - ۶- Insulation coordination
  - ۷- Protective Ratio

مناسب باید بین حداکثر دامنه اضافه ولتاژها و حداقل سطح استقامت عایقی تجهیزات تحت حفاظت انتخاب شود.

ضریب تصحیح شرایط محیطی<sup>۱</sup>:

ضریبی که اختلاف بین شرایط استاندارد محیطی را نسبت به شرایط واقعی محیط تصحیح می‌کند.

عایق بیرونی<sup>۲</sup>:

فاصله هوایی بین هادی‌ها و سطح خارجی عایق‌های جامد که در معرض مستقیم محیط بیرون قرار دارند و تغییرات شرایط محیطی بر این عایق‌ها تاثیرگذار باشد.

عایق داخلی<sup>۳</sup>:

عایق‌های جامد، مایع و با گازی که درون محفظه‌ای قرار دارند و از تاثیر مستقیم شرایط محیطی حفاظت شده‌اند.

عایق‌های خود ترمیم<sup>۴</sup>:

عایقی که پس از وقوع تخلیه مخرب در آن، مشخصات عایقی خود را ترمیم می‌کند.

عایق غیر خود ترمیم<sup>۵</sup>:

عایقی که پس از وقوع تخلیه مخرب در آن، خاصیت عایقی خود را بطور کامل از دست می‌دهد.

بیشترین ولتاژ کاری سیستم<sup>۶</sup>:

بیشترین ولتاژ سیستم که در شرایط عملکرد نامی آن در هر نقطه‌ای از سیستم امکان وقوع آن وجود داشته باشد.

بیشترین ولتاژ تجهیز<sup>۷</sup>:

بیشترین مقدار موثر ولتاژ خط به خط تجهیز که برای عایق آن طراحی شده باشد.

۱- Atmospheric correction factor

۲- External insulation

۳- Internal insulation

۴- Self-restoring insulation

۵- Non-self-restoring insulation

۶- Highest voltage of a system

۷- Highest voltage for equipment

موج ولتاژ ضربه کلیدزنی استاندارد<sup>۱</sup>:  
 موج ضربه‌ای که زمان پیشانی موج آن ۲۵۰ میکروثانیه و زمان پشت آن ۲۵۰۰ میکروثانیه می‌باشد.  
 موج ولتاژ ضربه صاعقه استاندارد<sup>۲</sup>:  
 موج ضربه‌ای که زمان پیشانی موج آن ۱/۲ میکروثانیه و زمان پشت آن ۵۰ میکروثانیه می‌باشد.  
 سطح حفاظتی امواج ضربه (صاعقه یا کلیدزنی)<sup>۳</sup>:  
 حداکثر پیک ولتاژ ضربه (صاعقه یا کلیدزنی) مجاز تجهیز حفاظتی.  
 ولتاژ استقامت<sup>۴</sup>:  
 مقدار ولتاژی که در آزمایش استقامت به عایق اعمال می‌گردد، در حالی که تعداد پذیرفته شده‌ای از تخریب اتفاق بیفتد.  
 معیار عملکرد<sup>۵</sup>:  
 حداقل سطح عایقی که احتمال قابل قبولی از عملکرد فنی و اقتصادی تجهیز در برابر تنش‌های ولتاژی حاصل گردد. این معیار بصورت نرخ خرابی در سال بیان می‌گردد.  
 ولتاژ استقامت هماهنگی<sup>۶</sup>:  
 میزان ولتاژ استقامت عایقی که در هر سطح ولتاژ، معیار عملکرد را در شرایط واقعی نصب تجهیز برآورده سازد.  
 ولتاژ استقامت مورد نیاز:  
 مقدار ولتاژی که به عایق در شرایط آزمایش استاندارد اعمال می‌گردد تا معیار عملکرد را در شرایط واقعی و به همراه اضافه ولتاژهای واقعی سیستم برآورده سازد.

- 
- ۱- Standard switching impulse
  - ۲- Standard lightning impulse
  - ۳- (lightning or switching) impulse protective level
  - ۴- Withstand voltage
  - ۵- Performance criterion
  - ۶- Coordination withstand voltage

ضریب اطمینان<sup>۱</sup>:

ضریبی که بدلیل تفاوت شرایط آزمایش و شرایط واقعی نصب تجهیز (غیر از شرایط محیطی) در ولتاژ استقامت هماهنگی عایقی ضرب می‌گردد. ولتاژ استقامت آزمایش: مقدار استاندارد ولتاژ که در آزمایش استقامت استاندارد استفاده می‌شود.

## ۲-۳-۵ استانداردهای هماهنگی عایقی

در زمینه هماهنگی عایقی دو استاندارد مهم IEC و IEEE به طور مفصل به جنبه‌های مختلف آن پرداخته‌اند.

در استاندارد IEC مسئله هماهنگی عایقی به دو بخش سیستم‌های فشار ضعیف و سیستم‌های فشارقوی تقسیم شده است. استانداردهای IEC ۶۰۶۶۴ و IEC ۶۰۰۷۱ به ترتیب به سیستم‌های LV و HV اختصاص یافته‌اند. از آنجاییکه که برگیرها نقش اساسی در هماهنگی عایقی ایفا می‌کنند، استاندارد IEC ۶۰۰۹۹ به بررسی انواع برگیرهای اکسید فلزی و نحوه انتخاب آنها برای حفاظت از تجهیزات سیستم قدرت پرداخته است.

در استاندارد IEC ۶۰۰۷۱ به انتخاب سطح عایقی تجهیزات فشار قوی با حداکثر ولتاژ بیشتر از ۱۰۰۰ ولت در سیستم‌های سه فاز الکتریکی پرداخته شده است. در این استاندارد، هماهنگی عایقی یا انتخاب سطح عایقی (ولتاژ استقامت استاندارد) برای تجهیزات شامل دو نوع عایق بیرونی و داخلی و همچنین در دو سطح ولتاژ،  $V_m > 245(kV)$  و  $V_m \leq 245(kV)$  بیان شده است. در این استاندارد ولتاژ استقامت نامی تجهیزات برای سطوح ولتاژ مختلف در شرایط واقعی سیستم (اضافه ولتاژها و شرایط محیطی) تعیین شده است.

استاندارد IEEE ۱۳۱۳ همانند استاندارد IEC ۶۰۰۷۱ به تعیین سطوح عایقی استاندارد

۱- Safety factor

برای ولتاژهای بیشتر از ۱۰۰۰ ولت می‌پردازد. در قدم اول اضافه ولتاژهای سیستم در نقطه‌ای که تجهیز مورد نظر نصب می‌گردد با استفاده از شبیه‌سازی‌ها و روش‌های ریاضی محاسبه و سپس به فرم شکل موج‌های استاندارد تبدیل می‌گردند. در مرحله دوم سطوح عایقی تجهیز جهت دستیابی به نرخ خطای مطلوب انتخاب می‌گردد. این استاندارد در دو بخش تدوین گردیده که در بخش اول تعاریف و اصطلاحات هماهنگی عایقی ارائه شده و در بخش دوم نحوه اجرای هماهنگی عایقی برای تجهیز در دو بازه ولتاژی،  $1(kV) < U_m \leq 240(kV)$  و  $U_m > 242(kV)$ ، بیان گردیده است. همچنین استاندارد IEEE-C62 به بررسی انواع برقی‌گیرهای اکسید فلزی و چگونگی انتخاب آنها برای کاهش سطوح عایقی تجهیزات قدرت اشاره کرده است. استانداردهای مذکور فقط به عنوان نمونه بیان شده‌اند و از استانداردهای متعدد دیگر نیز می‌توان در بخش مطالعات هماهنگی عایقی سیستم‌های قدرت استفاده نمود.

#### ۴-۵ روش‌های هماهنگی عایقی

ولتاژ استقامت هماهنگی عایقی، حداقل ولتاژ استقامت عایقی است که در آن معیار عملکرد (نرخ خرابی مطلوب تجهیز) با در نظر گرفتن اضافه ولتاژهای سیستم، برآورده گردد. در تعیین ولتاژ استقامت عایقی تحت اضافه ولتاژهای گذرا، از دو روش احتمالاتی و قطعی استفاده می‌گردد. البته در بسیاری از کاربردها با ترکیب این دو روش، هماهنگی عایقی مطلوب تجهیز انتخاب می‌شود.

##### ۱-۴-۵ روش احتمالاتی هماهنگی عایقی

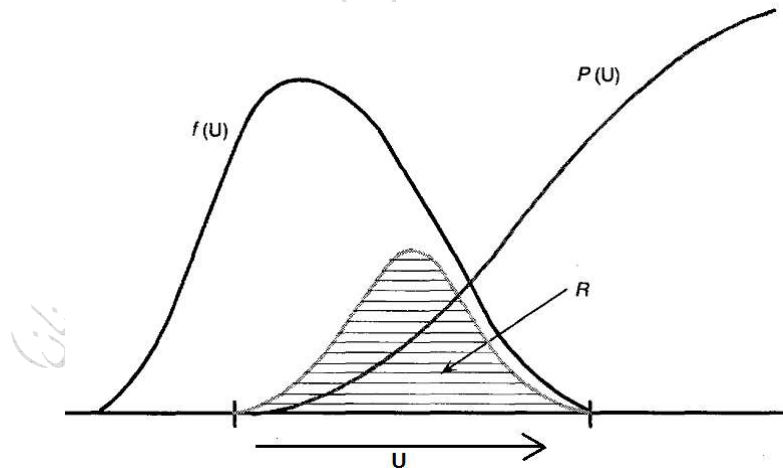
در این روش توزیع احتمالاتی دامنه اضافه ولتاژها و تابع توزیع احتمال ولتاژ شکست عایق مورد نیاز می‌باشد. تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژ برای اضافه ولتاژهای موقتی برحسب دامنه/مدت زمان می‌باشد. نرخ از کار افتادگی تجهیز با ترکیب این دو تابع توزیع احتمال بدست می‌آید. با محاسبه نرخ از کار افتادگی برای تمام تجهیزات سیستم می‌توان نرخ خروج سیستم ناشی از خطاهای عایقی را بدست آورد. با استفاده از روش احتمالاتی می‌توان سطوح عایقی بهینه را برای سیستم بدست آورد.

اما در عمل سطوح عایقی به دلیل عدم محاسبه دقیق پیامدهای ناشی از خطای عایقی و برآورد هزینه‌های ناشی از عدم انتقال انرژی معمولاً مقداری بیشتر از سطوح بهینه استقامت عایقی انتخاب می‌گردد.

در این روش ابتدا نرخ از کار افتادگی تجهیز بر اساس ملاحظات فنی و اقتصادی و تجربیات سیستمی تعیین می‌گردد. ارتباط بین این نرخ و تابع توزیع احتمال شکست عایقی و اضافه ولتاژهای سیستم از رابطه (۱-۵) محاسبه می‌گردد.

$$R = \int_0^{\infty} f(U) \times P(U) dU \quad (1-5)$$

در این رابطه  $f(U)$  تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژها و  $P(U)$  تابع توزیع احتمال شکست عایقی تجهیز می‌باشد. در محاسبه توزیع احتمال اضافه ولتاژها بایستی وقایعی که منجر به وقوع آنها می‌شوند و همچنین تعداد تکرار این وقایع در سیستم مورد نظر مشخص باشد. همچنین در هر حالت پیک شکل موج به عنوان مقدار اضافه ولتاژ در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ای از این توابع توزیع احتمالات در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵). محاسبه نرخ از کار افتادگی

روش دیگری نیز در جهت ساده‌سازی محاسبات وجود دارد که در آن ولتاژ استقامت

۹۰٪ عایق و دامنه اضافه ولتاژی که ۹۸٪ ولتاژها کمتر از آن هستند (ولتاژ ۰.۲٪) در نظر گرفته می‌شود. نسبت بین این دو ولتاژ با ضریب هماهنگی آماری بیان می‌گردد.

### ۱-۴-۵ تعیین احتمال وقوع اضافه ولتاژها

اضافه ولتاژ موقتی با دامنه، شکل موج و مدت زمان دوام آن روی سیستم، شناخته می‌شود. در هماهنگی عایقی اضافه ولتاژ موقتی با فرکانس قدرت و مدت زمان یک دقیقه و با دامنه‌های مختلف استانداردسازی می‌گردد. اضافه ولتاژ موقتی به دلایلی همانند خطای زمین، قطع بار، رزونانس و فرورزونانس در سیستم قدرت اتفاق می‌افتد. البته وقوع همزمان این خطاها در سیستم همانند خطای زمین به همراه قطع بار (بخصوص در خطوط بلند) با احتمال کم نیز ممکن می‌باشد.

در تعیین اضافه ولتاژهای کلیدزنی معمولاً وقوع حوادثی نظیر برق‌دار کردن و قطع خطوط، حذف خطا، قطع بار، قطع جریان‌های خازنی و سلفی و برخورد صاعقه به خط در نقاط دور را در نظر می‌گیرند. نوع کلید قدرت (وجود یا عدم وجود مقاومت موازی)، قدرت اتصال کوتاه باس بار متصل به خط، نوع جبران‌سازی خط و نوع مدار انتهایی خط (مدار باز، ترانسفورماتور یا برقیگیر) از جمله عوامل موثر بر اضافه ولتاژ ناشی از برق‌دار کردن خط به عنوان مهمترین عوامل در تولید اضافه ولتاژ با شیب کند می‌باشند. تابع توزیع احتمال تجمعی اضافه ولتاژ به صورت تابع توزیع ویبل می‌باشد. تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژهای با شیب کند (کلیدزنی) با مقدار ۰.۲٪، انحراف معیار و مقدار حداکثر دامنه مشخص می‌شوند. مقدار ۰.۲٪ در واقع مقدار دامنه ولتاژی است که تنها ۰.۲٪ ولتاژها بالاتر از این مقدار می‌باشند. مقدار حداکثر دامنه با وجود برقیگیر برابر سطح حفاظتی کلیدزنی برقیگیر می‌باشد. تابع توزیع احتمال تجمعی ویبل به صورت رابطه (۵-۲) بیان می‌گردد.

$$F(U_e) = 1 - e^{-\left(\frac{U_{et} - U_e}{3.5\sigma_e}\right)^3} \quad (2-5)$$

در این رابطه  $U_e$  دامنه اضافه ولتاژ،  $U_{et}$  حداکثر مقدار دامنه و  $\sigma_e$  انحراف معیار می‌باشد.

بهترین روش برای محاسبه توزیع ولتاژ کلیدزنی شبیه‌سازی کامپیوتری و اعمال حالات مختلف کلیدزنی بر روی آن می‌باشد. در استاندارد ۲-۶۰۰۷۱ IEC تقریبی از دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از برقداردار کردن خط بر گرفته از موارد عملی ارائه شده است. مشخصات اصلی تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژ ناشی از برقدار کردن خطوط با استفاده از جدول بالا بصورت زیر حاصل می‌گردد.

$$\sigma_e = 0.25(U_{e2} - 1) \quad (5-3)$$

$$U_{et} = 1.25U_{e2} - 0.25 \quad (5-4)$$

در هنگام وقوع خطا و یا برطرف کردن آن که سبب تغییر سطح ولتاژ سیستم از ولتاژ کاری آن به اضافه ولتاژ موقتی می‌گردد، اضافه ولتاژهایی با شیب کند نیز اتفاق می‌افتند که میتوان حداکثر دامنه این نوع اضافه ولتاژها را از رابطه زیر بدست آورد.

$$U_{et} = (2COG - 1)U\sqrt{2}/\sqrt{3} \quad \text{وقوع خطا} \quad (5-5)$$

$$U_{et} = 2U\sqrt{2}/\sqrt{3} \quad \text{برطرف کردن خطا} \quad (5-6)$$

صاعقه در سه حالت مختلف برخورد مستقیم یا هادی خط، برخورد با سیم محاذ یا برخورد با زمین اطراف سبب تولید اضافه ولتاژهای باشیب تند می‌شود. در هماهنگی عایقی اضافه ولتاژ القایی ناشی از برخورد غیر مستقیم صاعقه در سطوح ولتاژی پایین و اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه با سیم محافظ در سطوح ولتاژ کمتر از ۵۰۰ kV مورد توجه می‌باشد.

اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه در پست‌ها به عواملی همچون عملکرد خطوط متصل به پست در مقابل صاعقه، ابعاد پست، تعداد خطوط متصل به پست و ولتاژ کاری سیستم در لحظه برخورد صاعقه بستگی دارند. همچنین اضافه ولتاژ با شیب تند می‌تواند ناشی از کلید زنی در تجهیزات نزدیک به کلید قدرت باشد.

در محاسبه احتمال وقوع اضافه ولتاژهای با شیب تند در هر کلیدزنی پیک ولتاژ ایجاد شده بین فاز و زمین، بین فازها و در طول یک فاز (حالت کلید باز) در نظر گرفته می‌شود و از شکل موج استاندارد آن استفاده می‌گردد. همچنین در روشی ساده‌تر تنها پیک این سه نوع فاصله عایقی را به عنوان اضافه ولتاژ برای یک حالت کلیدزنی در نظر می‌گیرند.



## ۲-۱-۴-۵ روش قطعی هماهنگی عایقی

این روش زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که اطلاعات آماری کافی از نرخ خرابی تجهیز در دست نباشد. ابتدا ضریب هماهنگی عایقی در هر نوع از اضافه ولتاژها ضرب می‌گردد و سپس نزدیکترین و بزرگترین سطح عایقی به این مقدار به عنوان ولتاژ استقامت هماهنگی عایقی تجهیز انتخاب می‌گردد. اضافه شدن ضریب هماهنگی عایقی به دلیل عدم قطعیت در تعیین اضافه ولتاژها و سطوح عایقی می‌باشد. اگر تجهیز با برقگیر محافظت شده باشد، سطح حفاظتی کلیدزنی برقگیر جایگزین اضافه ولتاژهای با شیب کند (اضافه ولتاژهای کلیدزنی) می‌گردد. در بدست آوردن ولتاژ استقامت هماهنگی عایقی صاعقه از همان مقدار اضافه ولتاژ صاعقه بدون در نظر گرفتن ضریب هماهنگی عایقی استفاده می‌گردد.

## ۵-۵ تاثیر شرایط محیطی بر هماهنگی عایقی

تاکنون ولتاژ استقامت هماهنگی عایقی بدون در نظر گرفتن شرایط محیطی محاسبه گردیده است. ولی بدلیل احتمال اختلاف بین شرایط محیطی استاندارد (که بر اساس آن ولتاژ هماهنگی عایقی تعیین گردیده) و شرایط واقعی نصب تجهیزات بیرونی، ضریبی تحت عنوان ضریب شرایط محیطی در ولتاژ استقامت هماهنگی عایقی منظور می‌گردد. به عنوان مثال در تعیین ولتاژ استقامت عایقی صاعقه و کلیدزنی، شرایط محیطی و در ولتاژ استقامت موقتی و ولتاژ استقامت کاری سیستم، آلودگی بسیار موثر می‌باشند. نکته‌ای که در تاثیر شرایط محیطی بر استقامت عایقی باید لحاظ نمود این است که تمام شرایط بد محیطی به طور همزمان اتفاق نمی‌افتند بنابراین بایستی در تاثیر شرایط محیطی میانگینی از شرایط گوناگون محیطی در نظر گرفته شود. شرایط محیطی استاندارد (IEC) شامل دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، فشار هوای ۷۶۰ میلی‌متر جیوه و رطوبت مطلق ۱۱ گرم بر مترمکعب می‌باشد. همچنین در مناطق با سرعت وزش باد زیاد، استقامت عایقی خطوط انتقال نیرو در اثر

حرکت نوسانی زنجیره مفره و نزدیک شدن آن به دکل تحت تاثیر قرار می‌گیرد. با اعمال ضرایب تصحیح می‌توان ولتاژ استقامت عایقی را از شرایط محیطی استاندارد به شرایط واقعی محیطی نصب عایق تبدیل نمود. تغییر فشار هوا به دو صورت تغییر ارتفاع و تغییر چگالی هوا (ترکیب دما و فشار هوا) بر ولتاژ استقامت عایقی موثر می‌گردد.

### ۱-۵-۵ تاثیر دمای محیط

ولتاژ شکست عایقی در شرایط استاندارد را می‌توان با دو ضریب تصحیح فشار هوا ( $k_1$ ) و رطوبت ( $k_2$ ) به شرایط واقعی محیط تبدیل نمود.

$$k_t = k_1 k_2, \quad U = k_t U_0 \quad (5-7)$$

$U$  ولتاژ شکست عایقی در شرایط واقعی و  $U_0$  ولتاژ شکست در شرایط استاندارد می‌باشد و ضریب  $k_1$  بوسیله رابطه (۵-۸) محاسبه می‌گردد.

$$k_1 = \delta^m \quad (5-8)$$

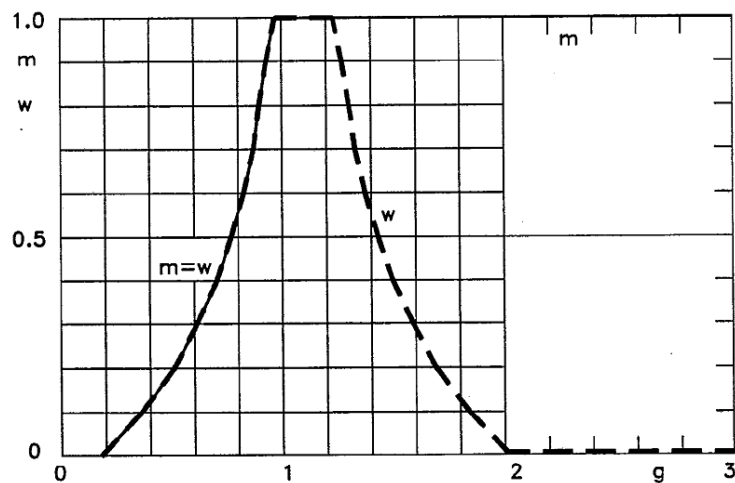
$\delta$  چگالی نسبی هوا از طریق رابطه (۵-۹) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\delta = \frac{b}{b_0} \left( \frac{273 + t_0}{273 + t} \right) \quad (5-9)$$

که در این رابطه،  $b$  فشار هوای واقعی محیط و  $b_0$  فشار هوای استاندارد بر حسب میلی بار و  $t$  دمای واقعی محیط و  $t_0$  دمای محیط استاندارد بر حسب درجه سانتیگراد است.  $m$  نیز با توجه به شکل (۵-۵) بر حسب پارامتر  $g$  تعیین می‌گردد.

$$g = \frac{U_{50\%}}{500L\delta k} \quad (5-10)$$

$U_{50\%}$  ولتاژ شکست ۵۰٪ عایق،  $L$  حداقل فاصله شکست الکتریکی هوا بر حسب متر و  $k$  ضریب وابسته به رطوبت می‌باشد که در ادامه توضیح داده می‌شود.



شکل (۵-۵). مقادیر  $m$  و  $w$  بر حسب تغییرات پارامتر  $g$

## ۲-۵-۵ تاثیر رطوبت محیط

تاثیر رطوبت نسبی بر ولتاژ شکست عایقی کاملاً نامنظم می‌باشد و نیاز به بررسی بیشتری در این زمینه می‌باشد. ضریب تصحیح رطوبت از رابطه (۵-۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$k_2 = k^w \quad (۵-۱۱)$$

در این رابطه مقدار  $w$  از شکل (۵-۵) بدست می‌آید و پارامتر  $k$  که به نوع ولتاژ اعمالی عایق بستگی دارد بر حسب نسبت رطوبت مطلق  $h$ ، به چگالی نسبی هوا  $\delta$ ، توسط روابط (۵-۱۲) تا (۵-۱۴) حاصل می‌گردد.

$$k = 1 + 0.012(h/\delta - 11) \quad 1 \leq h/\delta < 15 \quad \text{ولتاژ متناوب} \quad (۵-۱۲)$$

$$k = 1 + 0.01(h/\delta - 11) \quad 1 \leq h/\delta < 15 \quad \text{ولتاژ ضربه} \quad (۵-۱۳)$$

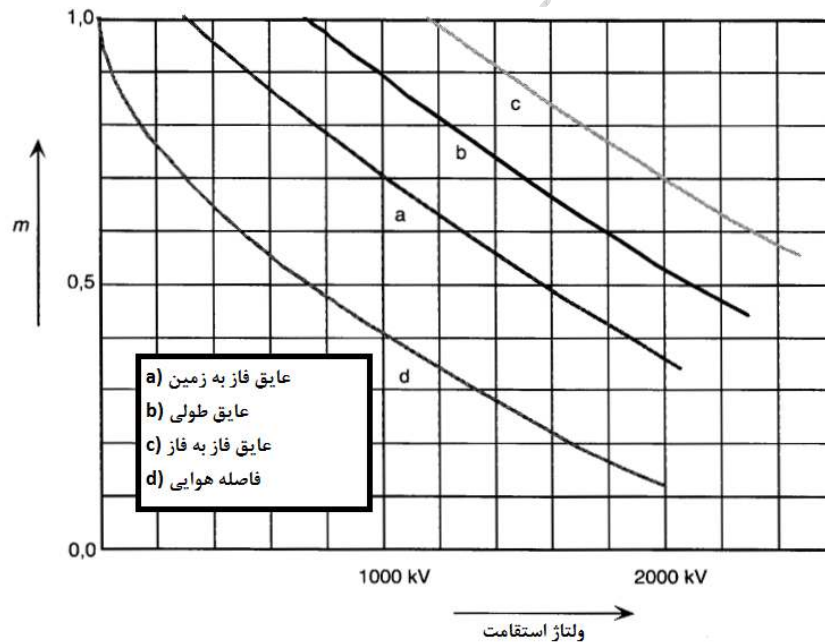
$$k = 1 + 0.014(h/\delta - 11) \quad 1 \leq h/\delta < 13 \quad \text{ولتاژ مستقیم} \quad (۵-۱۴)$$

## ۳-۵-۵ تاثیر ارتفاع منطقه از سطح دریا

در تعیین هماهنگی عایقی بعضا این فرض در نظر گرفته می‌شود که اثر رطوبت و دما همدیگر را خنثی می‌کنند و تنها تاثیر فشار هوا باید در نظر گرفته شود. ضریب تاثیر فشار محیط بر ولتاژ استقامت عایقی (ناشی از تاثیر ارتفاع) توسط رابطه (۵-۱۵) بیان می‌گردد.

$$K_a = e^{m \left( \frac{H}{8150} \right)} \quad (5-15)$$

که در این رابطه  $H$  ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر می‌باشد و  $m$  نیز برای ولتاژ استقامت صاعقه و ولتاژ استقامت کوتاه مدت (موقتی) برابر ۱ و برای ولتاژ استقامت کلیدزنی از نمودارهای شکل (۵-۶) استخراج می‌گردد.



شکل (۵-۶). مقدار  $m$  در استقامت عایقی ولتاژ کلیدزنی

## ۵-۶ سؤال و تمرین

۱. انواع مقره‌ها، کاربرد و مشخصات آنها را توضیح دهید.
۲. روش احتمالاتی در محاسبات هماهنگی عایقی را توضیح دهید. تفاوت آن با روش قطعی را بیان نمایید.
۳. اگر ولتاژ شکست الکتریکی یک عایق تحت شرایط استاندارد ۵۰ کیلوولت باشد. ولتاژ شکست این عایق در محیطی با دمای ۴۵ درجه سانتیگراد، فشار هوای ۷۰۰ میلی‌متر جیوه و رطوبت ۷۰٪ چه مقدار می‌گردد؟ حداقل فاصله تخلیه عایقی ۲۴ سانتی‌متر و ولتاژ شکست ۵۰٪ آن ۱۲۰ کیلوولت می‌باشد.

دکتر محسن نیاستی - دکتر احمد غلامی (انتشارات دانشگاه سمنان)

## فصل ۶

### هماهنگی عایقی برای خطوط انتقال نیرو

#### ۱-۶ مقدمه

در خطوط انتقال فشارقوی زنجیره‌های مقره که جهت عایق نگهداشتن سیم هادی نسبت به بدنه برج (زمین) و تأمین فاصله هوایی مجاز بکار می‌روند باید طوری طراحی گردند که در برابر افزایش غیر عادی ولتاژهای سیستم بطور کامل ایستادگی نمایند. خطوط انتقال هوایی به خاطر نوع ساختارشان و همچنین قرار گرفتن در محیط باز و شرایط متغیر، در معرض وقوع انواع خطاها قرار دارند. نتایج بررسیها نشان می‌دهند که عمده اتصالی‌های خطوط انتقال به صورت خطای تک فاز به زمین می‌باشد و از این رو هر زنجیره مقره وظیفه دارد اضافه ولتاژ منتهجه بر روی فاز سالم در شرایط خطای تکفاز را تحمل نماید. علاوه بر شرایط اتصال کوتاه تک فاز، افزایش ناگهانی ولتاژ ناشی از کلیدزنی (قطع و وصل شبکه) و اصابت صاعقه به خطوط انتقال عوامل دیگری هستند که سطح ایزولاسیون خطوط باید بر مبنای آنها طراحی و تعیین شود. همچنین به منظور حفاظت خطوط در برابر اضافه ولتاژهای صاعقه باید از سیستمهای محافظ و برقگیرهای خط به همراه کاهش امپدانس دکل و زمین استفاده شود.

## ۲-۶ انتخاب عایقهای خطوط هوایی

در خطوط انتقال هوایی جهت جداسازی الکتریکی خطوط از بدنه برج و همچنین تحمل وزن آنها، از مقره‌ها استفاده می‌گردد. لذا مقره‌ها بایستی خواص الکتریکی و مکانیکی مناسبی را دارا باشند. در احداث خطوط انتقال، مقره‌ها نقش اساسی در تعیین ارتفاع و ابعاد خطوط و هزینه احداث آنها و همچنین در تعیین قابلیت اطمینان سیستم ایفا می‌کنند. مقره‌های مورد استفاده در خطوط انتقال هوایی را می‌توان از جنبه‌های گوناگون به صورت زیر دسته‌بندی نمود.

### ۱-۲-۶ مقره‌های سوزنی

از این نوع مقره‌ها برای نگهداری هادیهای خطوط توزیع ۱۱، ۲۰ و ۳۳ کیلوولت استفاده می‌شود. مقره‌های سوزنی به صورت یکپارچه ساخته می‌شوند و توسط یک پیچ فولادی که به داخل مقره متصل شده است به بازوی پایه (کنسول) وصل می‌شود. اطراف پیچ فولادی را با فلز نرم مانند سرب یا سیمان پر می‌کنند تا چینی مقره با فولاد سخت در تماس نباشد و در اثر گشتاور خمشی شکسته نشود.



شکل (۶-۱). نمونه‌ای از مقره سوزنی

## ۲-۲-۶ مقره‌های بشقابی

این نوع مقره‌ها از جنس شیشه و یا چینی و به شکل بشقابی بوده و از نظر کاربرد نیز رایج‌ترین نوع مقره‌ها در خطوط هوایی انتقال انرژی می‌باشند. این مقره‌ها به صورت زنجیره مقره استفاده می‌شوند که تعداد آنها در زنجیر مقره بستگی به سطح ولتاژ، محل استفاده و اضافه ولتاژهای موجود در خط دارد. ارتباط این مقره‌ها با یکدیگر (در زنجیره مقره) بوسیله دو قطعه فلزی شامل کلاهک<sup>۱</sup> و سوزن<sup>۲</sup> که با پودر سیمان و شیشه و چسب مخصوص به مقره محکم می‌شوند، صورت می‌گیرد.

هر مقره بشقابی از یک قسمت بشقابی از جنس چینی یا شیشه تشکیل شده است که در طرف بالایی آن، یک کلاهک چدنی گالوانیزه توسط سیمان مخصوصی به نام آلومینا (که از مقاومت الکتریکی و استقامت مکانیکی و چسبندگی بالایی برخوردار است) به شیشه یا چینی متصل شده است و در طرف پایین مقره نیز یک سوزن یا میله فولادی گالوانیزه قرار دارد که آن هم به وسیله سیمان مخصوص آلومینا به مقره متصل شده

۱- Cap

۲- Pin



است. همچنین مسیر زیر بشقابها به صورت شیاردار است تا طول مسیر جریان نشتی بین فاز و بدنه افزایش یابد. سوزن فولادی هر مقره در داخل حفره کلاhek مقره پایینی به وسیله گیره اطمینان<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد.

دو مقره ضمن اتصال کامل با یکدیگر، به هم در محل اتصال به صورت لولایی حرکت آزادانه دارند. قطر بشقاب‌های این نوع مقره‌ها معمولاً بین ۱۵۰ تا ۳۶۰ میلی‌متر و یا بیشتر می‌باشد. استقامت مکانیکی آنها معمولاً بین ۴۰ تا ۳۰۰ کیلو نیوتن است.

مزایای استفاده از مقره‌های بشقابی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- با توجه به اینکه هر واحد مقره بشقابی برای یک ولتاژ نامی پایینی (در حدود ۱۱ کیلو ولت) طراحی می‌شود، متناسب با ولتاژ خط می‌توان تعداد دلخواهی از این مقره‌ها را به هم متصل نمود تا یک زنجیره آن بتواند ولتاژ خط را تحمل کند (قابلیت انتخاب تعداد بشقاب‌ها).

- اگر هر کدام از مقره‌های یک زنجیره مقره آویزان، معیوب بوده یا صدمه ببیند فقط لازم است همان یک مقره تعویض گردد و نیازی به تعویض کل زنجیره نیست (اقتصادی بودن مقره).

- چون زنجیره مقره به بازوی دکل خط آویزان است و می‌تواند به صورت آزادانه حرکت نماید، لذا حداقل تنش مکانیکی به مقره‌های آویزان وارد می‌شود (تنش-های مکانیکی کمتری به مقره وارد می‌شود).

- اگر به دلیلی بخواهند ولتاژ نامی خط را افزایش دهند به راحتی می‌توان با اضافه نمودن چند مقره، استقامت عایقی مناسب را به دست آورد و نیازی به تعویض زنجیره مقره نیست (قابلیت انعطاف در افزایش ولتاژ خط).

- چون هادی خط به زنجیره مقره آویزان می‌گردد و پایین تر از بازوی (صلیبی) دکل خط انتقال قرار می‌گیرد در نتیجه هنگام برخورد صاعقه به خط، صاعقه ابتدا به بازوی دکل خط برخورد می‌نماید لذا حدود زیادی از خط حفاظت می‌شود (حفاظت خط در برابر صاعقه به وسیله بازوی دکل انجام می‌شود).

- اگر بار مکانیکی خط زیاد باشد (مثلاً در اسپن‌های بلند، هنگام عبور خطوط انتقال از روی رودخانه‌ها، دره‌ها، اتوبان‌ها) می‌توان از زنجیره‌های دوتایی یا بیشتر استفاده نمود (قابلیت استفاده از زنجیره‌های چندتایی).

مقره‌های بشقابی از لحاظ مشخصات ظاهری همانند ارتفاع، قطر و فاصله خزشی انواع گوناگونی دارند که رایج‌ترین آنها در خطوط انتقال عبارتند از:

#### الف - مقره‌های بشقابی توپی و سوکت<sup>۱</sup>

این نوع از مقره‌های بشقابی رایج‌ترین نوع مقره در مناطق با شرایط محیطی معمولی می‌باشد. از لحاظ مشخصات ظاهری انواع گوناگونی از این نوع مقره‌ها وجود دارد. شکل (۶-۲) نمونه‌ای از این نوع مقره‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۲). نمونه‌ای از مقره توپی و سوکت

#### ب - مقره‌های بشقابی ضد مه<sup>۲</sup>

از این نوع مقره‌ها در مناطق آلوده و مه آلود که به فاصله خزشی بیشتری نیاز دارند استفاده می‌شود. در این نوع مقره‌ها شیارهای پایین بزرگتر از شیارهای مقره‌های

۱- Ball & socket

۲- Anti-fog insulator

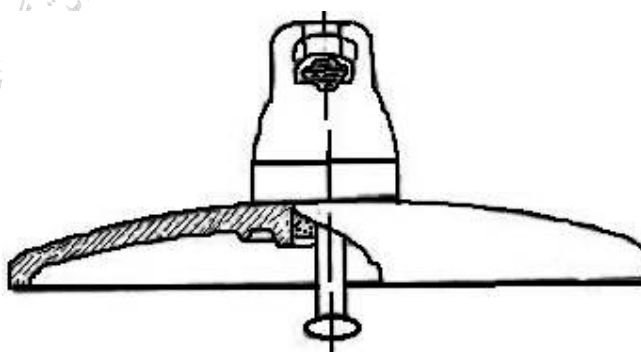
معمولی می‌باشد. ولی وزن آنها زیادت‌ر بوده و موجب افزایش نیروی مکانیکی روی برج می‌شود. نمونه از این نوع مقره‌ها در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.



شکل (۳-۶). نمونه‌ای از مقره ضد مه

### ج- مقره‌های بشقابی آنرودینامیک

از این نوع مقره در مناطق با وزش باد دائمی یا سرعت بالا استفاده می‌شود زیرا سطح بادگیر کمتری نسبت به دیگر مقره‌ها دارد و در زنجیر مقره انحراف زاویه کمتری داشته و نیروهای وارده به برج کم می‌شود. به علت فاصله خزشی کم این نوع مقره، جهت حفظ ایزولاسیون در زنجیر مقره از تعداد بیشتری از این نوع مقره استفاده می‌شود که اینکار باعث افزایش هزینه می‌شود. نمایی از این نوع مقره در شکل (۴-۶) نشان داده شده است.



۱- Aerofoil Insulator

شکل (۶-۴). نمایی از مقره آئرو دینامیکی

#### د- مقره بشقابی زنگوله‌ای<sup>۱</sup>

از این نوع مقره‌ها در مناطق با آلودگی بسیار زیاد و با بارش باران کم استفاده می‌گردد. شیارهای زیرین مقره سبب افزایش فاصله خزشی آن می‌گردد و همچنین شیب زیاد سطحی آنها سبب دفع آلودگی با کمترین میزان بارش باران می‌شود. در شکل (۶-۵) مقره بشقابی زنگوله‌ای نشان داده شده است.



شکل (۶-۵). نمونه‌ای از مقره بشقابی زنگوله‌ای

#### ۳-۲-۶ مقره‌های مهار

در خطوط توزیع برای پایه‌هایی که در ابتدا و انتهای خط قرار می‌گیرند و یا برای پایه‌های زاویه‌ای و یا در شرایطی که زمین سست یا غیر مستحکم باشد، از سیم مهار استفاده می‌شود. این سیم مهار از یک طرف به رأس تیر متصل می‌شود و از طرف دیگر به وسیله مهار و صفحه مهار در داخل زمین محکم می‌شود.

برای ایمنی و حفاظت بیشتر در برابر برق‌دار شدن احتمالی سیم مهار، در وسط سیم مهار از مقره مهار استفاده می‌شود و سیم مهار از دو طرف به مقره مهار متصل می‌شود. این مقره به گونه‌ای است که اگر شکسته شود، سیم مهار رها نمی‌شود و البته بایستی تحمل نیروی کششی سیم مهار را داشته باشد. نمونه‌ای از مقره مهار در شکل (۶-۶) نشان داده شده است.

۲- Bell type insulator



شکل (۶-۶). نمونه‌ای از مقره مهاری

#### ۴-۲-۶ مقره‌های یکپارچه یا استوانه‌ای

این مقره‌ها به صورت یک زنجیره استوانه‌ای و به صورت یکپارچه از جنس چینی یا مواد ترکیبی<sup>۱</sup> ساخته می‌شوند و به دو طرف انتهایی آن‌ها دو کلاهک فلزی با سیمان مخصوص اتصال داده شده است. قطر استوانه عایق متناسب با مقاومت مکانیکی مورد نیاز انتخاب می‌شود. از این مقره بعضاً در خطوط انتقال استفاده می‌شود. این مقره‌ها در مقایسه با مقره‌های آویزان بشقابی از وزن بسیار کمتری برخوردارند (وزن مقره‌های آویزان در یک زنجیره بیشتر به خاطر وزن کلاهکهای فلزی آن است) و لذا از نظر اقتصادی ارزانتر هستند. ولی نقطه ضعف اصلی آنها امکان خراب شدن کامل مقره در اثر یک قوس الکتریکی یا ضربه مکانیکی بیرونی است. در صورتی که در مقره‌های بشقابی تمام زنجیره از بین نمی‌رود. در زنجیره‌های بشقابی اگر یک مقره دچار ترک شود تا مدت زیادی بقیه آنها می‌توانند ولتاژ خط و همچنین بار مکانیکی خط را تحمل نمایند. در ولتاژهای بالا می‌توان دو یا سه مقره استوانه‌ای را به هم متصل نمود. نوع ساخته شده از مواد ترکیبی (کامپوزیت) این نوع مقره‌ها دارای خاصیت آب‌گریزی<sup>۲</sup> بوده و آب و آلودگی بر روی سطح مقره پخش نمی‌شود، بلکه این آلودگی و رطوبت به صورت مجزا روی سطح باقی می‌ماند و چون تمام سطح مرطوب نمی‌شود، می‌توان مسیر خزشی آن را کوتاه نمود. جریان نشستی این نوع مقره‌ها خیلی کم است و در مناطق با آلودگی زیاد

۱- Composite Material

۲- Hydrophobicity

روی سطح آن‌ها جرقه زده نمی‌شود و نیازی به تمیز کردن هم ندارند. این مقره‌ها ضمن داشتن استقامت مکانیکی بالا از وزن بسیار کمی برخوردارند. در شکل (۶-۷) نمونه‌ای از این نوع مقره‌ها نشان داده شده است.



شکل (۶-۷). نمونه‌ای از مقره استوانه‌ای

### ۵-۲-۶ مقره‌های چرخی

از این نوع مقره‌ها در خطوط فشار ضعیف استفاده می‌شود. این مقره‌ها توسط تسمه فلزی U شکل به نام اتریه و پین به پایه‌های خطوط توزیع هوایی بسته می‌شوند و سیم هوایی شبکه بر روی شیار چرخی مانند مقره قرار می‌گیرد. این مقره‌ها به عنوان مقره کششی نیز استفاده می‌شود و در دو نوع یک شیار و دو شیار موجود می‌باشند. در شکل (۶-۸) نمونه‌ای از نوع مقره‌ها آورده شده است.



شکل (۶-۸). نمونه‌ای از مقره چرخی

### ۶-۳ انواع آرایش مقره‌ها در زنجیره

مقره‌های بشقابی با توجه به نیروی مکانیکی و سطوح ولتاژ به صورت واحد و کلی ساخته می‌شوند. با توجه به سطح ولتاژ و نیروی مکانیکی مورد نیاز، نحوه اتصال و تشکیل زنجیره مقره‌ها متفاوت و به شرح زیر است.

#### ۶-۳-۱ زنجیره مقره آویزی تک<sup>۱</sup>

نحوه نصب زنجیره مقره آویزی تک به صورت شکل (۶-۹) می‌باشد. این نوع زنجیره مقره در مواردی استفاده می‌شود که اختلاف کشش مکانیکی وارده بر زنجیره مقره توسط هادی‌های دو سمت، ناچیز باشد و همچنین سرعت باد در منطقه زیاد نباشد. معمولاً در هادی‌های تک سیمه یا دو سیمه از این نوع زنجیره مقره استفاده می‌شود.

۱- I-Type string (suspension type string)



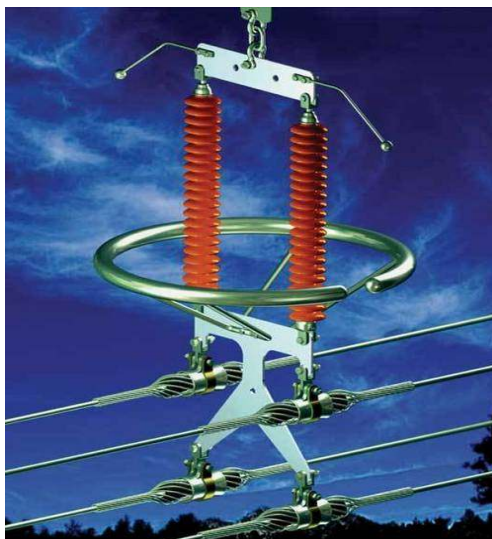
شکل (۶-۹). نمونه‌ای از زنجیره مقره آویزی (غیر کششی I شکل)

### ۲-۳-۶ زنجیره مقره آویزی چندتایی<sup>۱</sup>

در این نوع زنجیره مقره مطابق شکل (۶-۱۰) جهت افزایش استقامت مکانیکی زنجیره، حداقل از دو ردیف زنجیره مقره موازی هم در هر فاز، استفاده می‌شود. معمولاً در خطوط با هادی‌های چندتایی (باندل) از این ساختار استفاده می‌شود. با توجه به نیروی استقامت مکانیکی مورد نیاز برای کل زنجیره (مثلاً در خطوط با طول اسپن بلند)، تعداد ردیف زنجیره مقره موازی در هر فاز تعیین می‌گردد.

<sup>۱</sup>- Multi I-Type string



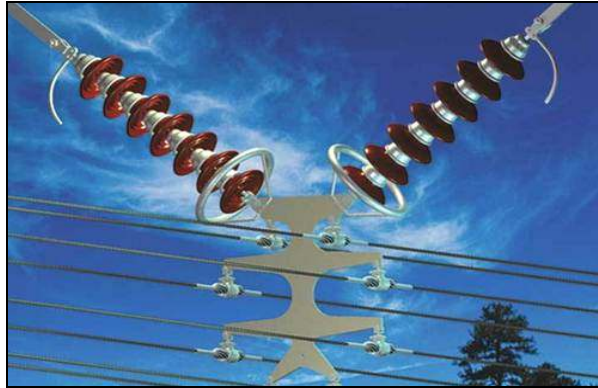


شکل (۶-۱۰). نمونه‌ای از زنجیره مقره دوتایی آویزی (غیر کششی دوتایی)

### ۳-۳-۶ زنجیره مقره آویزی V شکل<sup>۱</sup>

در مناطق با سرعت باد زیاد، نوسانات بوجود آمده بر روی زنجیره مقره و در نتیجه انحراف بیش از حد آن می‌تواند منجر به کاهش فاصله ایزولاسیون گردیده و در نتیجه بروز قوس الکتریکی و اختلال در برق رسانی را به دنبال داشته باشد. جهت جلوگیری از این مشکلات در این مناطق از زنجیری مقره V شکل استفاده می‌شود تا از نوسانات زنجیره مقره جلوگیری شود. در زنجیره مقره V شکل معمولاً طول دو بازو برابر می‌باشد. اما در مواردی که به دلیل زاویه خط نیاز به بازوهای متفاوت باشد، می‌توان با کاهش و یا افزایش طول یک بازو به این حالت دست پیدا کرد. معمولاً زاویه بین دو بازو در زنجیره مقره بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه می‌باشد. شکل (۶-۱۱) نمونه‌ای از زنجیره مقره دوتایی V شکل را نشان می‌دهد.

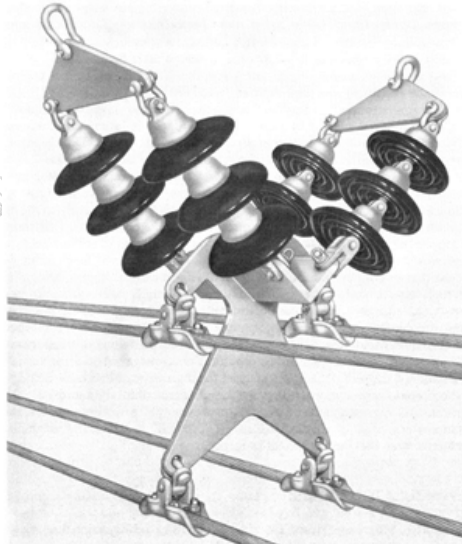
۲- V-Type String



شکل (۶-۱۱). نمونه‌ای از زنجیره مقره دوتایی V شکل

#### ۴-۳-۶ زنجیره مقره آویزی V شکل چندتایی<sup>۱</sup>

برای تامین استقامت مکانیکی بیشتر، زنجیره مقره V شکل می‌تواند به صورت چندتایی نصب شود. در شکل (۶-۱۲) نمونه‌ای از زنجیره مقره V شکل دوتایی نشان داده شده است.

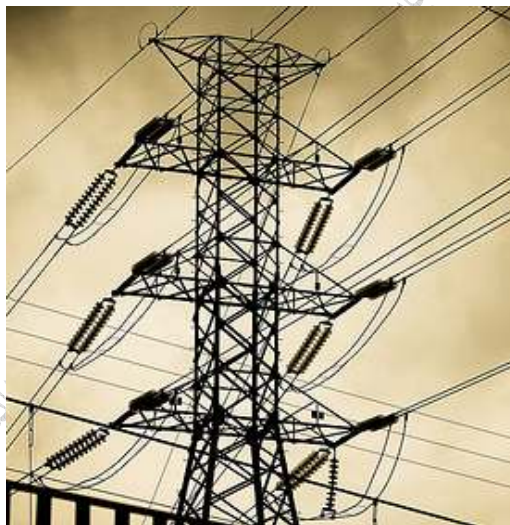


۱- Multi V-type string

شکل (۶-۱۲). نمونه‌ای از زنجیره مقره V شکل دوتایی

### ۵-۳-۶ زنجیره مقره کششی<sup>۱</sup>

زنجیره مقره کششی، مستقیماً تحت نیروی کشش سیم قرار داشته و کلیه بارهای وارده به هادی، مستقیماً از طریق زنجیره مقره به دکل منتقل می‌شود. این نوع زنجیره مقره همانند زنجیره مقره آویزی یا V شکل، می‌تواند به صورت تکی یا چندتایی مورد استفاده قرار گیرد. تعداد ردیفهای زنجیره در این نوع زنجیره مقره بستگی به تعداد هادی‌های هر فاز، شرایط بارگذاری و نوع مقره دارد. شکل (۶-۱۳) نمونه‌ای از این نوع زنجیره مقره را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۱۳). نمونه‌ای از زنجیره مقره کششی

### ۶-۳-۶ زنجیره مقره جامپر<sup>۲</sup>

۱- Tension type string

۲- Jumper insulator string

این زنجیره مقره، سیم جامپر ارتباطی فازها را در برج کششی به صورت آویزی نگه داشته و از حرکت جانبی آن جلوگیری می‌کند. نیروی مکانیکی وارده به این نوع زنجیره مقره چندان قابل ملاحظه نیست. در شکل (۶-۱۴) نمونه‌ای از زنجیره مقره جامپر ارائه شده است.



شکل (۶-۱۴). نمونه‌ای از زنجیره مقره جامپر

#### ۴-۶ مشخصات عمومی مقره‌ها

مقره‌ها با توجه به بهره برداری در سطوح ولتاژی و شرایط مختلف محیطی دارای مشخصات الکتریکی و مکانیکی گوناگونی می‌باشند. کارکرد درست مقره‌ها در این شرایط ملزم به احراز حداقل مقادیر مشخصات الکتریکی و مکانیکی است که در ذیل به آن اشاره شده است.

#### الف- مشخصات ابعادی

ارتفاع موثر، قطر و فاصله خزشی از جمله موارد مهم در انتخاب مقره‌های خطوط انتقال هوایی می‌باشد. ارتفاع موثر شامل ارتفاع عایق به همراه براق آلات متصل به آن می‌باشد، که در تعیین فاصله هوایی مجاز هادی خط موثر می‌باشد. کوتاهترین فاصله بین دو قسمت فلزی مقره که از روی سطح مقره عبور می‌کند، فاصله خزشی نامیده می‌شود و در تعیین حداقل فاصله خزشی بین هادی و برج در شرایط آلودگی محیط کاربرد دارد.

#### ب- مقاومت مکانیکی

یکی از وظایف مقره‌ها تحمل وزن کل هادی خط می‌باشد، که با قرار گرفتن برف و یخ روی سطح هادی این امر نیز تشدید می‌گردد. در این شرایط مقره باید از استقامت مکانیکی لازم برخوردار باشد. در خطوط با سطوح ولتاژ بالاتر به دلیل افزایش قطر و تعداد هادی‌های خط و همچنین افزایش طول اسپن خط انتقال، مقره‌ها بایستی از استحکام مکانیکی بیشتری برخوردار باشند.

#### ج- ولتاژ جرقه ۵۰٪ ناشی از ضربه صاعقه

مقدار ولتاژ ضربه استاندارد که در شرایط آزمایش استاندارد سبب وقوع جرقه بر روی سطح مقره با احتمال ۵۰٪ می‌گردد، در شرایط خشک و مرطوب بر روی مقره اعمال می‌گردد.

#### د- ولتاژ جرقه در فرکانس قدرت

حداقل ولتاژی که بر روی سطح مقره سبب وقوع جرقه می‌گردد. مقدار این ولتاژ برای هر سطح ولتاژ در شرایط خشک و مرطوب براساس استاندارد تعیین می‌گردد.

#### ه- ولتاژ استقامت ضربه صاعقه در شرایط خشک

حداکثر ولتاژ ضربه صاعقه استاندارد که توسط مقره در شرایط خشک قابل تحمل باشد.

#### و- ولتاژ استقامت فرکانس قدرت

حداکثر ولتاژ فرکانس قدرتی که مقره قادر به تحمل آن در شرایط خشک و مرطوب باشد.

### ۵-۶ تعیین فواصل فازی هادی‌های خطوط هوایی

انتخاب مقره‌های خطوط انتقال بر اساس تنش‌های الکتریکی (انواع اضافه ولتاژها) و مکانیکی (وزن هادی، سرعت وزش باد و تراکم یخ بر روی هادی) در سیستم قدرت انجام می‌شود. بطور کلی تعیین نوع و تعداد مقره‌های یک زنجیره مقره در سه مرحله

انجام می‌گیرد. انتخاب بر اساس معیارهای الکتریکی همانند اضافه ولتاژهای داخلی و خارجی و آلودگی صورت می‌گیرد. در مرحله دوم بر اساس معیارهای مکانیکی نوع مقره تعیین می‌گردد. در مرحله آخر بایستی معیارهای اقتصادی نیز در کنار معیارهای فنی قرار گیرد تا انتخاب نهایی زنجیره مقره بر اساس یک طرح بهینه فنی و اقتصادی صورت گیرد.

### ۱-۵-۶ محاسبه فاصله فازی بر مبنای اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه

صاعقه به صورت برخورد مستقیم به هادی‌های فاز یا برخورد با سیم محافظ یا زمین اطراف، اضافه ولتاژهایی را در خطوط انتقال هوایی القا می‌کند. عموماً در طراحی سیستم‌های حفاظت از صاعقه، هادیهای خطوط انتقال توسط سیم محافظ تا حدود بسیار زیادی از برخورد مستقیم صاعقه حفاظت می‌شوند. لذا در انتخاب مقره‌ها بر اساس اضافه ولتاژهای خارجی تنها اضافه ولتاژ ناشی از برخورد صاعقه به سیم محافظ که منجر به جرقه برگشتی بر روی خط می‌گردد در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا تعداد قطعی‌های ناشی از نرخ قوس برگشتی ( $BFR^1$ ) با توجه به اهمیت خط و سطح کرومیک منطقه و مسائل اقتصادی تعیین می‌گردد. ابتدا تعداد متوسط صاعقه‌های برخورد کننده در  $100$  کیلومتر از خط انتقال در طول یک سال ( $N_L$ ) توسط رابطه (۶-۱) بدست می‌آید.

$$N_L = \frac{N_g (28h^{0.6} + S_g)}{10} \quad (6-1)$$

در این رابطه  $S_g$  فاصله بین دو سیم محافظ بر حسب متر می‌باشد. اگر خط شامل یک سیم محافظ باشد، مقدار  $S_g$  صفر در نظر گرفته می‌شود.  $h$  ارتفاع متوسط برج بر حسب متر، توسط رابطه (۶-۲) محاسبه می‌گردد.

$$h = h_g - 2f_g/3 \quad (6-2)$$

۱- Back flashover rate

$h_g$  ارتفاع سیم محافظ بر حسب متر و  $f_g$  شکم سیم محافظ بر حسب متر می‌باشد. در اینجا فرض بر این است که سیم‌های محافظ بر روی دکل نصب شده‌اند، که نحوه محاسبه ارتفاع و مکان نصب سیم‌های محافظ در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.  $N_g$  چگالی صاعقه‌های برخورد کننده به زمین بر حسب تعداد برخوردها به هر کیلومتر مربع در سال، توسط رابطه (۳-۶) تعیین می‌گردد.

$$N_g = 0.04T_d^{1.25} \quad (۳-۶)$$

$T_d$  سطح کرومیک مسیر خط انتقال بر حسب تعداد روزهای وقوع رعدوبرق در سال می‌باشد که توسط نقشه ایزوکرومیک سالانه بدست می‌آید. سپس احتمال وقوع جریان‌های بزرگتر از  $I_c$  که منجر به وقوع پدیده قوس برگشتی در خط انتقال می‌گردد توسط رابطه (۴-۶) محاسبه می‌گردد.

$$P(I_c) = \frac{BFR}{0.6N_L} \quad (۴-۶)$$

مقدار جریان  $I_c$  نیز توسط رابطه (۵-۶) تعیین می‌گردد.

$$I_c = 31 \left( \frac{1 - P(I_c)}{P(I_c)} \right)^{\frac{1}{2.6}} \quad (۵-۶)$$

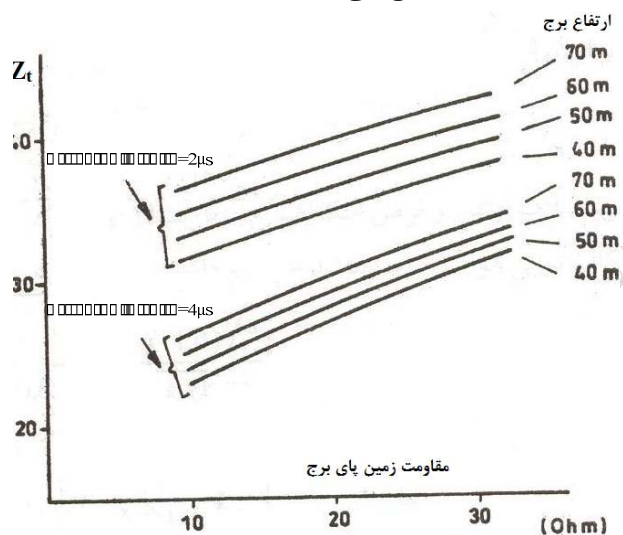
ولتاژ جرعه بحرانی اضافه ولتاژ صاعقه ( $CFOV^1$ ) بر حسب کیلوولت و با توجه به مقدار جریان بحرانی  $I_c$  توسط رابطه (۶-۶) به صورت تقریبی محاسبه می‌گردد.

$$CFO_L = \frac{1}{K_{wf}} \left[ (1 - C) Z_t I_c + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} K_{PF} E_m \right] \quad (۶-۶)$$

$CFOV$  ولتاژ جرعه بحرانی صاعقه متناظر با جریان بحرانی  $I_c$  بر حسب کیلوولت،  $I_c$  جریان بحرانی بر حسب کیلوآمپر،  $K_{wf}$  ضریب تصحیح شکل موج استاندارد (۱/۳۱)،  $C$  ضریب کوپلینگ بین سیم محافظ با هادی فاز (۰/۳)،  $K_{PF}$  ضریب اصلاح ولتاژ فرکانس قدرت خط (۰/۸۳)،  $E_m$  حداکثر ولتاژ فرکانس قدرت خط و  $Z_t$  امپدانس موجی برج بر حسب اهم می‌باشد. مقدار  $Z_t$  به مقاومت زمین پای دکل، ارتفاع

۱- Critical flashover voltage

متوسط برج‌ها و نوع ولتاژ اعمالی بستگی دارد، که مقدار آن با توجه به عوامل ذکر شده از شکل (۶-۱۵) قابل استخراج می‌باشد.



شکل (۶-۱۵). امیدانس موجی برج

با در نظر گرفتن استقامت عایقی فاصله هوایی در برابر امواج صاعقه با پلاریته منفی برابر با  $60.5 \text{ kV/cm}$ ، حداقل فاصله هوایی مجاز از رابطه (۶-۷) محاسبه می‌گردد.

$$S_L = \frac{CFO_L}{605\delta} \quad (۶-۷)$$

$\delta$  ضریب چگالی هوا می‌باشد که از رابطه  $\delta = e^{\frac{-H}{8150}}$  تعیین می‌گردد و  $H$  ارتفاع خط انتقال بر حسب متر می‌باشد.

سپس با توجه به ارتفاع موثر مقرر انتخاب شده، تعداد واحدهای مقرر مورد نیاز برای رسیدن به حداقل فاصله هوایی مجاز تعیین می‌گردد.

## ۲-۵-۶ محاسبه فاصله فازی بر مبنای اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی

برای تعیین دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی از توزیع آماری آنها به دلیل مشخص نبودن زمان دقیق کلیدزنی استفاده می‌گردد. تجربیات جدید نشان داده است که استفاده از



توزیع آماری در تعیین اضافه ولتاژ کلیدزنی، بهینه‌سازی فنی اقتصادی بهتری نسبت به استفاده از دامنه قطعی اضافه ولتاژ کلیدزنی به‌مراه دارد. پارامترهای مورد نیاز در توزیع آماری،  $E_2$  (ولتاژی که احتمال وقوع اضافه ولتاژهای با دامنه بیشتر از آن ۲٪ می‌باشد) و  $\sigma_0$  (انحراف معیار استاندارد) می‌باشند، که عموماً در فرآیند شبیه‌سازی تعیین می‌گردند. اما می‌توان مقدار  $E_2$  را از مقادیر شکل (۵-۵) نیز استخراج نمود که در این صورت مقدار  $\sigma_0$  از رابطه (۸-۶) محاسبه می‌گردد.

$$\sigma_0 = 0.17(E_2 - 1) \quad (۸-۶)$$

در ابتدا باید میزان قطعی‌های مطلوب در خط به ازای تعداد دفعات کلیدزنی مشخص ( $SSFOR^1$ ) تعیین گردد. این معیار به اهمیت خط، سطح ایزوکرونیک منطقه و هزینه مورد نیاز جهت کنترل اضافه ولتاژها بستگی دارد.

سپس معیار هماهنگی عایقی کلیدزنی که به صورت نسبت  $E_2/V_3$  بیان می‌گردد، تعیین می‌شود.  $V_3$  ولتاژ استقامت عایقی است که به اندازه ۳ برابر انحراف معیار کمتر می‌باشد. معیار هماهنگی عایقی کلیدزنی به میزان  $SSFOR$ ، منحنی اضافه ولتاژ در طول خط، توزیع آماری اضافه ولتاژ و توزیع آماری استقامت عایقی خط انتقال بستگی دارد. این نسبت را می‌توان با استفاده از رابطه (۹-۶) محاسبه نمود.

$$\frac{V_3}{E_2} = k_f k_G \quad (۹-۶)$$

مقادیر  $k_f$  و  $k_G$  توسط جداول (۱-۶) و (۲-۶) تعیین می‌گردند.

جدول (۱-۶). تعیین کمیت  $k_f$

$\sigma_f/CFO=0/0.7$	$\sigma_f/CFO=0/0.5$	$\sigma_f/CFO=0/0.2$	$n_c$
0.79	0.85	0.94	1
0.8578	0.909	0.9716	5
0.8826	0.9189	0.9691	10
0.9057	0.9353	0.9756	20
0.9341	0.9553	0.9833	50
0.9545	0.9693	0.9887	100

۱- Switching surge flashover rate

۰/۹۷۴۲	۰/۹۸۲۷	۰/۹۹۳۷	۲۰۰
۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۹۶	۰/۹۹۹۸	۵۰۰
۱/۰۱۷۸	۱/۰۱۱۸	۱/۰۰۴۲	۱۰۰۰
۱/۰۳۶	۱/۰۲۳۶	۱/۰۰۸۴	۲۰۰۰

جدول (۲-۶). تعیین کمیت  $k_g$

$\sigma_0/E_2=0.15$	$\sigma_0/E_2=0.1$	$\sigma_0/E_2=0.07$	$\sigma_0/E_2=0.05$	بر حسب تعداد قطعی در هر ۱۰۰ km
۰/۸۱۸۱	۰/۸۷۸۷	۰/۹۱۵۱	۰/۹۳۹۴	۱۰
۰/۸۸۴۱	۰/۹۲۲۸	۰/۹۴۵۹	۰/۹۶۱۴	۵
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱
۱/۰۴۰۹	۱/۰۲۷۳	۱/۰۱۹۱	۱/۰۱۳۶	۰/۵
۱/۰۸۹۷	۱/۰۵۹۸	۱/۰۴۱۹	۱/۰۲۹۹	۰/۲
۱/۱۲۳۶	۱/۰۸۲۴	۱/۰۵۷۷	۱/۰۴۱۲	۰/۱

در جدول (۲-۶)،  $n_e$  تعداد دکلهای معادل خط انتقال با در نظر گرفتن منحنی ولتاژ خط و تعداد واقعی برجهای خط می باشد که توسط رابطه (۱۰-۶) تعیین می گردد.

$$\begin{cases} n_e = \frac{0.4}{1-\gamma} \cdot \frac{\sigma_f}{CFO} \cdot n & \text{if } \gamma < 1 - 0.4 \frac{\sigma_f}{CFO} \\ n_e = n & \text{if } \gamma \geq 1 - 0.4 \frac{\sigma_f}{CFO} \end{cases}$$

$$\gamma = \frac{E_s}{E_R} = 1 - 0.15(E_2 - 1) \quad (10-6)$$

$n$  تعداد برجهای خط انتقال،  $E_s$  ولتاژ ابتدای خط و  $E_R$  ولتاژ انتهای خط می باشد.  $\gamma$  ضریب توزیع ولتاژ در خط انتقال را نشان می دهد، که رابطه ارائه شده برای آن یک رابطه تقریبی می باشد و در صورت استفاده از شبیه سازی مقدار واقعی آن جایگزین می گردد. همچنین نسبت  $\sigma_f/CFO$  برای خطوط انتقال هوایی عموماً ۰/۰۵ در نظر گرفته می شود.

پس از تعیین مقدار  $V_3$  توسط رابطه (۶-۱۱)، مقدار CFO از رابطه (۶-۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$CFO = \frac{V_3}{1 - 3\sigma_f/CFO} \quad (۶-۱۱)$$

در نهایت مقدار حداقل فاصله هوایی مورد نیاز ناشی از اضافه ولتاژ کلیدزنی توسط رابطه (۶-۱۲) تعیین می‌گردد.

$$S_s = \frac{8}{\frac{0.96(3400)K_g \delta^m}{CFO} - 1} \quad (۶-۱۲)$$

$S_s$  حداقل فاصله هوایی جهت بدست آوردن SSFOR مطلوب،  $\delta$  ضریب چگالی هوا که همانند حالت اضافه ولتاژ صاعقه محاسبه می‌گردد.  $k_g$  ضریب شکل فاصله هوایی می‌باشد که برای فازهای میانی برج (داخل پنجره برج)  $1/25$  و برای فازهای کناری برج  $1/45$  در نظر گرفته می‌شود. مقدار  $m$  نیز توسط رابطه (۶-۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$m = 1.25G_0(G_0 - 0.2)$$

$$G_0 = \frac{CFO}{500S_s} \quad (۶-۱۳)$$

برای محاسبه حداقل فاصله هوایی مجاز از روش تکرار استفاده می‌گردد. همچنین برای تعیین تعداد مقره‌ها،  $1/0.5$  تا  $1/1$  برابر  $S_s$  بر ارتفاع موثر هر واحد مقره تقسیم می‌گردد، تا SSFOR مطلوب حاصل گردد.

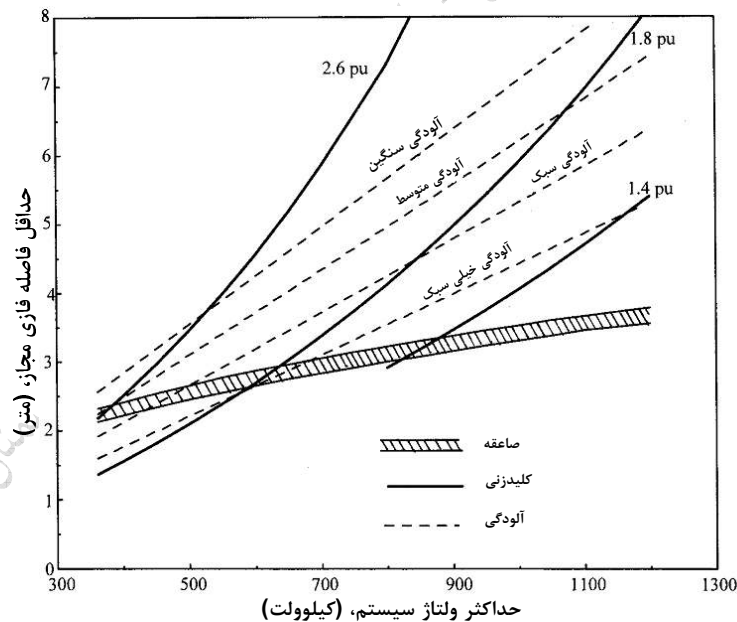
### ۳-۵-۶ محاسبه فاصله فازی بر مبنای آلودگی محیط

در مناطق آلوده استقامت عایقی مقره‌های بیرونی بشدت تحت تاثیر میزان آلودگی منطقه قرار دارد. با تجمع آلودگی بر روی سطح مقره و همراه شدن رطوبت، یک لایه رسانا بر روی سطح مقره تشکیل می‌گردد که حتی در ولتاژ نامی خط انتقال نیز ممکن است به پدیده جرقه سطحی منجر گردد.

در استاندارد IEC ۶۰۸۱۵ مناطق گوناگون از لحاظ میزان آلودگی به ۵ دسته تقسیم شده‌اند که برای هر یک از آنها میزان فاصله خزشی لازم تعیین گردیده است. در نهایت تعداد مقره‌ها با تقسیم فاصله خزشی کل بر فاصله خزشی هر واحد مقره تعیین می‌گردد. تاثیر آلودگی بر تعیین تعداد مقره‌های خطوط انتقال در فصل هشتم بطور کامل بررسی شده است.

در مناطق با آلودگی سنگین، افزایش فاصله خزشی از لحاظ اقتصادی موثر نمی‌باشد. لذا از روش‌های دیگری جهت کاهش میزان تاثیر آلودگی مثل استفاده از مقره‌های مخصوص، شستشوی دوره‌ای، گریسکاری مقره‌ها و استفاده از مقره‌های با لعاب نیمه هادی و کاپوزیتی می‌توان بهره برد.

در شکل (۶-۱۶) نمودار کلی فاصله فازی مجاز برای سطوح ولتاژی مختلف بر اساس صاعقه، کلیدزنی و آلودگی نشان داده شده است.



شکل (۶-۱۶). مقایسه حداقل فاصله فازی در سطوح ولتاژی مختلف

در شکل (۶-۱۶)، محاسبات مربوط به صاعقه شامل یک نوار می‌باشد، که نوار بالایی بر اساس چگالی صاعقه (Ng)، ۴ برخورد در کیلومتر مربع در سال و نوار پایینی بر اساس چگالی صاعقه ۸ برخورد در سال انجام گرفته است. همان طور که مشاهده می‌گردد تقریباً در تمامی سطوح ولتاژ فاصله فازی مورد نیاز ناشی از صاعقه ثابت می‌باشد. البته با افزایش ولتاژ بدلیل افزایش ارتفاع برج فاصله فازی اندکی افزایش می‌یابد. تعیین فاصله فازی مجاز برای اضافه ولتاژ کلیدزنی با سه مقدار متفاوت E<sub>2</sub> انجام گرفته است. مقدار ۲/۶ pu با در نظر گرفتن کلیدهای قدرت بدون مقاومت وصل، ۱/۸ pu با کلید قدرت با مقاومت وصل و ۱/۴ pu شامل کلید قدرت با یک یا دو مقاومت وصل به همراه سیستم کنترل در هنگام بسته شدن می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد در سطوح بالای ولتاژ معیار اصلی تعیین فاصله مجاز فازی، اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی می‌باشد.

### ۶-۶ حفاظت خطوط در برابر اصابت مستقیم صاعقه

خطوط انتقال انرژی بخاطر گستردگی زیاد و عبور از مناطق جغرافیایی مختلف، بیش از ۹۰ درصد اصابت‌های صاعقه به سیستم قدرت را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که بیش از ۷۰٪ وقفه‌های خطوط انتقال ناشی از اثرات صاعقه می‌باشد. از اینرو برای خطوطی که احتمال برخورد صاعقه قابل ملاحظه باشد و یا برای خطوط مهم، باید هادیهای فاز را بوسیله سیم‌های زمین در برابر اصابت مستقیم صاعقه محافظت نمود. این سیم‌ها در بالای هادیهای فاز قرار گرفته و از برخورد صاعقه به هادیهای فاز جلوگیری می‌نمایند.

صاعقه می‌تواند هم بصورت مستقیم و هم بصورت غیر مستقیم روی خطوط اثر بگذارد. اصابت‌های مستقیم صاعقه عامل مهمی برای خروج خطوط از مدار می‌باشند. حفاظت خطوط در برابر اصابت مستقیم صاعقه به روش‌های زیر قابل انجام می‌باشد:

- ۱- استفاده از سیم‌های محافظ با سیستم زمین خوب و بکارگیری تجهیزات با سطوح عایقی مناسب و بالا.
- ۲- استفاده از برقگیرها در مکانهای مناسب.

۳- انجام هر دو روش مذکور.

مهمترین روش محافظت خطوط انتقال انرژی در برابر اصابت مستقیم صاعقه، استفاده از سیم محافظ می‌باشد. با استفاده از سیم محافظ، احتمال برخورد مستقیم صاعقه به فازهای خطوط کمتر شده و عملاً استقامت الکتریکی سیستم بالا می‌رود. هر چه بازوی<sup>۱</sup> فازهای دکل کوتاهتر باشد احتمال برخورد صاعقه به آن کمتر می‌شود و هر چه طول اسپن (فاصله بین دو دکل مجاور) کوتاهتر باشد، دامنه اضافه ولتاژهای القایی روی فاز نیز کمتر می‌شود. وقتی که خطوط انتقال دارای سیم محافظ باشند آنگاه با برخورد صاعقه به سیم محافظ، عملاً بخش زیادی از ولتاژ صاعقه روی دکل اعمال می‌شود. اما مقاومت اهمی پای دکل باعث بالا رفتن ولتاژ صاعقه می‌شود. بنابراین باید سیستم زمین پای دکلها به نحوی اجرا شود که دارای حداقل امپدانس موجی باشد.

وظیفه سیستم حفاظت از صاعقه جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز می‌باشد. اما از نظر اقتصادی چندان بصره نمی‌باشد که خطوط انتقال در برابر تمام جریان‌های صاعقه حفاظت گردد. لذا یک حداقل جریانی به عنوان جریان بحرانی (I<sub>c</sub>) در نظر گرفته می‌شود که جریان‌های کمتر از آن سبب بروز جرعه بر روی عایق خطوط انتقال نمی‌گردد. این جریان از رابطه (۶-۱۷) محاسبه می‌گردد.

$$I_c = \frac{2(CFO)}{Z_c} \quad (6-17)$$

در این رابطه، Z<sub>c</sub> امپدانس مشخصه خط انتقال و CFO ولتاژ جرعه بحرانی عایق خطوط که مقدار تقریبی آن ۶۰۵S برحسب کیلوولت می‌باشد. S کوچکترین فاصله بین هادی و دکل خط انتقال برحسب متر می‌باشد. بر این اساس نرخ قوس ناشی از خطای حفاظت از صاعقه (SFFOR<sup>۱</sup>) به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$SFFOR = 2N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_c f(I) dI \quad (6-18)$$

SFFOR بر حسب تعداد جرعه در هر کیلومتر در سال، L طول خط انتقال بر حسب کیلومتر، D<sub>c</sub> سطح حفاظت نشده است که در شکل (۶-۱۷) نشان داده شده، f(I)

<sup>۱</sup>-Shielding failure flashover rate

احتمال وقوع صاعقه‌ای با جریان  $I$  می‌باشد و  $I_m$  حداکثر جریانی است که به ازای آن هیچ صاعقه‌ای به خط انتقال برخورد نمی‌کند.

در شکل (۶-۱۷) عامل مهم در تعیین محل نصب سیم محافظت کننده از صاعقه، مقدار ارتفاع سیم  $h$  و زاویه حفاظت  $\theta_p$  می‌باشد. برای حفاظت کامل خط انتقال ( $SFFOR=0$ ) مقدار  $I_m$  برابر با  $I_c$  قرار داده می‌شود. در این حالت زاویه حفاظت کامل از رابطه تقریبی (۶-۱۹) تعیین می‌گردد.

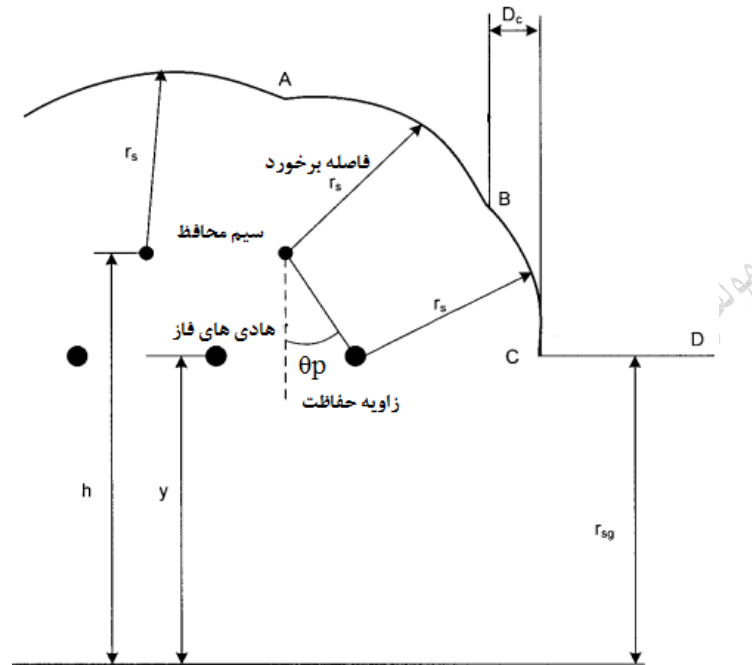
$$\theta_p = \frac{r_g}{r_c} - \frac{1}{r_c} \left( \frac{h+y}{2} \right) \quad (۶-۱۹)$$

$h$  ارتفاع سیم از زمین بر حسب متر،  $y$  ارتفاع هادی فاز از زمین بر حسب متر و  $r_g$  فاصله برخورد صاعقه با زمین و  $r_s$  فاصله برخورد صاعقه با سیم محافظ یا هادی‌های فاز بر حسب متر می‌باشد. نحوه محاسبه این فواصل در مراجع مختلفی ارائه شده است که به عنوان نمونه می‌توان به رابطه (۶-۲۰) که توسط Brown & Whitehead و رابطه (۶-۲۱) که توسط IEEE-92 ارائه شده‌اند اشاره نمود.

$$\begin{aligned} r_g &= 6.4I^{0.75} \\ r_c &= 7.1I^{0.75} \end{aligned} \quad (۶-۲۰)$$

$$\begin{aligned} r_c &= 10I^{0.65} \\ r_g &= Cr_c \end{aligned} \quad \begin{cases} C=0.36+0.17\ln(43-h) & \text{if } h \leq 40 \text{ m} \\ C=40 & \text{if } h > 40 \text{ m} \end{cases} \quad (۶-۲۱)$$

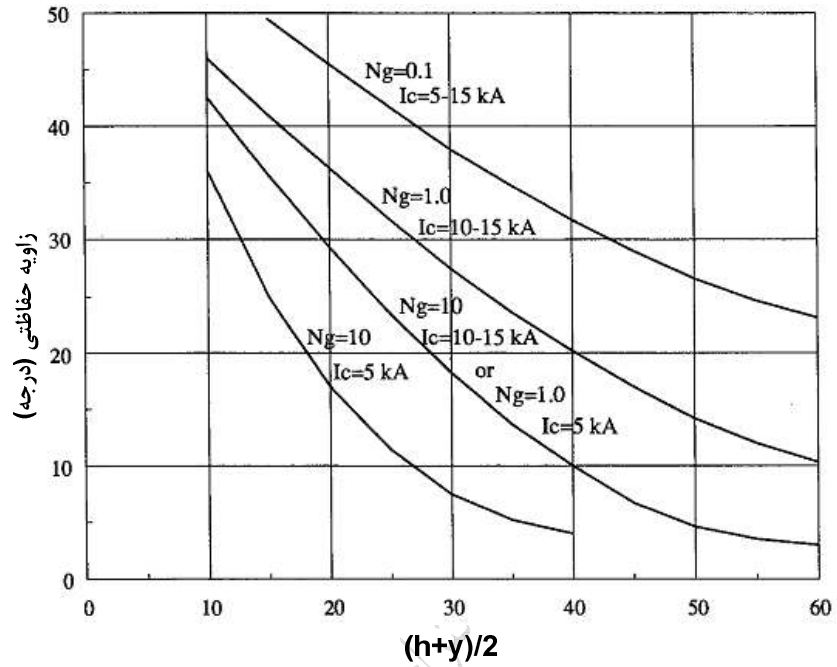
$I$  جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر می‌باشد.



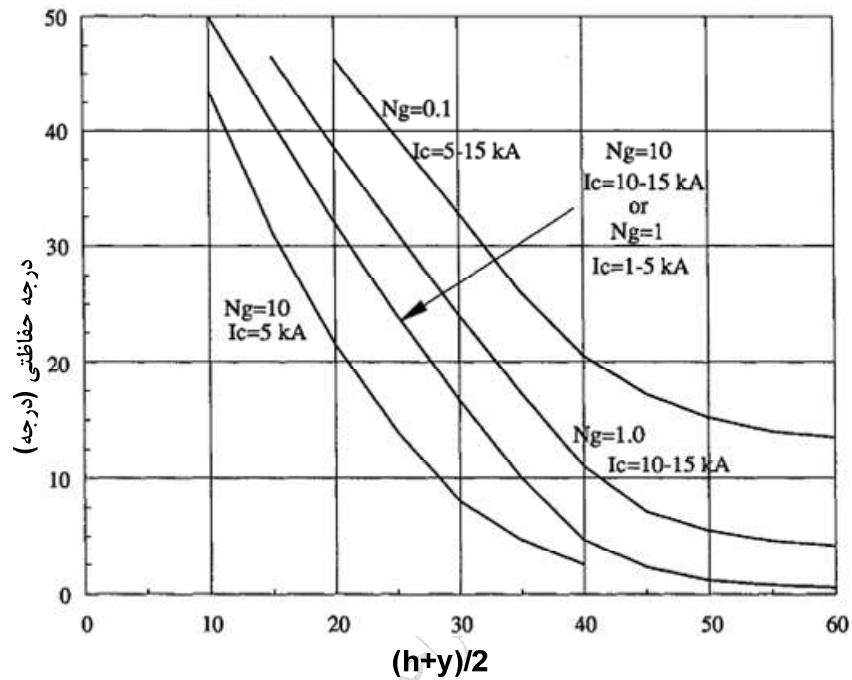
شکل (۶-۱۷). نمای هندسی سیستم حفاظت از خطوط انتقال

هدف اصلی در انتخاب تعداد و مکان نصب سیم محافظ جلوگیری از برخورد مستقیم صاعقه به خط می‌باشد که باید مسائل اقتصادی نیز مد نظر قرار گیرند. لذا در ابتدا مقداری برای SFFOR در نظر گرفته می‌شود و سپس زاویه حفاظتی سیمهای محافظ بر اساس آن تعیین می‌گردند. عموماً برای خطوط با اهمیت مقدار SFFOR برابر ۰/۰۵ جرعه در هر کیلومتر در سال در نظر گرفته می‌شود. در شکل‌های (۶-۱۸) و (۶-۱۹) تغییرات زاویه حفاظتی بر اساس تغییرات ارتفاع هادی فاز و سیم محافظ به ازای SFFOR برابر ۰/۰۵ نشان داده شده است. از این مقادیر به عنوان مقادیر ابتدایی در محاسبه مکان دقیق سیم محافظ استفاده می‌گردد.





شکل (۶-۱۸). زوایای حفاظتی برای  $SFFOR=0/05$  براساس روابط Brown & Whitehead با فرض صاعقه عمودی



شکل (۶-۱۹). زوایای حفاظتی برای  $SFFOR=0/05$  براساس روابط IEEE-92 با فرض صاعقه عمودی

## ۷-۶ برقگیر خطوط انتقال

در خطوطی که عملاً دستیابی به BFR مطلوب با تعیین سطح عایقی مناسب امکان‌پذیر نباشد از برقگیر خطوط استفاده می‌گردد. به عنوان مثال در زمین‌هایی که امکان نصب سیستم زمین کانتریپوز برای دکل وجود ندارد و برای خطوط عبوری از روی رودخانه‌ها و همچنین خطوط تغذیه کننده بارهای حساس، از برقگیرها جهت کاهش BFR استفاده می‌گردد.

در خطوط انتقال انرژی اضافه ولتاژ در پی بروز قوس برگشتی در هادی‌های فاز منتشر گشته و پس از طی مسافت ۲ الی ۳ کیلومتر در دو انتهای خطوط با دامنه بالا به پست‌ها وارد گردیده و ایزولاسیون داخلی تجهیزات فشارقوی را تهدید می‌نماید. بهترین

روش جهت کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرا و جلوگیری از اتصالی‌های تکفاز به زمین در انتهای خطوط و در هنگام برقدار کردن آنها، استفاده از برقگیرها می‌باشد که موجهای اضافه ولتاژ گذرای کلیدزنی و اضافه ولتاژهای صاعقه را به زمین تخلیه کنند. مشخصات برقگیرها و نحوه انتخاب آنها در فصل چهارم بطور کامل توضیح داده شده که شامل برقگیرهای خطوط انتقال نیز می‌باشد. اما چند نکته برای تعیین برقگیر مناسب خط وجود دارد که عبارتند از:

- هدف از نصب برقگیر شامل کاهش اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی و یا کاهش صاعقه و یا هر دو.
- ولتاژ نامی سیستم و اضافه ولتاژهای موقتی سیستم.
- حفاظت سیستم؛ برای سیستم‌های بدون محافظ که بالاترین فاز به عنوان محافظ استفاده می‌شود، بالاترین برقگیر، با بقیه برقگیرها متفاوت است.
- چگالی ضربه صاعقه.
- کیفیت زمین دکل.
- میزان جریان خطا موجود در سیستم.

معمولاً برقگیرهای پست در ابتدای خطوط و در محل ورود آنها به پست و قبل از سکسیونر و کلید قدرت نصب شده و مستقیماً به خط متصل می‌باشند. اما برقگیرهای خطوط انتقال انرژی، خصوصیات متمایزی از برقگیرهای معمول در پست‌های فشارقوی دارند که عبارتند:

- ۱- برقگیرهای خطوط باید از توانایی تحمل انرژی حرارتی قابل ملاحظه‌ای نسبت به برقگیرهای نصب شده در پست‌ها برخوردار باشند.
- ۲- در خطوط انتقال انرژی، برقگیرهای نصب شده در دکل‌ها، مستقیماً تحت تأثیر تخلیه الکتریکی جوی متشکل از چندین ضربه صاعقه هستند و تخلیه موج صاعقه به طور متوالی و مکرر در آنها اتفاق می‌افتد. لذا ظرفیت حرارتی برقگیرهای خطوط باید نسبت به برقگیرهای پست بیشتر باشد. در پست‌ها موج اضافه ولتاژ در پی انتشار در خطوط، وارد پست گردیده و معمولاً در برخورد اولیه با دامنه بسیار بالا توسط برقگیر پست تخلیه می‌گردد. در خطوط دارای سیم محافظ، صاعقه‌های با جریان پایین در حدود ۵ تا ۱۵ کیلوآمپر به هادی‌های فاز برخورد می‌کنند. لذا برقگیرهای این خطوط باید توانایی حرارتی عبور این جریان‌ها را دارا باشند. اما

- برقگیرهای خطوط فاقد سیم محافظ به دلیل برخورد صاعقه‌های با جریان بالا باید توانایی حرارتی بسیار بالاتری را دارا باشند.
- ۳- ظهور اضافه ولتاژهای موقت در خطوط انتقال انرژی بسیار معمول بوده، ولتاژ خطوط بر خلاف پستهای فشارقوی در فاصله وسیع افزایش می‌یابد. در پی بروز خطای فاز به زمین در فازهای سالم افزایش ولتاژ باعث بروز پدیده‌های فرورزونانس و رزونانس بین فازها و سایر تجهیزات می‌گردد، بطوریکه برقگیرهای فشارقوی نصب شده در خطوط را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد به همین علت این برقگیرها تنها به منظور تخلیه موجهای رعد و برق پیش بینی شده‌اند و تحت اضافه ولتاژهای قطع و وصل عمل نمی‌نمایند.
- ۴- در پستهای فشارقوی در صورت از کار افتادن برقگیرها، شرایط اتصال کوتاه در آنها ظاهر گردیده، بلافاصله شین متصل به برقگیرها با به کار افتادن رله‌های حفاظتی مربوط به آن از مدار خارج می‌گردد. در خطوط انتقال انرژی با سوختن هر یک از برقگیرها، خط برای مدت طولانی تا هنگام تعویض برقگیر آسیب دیده، قطع می‌گردد. یافتن برقگیر معیوب و تعویض آن نیز به سهولت میسر نمی‌باشد. به منظور رفع مشکل فوق برقگیر با فاصله هوایی بطور سری پیش بینی می‌گردد.
- ۵- برقگیرهای نصب شده در خطوط انتقال انرژی از مقاومت مکانیکی کاملاً مشابه زنجیره مقرر برخوردار می‌باشند.
- ۶- وزن برقگیرهای نصب شده در خطوط به منظور امکان نصب در دکلها محدود می‌باشد.

از جمله کاربردهای برقگیر خط می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- افزایش کیفیت توان و عملکرد کلی خط.
- پشتیبانی حفاظت سیم محافظ.
- فراهم نمودن حفاظت خطوط بدون سیم محافظ.
- حذف سیم محافظ و افزایش فضا روی دکل.
- کاهش نیاز به مقاومت پای دکل پایینتر (برای زمینهایی که کاهش مقاومت پای دکل به سختی امکان پذیر باشد).

- حفاظت در برابر جرقه برگشتی.
- محافظت ایمن در برابر ضربه های القایی ایجاد شده توسط صاعقه های نزدیک.
- کاهش تاثیرات کلیدزنی.
- نصب آسان و اقتصادی بودن.
- کاهش استقامت عایقی تجهیزات خط.
- کاهش تعداد قطع کلیدها.



شکل (۶-۲۰). برقگیر خطوط انتقال نیرو

## ۸-۶ سؤال و تمرین

۱. انواع مقره‌های مورد استفاده در خطوط هوایی انتقال نیرو را نام ببرید.
۲. فاصله هوایی فازی برای یک خط انتقال ۴۰۰ kV با BFR ۰/۰۵ و عدد ایزوکرونیک ۲۰ روز و مشخصات زیر را محاسبه کنید.  
ارتفاع سیم محافظ: ۷۰ متر، فلش سیم محافظ: ۱۰ متر، مقاومت زمین پای دکل: ۲۰ اهم، زمان پیشانی موج صاعقه: ۲ μs، ارتفاع خط از سطح دریا ۲۰۰۰ متر.
۳. تفاوت برقگیرهای خطوط انتقال هوایی و برقگیرهای پست را بیان کنید.
۴. معایب سیم محافظ هوایی را بیان نمایید.
۵. روشهای کاهش جرقه برگشتی بر روی زنجیره مقره خطوط را توضیح دهید.

## فصل ۷

### هماهنگی عایقی در پستهای فشارقوی

#### ۷-۱ مقدمه

بدلیل وجود تجهیزات فراوان در پست‌ها نسبت به خطوط انتقال، احتمال وقوع خطا در پست بسیار بیشتر از خطوط انتقال می‌باشد. لذا معیار قابلیت اطمینان در پست، متوسط زمانی بین خطاها ( $MTBF^1$ )، حدود ده برابر خطوط انتقال در نظر گرفته می‌شود. همچنین وجود تجهیزات با عایق‌های بازگشت‌ناپذیر همانند ترانسفورماتور، استفاده از برقگیرها را در پست‌ها اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. همچنین در پست گازی ( $GIS^2$ ) به دلیل مدت زمان زیاد جهت تعمیر تجهیزات آن معیار قابلیت اطمینان آن تقریباً ۴ برابر پست‌های با عایق هوا می‌باشد. در محاسبه هماهنگی عایقی پست‌ها در ابتدا نیاز به بررسی دامنه اضافه ولتاژها و محاسبه تابع توزیع احتمال آنها با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه می‌باشد. سپس با توجه به استاندارد عایقی تجهیزات، سطح عایقی مطلوب انتخاب می‌گردد. به منظور پایین آوردن سطح استقامت عایقی تجهیزات و کاهش هزینه‌های عایقی، از

---

۱- Mean time between failure

۲- Gas insulated substation

سیستم حفاظت بیرونی در برابر صاعقه (حفاظت مستقیم بوسیله صاعقه گیرها) و حفاظت داخلی (حفاظت ثانویه بوسیله برقگیرها و سایر تجهیزات حفاظتی) استفاده می‌شود.

## ۲-۷ انتخاب عایق پستهای فشارقوی

علاوه بر اینکه کلیه تجهیزات فشارقوی پستهای معمولی دارای مقره می‌باشند تعداد زیادی مقره از انواع مختلف نیز جهت اتصال قسمت‌های مختلف برقدار به نگهدارنده‌ها، پایه‌ها و یا قسمت‌های زمین شده (باسبارها و سایر ارتباط دهنده‌ها) و بعضاً نیز جهت ایزوله نمودن فازهای مختلف از یکدیگر در پستهای با عایق هوا مورد نیاز می‌باشد. این مقره‌ها اصولاً بمنظور ایجاد فاصله عایقی از یکطرف و ارتباط مکانیکی قسمت‌های برقدار با پایه‌های نگهدارنده و یا گنتری‌ها بکار گرفته می‌شوند.

مقره‌های مورد استفاده در پستهای فشارقوی عمدتاً دو نوع مقره‌های اتکائی<sup>۱</sup> و مقره‌های زنجیره‌ای (کششی و آویزی) می‌باشند.

مقره‌های زنجیره‌ای که از تعدادی واحد مقره بشقابی و اتصالات مربوطه تشکیل می‌گردد بصورت کششی و آویزی جهت اتصال هادی‌های رشته‌ای به سازه‌ها و نگهداری هادی‌های قابل انعطاف (شینه‌های نرم) مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً به منظور حفاظت مقره‌ها و اتصالات آنها در مقابل جرقه اضافه ولتاژها از شاخک‌های برقگیر استفاده می‌شود. این شاخکها بایستی قادر باشند که قوس را از مقره‌ها دور کنند و همچنین در ولتاژهای بالا همانند حلقه کرونا<sup>۲</sup> به تقسیم مناسب ولتاژ روی زنجیره مقره کمک کنند.

اتصالات مربوط به زنجیره مقره‌ها بایستی قادر به تحمل جریانهای اتصال کوتاه باشند و در غیر اینصورت بایستی توسط اتصالات با هادی‌های قابل انعطاف از مدار

۱- Post type insulator

۲- Corona ring



حذف شوند.

زنجیره مقره‌های کششی که برای مهار کردن هادیهای قابل انعطاف به گنتری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند متناسب با کشش سیم‌ها می‌توانند بصورت زنجیره‌های تکی، دو تایی و سه تایی باشند. در صورت استفاده از زنجیره‌های بیش از دوتایی بایستی توجه شود که اولاً بار مکانیکی بین زنجیره‌ها بصورت مساوی تقسیم شود و ثانیاً در صورت پاره شدن یک زنجیره مقره، زنجیره‌های سالم باقیمانده بایستی بتوانند نیروهای لازم را تحمل نمایند.

زنجیره‌های آویزی که برای نگهداری هادیها در فواصل مشخصی از گنتری‌ها بکار می‌روند نیز به صورت زنجیره‌های چندتایی و یا به صورت زنجیره‌های دوتایی V شکل به منظور جلوگیری از نوسانات پاندولی<sup>۱</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مقره‌های اتکایی جهت نگهداری شین‌های سخت (مفتولی یا لوله‌ای) استفاده می‌گردد. این مقره‌ها برای نگهداشتن شین‌های فشارقوی و دیگر تجهیزات به کار برده می‌شوند. برای ولتاژهای پایین معمولاً از مقره‌های نگهدارنده یکپارچه استفاده می‌شود ولی برای ولتاژهای بالا می‌توان از طریق اتصال چند واحد مقره به یکدیگر به کمک پیچ استفاده نمود. این مقره‌ها به شکل استوانه‌ای چینی توپر یا توخالی ساخته می‌شوند که برای تأسیساتی که مقره باید نیروی مکانیکی بیشتری را تحمل کند از نوع توخالی آن استفاده می‌شود. زیرا نوع توپر آن فقط با یک قطر معین و محدودی قابل ساخت است. ولی برای افزایش استقامت الکتریکی نوع توخالی آن، سوراخ داخل مقره‌ها به صورت افقی یا عمودی نصب می‌شوند. در شکل (۷-۱) نمونه‌ای از مقره‌های اتکایی نشان داده شده است.

---

۱- Swing



شکل (۷-۱). نمونه‌ای از مقره اتکایی پستها

این مقره‌ها بایستی از نظر الکتریکی طوری انتخاب گردند تا پارامترهایی از قبیل طول مستقیم، طول خزش و سطح عایقی و همچنین حداکثر مقدار تداخل در امواج رادیویی، با مقادیر مشخص شده برای پست در مرحله هماهنگی عایقی تطابق داشته باشند. همچنین استقامت مکانیکی لازم برای تحمل نیروهای ناشی از باد، یخ و زلزله را دارا باشند.

به همراه این مقره‌ها بخصوص در ولتاژ بالا از وسایلی مانند حلقه متعادل کننده میدان الکتریکی (حلقه کرونا) در طرف برقدار مقره استفاده شود تا توزیع یکنواخت ولتاژ و همچنین کاهش کرونا حاصل شود.

گاهی نیز از برقگیرها به عنوان مقره اتکایی استفاده می‌گردد. در این صورت این نوع برقگیرها پس از ترکیدن مقاومت‌های غیرخطی نیز قادر به تحمل تنشهای مکانیکی و الکتریکی خواهند بود. همچنین این عمل سبب افزایش بیشتر فضای پست و هزینه نصب مقره اتکایی نیز می‌گردد.

نوع دیگری از عایق‌ها که در پست‌ها استفاده می‌گردند پوشینگ‌ها (مقره‌های

عبوری) می‌باشند. مقره‌های عبوری برای سرهای ورود و خروج دستگاه‌های فشارقوی، جهت جلوگیری از ایجاد جرقه بین ولتاژ خط عبوری و بدنه دستگاه به کار می‌روند. این مقره‌ها به صورت لایه‌های استوانه‌ای به کار می‌روند و نسبت به محیط مورد استفاده، شکل مقره‌های عبوری متفاوت است. ساده‌ترین آن‌ها استوانه‌های هم محور است. فضای داخل این استوانه‌ها، معمولاً توسط گاز یا مایع عایق پر می‌شود. در ترانسفورماتورها، پوشینگ‌ها حاوی روغن هستند. ارتفاع آن‌ها بر حسب میزان ولتاژ و ارتفاع از سطح زمین متفاوت است. به منظور جلوگیری از افزایش حرارت در پوشینگ‌ها از فیبرهای عایقی در سر پوشینگ‌ها استفاده می‌شود زیرا فیبر هدایت حرارتی بهتری نسبت به چینی دارد. نمونه‌هایی از این نوع مقره‌ها در شکل (۲-۷) نشان داده شده‌اند.



شکل (۲-۷). نمونه‌هایی از مقره‌های عبوری

### ۳-۷ تعیین فواصل فازی در پستها

هماهنگی عایقی در پستها شامل تعیین اضافه ولتاژهای مجاز سیستم در پست برای تمام تجهیزات موجود و همچنین تعیین استقامت عایقی تجهیزات و در نهایت انتخاب استقامت عایقی مورد نیاز با توجه به معیار عملکرد مطلوب می‌باشد. بدلیل وجود تجهیزات مختلفی در پستها و همچنین اتصال خطوط مختلف هوایی، بایستی تمام اضافه ولتاژها با توجه به مکان قرارگیری تجهیزات (فاصله تجهیز تا برقگیر) مد نظر قرار گیرند.

بطور اجمالی مراحل تعیین هماهنگی عایقی را می‌توان در چهار مرحله زیر خلاصه نمود.

(۱) تعیین اضافه ولتاژهای ممکن.

(۲) تعیین ولتاژ هماهنگی عایقی با توجه به ولتاژ استقامت عایقی بر اساس معیار عملکرد مطلوب

(۳) تعیین ولتاژ مورد نیاز با در نظر گرفتن شرایط محیطی و شرایط انجام تست استاندارد در ولتاژ هماهنگی عایقی مرحله قبل

(۴) تعیین ولتاژ استقامت استاندارد بر اساس جداول ارائه شده در استاندارد برای هر تجهیز

عایق تجهیزات مورد استفاده در پستها شامل دو نوع عایق برگشت پذیر (بریکرها و مقره‌های اتکایی) و عایق‌های برگشت‌ناپذیر (عایق داخلی ترانسفورماتورها و بوشینگ‌ها) می‌باشد. برای تعیین ولتاژ هماهنگی عایقی عایق‌های برگشت‌ناپذیر بدلیل محدودیت در انجام تست‌های عایقی، از روش قطعی استفاده می‌شود و برای عایق‌های برگشت‌پذیر می‌توان هم از روش قطعی و هم از روش آماری استفاده کرد ولی روش مرسوم روش آماری می‌باشد.

۷-۳-۱ محاسبه فواصل هوایی فاز به زمین

فواصل هوایی فاز-زمین باید به نحوی انتخاب شوند که اضافه ولتاژهای با دامنه کوچکتر از سطح استقامت عایقی تجهیزات موجب بروز قوس الکتریکی نشوند. در سیستمهای با گروه ولتاژی C ( $300kV \leq V_m \leq 765kV$ )، فاصله هوایی بین بخشهای برقدار و زمین شده به کمک رابطه (۷-۱) محاسبه می‌گردد.

$$d_c = 3.63 \times 10^{-5} \left( \frac{V_{WS}}{k} \right)^{1.667} \quad (7-1)$$

$d_c (m)$ : فاصله هوایی فاز به زمین

$V_{WS} (kV)$ : ولتاژ استقامت کلیدزنی فاز به زمین

$k$ : ضریب فاصله هوایی، که مقدار آن برای آرایش الکترودهای مختلف فاز به زمین از جدول (۷-۱) قابل استخراج می‌باشد.

جدول (۷-۱). ضریب فاصله هوایی ( $k$ ) برای آرایش الکترودهای مختلف فاز به زمین

ضریب آرایش الکترودهای ( $k$ )		نوع آرایش
با مقره	در هوا	
۱	۱	سوزن - صفحه زمین شده
-	۱/۰۵ - ۱/۲	سوزن - تکیه گاه
-	۱/۱۵	هادی - صفحه زمین شده
۱/۱۵	۱/۲	هادی - پنجره
۱/۳	۱/۳ - ۱/۳۵	هادی - تکیه گاه
-	۱/۳ - ۱/۴	سوزن - سوزن
-	۱/۴	هادی - هادی
-	۱/۵۵	هادی - بازو
۱/۷۵	۱/۶۵ - ۱/۹	هادی - سوزن

فاصله هوایی فاز به زمین در پستهای با گروه ولتاژی B ( $52kV \leq V_m \leq 300kV$ ).

با توجه به ولتاژ موج صاعقه با پلاریته مثبت محاسبه می‌گردد. در این پستها با توجه به سطح ولتاژ LIWL<sup>۱</sup> انتخاب شده، فواصل هوایی فاز به زمین به کمک رابطه (۲-۷) تعیین می‌گردد.

$$d_c = \frac{1.04 \times V_{WL}}{E_S} \quad (۲-۷)$$

$d_c$  (m): فاصله هوایی فاز به زمین

$V_{WL}$  (kV): ولتاژ استقامت موج صاعقه

$E_S$  (kV/m): شدت میدان متوسط، مقادیر  $E_S$  با توجه به آرایش الکترودها

مطابق جدول (۷-۲) تعیین می‌شود.

جدول (۷-۲). مقادیر  $E_S$  برحسب آرایش الکترودها

$E_S$ (kV/m)	آرایش الکترودها
۴۸۰	سوزن - صفحه زمین شده
۵۵۰	هادی - زمین: هادی - هادی: حلقه - حلقه

موج صاعقه بر روی تجهیزات پست توسط دو عامل ایجاد می‌گردد. خطای زمین کردن در خطوط منتهی به پست که به دلیل دامنه کم جریان‌های صاعقه، ولتاژ تولید شده توسط آنها بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ ولتاژ جرعه بحرانی (CFO) خط می‌باشد. دلیل دیگر، وقوع جرعه برگشتی بر روی زنجیره مقره‌های خطوط نزدیک به پست می‌باشد، که بدلیل دامنه ولتاژهای بالاتر این امواج، بین ۸۵٪ تا ۱۲۰٪ مقدار CFO، معیار اصلی تولید اضافه ولتاژ خارجی در تجهیزات پست می‌باشند. برای تعیین دامنه این اضافه ولتاژها از معیار قابلیت اطمینان پستها، متوسط زمان بین خرابی تجهیزات، بر حسب سال استفاده می‌گردد. برای پست‌های با عایق هوا مقدار MTBF بین ۵۰ تا ۲۰۰ سال و برای پست‌های گازی به دلیل نیاز به زمان

۱- Lightning Insulation withstand level

بیشتری برای تعمیرات در صورت خرابی، بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ سال در نظر گرفته می‌شود.

دامنه اضافه ولتاژ گذرا در ترمینال تجهیزات پست ناشی از موج صاعقه ورودی از رابطه (۳-۷) محاسبه می‌گردد.

$$V_t = V_a + 2 \frac{S\tau}{n} \quad (3-7)$$

در این رابطه،  $V_t$  ولتاژ دو سر تجهیز،  $V_a$  ولتاژ باقیمانده برگیر،  $n$  تعداد خطوط متصل به پست،  $\tau$  زمان عبور موج از برگیر به تجهیز مورد حفاظت و  $S$  شیب موج ولتاژ ورودی به پست می‌باشد. مقدار شیب موج ولتاژ از رابطه (۴-۷) تعیین می‌گردد.

$$S = \frac{K_c}{d + S_1} \quad (4-7)$$

در رابطه مذکور،  $S_1$  طول اسپین خط بر حسب متر و  $K_c$  ضریب ثابت کرونا (مطابق جدول (۳-۷)) می‌باشند.

جدول (۳-۷). مقادیر ضریب  $K_c$

$K_c$ (kV-km)/ $\mu$ s	تعداد هادی باندل خط در هر فاز
۷۰۰	۱
۱۰۰۰	۲
۱۷۰۰	۳ یا ۴
۲۵۰۰	۶ یا ۸

$d$  فاصله محل برخورد صاعقه به دکل تا پست می‌باشد که بر حسب میزان BFR و MTBF به صورت زیر تعیین می‌گردد.

$$d = \frac{1}{n(BFR)(MTBF)} \quad (5-7)$$

نرخ وقوع جرقه برگشتی (BFR) در طراحی خط مشخص می‌شود که در فصل قبل به آن پرداخته شده است. در نهایت ولتاژ استقامت موج صاعقه ( $V_{wl}$ ) برای ترانسفورماتور و بوشینگ از روابط (۶-۷) حاصل می‌گردد.

$$\begin{aligned} BIL = V_{wl} &= 1.15 V_t / 1.1 & \text{if } t_f < 3\mu\text{s} \\ BIL = V_{wl} &= 1.15 V_t & \text{if } t_f \geq 3\mu\text{s} \end{aligned} \quad (۶-۷)$$

همچنین ولتاژ استقامت موج صاعقه برای تجهیزات دیگر پست توسط رابطه (۷-۷) تعیین می‌گردد.

$$\begin{aligned} BIL = V_{wl} &= V_a & \text{if } V_t / V_a \leq 1.15 \\ BIL = V_{wl} &= V_a / 1.15 & \text{if } V_t / V_a > 1.15 \end{aligned} \quad (۷-۷)$$

در کلیه روابط مذکور می‌توان با تقسیم نمودن مقدار  $V_{wl}$  بر  $\delta$  اثر تغییرات ارتفاع یا چگالی هوا را نیز در نظر گرفت. سپس مقدار فاصله هوایی مجاز با استفاده از رابطه (۷-۲) قابل محاسبه خواهد بود. البته مطابق استاندارد IEEE 1313-2 از تقسیم مقدار  $V_{wl}$  بر شدت میدان متوسط (به مقدار  $60.5 \text{ (kV/m)}$ ) فاصله هوایی مجاز حاصل می‌گردد. به طور کلی فواصل هوایی فاز به زمین در پستهای فشارقوی شامل موارد زیر می‌باشد:

- فاصله هوایی میان هادیها و گنتری‌ها (بیشتر در گنتریهای مربوط به خطوط ورودی و شینای داخلی با آرایش الکترودی هادی - صفحه)
- فاصله هوایی میان هادی و زمین (این فاصله بطور معمول بخاطر وجود پایه‌های فلزی و مقره‌های اتکائی به قدر کافی بزرگ خواهد بود).
- فاصله هوایی میان بخشهای برقدار تجهیزات و گنتریها (غالباً برای فاصله بین تجهیزات خطوط ورودی (برقگیر، ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژ و غیره) با گنتری‌ها مطرح می‌باشد)

براساس استاندارد IEC 60071 مقادیر حداقل فواصل هوایی برحسب آرایش الکترودها و استقامت عایقی مورد نظر، مطابق جداول (۴-۷) و (۵-۷) می‌باشد.



جدول (۷-۴). حداقل فاصله هوایی فاز- زمین طبق استاندارد ۲-۶۰۰۷۱ IEC  
(در سطوح ولتاژی  $1(kV) \leq U_m \leq 245(kV)$ )

حداقل فاصله هوایی فاز- زمین (mm)		ولتاژ نامی استقامت موج صاعقه LIWL (kV)
هادی - سازه	میله - سازه	
-	۶۰	۴۰
-	۹۰	۶۰
-	۱۲۰	۷۵
-	۱۶۰	۹۵
-	۲۲۰	۱۲۵
-	۲۷۰	۱۴۵
-	۳۲۰	۱۷۰
-	۴۸۰	۲۵۰
-	۶۳۰	۳۲۵
-	۹۰۰	۴۵۰
-	۱۱۰۰	۵۵۰
-	۱۳۰۰	۶۵۰
-	۱۵۰۰	۷۵۰
۱۶۰۰	۱۷۰۰	۸۵۰
۱۷۰۰	۱۹۰۰	۹۵۰
۱۹۰۰	۲۱۰۰	۱۰۵۰
۲۲۰۰	۲۳۵۰	۱۱۷۵
۲۴۰۰	۲۶۰۰	۱۳۰۰
۲۶۰۰	۲۸۵۰	۱۴۲۵
۲۹۰۰	۳۱۰۰	۱۵۵۰
۳۱۰۰	۳۳۵۰	۱۶۷۵
۳۳۰۰	۳۶۰۰	۱۸۰۰
۳۶۰۰	۳۹۰۰	۱۹۵۰
۳۹۰۰	۴۲۰۰	۲۱۰۰

جدول (۷-۵). حداقل فاصله هوایی فاز- زمین طبق استاندارد ۲-۶۰۷۱-۲ IEC  
(سطح ولتاژی  $U_m > 245(kV)$ )

حداقل فاصله هوایی فاز- زمین (mm)		ولتاژ استقامت کلیدزنی SIWL (kV)
میله - سازه	هادی - سازه	
۱۹۰۰	۱۶۰۰	۷۵۰
۲۴۰۰	۱۸۰۰	۸۵۰
۲۹۰۰	۲۲۰۰	۹۵۰
۳۴۰۰	۲۶۰۰	۱۰۵۰
۴۱۰۰	۳۱۰۰	۱۱۷۵
۴۸۰۰	۳۶۰۰	۱۳۰۰
۵۶۰۰	۴۲۰۰	۱۴۲۵
۶۴۰۰	۴۹۰۰	۱۵۵۰

مطابق جداول مذکور، برای هر سطح استقامت کلیدزنی و یا صاعقه، یک فاصله هوایی تحت شرایط محیطی استاندارد و آرایش الکتروود مربوطه تعیین شده است. لذا مقدار فاصله هوایی بزرگتر بین فواصل هوایی فاز به زمین مربوط به یک سطح استقامت عایقی صاعقه و کلیدزنی مشخص، به عنوان فاصله هوایی مطلوب انتخاب می‌شود.

با مشخص شدن حداقل فاصله هوایی فاز به زمین و مشخص بودن طول هر واحد مقره می‌توان تعداد مقره‌ها را از تقسیم حداقل فاصله هوایی و طول موثر هر واحد مقره بدست آورد. باید توجه داشت که تعدادی از مقره‌ها در دو طرف زنجیره مقره، تحت پوشش شاخکهای جرعه گیر قرار داشته و بایستی به تعداد مقره‌های بدست آمده به طریق فوق افزوده گردند. مقره‌های بشقابی معمولاً در انواع مختلف با طول مستقیم، طول خزش و استقامت مکانیکی مختلف وجود دارند و می‌توان یک نوع آنها را از کاتالوگ مربوطه بر اساس مشخصات مکانیکی انتخاب کرد و سپس تعداد مورد نیاز را بدست آورد.

در انتخاب مقره‌های اتکائی نیز می‌توان از واحدهای استاندارد (بسته به سطح ولتاژ از یک یا چند واحد) استفاده نمود. ابتدا بایستی از نظر مکانیکی (نیروهای ناشی از اتصال کوتاه، زلزله، سرعت باد و ترکیب‌های مختلف بارهای مکانیکی) واحدهای مزبور را انتخاب نمود و سپس با توجه به سطح ولتاژ هر واحد، تعداد مورد نیاز را تعیین کرد. در اتصال واحدهای مقره اتکائی به یکدیگر باید تحمل مکانیکی کل مجموعه در نظر گرفته شود.

علاوه بر فاصله مجاز هوایی محاسبه شده یک فاصله ایمنی بین قسمت‌های برقدار و زمین در نظر گرفته می‌شود. فاصله ایمنی به حداقل فاصله لازم بین قسمت‌های برقدار تجهیز از زمین و یا وسیله دیگری که بایستی کار روی آن انجام شود اطلاق می‌گردد. بعبارت دیگر فاصله ایمنی، حداقل فاصله لازم بین قسمت‌های برقدار و حدود نواحی کاری می‌باشد که جهت ایمنی پرسنل در هنگامی که برای انجام کار از نواحی کاری استفاده می‌کنند باید رعایت گردد.

### ۲-۳-۷ محاسبه فواصل هوایی فاز به فاز

در سیستم‌های با گروه ولتاژی C ( $300kV \leq V_m \leq 765kV$ )، فاصله هوایی فاز به فاز به کمک رابطه تجربی (۷-۸) محاسبه می‌گردد. برای سیستم‌های با گروه ولتاژی B ( $52kV \leq V_m \leq 300kV$ )، فواصل هوایی فاز به فاز را می‌توان از رابطه (۷-۲) بدست آورد.

$$d_{pp} = \frac{8.67 \times V_{WSP}}{3400 \times K_p - 1.084 \times V_{WSP}} \quad (7-8)$$

$d_{pp}$  (m): فاصله هوایی فاز به فاز

$V_{WSP}$  (kV): ولتاژ استقامت کلیدزنی فاز به فاز

$K_p$ : ضریب آرایش الکترودهای فاز به فاز مطابق جدول (۷-۶) می‌باشد.

جدول (۶-۷). ضریب  $K_p$  برای آرایش الکترودهای مختلف فاز به فاز

نوع آرایش	ضریب آرایش الکترودهای ( $K_p$ )
سوزن - سوزن	۱/۶۲
حلقه - حلقه	۱/۸
هادیهای متقاطع	۱/۶۵
شینهای مستقر بر روی پایه	۱/۵
سوزن - هادی	۱/۴۵
هادی - هادی	۱/۶۲

فواصل هوایی فاز به فاز در پستهای فشارقوی به سه شکل کلی زیر مشاهده می-شوند:

- فاصله هوایی میان هادیها؛ بین فازهای خطوط ورودی و شینها (آرایش الکترودهای هادی- هادی)
- فاصله میان هادی و تجهیزات؛ بین هادیهای خطوط ورودی و شینها و تجهیزات زیر آنها ( سکسیونر، کلیدهای قدرت، ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان)
- فاصله میان قطبهای تجهیزات؛ بین قطبهای سکسیونرها و کلیدهای قدرت همچنین بر طبق استاندارد IEC ۶۰۰۷۱ میزان فاصله هوایی فاز به فاز بر طبق ولتاژ استقامت کلیدزنی (SIWL) در جدول (۷-۷) ارائه شده است. میزان ولتاژ استقامت فاز به زمین با یک ضریب به ولتاژ استقامت فاز به فاز در هر سطح ولتاژی تبدیل گردیده است.

جدول (۷-۷). حداقل فاصله فاز به فاز طبق استاندارد IEC ۶۰۰۷۱-۲

ولتاژ استقامت کلیدزنی فاز به زمین (kV)	نسبت ولتاژ استقامت کلیدزنی فاز به فاز به استقامت کلیدزنی فاز به زمین	میله - هادی (mm)	هادی - هادی (mm)
۷۵۰	۱/۵	۲۶۰۰	۲۳۰۰
۸۵۰	۱/۵	۳۱۰۰	۲۶۰۰
۸۵۰	۱/۶	۳۴۰۰	۲۹۰۰
۹۵۰	۱/۵	۳۶۰۰	۳۱۰۰
۹۵۰	۱/۷	۴۳۰۰	۳۷۰۰
۱۰۵۰	۱/۵	۴۲۰۰	۳۶۰۰
۱۰۵۰	۱/۶	۴۶۰۰	۳۹۰۰
۱۱۷۵	۱/۵	۵۰۰۰	۴۲۰۰
۱۳۰۰	۱/۷	۷۴۰۰	۶۱۰۰
۱۴۲۵	۱/۷	۹۰۰۰	۷۲۰۰
۱۵۵۰	۱/۶	۹۴۰۰	۷۶۰۰

#### ۴-۷ حفاظت پستها در برابر اصابت مستقیم صاعقه

اگر صاعقه به پست‌های شبکه اصابت کند، روی کلیه تجهیزات پست اثر می‌گذارد و چنانچه عایق تجهیزات استقامت لازم را نداشته باشد، قوس ایجاد شده باعث تخریب تجهیزات پست می‌گردد. بنابراین پست‌ها نیز باید به طور موثر در برابر اضافه ولتاژها حفاظت شوند. حفاظت پست‌ها در برابر صاعقه معمولاً به صورت زیر انجام می‌شود:

(۱) در گوشه‌های محوطه پست میله‌های فلزی بلند (صاعقه گیرهای میله‌ای) با نوک‌های کاملاً تیز نصب می‌کنند تا صاعقه را جذب کنند و از اصابت صاعقه به تجهیزات پست جلوگیری کنند.

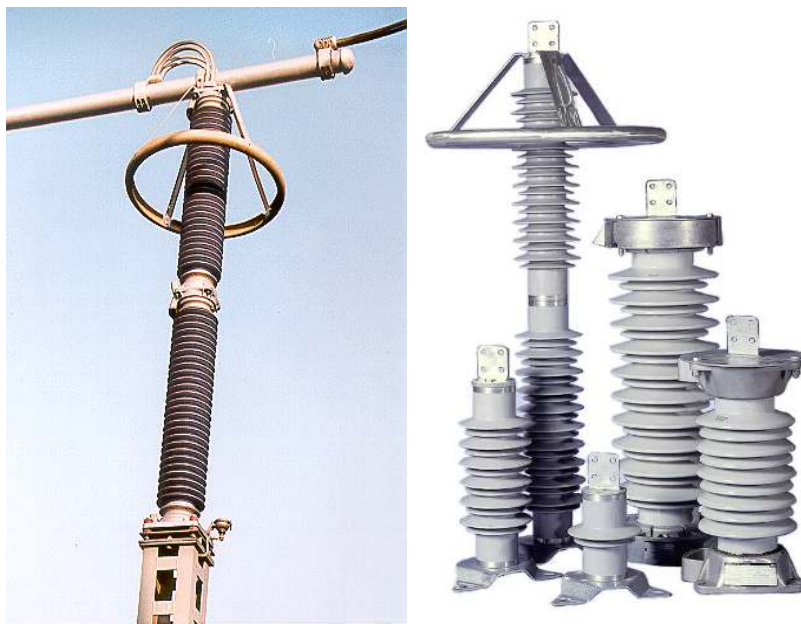
(۲) سطح هوایی محوطه پست را بوسیله سیم‌های زمین که در ارتفاع بالا روی پست قرار می‌گیرند و به سیستم زمین متصل می‌باشند، تحت پوشش قرار

می‌دهند. چون ارتفاع این سیم‌ها نسبت به تجهیزات پست خیلی بلندتر می‌باشد لذا بیشتر در معرض اصابت صاعقه قرار داشته و در نتیجه تجهیزات پست بطور کامل از اصابت مستقیم صاعقه در امان می‌باشند. در شکل (۳-۷) نمونه‌ای از بکارگیری سیم‌های زمین برای حفاظت پست نشان داده شده است.

۳) برای جلوگیری از ورود امواج تخلیه شده روی خط به پست، در محل ورودی خطوط به پست، برقگیر نصب می‌کنند. در شکل (۴-۷) نمونه‌ای از بکارگیری برقگیرها در ورودی پست نشان داده شده است.



شکل (۳-۷). حفاظت پست در برابر اصابت مستقیم صاعقه با استفاده از سیم محافظ



شکل (۷-۴). حفاظت پست در برابر اصابت غیر مستقیم صاعقه با استفاده از برقگیرها

طراحی سیستم حفاظت از صاعقه در پست‌ها با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و فنی صورت می‌گیرد. ارزش اقتصادی تجهیزات پست و اهمیت بارهای متصل به آن و هزینه نصب سیستم حفاظت در برابر صاعقه و چگالی وقوع صاعقه در محل احداث پست از مواردی هستند که بایستی در نحوه حفاظت از پست در مقابل اصابت مستقیم صاعقه در نظر گرفته شوند. بدلیل تعدد تجهیزات الکتریکی در پست نسبت به خط انتقال، محاسبه معیار SFFOR و در نتیجه محاسبه MTBF دچار مشکل می‌گردد. لذا در طراحی سیستم حفاظت از یک حداقل جریان صاعقه استفاده می‌گردد. این جریان طراحی ( $I_d$ ) به ازای SFFOR برابر با ۰/۰۵ از رابطه (۷-۹) تعیین می‌گردد.

$$I_d = (1.27 + 0.72e^{-N_g/4})I_c \quad (۷-۹)$$

$I_d$  جریان طراحی بر حسب کیلوآمپر،  $N_g$  چگالی سطحی صاعقه بر حسب تعداد برخورد صاعقه در هر کیلومتر مربع از سطح زمین در یک سال می‌باشد که از

رابطه (۷-۱۰) محاسبه می‌گردد و  $I_c$  نیز جریان بحرانی تجهیز مورد حفاظت بر حسب کیلوآمپر می‌باشد که از رابطه (۷-۱۱) بدست می‌آید.

$$N_g = 0.04(T_d)^{1.25} \quad (7-10)$$

$T_d$  متوسط تعداد روزهای رعد برقی در سال می‌باشد که از نقشه‌های ایزوکرونیک بدست می‌آیند.

$$I_c = \frac{2.2BIL}{Z_s} = \frac{2.068CFO}{Z_s} \quad (7-11)$$

که  $Z_s$  امپدانس موجی تجهیز می‌باشد. اگر طراحی بر اساس  $I_c$  صورت گیرد مقدار SFFOR برابر صفر می‌گردد که این امر مستلزم بکارگیری تعداد زیادی میله و سیم محافظ می‌باشد. البته برای پست‌های با اهمیت گاهی نیز از این جریان جهت طراحی استفاده می‌گردد.

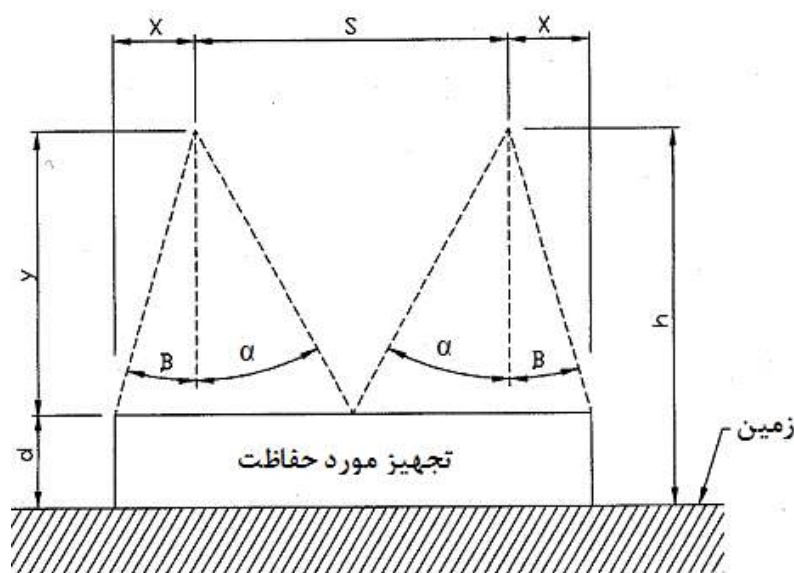
طراحی سیستم حفاظت در مقابل صاعقه برای پستهای فشارقوی به دو روش کلی زیر صورت می‌گردد.

- روش تجربی

- روش الکتروهندسی

در روش تجربی از مدل‌های زاویه حفاظتی ثابت و روش منحنی‌های تجربی استفاده می‌گردد. روش زاویه حفاظتی ثابت قدیمی‌ترین روش در تعیین ناحیه حفاظت میله‌های صاعقه گیر می‌باشد که در آن زاویه حفاظت با توجه به کلاس حفاظت در برابر صاعقه و ارتفاع میله یا سیم محافظ از سطح تحت حفاظت (مطابق استانداردها) تعیین می‌شود. نمونه‌ای از نمایش زاویه و ناحیه حفاظت توسط دو صاعقه گیر میله‌ای در شکل (۷-۵) نشان داده شده است.



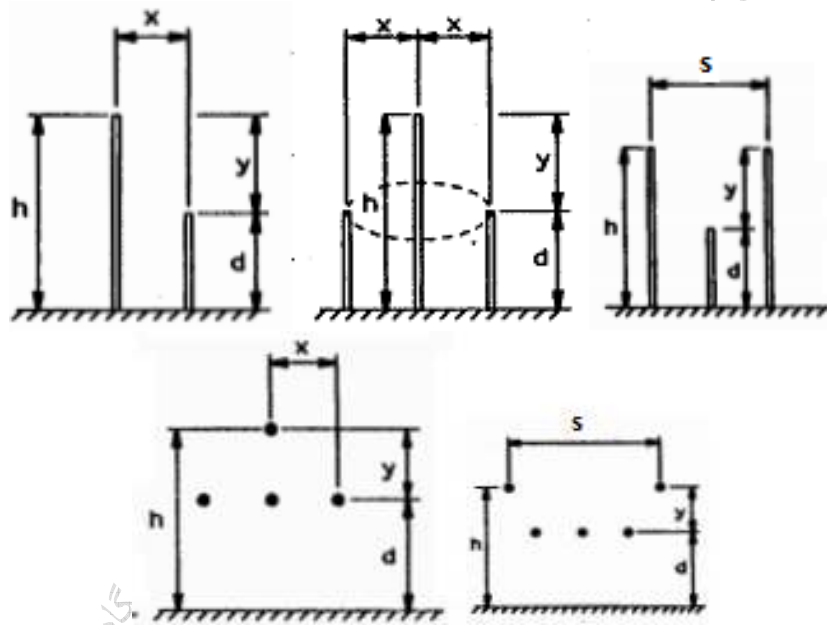


شکل (۷-۵). تعیین شعاع حفاظتی دو صاعقه گیر میله‌ای به روش زاویه حفاظتی

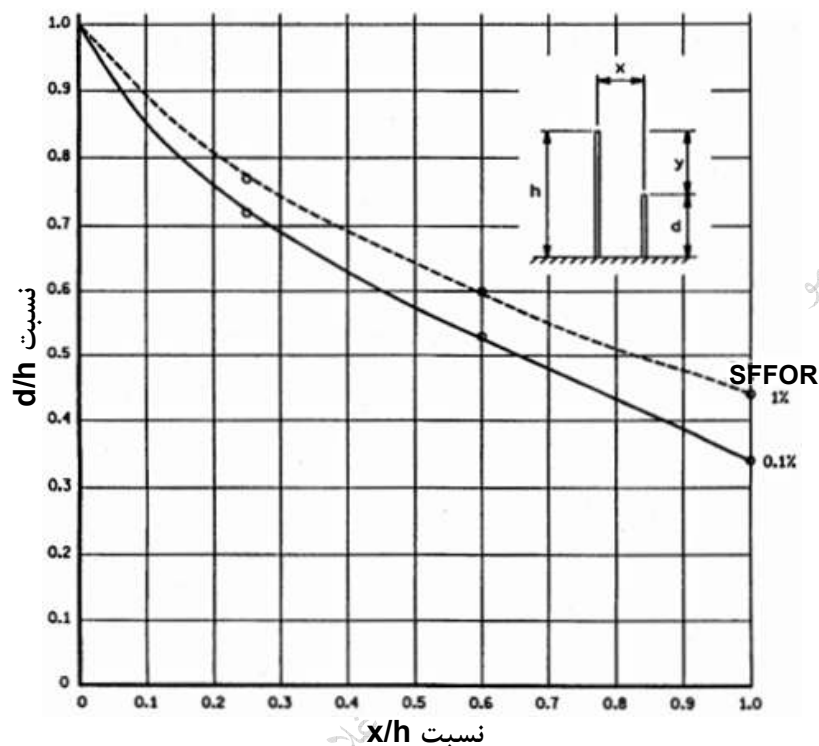
در طراحی سیستم حفاظت صاعقه پست مقدار زاویه  $\alpha$  برابر  $45^\circ$  و زاویه  $\beta$  برابر  $30^\circ$  یا  $45^\circ$  درجه در نظر گرفته می‌شود. همچنین اگر مقدار SFFOR بین  $0.1$  تا  $0.2$  مد نظر باشد، برای میله با ارتفاع حفاظت کمتر از  $15$  متر زاویه  $40^\circ$  یا  $45^\circ$  درجه و برای ارتفاع میله بین  $15$  تا  $25$  متر زاویه  $30^\circ$  درجه و تا ارتفاع  $50$  متر زاویه کمتر از  $20^\circ$  درجه انتخاب می‌گردد. در استانداردهای BS62305 و یا IEC62305 نحوه محاسبه شعاع حفاظتی صاعقه گیرهای میله‌ای و سیمهای معلق (سیم محافظ بالاسری) به روش زاویه‌ای و گوی غلطان به طور کامل بیان شده است.

روش منحنی‌های تجربی مبتنی بر آزمایشات صورت گرفته ناشی از تخلیه صاعقه بر روی یک تجهیز تحت حفاظت به همراه یک سیم محافظ می‌باشد. این منحنی‌ها برای دو ساختار حفاظتی شامل میله و سیم محافظ و برای دو مقدار SFFOR برابر  $0.1$  و  $0.1$  استخراج شده است. با توجه به نوع آرایش حفاظت

(میله یا سیم معلق و نحوه نصب آنها نسبت به تجهیز) و ارتفاع تجهیز می‌توان ارتفاع و فاصله سیستم حفاظتی تا تجهیز را از این نمودارها بدست آورد. ۵ ساختار حفاظتی اشاره شده در این روش در شکل (۶-۷) نشان داده شده است. همچنین نمونه‌ای از این منحنی‌ها برای یک میله حفاظتی به همراه یک تجهیز در کنار آن در شکل (۷-۷) ارائه شده است. جهت مشاهده تمامی این منحنی‌ها می‌توان به استاندارد IEEE ۹۹۸ مراجعه نمود.



شکل (۶-۷). آرایش‌های حفاظتی ارائه شده توسط منحنی‌های تجربی



شکل (۷-۷). حفاظت یک تجهیز با استفاده از یک میله حفاظت

در منحنی مذکور ارتفاع تجهیز (d)، ارتفاع میله حفاظت (h) و فاصله میله حفاظت تا تجهیز (X) به صورت نسبی بیان شده‌اند تا بتوان برای مقادیر مختلف از آنها استفاده کرد.

روشی که امروزه برای حفاظت از صاعقه در پست‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد مدل الکتروهندسی می‌باشد. این مدل بر اساس فواصل برخورد طراحی می‌شود. در این روش ابتدا جریان بحرانی ( $I_c$ ) انتخاب می‌گردد و سپس با استفاده از رابطه (۷-۹) جریان طراحی برای نرخ خطای SFFOR برابر ۰/۰۵ که برای پست‌ها نرخ خطای مطلوبی می‌باشد، بدست می‌آید.

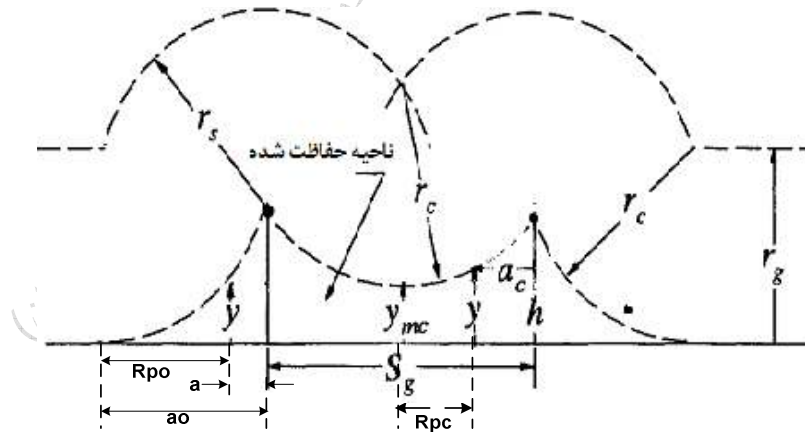
فواصل برخورد در این روش با استفاده از رابطه IEEE به صورت رابطه (۷-۱۰)

محاسبه می‌گردد.

$$r_g = r_c = r_s = 8I_d^{0.65} \quad (7-10)$$

در این رابطه،  $r_g$ ،  $r_c$  و  $r_s$  به ترتیب فاصله جذب صاعقه توسط زمین، تجهیز و سیستم محافظ بر حسب متر می‌باشد.

در این روش ابتدا کمانهایی به شعاع  $r_s$  به مرکز سیم محافظ زده می‌شود. همچنین صفحه‌ای به موازات زمین به فاصله  $r_g$  رسم می‌گردد. از مکان‌های برخورد کمان و صفحه کمان‌هایی به شعاع  $r_c$  بین سیم محافظ و زمین ترسیم می‌گردد. ناحیه بین این کمان و زمین ناحیه حفاظت شده نامیده می‌شود. تجهیزاتی که در این ناحیه قرار می‌گیرد در برابر جریان‌های صاعقه بالاتر از  $I_d$  قابل محافظت می‌باشد. اگر مقدار جریان طراحی افزایش یابد ناحیه حفاظتی بیشتر می‌گردد و تجهیزات بیشتر با ارتفاع بالاتری می‌توانند تحت پوشش قرار گیرند. ولی این امر سبب افزایش نرخ خطای SFFOR می‌گردد. ناحیه حفاظتی ناشی از دو سیم محافظ در شکل (7-10) نشان داده شده است.



شکل (7-10). ناحیه حفاظت شده توسط دو سیم محافظ در روش الکتروهندسی

ناحیه حفاظتی در شکل مذکور را می‌توان به دو ناحیه بین دو سیم محافظ و خارج از سیم محافظ تقسیم نمود. در ناحیه بین دو سیم محافظ روابط هندسی

(۷-۱۱) بین پارامترهای مختلف برقرار می‌باشد.

$$R_{PC} = \sqrt{r_c^2 - \left( h - y + \sqrt{r_s^2 - R_c^2} \right)^2} \quad (۱۱-۷)$$

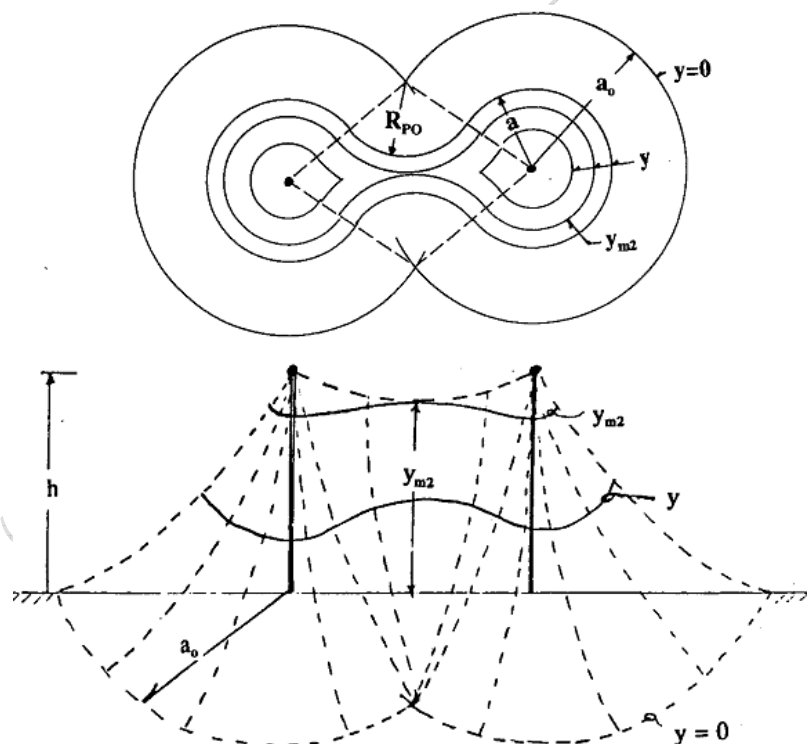
$$a_c = R_c - R_{PC}$$

در رابطه بالا  $R_c$  برابر نصف فاصله بین دو سیم محافظ  $(S_g/2)$  می‌باشد. همچنین برای ناحیه خارج از بین دو سیم محافظ روابط (۱۲-۷) برقرار می‌باشد.

$$R_{PO} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (۱۲-۷)$$

$$a_o = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2}$$

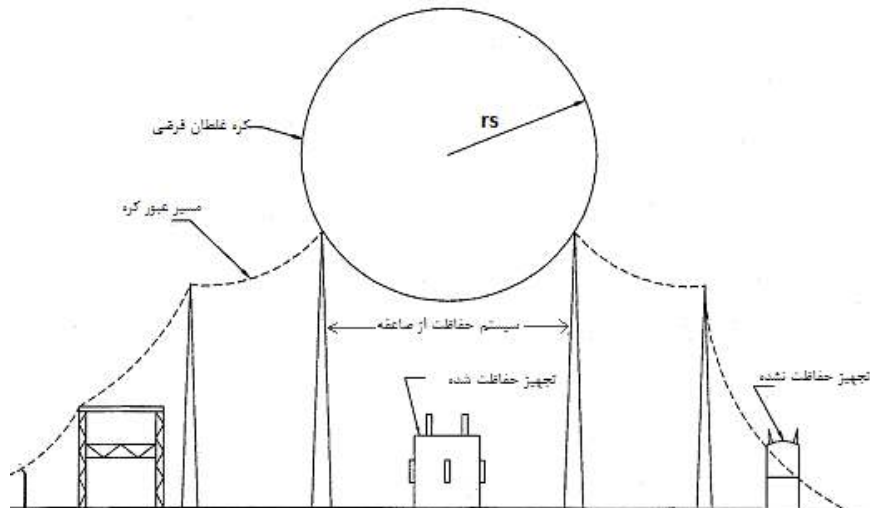
اگر از دو میله محافظ استفاده گردد، ناحیه حفاظت بصورت شکل (۱۱-۷) می‌باشد.



شکل (۱۱-۷). ناحیه حفاظتی برای دو صاعقه گیر میله‌ای

محاسبه روابط جهت حفاظت تجهیز بین دو میله همانند روابط اشاره شده برای دو سیم محافظ می‌باشد. اما اگر تعداد میله‌ها یا سیم‌ها افزایش یابد ارائه روابط جهت حفاظت بسیار مشکل خواهد بود. بهترین راه برای بررسی این حالت ترسیم شکل هندسی تجهیزات و ترسیم نواحی حفاظت توسط نرم‌افزارهای مربوطه می‌باشد.

روش دیگری نیز برای ترسیم نواحی حفاظت در اطراف میله یا سیم حفاظت وجود دارد. در این روش فواصل برخورد برای زمین، میله و تجهیز یکسان فرض می‌گردد. سپس یک کره فرضی با شعاع برابر با فاصله جذب برای جریان طراحی مورد نظر در اطراف سیستم حفاظتی غلطانده می‌گردد. برای حفاظت کامل تجهیزات می‌بایستی زمانی که کره فرضی بر روی محوطه مورد نظر غلطانده می‌شود، سطح خارجی کره تنها در تماس با میله یا سیم‌های حفاظتی قرار داشته باشد. در واقع تمام تجهیزات مورد حفاظت در نواحی بین سطح خارجی کره فرضی و زمین قرار دارند. این روش کره فرضی غلطان نامیده می‌شود. نمونه‌ای از چگونگی حرکت کره فرضی غلطان در شکل (۷-۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۷-۱۲). نواحی حفاظت شده به روش کره فرضی غلطان

در پست‌ها عموماً ترکیبی از میله‌ها و سیم‌های محافظ جهت طراحی سیستم حفاظت در برابر صاعقه مورد استفاده قرار می‌گیرد که بهترین روش جهت بررسی ناحیه حفاظتی آنها استفاده از روش گوی غلطان می‌باشد. بطور خلاصه می‌توان مراحل طراحی سیستم حفاظت در مقابل صاعقه در پست‌ها را به صورت زیر خلاصه نمود.

- انتخاب جریان طراحی از رابطه (۷-۹)
- انتخاب نوع سیستم حفاظت (میله، سیم معلق یا هردو)
- تعیین مکان و ارتفاع نصب صاعقه گیرهای میله‌ای و سیم محافظ با استفاده از روش‌های مذکور
- بررسی میزان خطای SFFOR پس از اتمام طراحی و مقایسه آن با مقدار مطلوب اولیه

جهت تعیین نرخ خطای SFFOR پس از طراحی سیستم بایستی ابتدا نواحی حفاظت شده توسط جریان طراحی مشخص گردد. سپس از جریان بحرانی برای ترسیم نواحی حفاظتی جدید استفاده شود. به اختلاف بین این دو ناحیه، ناحیه حفاظت نشده ( $S_{up}$ ) اطلاق می‌گردد. سپس احتمال وقوع جریان‌های صاعقه با دامنه بین جریان طراحی و جریان بحرانی ( $P(I_d) - P(I_c)$ ) توسط رابطه (۷-۱۳) تعیین می‌گردد.

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2.6}} \quad (۷-۱۳)$$

$I$  جریان صاعقه بر حسب کیلوآمپر و  $P(I)$  احتمال وقوع صاعقه با جریان‌های بزرگتر از  $I$  می‌باشد.

سپس می‌توان نرخ خطای سیستم حفاظت در برابر صاعقه را از رابطه (۷-۱۴) تعیین نمود.

$$SFFOR = N_g \times (P(I_d) - P(I_c)) \times S_{up} \quad (۷-۱۴)$$

$N_g$  چگالی وقوع صاعقه در محل پست بر حسب تعداد صاعقه در هر کیلومتر مربع در سال و  $S_{up}$  مساحت حفاظت نشده بر حسب کیلومتر مربع می‌باشد. همچنین

میزان MTBF بر حسب سال نیز از رابطه (۷-۱۵) تعیین می‌گردد.

$$MTBF = \frac{1}{SFFOR} \quad (7-15)$$

### ۷-۵ برقگیرهای پستها

برقگیر از وسایل حفاظتی محدود کننده دامنه اضافه ولتاژها برای حفاظت تجهیزات سیستمهای قدرت می‌باشد. یک وسیله حفاظتی محدود کننده دامنه اضافه ولتاژ باید اضافه ولتاژهای گذرا یا اضافه ولتاژهایی که باعث تخریب تجهیزات شبکه می‌شوند را محدود و به زمین هدایت کند و بتواند این کار را بدون اینکه آسیبی ببیند به دفعات تکرار کند. برقگیرها نسبت به سایر وسایل حفاظتی بهترین حفاظت را انجام می‌دهند و بیشترین مقدار حذف امواج گذرا را فراهم می‌کنند. برقگیرها به صورت موازی با وسیله تحت حفاظت یا بین فاز و زمین قرار می‌گیرند. انرژی موج اضافه ولتاژ به وسیله برقگیر به زمین منتقل می‌شود.

برقگیرها به سه دسته کلی تقسیم می‌گردند. برقگیرهای کلاس پست برای تعداد عملکردهای بالا طراحی می‌گردند. دارای سطوح حفاظتی پایین، پایداری حرارتی بالا و بازه ولتاژی وسیعی می‌باشند. برقگیرهای کلاس متوسط برای تعداد عملکرد متوسط و سطوح ولتاژی کمتر از ۱۶۹ kV طراحی شده‌اند. البته از این برقگیرها در خطوط انتقال با ولتاژ بالاتر نیز استفاده می‌گردد. از برقگیرهای کلاس توزیع نیز برای حفاظت ترانسفورماتورهای با ولتاژ پایین و خطوط توزیع و انتقال که تعداد عملکرد برقگیر پایین است، استفاده می‌گردد.

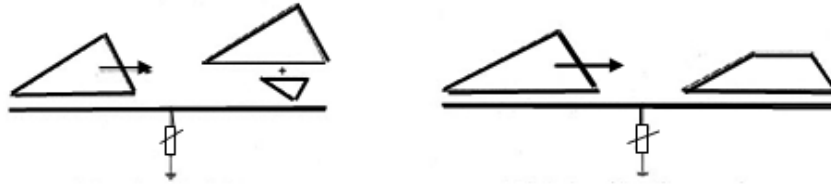
وجود سیستم حفاظت در برابر صاعقه در پستها و همچنین در خطوط منتهی به پست مانع از ورود جریانهای صاعقه با دامنه‌های بالا و شیب تند به تجهیزات داخلی پست می‌گردد. در نتیجه سطوح حفاظتی برقگیرها در این حالت کاهش می‌یابد. همچنین در این حالت می‌توان از یک برقگیر برای حفاظت چند تجهیز استفاده نمود. در پست‌هایی که بدون سیستم حفاظت در برابر صاعقه می‌باشند



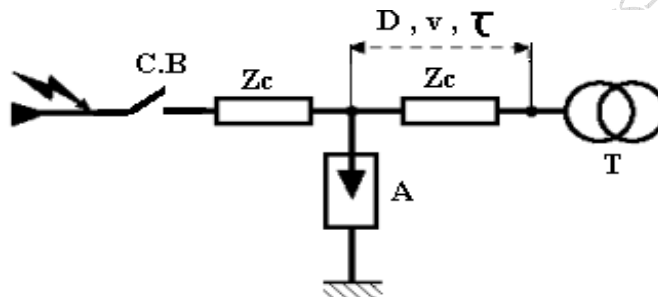
برقگیر بایستی تا حد امکان به تجهیز مورد نظر نزدیک باشد که به عنوان یک وسیله حفاظتی برای هر تجهیز موثر باشد. همچنین زمین برقگیر و تجهیز مورد حفاظت بایستی در کوتاه‌ترین مسیر به یکدیگر متصل گردند.

تا جایی که مقدور باشد باید برقگیر در نزدیکی تجهیزات قرار گیرد بویژه وقتی که تأسیسات بوسیله سیستم زمین حفاظت نشده باشند و پست در انتهای خط قرار گرفته باشد. پس از وارد شدن موج سیار به پست، ولتاژ در محل برقگیر تا مقدار ولتاژ پسماند برقگیر کاهش می‌یابد. این موج بعد از رسیدن به برقگیر با دامنه ولتاژ پسماند برقگیر و شیب اولیه موج اضافه ولتاژ به مسیر خود ادامه می‌دهد و در صورتیکه در ادامه مسیر به نقطه باز یا ترانسفورماتور برسد با دامنه دو برابر ولتاژ باقیمانده منعکس می‌شود. ولتاژ در محل ترانسفورماتور با دو برابر شیب موج اولیه بالا می‌رود تا وقتی که به حداکثر مقدار خود یعنی دو برابر ولتاژ پسماند برقگیر برسد. بالا رفتن ولتاژ در محل ترانسفورماتور تا زمانی ادامه می‌یابد که امواج با دامنه منفی ناشی از حذف ولتاژ توسط برقگیر مطابق شکل (۷-۱۳) در هر دو جهت از جمله به سمت ترانسفورماتور حرکت کرده و به آن نقطه برسد و از افزایش ولتاژ در محل ترانسفورماتور جلوگیری کند. همچنین تجهیزاتی نظیر کلید که قبل از برقگیر قرار گرفته‌اند تا زمانی که برقگیر عمل کند و موج حذفی با دامنه منفی از برقگیر به کلید برسد. در معرض دامنه موج ورودی هستند. در واقع با فاصله گرفتن تجهیزات از برقگیر مدت زمان عبور موج حذفی برای رسیدن به محل تجهیزات افزایش می‌یابد و در این فاصله زمانی ممکن است ولتاژ در محل ترانسفورماتور به دو برابر ولتاژ پسماند برقگیر و در محل کلید حتی تا حداکثر دامنه موج اضافه ولتاژ ورودی برسد.

هرگاه زمان لازم برای عبور موج از برقگیر تا ترانسفورماتور ( $T$ ) از دو برابر زمان لازم برای رسیدن ولتاژ دو سر برقگیر به ولتاژ پسماند ( $\tau$ ) کمتر باشد آنگاه ولتاژ در محل ترانسفورماتور به دو برابر ولتاژ پسماند برقگیر می‌رسد.



الف- محدود شدن دامنه موج اضافه ولتاژ توسط برقگیر ب- تولید موج حذفی توسط برقگیر  
شکل (۷-۱۳). عملکرد برقگیر در برابر اضافه ولتاژها



شکل (۷-۱۴). دیاگرام تک خطی سیستم شامل ترانسفورماتور و برقگیر

با توجه به شکل (۷-۱۴) و به کمک دیاگرام نردبانی، می‌توان نشان داد که ولتاژ در محل ترانسفورماتور و کلید قدرت از رابطه‌های زیر بدست می‌آیند:

$$V_T = V_{SA} + 2ST \quad (7-16)$$

$$V_{C.B} = V_{SA} + 2ST \quad (7-17)$$

$V_T$  : حداکثر ولتاژ در محل ترانسفورماتور

$V_{SA}$  : ولتاژ پسماند برقگیر

$V_{C.B}$  : ولتاژ در محل کلید قدرت

S : شیب پیشانی یا نرخ افزایش موج اضافه ولتاژ

T : مدت زمان عبور موج از برقگیر تا تجهیز

روابط مذکور با در نظر گرفتن فرضیه‌های زیر بدست آمده‌اند:

- ۱- امپدانس موجی ورودی ترانسفورماتور بینهایت (مدار باز) فرض شده است.
  - ۲- از خازنهای فرکانس بالای ترانسفورماتور صرفنظر شده است.
  - ۳- ولتاژ پسماند برقگیر یا سطح حفاظتی آن ثابت فرض شده است.
  - ۴- شیب موج گذرای ولتاژ ثابت فرض شده است.
  - ۵- امپدانس سیمهای زمین برقگیر صفر فرض شده است.
- برای اینکه ترانسفورماتور و کلید قدرت در برابر اضافه ولتاژهای بوجود آمده حفاظت شوند، باید  $V_T > 2V_{SA}$  و  $V_{C.B}$  کوچکتر از دامنه موج ورودی باشد. با در نظر گرفتن اصل مذکور می‌توان حداکثر فاصله مجاز محل برقگیر تا تجهیز را تعیین کرد. بطور مثال اگر حداکثر ولتاژ ضربه قابل تحمل توسط ترانسفورماتور (ولتاژ استقامت) برابر  $1/3$  برابر ولتاژ پسماند برقگیر باشد آنگاه:

$$V_T = 1.3V_{SA} \geq V_{SA} + 2 \frac{SD}{v} \quad (7-18)$$

در رابطه مذکور،  $D$  فاصله برقگیر از ترانسفورماتور و  $v$  سرعت موج می‌باشد. به کمک این رابطه بالا می‌توان مقدار حداکثر فاصله مجاز بین برقگیر تا ترانسفورماتور ( $D$ ) را بدست آورد:

$$D \leq 0.15 \frac{V_{SA} \cdot v}{S} = 0.15 \tau v \quad (7-19)$$

$\tau$ ، زمان لازم برای هدایت برقگیر پس از برخورد با موج ولتاژ می‌باشد. به طور مثال، اگر  $V_{SA} = 1200 \text{ kV}$ ،  $v = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$  و  $S = 2000 \text{ kV}/\mu\text{s}$  باشد، آنگاه حداکثر فاصله مجاز بین برقگیر تا ترانسفورماتور ( $D$ ) برابر با ۲۷ متر می‌باشد.

در عمل باید برای تعیین دقیقتر حداکثر فاصله مجاز بین محل نصب برقگیر تا تجهیز تحت حفاظت آن، نکاتی چون چگونگی اتصال برقگیر به تجهیز و زمین (طول سیم اتصال دو سر برقگیر بین فاز تا زمین)، مشخصات واقعی برقگیر، پیکر بندی شبکه با امپدانس‌ها، سرعت انتشار و شیب پیشانی موج، خازنهای نشتی و

فرکانس بالای تجهیزات مد نظر قرار گیرند.

علاوه بر موج برگشتی که می‌تواند باعث افزایش ولتاژ روی تجهیزات گردد، اضافه ولتاژهای ناشی از رزونانس حاصل از اندوکتانس بین برقگیر و وسیله تحت حفاظت با کاپاسیتانس وسیله مورد نظر (مثلاً ترانسفورماتور) نیز می‌توانند باعث افزایش ولتاژ روی تجهیزات گردند.

افت ولتاژ روی هادی‌های اتصال دهنده ترمینال‌های برقگیر به هادی خط و زمین در اثر عبور جریان تخلیه از آنها به افت ولتاژ دو سر برقگیر اضافه می‌شود و علاوه بر این هر اختلافی بین پتانسیل زمین در محل برقگیر و تجهیزات نیز به ولتاژ اعمال شده به عایق تجهیزات اضافه می‌گردد. بنابراین هادی‌های ارتباط دهنده برقگیر را تا حد امکان باید کوتاه و مستقیم انتخاب کرد و همچنین زمین برقگیر و تجهیزات با کمترین مقاومت ممکنه (کمتر از یک اهم) به یکدیگر متصل شوند. اگر سمت فشار قوی ترانسفورماتور به یک خط انتقال متصل باشد زمانی که کلیدزنی صورت می‌گیرد موج ضربه از سمت خط انتقال به سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور انتقال می‌یابد. تمام انرژی این موج توسط برقگیرهای سمت فشار ضعیف جذب می‌گردد که سبب تضعیف عملکرد برقگیر می‌شود. برای کنترل این حالت بایستی برقگیرهای سمت فشار قوی طوری انتخاب گردند که بخش اعظمی از انرژی موج توسط این برقگیرها جذب گردد. همچنین بجهت کاهش نرخ خرابی برقگیرهای سمت فشار ضعیف توصیه می‌گردد که سطح حفاظتی کلیدزنی این برقگیرها بالاتر از سطح حفاظتی کلیدزنی برقگیرهای سمت فشار قوی بر اساس رابطه (۷-۲۰) انتخاب گردند.

$$SPL_{LV} > \frac{N_{LV}}{N_{HV}} SPL_{HV} \quad (۷-۲۰)$$

$SPL_{HV}$  سطح حفاظتی برقگیرهای سمت فشار قوی،  $SPL_{LV}$  سطح حفاظتی برقگیرهای سمت فشار ضعیف،  $N_{LV}$  تعداد دور سیم‌پیچی فاز به فاز فشار ضعیف و  $N_{HV}$  تعداد دور سیم‌پیچی فاز به فاز فشار قوی می‌باشند.

ترانسفورماتورهای موجود در پست‌ها علاوه بر برقگیرهای فاز به زمین در شرایط زیر نیاز به برقگیرهای فاز به فاز نیز دارند.

(۱) اگر تحت اضافه ولتاژهای فاز به فاز ناشی از کلیدزنی بانک‌های خازنی قرار گیرند و کلیدها فاقد مقاومت‌های وصل باشند.

(۲) باس‌بار ترانسفورماتور متصل به سه خط انتقال یا کمتر با طول‌های بیشتر از ۱۰ km باشد.

همچنین بانک‌های خازنی موجود در پست‌ها نیاز به حفاظت در مقابل موج صاعقه ورودی از خطوط منتهی به پست دارند. بار الکتریکی موجود در این امواج سبب شارژ بیش از حد خازن‌ها می‌گردد که وجود برقگیر جهت حفاظت در مقابل این اضافه ولتاژها ضروری است.

کلیدهای قدرت نیز در هنگام قطع با اضافه ولتاژهای گذرای بازیافتی مواجه می‌گردد که به جهت کنترل اقتصادی‌تر این اضافه ولتاژها می‌توان به جای افزایش محفظه‌های قطع یا استفاده از مقاومت‌های قطع از برقگیر در کنتاکت‌های کلید بهره برد. در این حالت TRV به سطح حفاظتی برقگیر محدود می‌گردد. اگر فاصله بین کلید قدرت و ترانسفورماتور پست کم و همچنین BIL کلید کمتر از BIL ترانسفورماتور باشد می‌توان از برقگیر ترانسفورماتور برای حفاظت کلید در حالت بسته نیز استفاده کرد. اما اگر کلید قدرت باز باشد و دیسکانکتورهای کلید نیز بسته باشند (در حالتی که موج ابتدایی صاعقه از خط به پست وارد گردد و رله فرمان قطع کلید را بدهد که البته بعد از زمان ۳۰۰ ms دوباره بسته می‌شود) در این حالت هیچ حفاظتی برای کلید قدرت در مقابل موج‌های صاعقه برگشتی ورودی از خط وجود نخواهد داشت که ممکن است سبب بروز قوس در عایق فاز به زمین و عایق طولی کلید (بین تیغه‌ها) گردد. برای حفاظت در این حالت می‌توان از برقگیر در سمت خط متصل به کلید قدرت استفاده نمود. البته در ولتاژهای بالا به دلیل BIL بالای کلیدهای قدرت با پذیرفتن اندکی نرخ خطای MTBF، هیچ حفاظتی برای کلید در نظر نمی‌گیرند.

### ۶-۷ سؤال و تمرین

۱. انواع مقره‌های مورد استفاده در پست‌های فشار قوی را نام ببرید.
۲. برای یک پست فشارقوی  $400\text{ kV}/230\text{ kV}$  دارای سوئیچگیر با ابعاد  $40$  متر در  $60$  متر، یک سیستم حفاظت صاعقه به روش سیمهای معلق طراحی کنید.  
(حداکثر ارتفاع تجهیزات برقدار پست از سطح زمین برابر  $10$  متر، ولتاژ بحرانی صاعقه  $1425\text{ kV}$ ، امپدانس موجی بلندترین تجهیز  $300\ \Omega$ ، تعداد روزهای رعد و برق در سال  $25$  روز).
۳. در یک پست  $230\text{ kV}/63\text{ kV}$  حداکثر فاصله محل نصب برقگیرهای دو سر ترانسفورماتور را محاسبه نمایید (کلیه اطلاعات مطابق با استانداردهای مربوطه و اطلاعات سازنده برقگیر انتخاب شوند).

## فصل ۸

### اثر آلودگی بر هماهنگی عایقی

#### ۸-۱ مقدمه

در طراحی تجهیزات الکتریکی سیستم‌های قدرت (نیروگاه‌ها، پست‌ها، خطوط انتقال انرژی و غیره) علاوه بر پارامترهای الکتریکی سیستم قدرت، شرایط جوی محل نصب (ارتفاع، رطوبت، دما، ...) و آلودگی محیطی باید مد نظر قرار گیرند. بطور کلی آلودگی باعث فرسودگی و پیری زود هنگام تجهیزات سیستم قدرت می‌شود. این امر می‌تواند باعث عملکرد نادرست سیستم حفاظت، وقوع اتصال کوتاه و بطور کلی ایجاد وقفه در سیستم گردد.

آلودگی به همراه رطوبت یک از عوامل اصلی تاثیرگذار بر قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت در بخش‌های مختلف مثل خطوط انتقال نیرو و پست‌های بیرونی می‌باشد. آلاینده‌های معلق در هوا پس از نشستن روی عایق تجهیزات بیرونی با رطوبت هوا (از طریق باران سبک<sup>۱</sup>، رطوبت<sup>۲</sup>، شبنم<sup>۳</sup> و مه<sup>۴</sup>) ترکیب شده و یک لایه

---

۱- Light rain

۲- Mist

۳- Dew

رسانای الکتریکی با مقاومت نسبتاً کم روی سطح عایق‌های بیرونی مثل مقره‌ها ایجاد می‌کنند و باعث عبور جریان نشتی از سطح عایق و تولید جرقه و خطای اتصال کوتاه در دو سر مقره‌ها می‌شوند. بنابراین آلودگی بر سطح خزشی<sup>۱</sup> و حتی فاصله هوایی<sup>۲</sup> عایق بیرونی تاثیر مستقیم دارد. همچنین آلودگی باعث خوردگی و فرسایش اجزای مقره‌ها شده و تاثیر جدی بر مشخصات الکتریکی آنها می‌گذارد و یکی از مهمترین علل عملکرد نادرست مقره-ها و ایجاد وقفه در سیستم قدرت می‌باشد. آلودگی می‌تواند باعث ایجاد نواحی خشک<sup>۳</sup> در سطح مقره‌ها (بخصوص مقره‌های پلیمری) و تغییر در ساختار آنها گردد.

## ۲-۸ فرآیند تولید جرقه روی زنجیره مقره

تولید جرقه یا جریان نشتی روی زنجیره مقره نیازمند دو شرط زیر می‌باشد:

- الف- وجود آلودگی روی سطح مقره و عایق خارجی.
  - ب- خیس شدن سطح مقره (در اثر باران سبک، رطوبت، شبنم و مه، بدون شسته شدن و حذف آلودگی از سطح مقره).
- ترکیب آلودگی و رطوبت سبب ایجاد یک لایه نسبتاً رسانا روی سطح عایق خارجی (مقره) شده و باعث عبور جریان خزشی از سطح آن می‌گردد. بنابراین آلودگی باعث کاهش استقامت عایقی تحت ولتاژ فرکانس قدرت مقره می‌شود. مستقل از نوع آلودگی موجود، مراحل (فازهای) مختلف وقوع جرقه ناشی از وجود آلودگی روی سطح مقره به شرح زیر می‌باشد:
- قرار گرفتن آلودگی روی سطح مقره و تشکیل یک لایه آلودگی سراسری.

۴- Fog

۱- Creepage distance

۲- Clearance

۳- Dry bands



- ترکیب لایه آلاینده موجود در سطح مقره با رطوبت هوا و تشکیل و توسعه مسیر رسانا و عبور جریان ناشی.
- افزایش رسانایی سطح مقره و به همراه آن افزایش جریان ناشی.
- تشکیل نواحی خشک در اثر گرم شدن لایه موجود بواسطه افزایش چگالی جریان در برخی نقاط سطح مقره، بخصوص نقاط نزدیک هادی‌ها.
- فرار گرفتن تقریبی کل ولتاژ اعمالی مقره در دو سر این نواحی خشک و ایجاد قوسهای جزئی و کوچک در این نواحی.
- در نهایت، تولید جرقه کلی (اتصال کوتاه) در دو سر مقره یا زنجیره مقره به شرط کم بودن مقاومت آلودگی سری با باند خشک.

هنگام وقوع جرقه، ممکن است بعضی از این مراحل بطور متوالی اتفاق نیفتد و یا ممکن است چند مرحله در یک لحظه اتفاق بیفتد.

وقتی سطح آلاینده روی مقره رطوبت جذب کند و مرطوب شود، مقاومت سطحی آن کاهش یافته و دامنه جریان خزشی زیاد می‌شود. با افزایش جریان ناشی، دمای سطح مقره بالا می‌رود و باعث کاهش بیشتر مقاومت سطح مقره می‌گردد. کاهش مقاومت سطح مقره تا رسیدن دمای آن به دمای تبخیر ادامه می‌یابد. سپس با شروع تبخیر رطوبت لایه سطحی، مقاومت آن افزایش می‌یابد. وقتیکه کل مسیر خشک شد مقاومت به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این پدیده بیشتر در مسیرهای باریکی که جریان ناشی بالاتری دارند اتفاق می‌افتد و باعث کاهش جریان ناشی در این مسیرها می‌گردد. بیشترین تنش الکتریکی از طریق همین نواحی خشک در سطح مقره به آن تحمیل می‌شود.

افزایش آلودگی باعث افزایش جریان ناشی و افزایش احتمال وقوع جرقه روی مقره می‌شود. اما اگر آلودگی سطحی در کل سطح مقره پخش شود، تنش الکتریکی بصورت خطی (یکنواخت تر) به عایق اعمال می‌گردد و احتمال جرقه کمتر می‌شود.

عوامل متعددی بر مقدار ولتاژ جرقه (FOV)<sup>۱</sup> یک مقره با سطح آلوده تاثیر گذارند که مهمترین آنها عبارتند از:

۱- میزان مواد قابل حل شدن موجود روی سطح مقره.

۲- نوع مواد قابل حل شدن.

۳- چگالی مواد حل نشدنی (NSDD)<sup>۲</sup>.

نوع و چگالی سطحی مواد حل شدنی روی سطح مقره بیشترین تاثیر بر مقدار ولتاژ جرقه را دارد.

بطور کلی، نوع آلودگی، شدت و جهت وزش باد به عنوان عامل اصلی پراکندگی ذرات معلق در هوا، نیروی جاذبه (وزن ذرات آلاینده)، چگونگی سطح مقره و شدت میدان الکتریکی اطراف مقره از عوامل اصلی مقدار استقرار ذرات آلاینده روی سطح مقره‌ها می‌باشند. بنابراین شرایط محیطی و آب و هوایی از جمله عوامل مهم در قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت می‌باشد که می‌تواند با کاهش ولتاژ جرقه روی مقره‌های آلوده سبب خروج ناخواسته خطوط انتقال نیرو شود.

### ۳-۸ انواع آلاینده‌ها و منابع تولید آنها

بطور کلی عوامل جوی<sup>۳</sup> و آلودگی محیطی در طراحی و چگونگی عملکرد سیستم‌های قدرت نقش بسزایی دارند.

از پارامترهای مهم جوی و اقلیمی تاثیر گذار بر عایق‌های خارجی می‌توان به مواردی همچون ارتفاع از سطح دریا<sup>۴</sup> یا میزان فشار هوا، درجه حرارت محیط (حداکثر، حداقل و متوسط دمای روزانه و سالانه)، میزان رطوبت (مه، شبنم، برف، باران و یخ)، سرعت باد و میزان اشعه ماوراء بنفش<sup>۵</sup> اشاره نمود.

۱- Flashover Voltage

۱- Non-soluble deposit density

۲- Climatic

۳- Sea level (altitude)

۴- Ultra Violet (UV) ray

آلاینده‌های محیطی تاثیر گذار بر عملکرد مقره‌های خارجی، دارای تنوع زیادی می‌باشند. این آلاینده‌ها شامل گرد و خاک، شن و ماسه معلق در هوا، املاح نمک موجود در هوا، رسوبات ناشی از قطرات آب برجهای خنک کننده در نیروگاهها، دود خروجی دودکش نیروگاهها و کارخانجات آلاینده مجاور، دود وسایل نقلیه موتوری، آلودگی کارخانجات یا انبارهای ذخیره مواد مجاور سیستمهای قدرت (کارخانجات سیمان، گچ، کک یا ذغال سنگ، پودر کارخانجات سنگبری، ...) و غیره می‌باشند.

بطور کلی آلودگیها به دو دسته مواد قابل حل و غیر قابل حل در آب تقسیم می‌شوند. برای اندازه‌گیری میزان مواد قابل حل روی سطح مقره‌ها از واحد ESDD و برای مواد غیر قابل حل از واحد NSDD استفاده می‌شود.

میزان و نوع آلودگی یک منطقه بستگی به منابع آلاینده موجود در منطقه و شرایط آب و هوایی آن دارد. جدول (۸-۱) انواع آلاینده‌ها و منابع تولید آنها را معرفی می‌کند.

جدول (۸-۱). انواع آلاینده‌ها و منابع تولید آنها

نوع آلاینده	منابع تولید آلاینده
نمک	مناطق ساحلی و دریایی، صنایع نمک، مناطق جاده‌ای که در آنجا از نمک برای آب کردن برف و یخ سطح جاده‌ها استفاده می‌شود
سیمان	کارخانجات سیمان، مناطق کارگاهی و عمرانی، معادن سنگ
خاک	محیطهای خاکی، مناطق کارگاهی
کود شیمیایی	صنایع تولید کود شیمیایی، زمینهای که بطور مکرر از کودهای شیمیایی استفاده می‌کنند.
فلزات	معادن، محیطهای کارگاهی، صنایع فلزی
ذغال سنگ	معادن ذغال سنگ، نیروگاه‌های حرارتی با سوخت ذغال سنگ، مناطق دارای کوره‌های گچ و آجر پزی با سوخت ذغال سنگ

مناطق دارای فعالیتهای آتشفشانی	خاکستر آتشفشانی
مناطق زیستگاه و لانه گذاری پرندگان	مدفوع پرندگان
صنایع مختلف شیمیایی، صنایع فرآیندی و تبدیلی، صنایع پتروشیمی و پالایشگاههای نفت و گاز	مواد شیمیایی
مناطق دارای حجم زیاد دود آگروز ماشین (خیابانها و بزرگراههای شلوغ)، مناطق دارای دود ناشی از موتور دیزلی (مسیر خط راه آهن دیزلی) و سوخت فسیلی، ذرات سنگین معلق در هوا ناشی مواد سوختی	مه دود <sup>۱</sup>
دود ناشی از مواد قابل اشتعال جنگلی، کشاورزی، صنعتی، مسکونی، ناشی از سوخت فسیلی	دود <sup>۲</sup> یا دوده

در میان انواع مختلف آلودگی‌ها، سه نوع آلودگی صنعتی<sup>۳</sup>، آلودگی دریایی<sup>۴</sup> و آلودگی کویری<sup>۵</sup> مهمتر می‌باشند.

### ۱-۳-۸ آلودگی صنعتی

کارکرد صنایع مختلف باعث تولید آلاینده‌هایی مثل دود، گرد و غبار، خاکستر معلق، سیمان، ذرات فلزی، نمک، مواد شیمیایی، ذرات معلق در هوا و غیره می‌شود. این آلاینده‌ها اغلب توسط باد در هوا پخش شده و به مرور روی تجهیزات سیستم قدرت قرار می‌گیرند و به آهستگی و با مرور زمان (پس از چند ماه و یا چند سال) باعث تشکیل یک لایه آلاینده روی سطح مقره‌های خطوط و پستهای فشارقوی می‌شود.

۱- Smog

۲- Smoke

۳- Industrial Pollution

۴- Marine (Coastal/sea) Pollution

۵- Desert Pollution

### ۲-۳-۸ آلودگی دریایی

املاح نمکی به همراه رطوبت در اثر وزش نسیم و باد از سمت دریا به سمت مناطق دریایی، ساحلی و مناطق فرا ساحلی در معرض بادهای دریایی حرکت کرده و روی سطح عایقهای بیرونی رسوب می‌کنند. هرچند املاح نمکی در شرایط آب و هوایی خشک، خطر جدی ایجاد نمی‌کنند اما در صورت جذب رطوبت از محیط، یک لایه رسانا (با توجه به نوع و مقدار املاح نمکی و ساختار مقره) روی سطح مقره‌ها تشکیل می‌دهند و باعث افزایش جریان خزشی و یا وقوع جرقه روی مقره‌ها می‌شوند. از اینرو آلودگیهای دریایی یکی از عوامل اصلی ایجاد جرقه روی سطح مقره‌های خطوط و پستهای موجود در مناطق ساحلی می‌باشند. لذا برای جلوگیری از وقوع جرقه باید سطح خارجی مقره‌ها بطور منظم شستشو شوند و همچنین مقره‌ها براساس فاصله خزشی خاص انتخاب گردند. شدت رسوب آلودگی دریایی روی سطح مقره‌ها به عواملی همچون سرعت و جهت باد، نوع و وزن املاح نمکی، فاصله از دریا، نوع مقره‌ها و شدت میدان الکتریکی اطراف آنها بستگی دارد.

### ۳-۳-۸ آلودگی کویری

طوفانها و بادهای شنی و گرد و خاک نمکی تحت هوای خشک از مهمترین انواع آلاینده‌های بیابانی می‌باشند. نوع شرایط محیطی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقره‌های خطوط و پستها دارد. برخورد شن و گرد و غبار با سرعت بالا به سطح مقره‌ها باعث فرسایش آنها می‌گردد. طوفانهای شنی از عوامل اصلی کاهش قابلیت اطمینان خطوط انتقال نیرو در مناطق بیابانی می‌باشند. عملکرد مقره‌های سرامیکی در مناطق بیابانی در مقایسه با مناطق صنعتی و دریایی مناسبتر می‌باشند.

### ۴-۳-۸ آلودگی نواحی کشاورزی

این نواحی در مجاورت مزارع کشاورزی قرار دارند، بخصوص مکانهایی که در آنها عملیات کاشت و برداشت انجام می‌شود. لایه آلودگی در این نواحی شامل املاح مختلف با حل‌شوندگی سریع مانند مواد شیمیایی مورد استفاده برای محصولات شیمیایی و حل‌شوندگی کند مانند فضولات پرندگان یا املاح موجود در خاک می‌باشد. لایه آلودگی در این نواحی دارای مقدار متوسط یا بالای ذرات حل‌شدنی است که به همراه وزش باد روی سطوح افقی مفره‌ها قرار می‌گیرند.

#### ۴-۸ تعیین سطح آلودگی منطقه

درجه آلودگی<sup>۱</sup> یا سطح آلودگی یک طبقه بندی محیطی براساس مقدار آلودگی (خشک، گازی و یا مایع) موجود در آن می‌باشد. به عبارت دیگر، شرایط محیطی مربوط به آلودگی را سطح آلودگی می‌نامند که براساس استاندارد IEC ۶۰۸۱۵ به پنج سطح آلودگی به شرح جدول (۸-۲) تقسیم می‌شود. این طبقه بندی از این لحاظ که بر سطح خزشی تاثیر گذار می‌باشد حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین برای تعیین مقدار موثر فاصله خزشی عایق بیرونی تجهیزات سیستم قدرت، دانستن درجه آلودگی ضروری می‌باشد.

جدول (۸-۲). انواع سطوح آلودگی براساس استاندارد IEC ۶۰۸۱۵

سطح آلودگی	مثال‌هایی از چند ناحیه نمونه
سبک و خیلی سبک	- ناحیه‌های بدون کارخانه و با تراکم کمی از خانه‌های مسکونی فاقد امکانات گرمایشی پر قدرت.
	- ناحیه‌هایی با تراکم کم از کارخانه‌های صنعتی و ساختمانهای مسکونی و با وزش باد و بارندگی دائمی.
	- ناحیه‌های کشاورزی غیر متراکم.
	- نواحی کوهستانی.
	- تمام نواحی فوق دارای حداقل فاصله‌ای برابر ۱۰ الی ۲۰ کیلومتر از دریا

۱- Pollution Degree (Level)

<p>بوده و در معرض بادهای دریایی نیستند.</p>	
<p>- ناحیه‌های با کارخانه‌هایی که دارای دود آلوده کننده مخصوصی نیستند و یا ناحیه‌هایی با تراکم متوسط از خانه‌هایی که دارای لوازم گرمازا هستند. - ناحیه‌های با تراکم زیاد خانه‌ها و یا تراکم کارخانه‌ها همراه با وزش مداوم باد و یا بارش مداوم باران. - ناحیه‌های که در معرض باد از سمت دریا بوده ولی خیلی به ساحل دریا نزدیک نیستند.</p>	<p>متوسط</p>
<p>- ناحیه‌های با تراکم زیاد کارخانه و شهرهای بزرگ دارای حومه متراکم همراه با منابع گرمایی که مولد آلودگی هستند. - نواحی نزدیک به دریا که در معرض وزش بادهای نسبتاً شدید از طرف دریا هستند.</p>	<p>سنگین</p>
<p>- ناحیه‌های که دارای گرد و غبارهای محلی و رسانا بوده و کارخانه‌هایی که مولد دودهای آلوده کننده همراه با ذرات ریز معلق هستند. - ناحیه‌هایی با وسعت محدود که خیلی به ساحل دریا نزدیک بوده و در معرض قطرات ریز آب دریا و یا بادهای آلوده خیلی قوی از طرف دریا هستند. - نواحی خشک و بدون باران (بیابانی) که در معرض طوفانها و بادهای شنی و نمکی قرار دارند.</p>	<p>خیلی سنگین</p>

عموماً برای هر منطقه نقشه آلودگی<sup>۱</sup> تهیه می‌شود که در آن، مناطق با سطح آلودگی یکسان به صورت منحنی‌های پیوسته نشان داده می‌شوند. شدت آلودگی محیط را می‌توان با استفاده از سه روش زیر مشخص کرد.

- تعیین محل نصب عایق با توجه به دسته‌بندی جدول (۸-۲).
- تجربیات قبلی عایق‌های نصب شده در محیط و تهیه گزارشی از عملکرد عایق‌ها بر اساس استاندارد IEC ۶۰۸۱۵.

- اندازه گیریهای آزمایشگاهی.

روش‌های آزمایشگاهی ارائه شده جهت دسته بندی آلودگی محیط به عناوین زیر دسته‌بندی می‌شوند.

۱- روش اندازه گیری چگالی رسوب نمک معادل  $ESDD^1$  : شدت طبیعی آلودگی سطح مفره با پارامتر  $ESDD$  بیان می‌شود و میزان آلودگی یا ضریب  $ESDD$  بیانگر مقدار نمک  $NaCl$  در مقدار حجم مشخص آب مقطر بر واحد سطح است که رسانایی آن معادل رسانایی اندازه‌گیری شده سطح در مفره آلوده می‌باشد. مقدار  $ESDD$  برحسب  $mg/cm^2$  (مثلاً  $0.3 mg/cm^2$ ) برای مناطق دور از ساحل و یا  $0.5 mg/cm^2$  برای مناطق ساحلی) بیان می‌شود. این روش معمولاً برای اندازه‌گیری آلودگی مناطق صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- روش اندازه‌گیری رسانایی حجمی آلودگی جمع‌آوری شده از سطح مفره، که با شوری بر حسب  $kg/m^3$  محلول نمک معادل سازی می‌شود. از این روش اغلب برای اندازه‌گیری آلودگی مناطق دریایی استفاده می‌گردد.

۳- روش اندازه‌گیری رسانایی ویژه سطح مرطوب: در این روش میزان رسانایی مربوط به آلودگی مرطوب روی سطح مفره برحسب میکروزیمنس اندازه‌گیری می‌شود و همانند روش  $ESDD$  برای اندازه‌گیری آلودگی مناطق صنعتی استفاده می‌گردد.

۴- روش شمارش پالسیها.

۵- روش اندازه‌گیری جریان نشتی.

۶- روش اندازه‌گیری و سنجش رسوبات.

۷- روش اندازه‌گیری تنشهای جرکه مفره در موقعیت‌های تجربی.

۸- روش نمونه‌گیری جوی.

۱- Equivalent Salt Deposit Density



مطابق استاندارد سیگره، رسانایی حجمی و رسانایی سطحی به ترتیب ۱۴۰ و ۱۰۰ برابر ESDD می‌باشند. به طور مثال، مقدار ESDD برابر با  $0.5 \text{ mg/cm}^2$  معادل رسانایی محلول ۷ کیلوگرم نمک در یک متر مکعب آب و یا معادل رسانایی سطحی ۵ میکروزیمنس می‌باشد.

جهت محاسبه سطح آلودگی یک منطقه با استفاده از روشهای سه گانه اصلی مورد اشاره، ابتدا آلودگی سطح مفره جمع‌آوری می‌گردد و سپس بر حسب یکی از واحدهای  $\mu\text{s}$ ،  $\text{mg/m}^2$  و  $\text{kg/m}^3$  اندازه‌گیری می‌گردد. در انتها از مقایسه نتایج بدست آمده با جدول (۳-۸) کلاس یا سطح آلودگی مشخص می‌گردد.

جدول (۳-۸). مقایسه استانداردهای معتبر برای تعیین شدت آلودگی

معادل چگالی نمک رسوب شده ( $\text{mg/cm}^2$ )			شوری محلول ( $\text{kg/m}^3$ )		هدایت ویژه سطحی ( $\mu\text{s}$ )		نوع آلودگی
CIGRE E	IEEE	IEC 60815	CIGRE	IEC 60815	CIGRE	IEC 60815	
۰-۰.۳ ۰/۰.۱۵	۰-۰/۰.۳	-	۲/۵-۵	-	۱/۳-۵	-	خیلی سبک
۰-۰.۰۶ ۰/۰.۳	۰-۰/۰.۰۶ ۰/۰.۳	۰-۰/۰.۰۶ ۰/۰.۰۳	۱۰-۵	۱۴-۵	۶-۳	۲۰-۱۵	سبک
۰-۰/۱۲ ۰/۰.۰۶	۰-۰/۱ ۰/۰.۰۶	۰-۰/۲ ۰/۱	۲۰-۱۰	۴۰-۱۴	۱۲-۶	۳۵-۲۴	متوسط
۰-۰/۲۴ ۰/۰.۱۲	بیشتر از ۰/۱	۰/۰-۳/۶	۴۰-۲۰	۱۱۲- ۴۰	۲۴-۱۲	بیشتر از ۳۶	سنگین
۰-۰/۴۸ ۰/۰.۲۴	-	بیشتر از ۰/۰.۰۶	بیشتر از ۸۰	بیشتر از ۱۶۰	۴۸-۲۴	-	خیلی سنگین
بیشتر از ۰/۴۸	-	-	-	-	بیشتر از ۴۸	-	ویژه

#### ۵-۸ ارزیابی عایق‌های بیرونی براساس آلودگی محیط

عایقهای بیرونی (مقره و مقره عبوری) سیستم قدرت بیشتر از سایر عایقها در معرض آلودگی محیطی قرار دارند. بنابراین در انتخاب مقره‌های بیرونی کلاس آلودگی محیطی باید مد نظر قرار گیرد. مطابق استانداردهای IEC ۶۰۸۱۵ مقدار فاصله خزشی مورد نیاز (حداقل فاصله یا طول سطحی یک مقره بین سمت برقدار و سمت زمین آن) به دو صورت زیر بیان می‌شود:

الف- برحسب میلیمتر (کل فاصله خزشی).

ب- برحسب میلیمتر بر کیلوولت (فاصله خزشی مرتبط با حداکثر ولتاژ سیستم).

### ۱-۵-۸ ارزیابی عایق‌های بیرونی از طریق فاصله خزشی ویژه

براساس استاندارد IEC مقدار حداقل فاصله خزشی نامی عایق با توجه به سطح آلودگی، مطابق جدول (۸-۴) تعیین می‌شود.

جدول (۸-۴). مقدار حداقل فاصله خزشی نامی براساس سطح آلودگی IEC ۶۰۸۱۵

نسبت فاصله خزشی به فاصله هوایی	فاصله خزشی فاز به زمین (mm/kV)	فاصله خزشی فاز به فاز (mm/kV)	سطح آلودگی
حداکثر ۳/۵	-	۲۲	خیلی سبک
	۱۶	۲۸	سبک
	۲۰	۳۵	متوسط
حداکثر ۴	۲۵	۴۴	سنگین
	۳۱	۵۵	خیلی سنگین

در استاندارد IEC ۶۰۸۱۵ قوانین کلی انتخاب مشخصات مقره‌ها تحت شرایط آلاینده‌ها بیان شده است. حداقل فاصله خزشی نامی مقره‌های سرامیکی یا شیشه‌ای خارجی بین فاز و زمین، بین فاز و فاز و یا بین ترمینالهای یک فاز کلید قدرت یا سسکسیونر، از رابطه (۸-۱) تعیین می‌شود:

$$L_t = a \times L_r \times V_r \times k_d \quad (۸-۱)$$

$L_t$  (mm): حداقل فاصله خزشی نامی (مقدار فاصله خزشی واقعی باید با توجه به مقدار تغییرات مجاز بیان شده توسط سازندگان تعیین گردد).

$a$ : ضریب کاربری<sup>۱</sup> براساس نوع عایق مطابق جدول (۸-۶).

$L_r$  (mm/kV): حداقل فاصله خزشی نامی مخصوص فاز به زمین مطابق جدول (۸-۴).

$V_r$  (kV): حداکثر ولتاژ موثر فاز به فاز سیستم.

$k_d$ : ضریب اصلاح مربوط به قطر عایق‌های پست مطابق استاندارد IEC ۶۰۸۱۵.

جدول (۸-۵). ضریب اصلاح قطر برای فاصله خزشی

$k_d$	قطر متوسط عایق پست ( $D_m$ )
۱	$D_m < 300$ mm
۱/۱	$300 \leq D_m \leq 500$ mm
۱/۲	$D_m > 500$ mm

قطر متوسط عایق پست از رابطه (۸-۲) بدست می‌آید.

$$D_m = \frac{\int_0^{L_t} D(L) dL}{L_t} \quad (۸-۲)$$

در این رابطه:

$L_t$ : طول کل فاصله خزشی عایق پست.

$D(L)$ : قطر عایق پست متناسب با فاصله خزشی به طول  $L$ .

جدول (۸-۶). ضریب کاربری برای فاصله خزشی

کاربرد عایق	ضریب کاربری ( $a$ )
-------------	---------------------

۱/۰	بین فاز و زمین
۱/۷۳	بین فازها
۱/۰	بین کنتاکتهای باز یک کلید یا سوئیچ

تذکره ۱: تجهیزات کلیدزنی روباز (بدون محفظه)<sup>۱</sup> ممکن است به ضریب کاربری بزرگتر (۱/۱۵) نیاز داشته باشند.

تذکره ۲: مقره‌های با آرایش غیر عمودی که بوسیله برف پوشیده می‌شوند، به فاصله خزشی بزرگتری نیاز دارند.

همچنین مقدار فاصله خزشی مورد نیاز برای یک سطح آلودگی مشخص از رابطه (۸-۳) نیز قابل محاسبه می‌باشند. در تعیین میزان شدت آلودگی در این رابطه از سه روش، اندازه‌گیری ESDD، اندازه‌گیری هدایت ویژه سطحی و اندازه‌گیری شوری محلول آلودگی جمع‌آوری شده از محل نصب مقره‌ها استفاده شده است.

$$L_s (mm / kV) = A \times (ESDD)^b \quad (8-3)$$

رابطه (۸-۳) برای مقره‌های بشقابی و ضد مه صادق است. در رابطه مذکور  $L_s$  میزان فاصله خزشی ویژه بر حسب ولتاژ موثر فاز به زمین می‌باشد و مقادیر A و b از جداول (۷-۸) تا (۹-۸) بدست می‌آیند.

جدول (۷-۸). ضرایب ثابت در محاسبه حداقل فاصله خزشی ویژه در روش اندازه‌گیری ESDD

مراجع	b	A	ESDD (mg/cm <sup>2</sup> )	ساختار زنجیره مقره
IEEE	۰/۳۷۴	۸۶/۵	۰/۱ تا ۰/۰۲	آویزان
	۰/۱۵۸	۵۱/۴	۰/۱ تا ۰/۳	آویزان
	۰/۲۷۴	۵۲/۹	۰/۰۲ تا ۰/۱	شکل V
	۰/۱۲۲	۳۷/۱	۰/۱ تا ۰/۳	شکل V
CIGRE	۰/۲۲۳	۶۶	۰/۰۲ تا ۰/۴	آویزان

آویزان	۰/۴ تا ۰/۲	۴۸	۰/۲۲۰	CESI
آویزان	۰/۴ تا ۰/۲	۵۴/۴	۰/۲۳۲	NGK

ذکر این نکته ضروری است که به دلیل خود پالایندگی و تجمع کمتر آلودگی در زنجیره مقره V شکل مقدار فاصله خزشی آن نسبت به زنجیره مقره آویزان کمتر است، که این نکته در IEEE لحاظ شده است.

جدول (۸-۸). ضرایب ثابت در محاسبه حداقل فاصله خزشی ویژه در روش اندازه‌گیری هدایت سطحی ویژه

مراجع	b	A	رسانایی سطحی ( $\mu\text{s}$ )	ساختار زنجیره مقره
CIGRE	۰/۳۸۷	۱۴/۲	۸۰ تا ۲/۵	آویزان
CESI	۰/۲۸	۱۴/۲	۸۰ تا ۲/۵	آویزان

جدول (۹-۸). ضرایب ثابت در محاسبه حداقل فاصله خزشی ویژه در روش اندازه‌گیری شوری محلول

مراجع	b	A	شوری ( $\text{kg/m}^3$ )	ساختار زنجیره مقره
CIGRE	۰/۲۲۴	۲۳/۴	۱۰۰ تا ۳/۵	آویزان
CESI	۰/۲۸	۱۶/۶	۱۰۰ تا ۳/۵	آویزان

### مقایسه تعداد مقره‌های مورد نیاز بر اساس منابع گوناگون

در جدول (۸-۱۰) بر اساس روابط ذکر شده قبلی، تعداد مقره‌های مورد نیاز برای یک زنجیره مقره برای سطوح مختلف ولتاژ و سطوح مختلف آلودگی بر اساس استاندارد IEC ۶۰۸۱۵ ارائه شده است. این زنجیره مقره شامل مقره‌های استاندارد می‌باشد.

جدول (۸-۱۰). تعداد مقره‌های مورد نیاز

آلودگی سبک (ESDD=0/06) (mg/cm <sup>2</sup> )					آلودگی متوسط (ESDD= ۰/۱) (mg/cm <sup>2</sup> )					حداکثر ولتاژ موثر سیستم (kV)
IEC	IEEE	CIGRE	NGK	CESI	IEC	IEEE	CIGRE	NGK	CESI	
۴	۴	۵	۴	۴	۳	۵	۵	۴	۴	۷۲/۵
۸	۸	۱۰	۸	۷	۱۰	۱۰	۱۱	۹	۸	۱۴۵
۱۳	۱۴	۱۶	۱۳	۱۲	۱۶	۱۷	۱۸	۱۵	۱۳	۲۴۵
۲۲	۲۴	۲۸	۲۳	۲۱	۲۸	۲۹	۳۱	۲۵	۲۳	۴۲۰

### ۲-۵-۸ محاسبه عایق‌های بیرونی از طریق ولتاژ استقامت عایقی (CFO)<sup>۱</sup>

ولتاژ استقامت آلودگی<sup>۲</sup> مقره‌ها متناسب با طول آنها می‌باشد لذا با توجه به سطح ولتاژ استقامت آلودگی مورد نیاز، تعداد مقره‌ها را می‌توان محاسبه کرد. برای مقره‌های بشقابی استاندارد (طول قطر ۲۵۴ میلیمتر، فاصله هوایی ۱۴۶ میلیمتر و فاصله خزشی ۳۰۵ میلیمتر)، مقدار ولتاژ استقامت (ولتاژ موثر جرعه ۵۰٪ فاز به زمین) بر حسب طول زنجیره مقره با ESDD از طریق رابطه تجربی (۴-۸) بدست می‌آید.

۱- Critical Flashover Voltage

۲- The pollution withstand voltage

(۸-۴)

$$\begin{aligned} \text{CFO (kv / m)} &= 72 / 3 + \frac{1.64}{\text{ESDD}} && \text{for } 0/02 < \text{ESDD} < 0.04 \text{ (mg/m}^2\text{)} \\ \text{CFO (kv / m)} &= 64 / 4 + \frac{1.64}{\text{ESDD}} && \text{for } \text{ESDD} > 0.04 \text{ (mg/m}^2\text{)} \end{aligned}$$

همچنین جهت بدست آوردن ولتاژ استقامت با احتمال ۰/۱۵٪، CFO در ۰/۷ ضرب می‌شود. سپس با این مقدار می‌توان تعداد مقره‌های مورد نیاز برای یک سطح ولتاژ در یک شرایط آلودگی مشخص را بدست آورد. به عنوان مثال برای سطح ولتاژ ۶۳ کیلوولت و مقدار آلودگی ESDD برابر با ۰/۵۵، مقدار CFO برابر ۶۴/۴ کیلوولت بر متر خواهد شد. ولتاژ استقامت با احتمال ۰/۱۵٪ برابر ۴۷/۲ کیلوولت بر متر بدست خواهد آمد. لذا برای ولتاژ فاز به زمین سیستم که ۳۶/۴ کیلوولت می‌باشد، زنجیره مقره با طول ۰/۸ متر مورد نیاز است که با توجه به فاصله هوایی مقره استاندارد برابر با ۱۴۶ میلی‌متر تعداد مقره‌های لازم برای هر زنجیره، شش واحد خواهد بود.

مقدار ولتاژ استقامت آلودگی (برحسب پرینیت) برای سطح خزشی مقره‌های ضد مه برحسب سطح ESDD از رابطه تجربی (۸-۵) بدست می‌آید:

$$\text{CFO} = 15.462(\text{ESDD})^{-0.2879} \text{ (kV / m)} \quad (۸-۵)$$

به طور مثال، برای سطح ESDD برابر با ۰/۵۵ mg/mm<sup>2</sup>، مقدار CFO برابر است با:

$$\text{CFO} = 15.462(0.55)^{-0.2879} = 18.366 \text{ (kV / m)}$$

ولتاژ استقامت مقره‌ها بصورت ولتاژی که به ازای آن احتمال وقوع جرقه به ۰/۵٪ برسد انتخاب می‌شود که باعث بدست آمدن ولتاژ CFO به مقدار ۲۰٪ آن می‌باشد.

$$\text{CFO} = 13.223 \text{ (kV / m)}$$

مقدار ولتاژ جرقه مقره همچنین به مقدار مواد حل نشدنی (NSDD) بستگی دارد.

اگر مقدار NSDD بزرگتر یا مساوی مقدار ESDD باشد آنگاه ولتاژ جرعه بحرانی مقرر کاهش می‌یابد. با توجه به مقدار NSDD، ضریب کاهش ولتاژ استقامت بدست می‌آید. مثلاً برای NSDD برابر  $6 \text{ mg/cm}^2$ ، مقدار ضریب کاهش  $10\%$  می‌شود.

ولتاژ جرعه زنجیره مقره‌های آلوده، تابعی از تعداد زنجیره مقره‌های موازی می‌باشد. برای زنجیره مقره‌های موازی چندتایی ولتاژ جرعه با افزایش تعداد زنجیره مقره کاهش می‌یابد (EPRI-1982)<sup>۱</sup>. این امر به این علت است که تعداد نقاط ضعیف روی خط افزایش می‌یابد و بنابراین احتمال جرعه افزایش می‌یابد. بنابراین یک ضریب تعدیل  $10\%$  دیگر برای زنجیره مقره موازی خط انتقال در نظر گرفته می‌شود.

$$CFO = 0.9 \times 13.223 = 11.9 \quad (kV / m)$$

بنابراین حداقل فاصله خزشی مخصوص ( $l_{SCD}$ )<sup>۲</sup> برای ولتاژ فاز به فاز براساس رابطه زیر برابر  $48/59 \text{ mm/kV}$  می‌باشد.

$$l_{SCD} = \frac{1000}{11.9 \times \sqrt{3}} = 48.52 \quad (mm / kV)$$

در نهایت مقدار  $50 \text{ mm/kV}$  برای سطح خزشی انتخاب می‌شود تا فاصله خزشی و تعداد مقره‌های ضد مه انتخاب شود. بنابراین برای خطوط مختلف، تعداد مقره‌های ضد مه معمولی و ضد مه خاص از جدول (۸-۱۱) بدست می‌آیند.

جدول (۸-۱۱). تعداد مقره‌های ضد مه خطوط مختلف با سطح خزشی  $50 \text{ mm/kV}_{L-L}$

ولتاژ خط (kV)	فاصله خزشی (mm)	تعداد مقره ضد مه استاندارد مورد نیاز (با فاصله خزشی $432 \text{ mm}$ )	تعداد مقره ضد مه خاص مورد نیاز (با فاصله خزشی $545 \text{ mm}$ )
۳۳	۱۶۵۰	۴	-

۱- Electric Power Research Institute

۲- Special creepage distance



-	۸	۳۱۵۰	۶۳
-	۱۶	۶۶۰۰	۱۳۲
۲۲	-	۱۱۵۰۰	۲۳۰
۳۷	-	۲۰۰۰۰	۴۰۰

### تأثیر ارتفاع بر هماهنگی عایقی

محاسباتی که تاکنون برای انتخاب تعداد مقره انجام شده در شرایط استاندارد (دما ۲۰ درجه سانتیگراد، رطوبت ۱۱ گرم بر مترمکعب و فشار ۷۶۰ میلی‌مترجیوه) بوده است. از جمله شرایط محیطی که بر عملکرد مقره‌ها در محیط‌های بیرونی تأثیرگذار است، فشار هوا و یا ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. بر اساس استاندارد IEC ۶۰۰۷۱ فاصله خزشی ویژه با رابطه (۸-۶) از تغییر ارتفاع تأثیر می‌پذیرد.

$$L_s(\text{mm/kv})_H = \frac{L_s(\text{mm/kv})}{K_a} \quad (۸-۶)$$

$L_{sH}$  فاصله خزشی در ارتفاع مورد نظر و  $L_s$  فاصله خزشی در سطح دریا می‌باشد. همچنین  $K_a$  نیز از رابطه (۸-۷) بدست می‌آید.

$$K_a = e^{-m \frac{H}{8150}} \quad (۸-۷)$$

در این رابطه:

H: ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر.

m: ضریب ثابتی است که برای مقره‌های استاندارد ۰/۵ و برای مقره‌های ضد مه ۰/۸ می‌باشد.

همچنین مطابق استاندارد IEEE تأثیر ارتفاع بر تعداد مقره‌ها در هر زنجیره مقره بصورت زیر مشخص شده است.

$$N_H = N_g \left( e^{\frac{H}{14}} \right) \quad (8-8)$$

$N_H$  تعداد مقره در ارتفاع مورد نظر،  $N_g$  تعداد مقره در سطح دریا و  $H$  ارتفاع از سطح دریا بر حسب km می‌باشد.

به عنوان مثال تعداد مقره‌های استاندارد براساس استاندارد IEC برای سطح ولتاژ ۲۳۰ کیوولت و آلودگی متوسط در ارتفاع ۲۰۰۰ متری از سطح دریا مطابق جدول (۸-۱۲) می‌باشد.

جدول (۸-۱۲). مقایسه تعداد مقره‌ها در ارتفاع ۲۰۰۰ متری

ارتفاع از سطح دریا	در سطح دریا	IEC (در ارتفاع ۲۰۰۰ متری)	IEEE (در ارتفاع ۲۰۰۰ متری)
تعداد مقره	۱۶	۱۸	۱۸

### ۶-۸ روشهای کاهش تاثیر آلودگی‌ها بر عایقهای بیرونی

همانطور که ذکر شد، آلودگیها به همراه شرایط جوی نقش به سزایی بر کاهش قابلیت اطمینان سیستم قدرت دارند. برای پرهیز از تاثیر آلودگی‌ها بر عملکرد مقره‌ها، سه راهکار اصلی شامل انتخاب صحیح نوع مقره‌ها، حذف منابع آلاینده (انتخاب مکان مناسب برای سیستم قدرت) و نگهداری و تعویض مقره‌ها وجود دارد. بنابراین باید سطح عایقهای خارجی را همواره تمیز نگه داشت تا مانع وقوع خطای ناشی از آلودگی شوند. برای اینکار یا باید سطح مقره‌ها بطور طبیعی (خود به خود) تمیز شوند و یا شستشوی منظم آنها در برنامه تعمیر و نگهداری سیستم قرار داده شود.

اکثر روشهای کنترل آلودگی عموماً به شرح زیر می‌باشند:

- بررسی شدت آلودگی (تعیین انواع سطوح یا نواحی آلودگی).
- کنترل وضعیت آلودگی روی سطح مقره‌ها به منظور تعیین زمان تمیز کردن و نگهداری آنها برای جلوگیری از وقوع مشکلات ناشی از آلودگی.

- بررسی و مقایسه رفتار و مشخصات انواع طرحهای مختلف (شکل و طول) مقره‌ها و یا مقایسه جنس و نوع مواد مقره‌ها که باید در محیطهای آلوده به کار گرفته شوند.

مقره‌های مناسب برای استفاده در مناطق آلوده شامل مقره‌های غیرسرامیکی، مقره‌های سرامیکی با پوشش سیلیکونی (RTV)، مقره‌های با پوشش نیمه هادی و مقره‌های ضدمه می‌باشند. در مرحله نگهداری نیز از دو روش شستشوی دوره‌ای و گریس‌کاری به عنوان روش‌هایی جهت کاهش تاثیر آلاینده‌ها در مناطقی که میزان آلودگی بالاست استفاده می‌شود. لذا به اختصار هر کدام از این روش‌ها معرفی می‌شوند.

#### ۱-۶-۸ استفاده از مقره با شکل‌های بهینه شده

شکل و فاصله خزشی مقره‌ها می‌تواند بر حسب شرایط محیطی تغییر کند. به طور کلی شکل مقره به لحاظ آیرودینامیکی بهینه می‌شود تا کمترین مقدار آلودگی ممکن را جذب کند و تمیز شوندگی خود به خودی مقره‌ها به کمک باد و باران تسهیل شود. مقره‌های ضد مه دارای فاصله خزشی تقریباً ۱/۵ برابر مقره‌های استاندارد بوده و نسبت فاصله خزشی به فاصله هوایی این مقره‌ها بین ۲/۹ تا ۴/۵ می‌باشد، که عملکرد مناسبی را در مناطق آلوده از خود نشان می‌دهند.

#### ۲-۶-۸ استفاده از پوشش RTV

پوشش‌های سیلیکونی ( $RTV^1$ ) بطور مکرر هم در مقره‌های پستها و هم در مقره‌های خطوط مورد استفاده قرار می‌گیرند. این پوششها روی مقره‌های چینی و پوشینگها به منظور ایجاد یک سطح آبگریز اعمال می‌گردند. تجربیات بدست آمده نشان می‌دهد که این پوششها به خوبی عمل کرده و برای چند سال روی مقره باقی می‌مانند. همچنین این پوشش ولتاژ شکست مقره را نیز افزایش می‌دهد.

طول عمر پوشش RTV به ترکیب پوشش، ضخامت آن و شدت آلودگی بستگی دارد. این پوشش عمر مفره را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. همچنین این پوشش را می‌توان به مفره‌ها در شرایط خط گرم نیز اعمال نمود. مکانیزم مقاومت در برابر جرقه ناشی از آلودگی، بر اساس حفظ خاصیت آبگریزی<sup>۱</sup> سطح و به شکل کپسول در آوردن آلودگی می‌باشد. همانند مفره‌های غیرسرامیکی، پوششهای RTV به سرعت در هنگام تخلیه‌های الکتریکی فرسوده می‌شوند. لذا باید در سطوح ولتاژ بالاتر، مراقبت بیشتری برای اطمینان از اینکه مفره‌ها بدون کرونا هستند صورت گیرد.

### ۳-۶-۸ بکارگیری مفره‌های با لعاب نیمه هادی

در مناطق با آلودگی سنگین، مفره‌های با لعاب نیمه‌هادی اغلب به منظور کم کردن جرقه ناشی از آلودگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مفره‌ها از یک لعاب مخصوص استفاده می‌شود که بصورت بسیار اندک خاصیت هدایت دارد. این لعاب برای فراهم کردن یک جریان پایدار با فرکانس قدرت در روی سطح مفره بکار گرفته می‌شود. کاربرد آن منجر به توزیع میدان الکتریکی یکنواخت و گرم شدن یکنواخت سطح مفره می‌گردد که هر دوی اینها به عملکرد مناسب مفره در شرایط آلوده کمک می‌کنند. گرم شدن سطح، ناشی از چگالی جریان، به فرآیند خشک شدن سطح کمک می‌کند. همچنین توزیع میدان الکتریکی یکنواخت‌تر، جرقه ناشی از باند خشک را کنترل می‌کند. جریان هدایتی لعاب عموماً طوری انتخاب می‌شود که حدوداً یک میلی آمپر باشد و باعث گردد سطح مفره چندین درجه گرمتر از محیط اطرافش شود. امروزه اغلب از لعاب نیمه هادی برای ساخت مفره‌های نوع یکپارچه اتکائی و پوشینگها استفاده می‌شود.

#### ۴-۶-۸ شستشوی دوره‌ای

در مناطقی که آلودگی شدید و بارش باران کم بوده و افزایش فاصله خزشی زنجیره مقره مقرون به صرفه نباشد از این روش استفاده می‌شود. در تعداد زیادی از تأسیسات فشارقوی، سیستمهای آب پر فشار و بلاستینگ یا گلوله‌های دی‌اکسیدکربن برای شستشوی منظم و دوره‌ای سطح جهت رفع آلودگی از روی مقره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. از میان این روشها، روش آب پر فشار دارای کاربرد بیشتر و بمراتب کم هزینه‌تر است. روش بلاستینگ یا گلوله‌های دی‌اکسیدکربن برای شستشوی آلودگی‌های شبیه سیمان که پاک کردن آنها مشکل است، مؤثرتر می‌باشد. بطور کلی این روشها بصورت دوره‌ای، بر اساس ساختار آلودگی، شدت و چگونگی رسوب آلودگی و شرایط رطوبت محلی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

#### ۵-۶-۸ استفاده از پوشش گریس

از ژلهای نفتی یا گریسهای هیدروکربنی به عنوان پوشش سطح مقره‌ها در نواحی با آلودگی سنگین استفاده می‌شود. این پوششها سطوح مقره‌ها را آبگریز کرده و لایه سطحی می‌تواند آلودگی را در بدنه خود بصورت کپسول درآورد که از حل شدن آلودگی در آب در هنگام شروع مکانیزم خیس شدن سطح، جلوگیری می‌کند. ضخامت گریس استفاده شده بر روی سطح مقره به نوع گریس و درجه آلودگی بستگی دارد، ولی به طور معمول ضخامت گریسهای نفتی ۱ میلی‌متر و گریسهای هیدروکربنی بیشتر می‌باشد. همانند روش شستشو، این روش نیز راه حلی مبنی بر نگهداری است که باید بطور دوره‌ای تکرار شود. گریس به مرور زمان بر اثر باران و باد و اشباع آلودگی به صورت موضعی از سطح مقره جدا می‌گردد. معمولاً پیش از عملیات گریس‌کاری جدید، گریس‌کاری قدیمی می‌بایست از روی مقره پاک شود. در اکثر موارد، هم اعمال گریس جدید و هم پاک کردن گریس قدیمی، عملیاتی دستی هستند. این فرآیند کند بوده و نیاز به

قطع مدار دارد.

احتمال وقوع و چگونگی وضعیت خطا به نوع و شکل مقره، شرایط آب و هوای منطقه، نوع و میزان آلودگی و همچنین ولتاژ کاری سیستم بستگی دارد. در مناطق با آلودگی دریایی، بخاطر وجود املاح نمکی و رطوبت بالای محیط، حتی فاصله خزشی بالای  $40 \text{ kV/mm}$  نمی تواند باعث اطمینان از کارائی مقره‌ها گردد و جرقه روی مقره‌ها تحت شرایط رطوبت بالا ایجاد می شود. لذا باید سطح خزشی بزرگتر از این مقدار انتخاب شود و یا برنامه شستشوی دوره‌ای زنجیره مقره‌ها اجرا گردد. شستشوی مقره‌ها باعث افزایش قابل ملاحظه هزینه‌های نگهداری می شود.

به طور کلی، به منظور کاهش جریان خزشی در مقره‌های پست از مواد مختلف شوینده مثل اسید کلریدریک رقیق (فلوئور به همراه اسید کلریدریک رقیق یا نیترات آلومینیم، یا مواد پاک کننده معمولی و غیره) به همراه گریسکاری با گریس سیلیکونی استفاده می شود.

استفاده از مقره‌های ضد سوپر-مه<sup>۱</sup> که دارای طول خزشی بزرگتری نسبت به مقره‌های ضد مه معمولی هستند برای مناطق با رطوبت خیلی بالا مناسب می-باشند و بدون اینکه طول زنجیره مقره را افزایش دهند باعث افزایش فاصله خزشی آن می شوند. فاصله خزشی یک مقره ضد مه سوپر استاندارد با طول استاندارد  $146$  میلیمتر برابر  $612$  میلیمتر می باشد. در واقع با استفاده از مقره مذکور، سطح خزشی با  $46\%$  افزایش از  $40 \text{ kV/mm}$  به  $58/5 \text{ kV/mm}$  تغییر می کند. این افزایش سطح خزشی باعث افزایش فاصله شستشوی مقره‌ها از حداکثر  $6$  ماه به  $3$  سال می شود.

## ۷-۸ سؤال و تمرین

۱. روش های آزمایشگاهی جهت دسته بندی آلودگی محیط را نام ببرید.

۲. یک خط انتقال ۴۰۰ کیلوولتی در ارتفاع ۱۲۰۰ متری از سطح دریا مفروض است. این خط در مسیر خود از منطقه‌ای با میزان آلودگی برابر با  $0/15 \text{ (mg/m}^2\text{)}$  (با روش اندازه‌گیری ESDD) عبور می‌کند. در این خط از دو نوع زنجیره مقره آویزان و V شکل استفاده شده است. تعداد مقره‌ها را برای این زنجیره مقره‌ها محاسبه کنید.

۳. روش‌های کاهش آلودگی روی مقره‌ها را نام ببرید.

دکتر محسن نیاستی - دکتر احمد غلامی (انتشارات دانشگاه سمنان)

## فصل ۹

### مدلسازی شبکه قدرت جهت بررسی حالت‌های گذرا

#### ۹-۱ مقدمه

حالت‌های گذرای الکتریکی در یک سیستم قدرت زمانی پدید می‌آیند که یک تغییر مداری آنی مثل پدیده کلیدزنی رخ دهد. در این صورت حالت‌های گذرا برای تبدیل شرایط مدار یا سیستم از یک وضعیت پایدار قبلی (قبل از کلیدزنی) به وضعیت پایدار جدید (بعد از کلیدزنی) اتفاق می‌افتند. پدیده‌هایی که در حالت‌های گذرای سیستم قدرت وجود دارند به دو گروه اصلی به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

الف- تقابل بین انرژی مغناطیسی و انرژی الکترواستاتیکی (ذخیره شده در اندوکتانس و ظرفیت خازنی مدار) که حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی را ایجاد می‌کنند.

ب- تقابل بین انرژی مکانیکی ذخیره شده در ماشین‌های دوار و انرژی الکتریکی ذخیره شده در اندوکتانس و کپاسیتانس مدار که حالت‌های گذرای الکترومکانیکی را بوجود می‌آورند.



هرچند دوره‌های گذرا معمولاً در مقایسه با فرکانس‌های قدرت بسیار کوچک می‌باشند، اما بررسی و مطالعات آنها بسیار مهم و با اهمیت هستند. زیرا در چنین زمان‌های بسیار کوچکی، ممکن است تنش‌های بسیار زیادی به خاطر جریانها و ولتاژهای گذرای غیر طبیعی به تجهیزات سیستم تحمیل شود.

در بررسی هماهنگی عایقی سیستم‌های قدرت در ابتدا بایستی اطلاعات دقیقی از اضافه ولتاژهای موجود در سیستم در دسترس باشد. اضافه ولتاژهای متداول همانند صاعقه و کلیدزنی در بازه فرکانسی بسیار بالایی تا چند صد مگاهرتز اتفاق می‌افتند. در این حالت برای مدل‌سازی تجهیزات سیستم قدرت نمی‌توان از مدل حالت ماندگار تجهیزات برای مطالعات رفتار شبکه در فرکانسهای بالا استفاده نمود. در فرکانسهای بالا در شرایط گذرا، خازن‌های موجود در تجهیزات دارای امپدانس بسیار کوچکی می‌باشند و نقش اساسی را در مدل‌سازی حالت گذرا ایفا می‌کنند. برای پستها، ترانسفورماتورهای قدرت، برقگیرها، ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان و کلیدهای قدرت و همچنین خطوط انتقال، عناصر اساسی در تعیین اضافه ولتاژهای گذرا می‌باشند، که در ذیل مدل‌های گذرای آنها مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۹ مدل خط انتقال هوایی

خطوط انتقال الکتریکی متشکل از اجزاء یک سیستم به هم پیوسته می‌باشند و برای تعیین جریان، ولتاژ، توان، افت ولتاژ، تلفات و دیگر کمیت‌های خطوط، باید سیستم بهم پیوسته را تجزیه و تحلیل نمود. مطالعه روابط ولتاژها و جریانها در یک خط انتقال نتیجه بهتری از اهمیت پارامترهای خط و تأثیر آنها در ولتاژ شین و پخش توان در نقاط مختلف را ارائه خواهد نمود.

همچنین مدل‌سازی خطوط انتقال، زمینه را برای مطالعات بعدی سیستم هموار می‌سازد. برای مدل‌سازی خط انتقال نیرو در نرم افزار EMTP سه روش وجود دارد:

(۱) مدل  $\pi$  خط انتقال

(۲) مدل خط انتقال

(۳) مدل وابسته به فرکانس خط انتقال (Semlyen, J.Marti)

در مدل  $\pi$ ، خط بصورت فشرده، همراه با عناصر R,C,L مدل و نمایش داده می‌شود. در این مدل طول خط دخالتی ندارد ولی در مدل گسترده طول خط انتقال پارامتر مهمی است. در فرکانسهای مختلف پارامترهای خط مقدار ثابتی را خواهند داشت. در این مدل خطوط کوتاه (کمتر از ۸۰ کیلومتر) به صورت یک امپدانس فشرده سری و خطوط متوسط با مدل نامی  $\pi$  مدل می‌گردند. در مطالعات بررسی حالت‌های گذرا در سیستمهای قدرت، تعیین تعداد المانهای مدل  $\pi$  خط انتقال از اهمیت بالایی برخوردار است. بطور کلی تعداد المانهای مدل  $\pi$  خط به عواملی مثل طول خط، ثابت انتشار (سرعت انتشار موج) و فرکانس شبیه سازی بستگی دارد. تعداد المانهای مدل پی برای یک خط انتقال با طول  $L$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n_{pi} = \frac{L(m)}{\Delta l(m)} \quad (1-9)$$

$$\Delta l = v \times \Delta t \quad (2-9)$$

$\Delta l(m)$ : حداکثر طول هر المان مدل خط

$\Delta t(s)$ : بازه تغییرات زمان در شبیه سازی

$v(m/s)$ : سرعت انتشار موج گذرا در خط که متناسب با پارامترهای خط

می‌باشد و از رابطه (۳-۹) محاسبه می‌شود:

$$v = 1/\sqrt{lc} \quad (3-9)$$

به عنوان مثال برای یک خط با اندوکتانس  $0.45 \mu H/m$  و کاپاسیتانس  $1 PF/m$

و بازه تغییراتی زمانی  $1 ms$  طول هر بخش از مدل  $\pi$  برابر است با:

$$v = 1/\sqrt{0.045 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^{-8}} = 1.5 \times 10^7 m/s$$

$$\Delta t = 1ms = 1 \times 10^{-3} s$$

$$\Delta l = 1.5 \times 10^7 \times 1 \times 10^{-3} = 15 \text{ km}$$

حداکثر بازه فرکانسی مدل  $\pi$  خط از رابطه تقریبی (۴-۹) قابل محاسبه می‌باشد:

$$f_{\max} \approx \frac{n \pi \times V}{8 \times L} \quad (۴-۹)$$

به عنوان مثال برای یک خط با طول ۳ km و سرعت حرکت موج برابر با نصف سرعت نور بزرگترین فرکانس کاری برای شبیه‌سازی برابر است با:

$$f_{\max} \approx \frac{1 \times 1.5 \times 10^7}{8 \times 3000} = 625 \text{ Hz}$$

ارتباط بین ولتاژها و جریان‌های طرف فرستنده و گیرنده خط انتقال به صورت ماتریسی زیر بیان می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (۵-۹)$$

$V_s$  و  $I_s$  به ترتیب ولتاژ و جریان سمت فرستنده خط و  $V_r$  و  $I_r$  به ترتیب ولتاژ و جریان سمت گیرنده خط می‌باشد. عنصر ماتریس نیز با توجه به طول خط مورد بررسی در جدول (۱-۹) نشان داده شده است.

جدول (۱-۹). پارامترهای ماتریسی انتقال خطوط انتقال هوایی در روش‌های مختلف

نوع خط	نوع مدار معادل	A=D (بدون واحد)	B ( $\Omega$ )	C (S)
خط کوتاه ( $L < 80 \text{ km}$ )	امپدانس سری	۱	Z	۱
خط متوسط ( $80 \text{ km} < L < 240 \text{ km}$ )	مدار معادل $\pi$ نامی	$1 + \frac{YZ}{2}$	Z	$Y(1 + \frac{ZY}{4})$
خط بلند ( $L > 240 \text{ km}$ )	مدار معادل $\pi$ گسسته	$\text{Cosh}(\gamma l)$	$Z_c \text{Sinh}(\gamma l)$	$(1/Z_c) \text{Sinh}(\gamma l)$
خط بلند بدون تلفات R=G=0	مدار معادل $\pi$ گسسته	$\text{Cos}(\beta l)$	$jZ_c \text{Sin}(\beta l)$	$(j/Z_c) \text{Sin}(\beta l)$

در مدار معادل گسسته پارامترهای مدار معادل خط بصورت گسسته مدل شده و در طول خط انتشار یافته‌اند. پارامترهای استفاده شده در جدول مذکور بصورت زیر محاسبه می‌گردند.

$$\begin{aligned} Z &= zl \quad (\Omega), & z &= R + j\omega L \quad (\Omega/m) \\ Y &= yl \quad (S), & y &= G + j\omega C \quad (S/m) \end{aligned} \quad (6-9)$$

در روابط مذکور R و L به ترتیب مقاومت و اندوکتانس واحد طول خط، G و C به ترتیب رسانایی و خازن واحد طول خط می‌باشد. همچنین مقادیر  $\gamma$  و  $Z_c$  که به ترتیب ثابت انتشار و امپدانس مشخصه نامیده می‌شوند، از روابط زیر حاصل می‌گردند.

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad (m^{-1}), \quad Z_c = \sqrt{z/y} \quad (\Omega) \quad \beta = \omega\sqrt{LC} \quad (7-9)$$

کاملترین مدل، مدل وابسته به فرکانس می‌باشد که در فرکانسهای مختلف مقادیر پارامترهای خط محاسبه می‌شوند. دو پارامتر مهم در این مدل، امپدانس مشخصه خط یا  $Z_c$  و ثابت انتشار<sup>۱</sup> می‌باشند که به ترتیب از روابط (۹-۸) و (۹-۹) بدست می‌آیند. البته هر دو رابطه مذکور وابسته به فرکانس می‌باشند.

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (9-8)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (9-9)$$

چنانچه خط بدون تلفات فرض شود روابط بالا به روابط ساده (۹-۱۰) و (۹-۱۱) تبدیل می‌شوند.

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9-10)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC} \quad (9-11)$$

در تحلیل حالت‌های گذرا از مدار معادل گسسته استفاده می‌گردد ولی در این حالت تنها شکل موج ولتاژ یا جریان در نظر گرفته می‌شود. این شکل موج‌ها همان‌طور که در فصل سوم اشاره شده برای خط بدون تلفات به صورت زیر می‌باشند.

$$u = u^- \left( t + \frac{X}{v} \right) + u^+ \left( t - \frac{X}{v} \right) \quad (9-12)$$

$$i = i^- \left( t + \frac{X}{v} \right) + i^+ \left( t - \frac{X}{v} \right) \quad (9-13)$$

در روابط بالا  $i^+$  و  $v^+$  به ترتیب موج جریان و ولتاژ در جهت مثبت محور  $X$  و  $i^-$  و  $v^-$  به ترتیب موج جریان و ولتاژ در جهت منفی محور  $X$  می‌باشد. اگر خط دارای تلفات ( $R \neq 0, G \neq 0$ ) و بدون اغتشاش ( $R/L = G/C$ ) در نظر گرفته شود، آنگاه معادلات شکل موج‌ها بصورت زیر ظاهر می‌گردند.

$$u = e^{-\alpha x} u^- \left( t + \frac{X}{v} \right) + e^{\alpha x} u^+ \left( t - \frac{X}{v} \right) \quad (9-14)$$

$$i = e^{\alpha x} i^- \left( t + \frac{X}{v} \right) + e^{-\alpha x} i^+ \left( t - \frac{X}{v} \right) \quad (9-15)$$

در روابط فوق،  $\alpha = \sqrt{RG}$  ثابت تضعیف موج در جهت حرکت در محور  $X$  می‌باشد.

برای حل این معادلات و بررسی آنها در نرم‌افزارهای تحلیل حالت‌های گذرا می‌توان این معادلات را در بازه‌های زمانی گسسته  $\Delta t$  بررسی نمود. در این حالت با در نظر گرفتن زمان عبور موج از ترمینال  $m$  به ترمینال  $k$  برابر با  $\tau$  می‌توان روابط ولتاژ و جریان را بین این ترمینال‌ها بصورت روابط (9-16) و (9-17) بیان نمود.

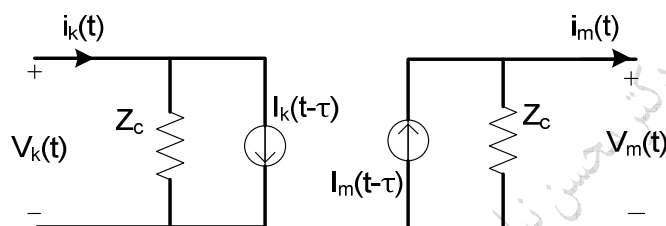
$$(9-16)$$

$$i_m(t) = I_m(t-\tau) - v_m(t) / Z_c, \quad I_m(t-\tau) = i_k(t-\tau) + v_k(t-\tau) / Z_c$$

$$(9-17)$$

$$i_k(t) = I_k(t-\tau) - v_k(t) / Z_c, \quad I_k(t-\tau) = i_m(t-\tau) + v_m(t-\tau) / Z_c$$

با توجه به معادلات بالا مقدار ولتاژ و جریان در هر کدام از ترمینال‌ها با یک منبع جریان و یک مقاومت مطابق شکل (۹-۱) بیان می‌گردد. در واقع مقدار جریان و ولتاژ در هر لحظه در یک ترمینال به مقدار جریان در ترمینال دیگر در  $\tau$  لحظه قبل بستگی دارد.

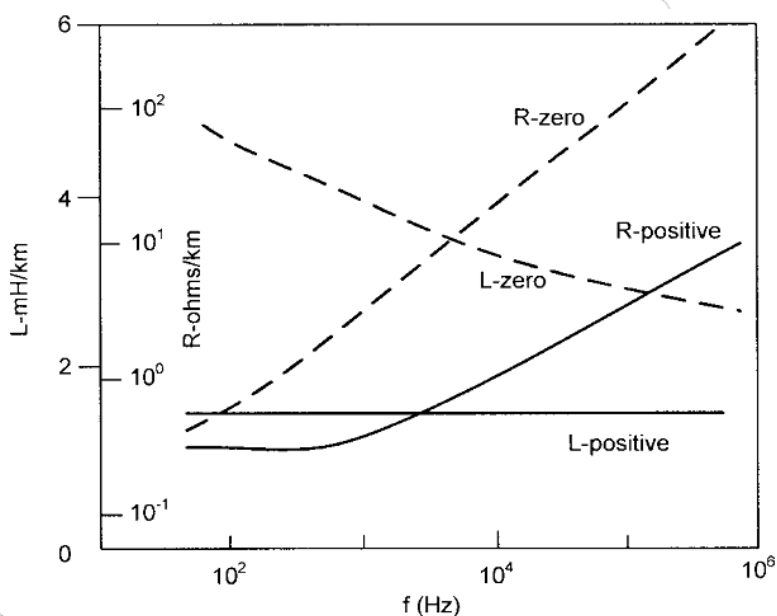


شکل (۹-۱). مدار معادل در روش زمان گسسته

در این روش عناصر مداری سلف و خازن با یک مقاومت و یک منبع جریان ایده‌آل موازی با هم مدل می‌شوند. برای تبدیل آنها از روش انتگرال دوزنقه‌ای استفاده می‌شود. مقدار مقاومت سلف و خازن به ترتیب برابر  $\Delta t/2L$  و  $\Delta t/2C$  می‌باشد، و مقدار جریان نیز برابر مقدار گذشته جریان عبوری از عنصر مورد نظر می‌باشد. با توجه به تعداد هادیهای خطوط انتقال (تعداد هادیهای فازها، وجود سیمهای محافظ و چند مداره بودن) بایستی از روش آنالیز مودال استفاده شود. در هر کدام از حالت‌های مثبت و منفی و صفر، موج با یک سرعت و امپدانس موجی مخصوص بخود حرکت می‌کند. برای تبدیل ماتریس ولتاژ خطوط انتقال به ولتاژهای مودال از ماتریس مودال استفاده می‌گردد. یکی از ماتریس‌های مودال معروف که در تحلیل خطوط انتقال استفاده می‌گردد، ماتریس Clarke می‌باشد.

پارامترهای مدار معادل خط انتقال (مقاومت، سلف و خازن‌های خودی و متقابل) می‌توانند هم بصورت یک عدد ثابت و هم وابسته به فرکانس در نظر گرفته شوند. برای تحلیل فرکانس‌های بالا باید وابستگی مقاومت و اندوکتانس خط انتقال به

فرکانس نیز در نظر گرفته شود که در مدل خط انتقال J.Marti این امر لحاظ گردیده است. میزان تاثیر فرکانس بر عناصر معادل هادی‌های خطوط انتقال به مقاومت زمین، اثر پوستی، ارتفاع هادی و فاصله هادی‌ها از همدیگر بستگی دارد. نمونه‌ای از وابستگی مقدار اندوکتانس و مقاومت به فرکانس برای یک خط دارای سه هادی که بطور افقی به فاصله ۳ متر از هم و در ارتفاع ۱۲ متری از سطح زمین قرار دارند، در شکل (۹-۲) ارائه شده است. در این شکل تنها تاثیر اثر پوستی در نظر گرفته شده است.



شکل (۹-۲). تغییرات مقدار مقاومت و اندوکتانس بر حسب فرکانس

برای فرکانسهای کمتر از ۱۰۰ MHz، یک شین به صورت یک خط انتقال بدون تلفات مدل می‌شود و امپدانس موجی و سرعت انتشار موج در داخل شین براساس مشخصات فیزیکی آن مدلسازی می‌گردد.

## ۳-۹ مدل کابلها

کابل‌ها همانند خطوط انتقال با مقاومت، امپدانس مشخصه، میزان تضعیف و سرعت انتشار در بررسی حالت‌های گذرا مدل می‌گردند. مدل  $\pi$  کابل‌ها شامل مقاومت، اندوکتانس و خازن با مقادیر ثابت می‌باشد. در این مدل مقاومت در سه بخش میانی و دو انتهای کابل در نظر گرفته می‌شود. در کابل‌ها به دلیل فاصله کم بین فازها و عدد دی‌الکتریک بالای عایق‌های آن نسبت به هوا، حتی در مدل‌سازی کابل‌های با طول کم نیز باید خازن‌های موازی (مدل  $\pi$ ) لحاظ گردند. غلاف‌های فلزی کابل نیز در تحلیل حالت گذرا نقش اساسی دارند که با تقسیم کابل به زیر بخش‌های مختلف پارامترهای وابسته به این بخش فلزی نیز در مدار معادل کابل وارد می‌گردند. همانند خطوط انتقال بهترین روش در مدل‌سازی کابل‌ها در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی پارامترها می‌باشد. محاسبه پارامترهای کابل مستلزم در نظر گرفتن شکل هندسی آن و نحوه نصب کابل می‌باشد. بطور کلی در تمامی کابل‌ها بایستی بدلیل عبور جریان‌های نشتی و القایی بین قسمت‌های فلزی (هادی، محافظ الکترومغناطیسی و محافظ مکانیکی)، امپدانس آنها در تعیین پارامترهای کابل لحاظ گردند. در جدول (۲-۹) به صورت نمونه تفاوت مشخصات الکتریکی کابل و خط هوایی  $230 \text{ kV}$  نشان داده شده است.

جدول (۲-۹). مقایسه مشخصات الکتریکی خط هوایی و کابل دفنی  $230 \text{ kV}$

پارامتر	خط هوایی	کابل XLPE دفن شده
خازن موازی ( $\mu\text{F}/\text{mi}$ )	۰/۰۱۵	۰/۳
اندوکتانس سری ( $\text{mH}/\text{mi}$ )	۲	۰/۹۵
جریان شارژ خط ( $\text{A}/\text{mi}$ )	۱/۴	۱۵/۲
تلفات عایقی ( $\text{kw}/\text{mi}$ )	۰	۰/۲
امپدانس موجی ( $\Omega$ )	۳۷۵	۲۶/۸



#### ۴-۹ مدل دکل یا برج خط انتقال هوایی

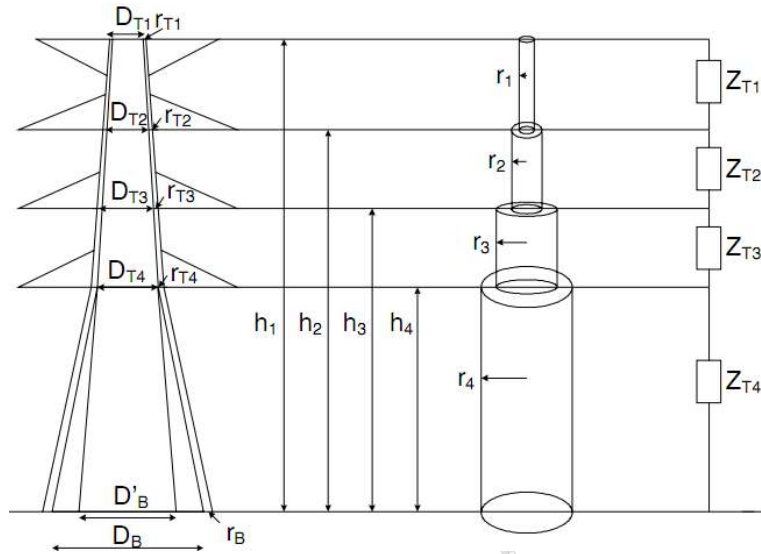
دکلها یا برجهای خطوط انتقال یکی از تجهیزات مهم در مطالعات حالت گذرا به خصوص برای مطالعات صاعقه در خطوط انتقال می‌باشند. برای امواج با شیب تند (موج صاعقه) دکل باید بصورت مدل پارامتری گسترده مدلسازی شود. دکل خط انتقال غالباً به وسیله مدل Sargent مدلسازی می‌شود که براساس این مدل، دکل بصورت یک مخروط با امپدانس موجی ۱۷۰ اهم مدل می‌شود. در این صورت، سرعت انتشار موج در دکل برابر سرعت انتشار نور فرض می‌شود و هیچ تضعیف موجی وجود ندارد.

در مدل خط عمودی چند-هادی<sup>۱</sup>، هر بخش از دکل بین بازوها توسط چند هادی عمودی در کنار هم مدل شده است. در نهایت هر بخش با یک هادی خط انتقال که سطح مقطع آن از بالا به پایین افزایش می‌یابد مدل می‌گردد. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۹-۳) ارائه شده است.

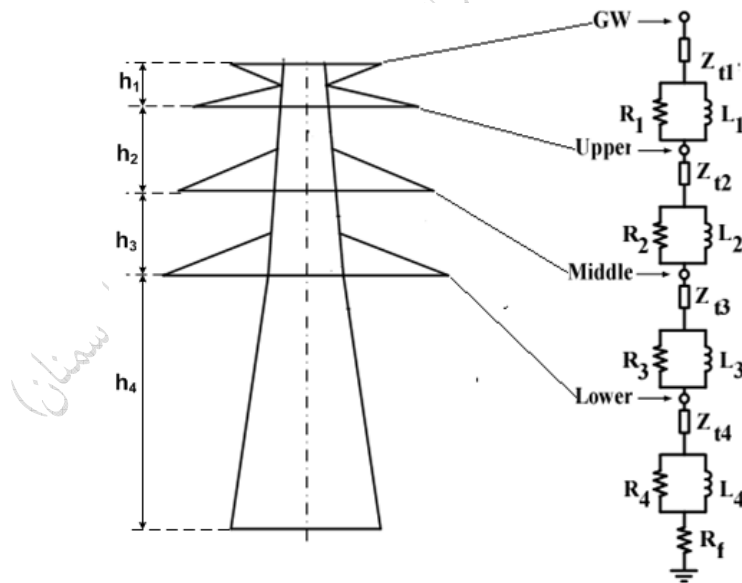
در مدلی جدید معروف به مدل چند جزئی<sup>۲</sup>، مطابق شکل (۹-۴) سری با امپدانس موجی دکل یک مقاومت و اندوکتانس موازی قرار می‌گیرد. اندوکتانس برای مدل کردن بهتر شکل موج (پشت موج گذرا) پس از عبور موج از دکل می‌باشد و مقاومت نیز برای در نظر گرفتن تضعیف موج در هنگام عبور از دکل اضافه می‌گردد. در این مدل هر دکل به قسمت‌هایی بین بازوهای دکل تقسیم می‌گردد، که هر قسمت دارای امپدانس مشخصه و مقاومت و اندوکتانس مربوطه می‌باشد.

۱- Multi-conductor vertical line model

۲- Multistory



شکل (۹-۳). مدل دکل خط عمودی چند هادی



شکل (۹-۴). مدل دکل با استفاده از روش چند قسمتی

مقادیر مقاومت و اندوکتانس اشاره شده در مدل‌های مذکور، با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردند.

$$R_i = \frac{-2Z_{ti} \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} \cdot h_i \quad \text{for } i = 1-3 \quad (18-9)$$

$$R_4 = -2Z_{t4} \ln \sqrt{\gamma}$$

$$L_i = \frac{2R_i(h_1 + h_2 + h_3 + h_4)}{v} \quad (19-9)$$

$\gamma$  ضریب تضعیف موج می‌باشد که مقدار آن بین  $0/8$  تا  $0/9$  در نظر گرفته می‌شود. امپدانس موجی نیز با توجه به نوع دکل به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

• دکل مخروطی شکل:

$$Z_t = 30 \ln \left[ 2 \left( 1 + \left( \frac{h}{r} \right)^2 \right) \right] \quad (\Omega) \quad (20-9)$$

• دکل استوانه‌ای شکل:

$$Z_t = 60 \left( \ln \left( \frac{h}{r} \right) + \frac{1.5r}{h} - 1 \right) \quad (\Omega) \quad (21-9)$$

در روابط مذکور  $r$  شعاع قاعده دکل (شعاع دایره معادل قاعده دکل) و  $h$  ارتفاع دکل بر حسب متر می‌باشد.

مقاومت زمین پای دکل ( $R_f$ ) بصورت تابعی از جریان تزریقی به آن، از رابطه (۹-۲۲) بدست می‌آید.

$$R_f = \frac{R_0}{\sqrt{1 + I/I_g}} \quad (22-9)$$

در این رابطه  $R_0$  مقاومت زمین پای دکل در جریان کم و فرکانس پایین،  $I$  جریان صاعقه تزریق شده در خاک و  $I_g$  جریان محدود کننده یونیزاسیون اولیه خاک با توجه به رابطه (۹-۲۳) می‌باشد.

$$I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R_0^2} \quad (23-9)$$

همچنین  $\rho$  مقاومت مخصوص خاک برحسب اهم-متر و  $E_0$  شدت میدان یونیزاسیون خاک ( $\cong 300kV/m$ ) می‌باشد.

### ۵-۹ مدل زنجیره مقره دکلهای خطوط انتقال

زنجیره مقره در خطوط انتقال به صورت یک خازن موازی با یک کلید ایده آل (بدون تاخیر زمانی) مدل می‌شود. خازن این مدل در واقع مقدار معادل خازن‌های مقره‌ها و خازن‌های نشستی بین مقره‌ها و بدنه دکل می‌باشد. کلید در این مدل به صورت کنترل شده با ولتاژ که در زمان اصابت صاعقه یا اعمال اضافه ولتاژ به دو سر زنجیره مقره بصورت لحظه‌ای بسته می‌گردد، مدل می‌شود. مقدار این اضافه ولتاژ برای زنجیره مقره با طول  $3/5$  متر،  $1650$  kV بدست می‌آید. ظرفیت خازنی هر مقره بین  $30$  تا  $50$  پیکوفاراد و خازن‌های نشستی بین کلاک‌ها و دکل نیز بین  $2$  تا  $6$  پیکوفاراد می‌باشد.

از آنجایی که ولتاژ شکست در فاصله هوایی بین دکل و هادی علاوه بر دامنه ولتاژ به زمان اعمال ولتاژ نیز بستگی دارد، بهترین روش برای مدل کردن جرقه استفاده از رابطه ولتاژ- زمان به صورت زیر می‌باشد.

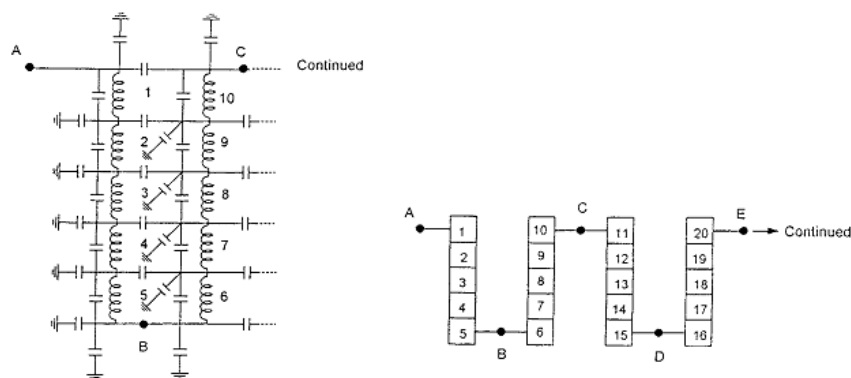
$$V_{fo}(t) = \left( 400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) L \quad (9-24)$$

در این رابطه  $V_{fo}$  ولتاژ شکست در فاصله هوایی برحسب کیلوولت و  $L$  طول فاصله هوایی بر حسب متر می‌باشد.

### ۶-۹ مدل ترانسفورماتور

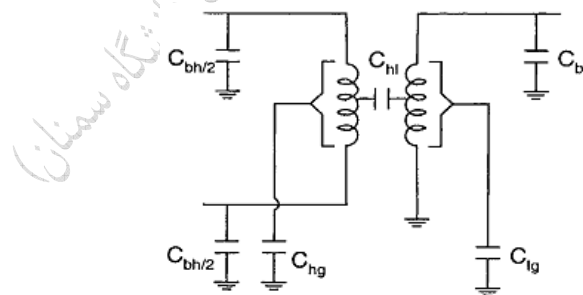
عامل مهم در انتقال امواج فرکانس بالای ولتاژ یا جریان بین سیم پیچ‌های ترانسفورماتور وجود خازن‌های نشستی می‌باشد. ظرفیت این خازن‌ها به نوع سیم‌پیچی و نوع هسته ترانسفورماتور بستگی دارد. این خازن‌ها با تغییر در منحنی شار-جریان هسته، مشخصات تحریک ترانسفورماتورها را تغییر می‌دهند.

در شکل (۵-۹) یک نمونه از این خازن‌های نشتی نشان داده شده است. هر کدام از مستطیل‌ها بیان‌گر بخشی از سیم‌پیچ می‌باشند، که با یک سلف مدل شده‌اند. خازن‌های ترانسفورماتور شامل خازن بین دورهای سری سیم‌پیچ‌ها، خازن بین دورهای موازی سیم‌پیچ و خازن بین سیم‌پیچ و بدنه یا هسته ترانسفورماتور می‌باشند.



الف: نحوه سیم‌پیچی ترانسفورماتور (ب): مدار معادل حالت گذرای سیم‌پیچی ترانسفورماتور شکل (۵-۹). مدار معادل ترانسفورماتور در حالت گذرا

پیچیدگی مداری شکل بالا مهم‌ترین مسئله در تحلیل آن می‌باشد. لذا در بسیاری از کاربردها از مدار معادل ساده شده زیر استفاده می‌گردد.



شکل (۶-۹). مدار معادل ساده شده ترانسفورماتور در حالت گذرا

خازن‌های نشان داده شده در شکل (۶-۹) شامل موارد ذیل می‌باشند.

$C_{bh}$ : خازن پوشینگ فشار قوی

$C_b$ : خازن پوشینگ فشار ضعیف

$C_{hg}$ : خازن پراکنده سیم‌پیچ فشار قوی با بدنه

$C_{ig}$ : خازن پراکنده سیم‌پیچ فشار ضعیف بدنه

$C_{hi}$ : خازن پراکنده بین سیم‌پیچ‌های فشار قوی و فشار ضعیف

علاوه بر در نظر گرفتن خازن‌های ترانسفورماتور، وجود اشباع، حلقه هیستریزیس و لحاظ کردن وابستگی عناصر به فرکانس نیز در مدل کردن ترانسفورماتور حائز اهمیت می‌باشد. میزان اهمیت این پارامترها با توجه به فرکانس موج اعمالی و نوع تحلیل مورد بررسی طبق سیگره در جدول (۹-۳) تعیین گردیده است.

جدول (۹-۳). راهنمای مدل‌سازی ترانسفورماتور

فرکانس ۵۰ MHz - ۱۰۰ kHz	فرکانس ۳ MHz - ۱۰ kHz	فرکانس ۳kHz - Hz ۵۰	فرکانس ۳kHz - Hz ۰/۱	پارامترهای مدل‌سازی
قابل چشم پوشی	مهم برای انتقال ضربه	خیلی مهم	خیلی مهم	امپدانس اتصال کوتاه
قابل چشم پوشی	قابل چشم پوشی	خیلی مهم	خیلی مهم	اشباع هسته
قابل چشم پوشی	قابل چشم پوشی	مهم	خیلی مهم	وابستگی فرکانسی عناصر
قابل چشم پوشی	قابل چشم پوشی	مهم برای برقرار کردن ترانسفورماتور	مهم برای بررسی پدیده رزونانس	هیستریزیس و تلفات هسته
خیلی مهم برای انتقال ضربه	خیلی مهم برای انتقال ضربه	مهم برای انتقال ضربه	قابل چشم پوشی	خازن‌های پراکنده

ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری جریان ( $C.T^1$ ) و ولتاژ ( $C.V.T^2$ ) توسط خازنهای موجی آنها که بصورت متمرکز در نظر گرفته می‌شود در حالت گذرا شبیه‌سازی می‌گردند. این خازن‌ها می‌توانند بوسیله مقادیر طراحی شده و یا بوسیله اندازه‌گیری بدست آیند. عموماً مقدار خازن موجی  $C.T$  برابر  $80 PF$  و مقدار خازن موجی  $C.V.T$  برابر  $350 PF$  در نظر گرفته می‌شود.

### ۷-۹ مدل کلیدها

کلید قدرت مشروط به اینکه باز و یا بسته باشد شبیه‌سازی می‌گردد. وضعیت باز و بسته بودن کلید قدرت را می‌توان به ترتیب بوسیله خازن موجی و خط انتقال مدل کرد. بین کنتاکت‌های کلید قدرت در هنگام باز شدن جرقه برقرار می‌شود که عموماً با عبور جریان از نقطه صفر آن را خاموش در نظر می‌گیرند. ولی ممکن است بدلیل بزرگتر بودن ولتاژ بازبایی گذرا ( $TRV$ ) از استقامت عایقی بین کنتاکت‌ها در کلید دوباره جرقه برقرار گردد. عموماً کلیدهای قدرت در نقطه صفر جریان عمل باز شدن را انجام می‌دهند تا حداقل انرژی جرقه از کلید عبور کند. بنابراین مدل کردن جرقه در هنگام باز شدن کلید در تحلیل حالت گذرا امری ضروری می‌باشد. برای مدل‌سازی جرقه دو مدل استاتیکی و دینامیکی وجود دارد که معادله دینامیکی Mayer پرکاربردترین معادله در توصیف رفتار گذرای جرقه می‌باشد. در معادله (۹-۲۵) رابطه Mayer در نزدیکی جریان صفر با فرض تلفات و قطر ثابت جرقه ارائه شده است.

$$\frac{1}{G} \frac{dG}{dt} = \frac{1}{\theta} \left( \frac{EI}{N_0} - 1 \right) \quad (9-25)$$

در این رابطه  $G$  رسانایی جرقه،  $\theta$  ثابت زمانی جرقه،  $E$  ولتاژ جرقه،  $I$  جریان جرقه و  $N_0$  ثابت تلفات جرقه می‌باشد.

۱- Current transformer

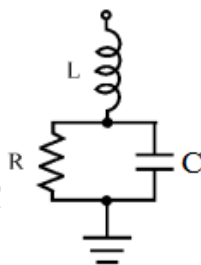
۲- Capacitor voltage transformer

## ۸-۹ مدل سیستم زمین

وظیفه شبکه زمین در سیستم حفاظت صاعقه ایجاد مسیر با امپدانس پایین جهت تخلیه جریان صاعقه به زمین و توزیع یکنواخت پتانسیل الکتریکی در محل تخلیه جریان صاعقه به زمین و پیرامون آن می‌باشد.

روش‌های تحلیل مدل فرکانس بالای سیستم زمین و رفتار دینامیکی آن در هنگام تخلیه جریان صاعقه به سه دسته شامل تئوری مدار، روش تئوری خط انتقال و روش تئوری میدان الکترومغناطیسی طبقه‌بندی می‌شوند.

یکی از روش‌های عددی که اغلب برای مدل کردن رفتار دینامیکی (گذرای) سیستم‌های زمین با آرایش پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش تئوری مدار می‌باشد. در این روش از مدل مداری نشان داده شده در شکل (۹-۷) برای سیستم زمین استفاده می‌گردد.



شکل (۹-۷). مدل امپدانس الکتروود زمین

غالباً سیستم زمین پستها بوسیله الکتروودهای افقی اجرا می‌گردد زیرا هادی‌های افقی بهتر از هادی‌های عمودی مقاومت زمین را کاهش می‌دهند. مقادیر عناصر مدار معادل شکل (۷-۹) برای یک الکتروود افقی با استفاده از روابط زیر حاصل می‌گردد.

$$R(\Omega) = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln\left(\frac{2l^2}{ah}\right) - 1 \right) \quad (۹-۲۶)$$



$$C(F) = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{2l^2}{ah}\right) - 1} \quad (27-9)$$

$$L(H) = \frac{\mu l}{2\pi} \left( \ln \frac{2l}{\sqrt{2ah}} - 1 \right) \quad (28-9)$$

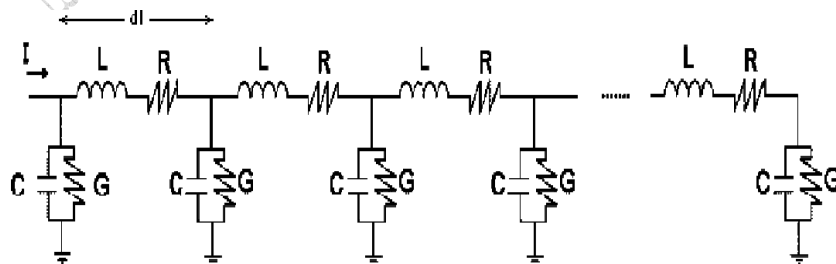
در این روابط  $\rho$  مقاومت ویژه خاک (بر حسب اهم متر)،  $\epsilon$  (F/m) ضریب نفوذپذیری الکتریکی خاک،  $\mu$  (H/m) ضریب نفوذپذیری مغناطیسی خاک،  $l$  طول الکتروود زمین (بر حسب متر)،  $a$  شعاع الکتروود (بر حسب متر) و  $h$  عمق دفن الکتروود بر حسب متر می باشد.

روش خط انتقال اولین روشی است که برای مدلسازی رفتار سیستم زمین بکار رفته است. در روش خط انتقال برای مدلسازی سیم زمین افقی از معادله تلگرافی بصورت زیر استفاده می گردد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} + r_e I &= 0 \\ \frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial V}{\partial t} + GV &= 0 \end{aligned} \quad (29-9)$$

با حل معادلات (29-9) مقادیر جریان و ولتاژ توزیع شده در طول سیم زمین ابتدا در حوزه لاپلاس و سپس با استفاده از تبدیل معکوس لاپلاس در حوزه زمان بدست می آید.

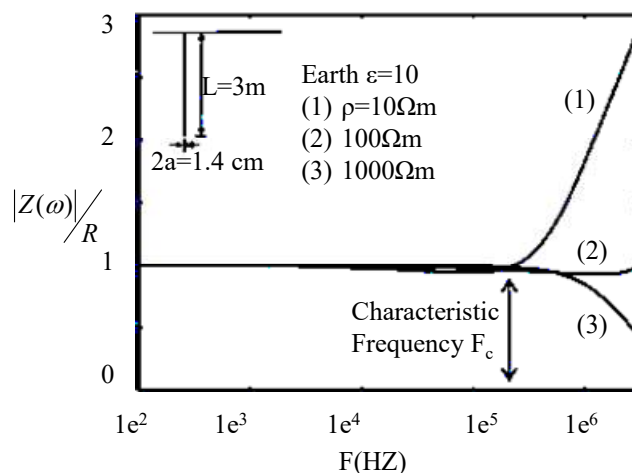
متداولترین مدل در روش خط انتقال مدل مدار تعمیم یافته می باشد. در شکل (8-9) مدار معادل خط انتقال سیستم زمین



شکل (8-9). مدار معادل مدل خط انتقال سیستم زمین

پیچیده‌ترین روش برای مدل کردن رفتار گذرای سیستم زمین مدل میدان الکترومغناطیسی می‌باشد زیرا در این روش باید معادلات ماکسول با کمترین تخمین حل شوند. شرط اولیه برای استفاده از این مدل این است که سیستم باید خطی باشد بنابراین، این روش برای مدل کردن پدیده‌های غیر خطی مناسب نیست. با این وجود این روش برای مدل کردن مشخصه‌های وابسته به فرکانس بسیار مناسب می‌باشد.

در شکل (۹-۹) نسبت مقدار امپدانس ( $|Z(\omega)|$ ) به مقاومت سیستم زمین در فرکانس‌های پایین ( $R$ ) برای حالات مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل (۹-۹)، دو بازه فرکانسی متفاوت شامل بازه فرکانس پایین (امپدانس ثابت) و بازه فرکانس بالا (امپدانس متغیر با فرکانس) برای امپدانس سیستم زمین مشاهده می‌گردد. به عبارت دیگر، رفتار فرکانس بالای سیستم زمین در حالت  $|Z(\omega)|/R > 1$  بصورت سلفی، در حالت  $|Z(\omega)|/R \approx 1$  بصورت مقاومتی و در حالت  $|Z(\omega)|/R < 1$  رفتار سیستم زمین بصورت خازنی می‌باشد.



شکل (۹-۹). تغییر رفتار امپدانس زمین با فرکانس  
 ۱- رفتار سلفی ۲- رفتار مقاومتی ۳- رفتار خازنی

در شکل (۹-۹)، مهمترین پارامتر که آستانه رفتار سلفی یا خازنی را مشخص می‌نماید، فرکانس مشخصه می‌باشد. این پارامتر در شکل مذکور با  $F_c$  نشان داده شده است. برای هر فرکانس مشخصه  $F_c$  برای داشتن رفتار مقاومتی یک حداکثر طول ( $l_R$ ) وجود دارد این طول همچنین بیانگر طول موثر هارمونیک می‌باشد. رابطه (۹-۳۰) یکی از روابطی است که طول موثر هارمونیک ( $l_R$ ) را بر حسب مقاومت ویژه خاک ( $\rho$ ) و فرکانس مشخصه ( $F_c$ ) تعیین می‌کند.

$$l_R = 0.6(\rho/F_c)^{0.43} \quad (۹-۳۰)$$

بنابراین می‌توان اینطور نتیجه گرفت که در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس مشخصه فقط بخشی از الکتروود (به طول  $l_R$ ) بطور موثر جریان موج گذرا را به زمین انتقال می‌دهد صرفنظر از اینکه طول الکتروود چند متر باشد. فرکانس مشخصه برای موج ضربه اصلی صاعقه ۱۰۰kHz و برای امواج فرعی ۱MHz لحاظ می‌شود. این بدان معنی می‌باشد که بعضی از الکتروودها ممکن است در برابر ضربه اصلی رفتار مقاومتی داشته باشند در حالیکه در برابر ضربه‌های فرعی رفتار سلفی از خود نشان دهند.

### ۹-۹ مدل برقگیر

رفتار دینامیکی برقگیر متاثر از شکل موج صاعقه است. لذا نمی‌توان برقگیر را فقط با یک مقاومت غیر خطی مدل نمود. مقاومت غیرخطی برای برقگیرها با معادله غیر خطی زیر تعریف می‌شود.

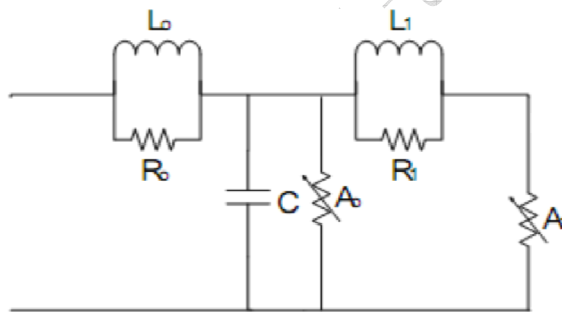
$$I = kv^\alpha, \alpha > 1 \quad (۹-۳۱)$$

در این رابطه  $I$  جریان برقگیر،  $V$  ولتاژ برقگیر،  $k$  ثابت و  $\alpha$  مقدار غیر خطی بودن می‌باشند. ولتاژ باقیمانده<sup>۱</sup> به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای برقگیر است که با  $V_{res}$  یا  $V_r$  نشان داده می‌شود و به آن ولتاژ تخلیه هم گفته می‌شود. با اندازه گیری ولتاژ باقیمانده مشخصه دینامیکی برقگیر تعیین می‌گردد.

۱- Residual Voltage

اثرات دینامیکی برقگیر برای مطالعات جایابی برقگیر و هماهنگی عایقی شبکه قدرت حائز اهمیت می‌باشد. لذا مدل‌های مختلفی برای برقگیر ارائه شده است که از میان می‌توان به مدل‌های پرکاربرد IEEE، Pinceti-Giannetoni و Fernandez-Diaz اشاره نمود.

در شکل (۹-۱۰) مدل IEEE برقگیر نشان داده شده است. شاخه  $R_1$  و  $L_1$  به صورت یک فیلتر بین دو مقاومت غیرخطی عمل می‌کند. این فیلتر برای جریان با پیشانی موج کند دارای امپدانس پایین بوده و در این حالت مقاومت‌های غیرخطی موازی‌اند. برای جریان با پیشانی موج تند این فیلتر دارای امپدانس بالا بوده و جریان فقط در شاخه  $A_0$  جاری می‌شود. اندوکتانس  $L_0$  نشان دهنده میدان‌های مغناطیسی اطراف برقگیر و خازن  $C$  ظرفیت الکتریکی بین سرهای برقگیر می‌باشد.



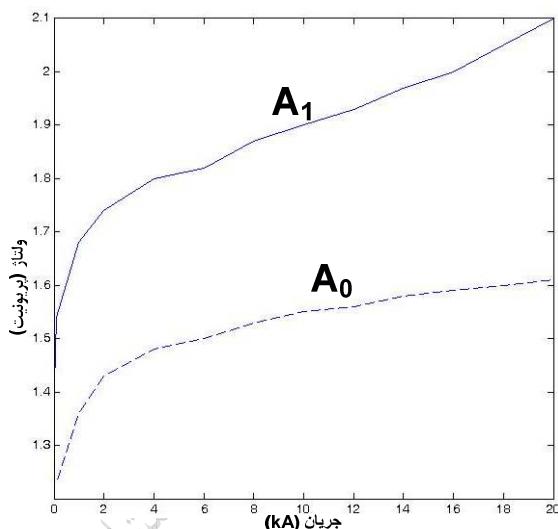
شکل (۹-۱۰). مدل IEEE برقگیر اکسید فلزی

عناصر نشان داده شده در شکل (۹-۱۰) با استفاده از روابط زیر تعیین می‌گردند.

$$\begin{aligned} L_1 &= 15d/n & \mu\text{H} \\ L_0 &= 0.2d/n & \mu\text{H} \\ R_1 &= 65d/n & \Omega \\ R_0 &= 100d/n & \Omega \\ C &= 100n/d & \text{PF} \end{aligned} \quad (۹-۳۲)$$

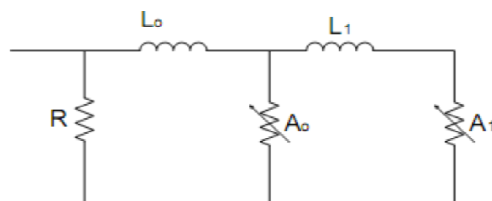
در این روابط  $d$  طول ستون برقگیر و  $n$  تعداد ستون‌های موازی قرص‌های برقگیر می‌باشند.

یک نمونه از مشخصه غیر خطی V-I برای مقاومت‌های غیر خطی برقی اکسید فلزی، در شکل (۹-۱۱) نشان داده شده است. جهت استفاده از مدار معادل مذکور ابتدا با استفاده از کاتالوگ برقی و مقدار ولتاژ باقیمانده برای شکل موج جریان  $8/20 \mu\text{s}$ ، مقدار پریونیت ولتاژ به مقدار واقعی تبدیل می‌گردد.



شکل (۹-۱۱). مشخصه V-I مقاومت‌های غیر خطی برقی

در مدل Pinceti-Giannetoni، خازن C بدلیل تاثیر ناچیز آن بر عملکرد برقی حذف شده و دو مقاومت  $R_1$  و  $R_0$  با یک مقاومت R به مقدار  $1\text{M}\Omega$  جایگزین شده است. مدار معادل مدل Pinceti-Giannetoni در شکل (۹-۱۲) نشان داده شده است. مقدار اندوکتانس‌ها با استفاده از مشخصات الکتریکی برقی و رابطه (۳۳-۹) محاسبه می‌گردد.

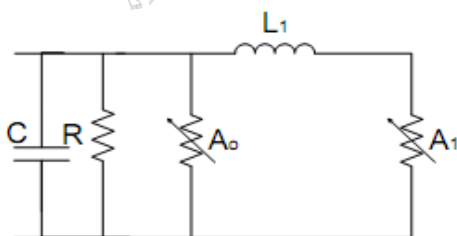


شکل (۹-۱۲). مدل Pinceti-Gianettoni برقگیر

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/T_2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \quad (۹-۳۳)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/T_2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n$$

در رابطه مذکور  $V_n$  ولتاژ نامی برقگیر،  $V_{r8/20}$  ولتاژ باقیمانده برقگیر در صورت اعمال جریان با شکل موج  $20/\mu s$  و  $V_{r1/T_2}$  ولتاژ باقیمانده برقگیر با اعمال جریان با شیب تند می‌باشد، که از کاتالوگ برقگیر قابل استخراج می‌باشد. مدل Fernandez-Diaz که دارای ساختار ساده‌تری نسبت به دو مدل قبل بوده مطابق شکل (۹-۱۳) می‌باشد.



شکل (۹-۱۳). مدل برقگیر Fernandez-Diaz

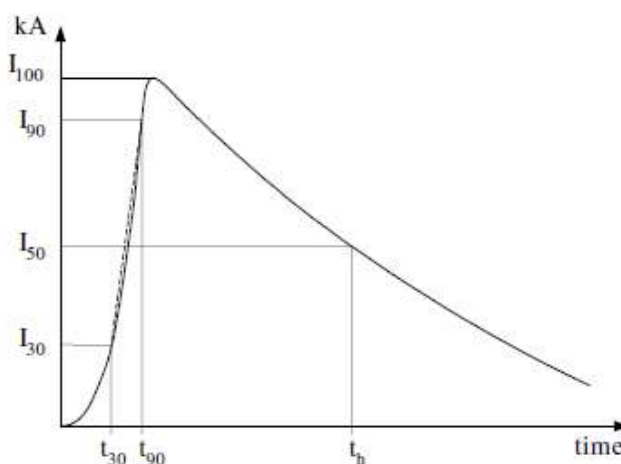
### ۹-۱۰ مدل موج صاعقه

موج جریان صاعقه براساس استاندارد IEC ۶۱۳۱۲-۱ با یک منبع جریان ایده آل مدل می‌شود. معادله این منبع جریان مطابق رابطه (۹-۳۴) می‌باشد.

$$i(t) = \frac{I_{peak}}{\eta} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (9-34)$$

در این رابطه  $\alpha$  و  $\beta$  ثابتهای زمانی براساس شکل (۹-۱۴) می‌باشند.

$$\beta = \frac{1}{\tau_2} \text{ و } \tau_1 = 1.67(t_{90} - t_{30}) \text{ و } \alpha = \frac{1}{\tau_1} \quad (9-35)$$



شکل (۹-۱۴). پارامترهای منحنی جریان صاعقه برگشتی

که در آن  $I_{peak}$  پیک جریان صاعقه و  $\eta$  ضریب اصلاح مقدار پیک جریان صاعقه می‌باشد.

پارامترهای فوق برای اولین موج جریان صاعقه و برای سطوح حفاظتی مختلف را می‌توان از استاندارد IEC ۶۱۳۱۲-۱ بدست آورد. به طور نمونه، برای یک موج جریان صاعقه ۱۰/۳۵۰ میکروثانیه و دامنه ۱۰۰ کیلوآمپر (برای سطح حفاظتی ۳ و ۴)، مشخصه‌های فوق عبارتند از:  $I_{peak} = 100kA$ ،  $\eta = 0.9761$ ،  $\alpha = 2049.38(1/sec)$ ،  $\beta = 563768.3(1/sec)$ .

همچنین، رابطه (۹-۳۶) معروف به مدل Heidler یکی از رایجترین مدل‌های پیشنهادی برای مدلسازی موج صاعقه برگشتی است.

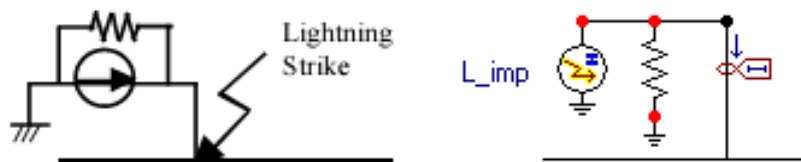
$$i(t) = \frac{I_{peak}}{\eta} \times \frac{k^n}{1+k^n} \times e^{-t/\tau_2} \quad \text{و} \quad k = \frac{t}{\tau_1} \quad (9-36)$$

$n$ : ضریب شیب جریان<sup>۱</sup> (برابر ۱۰)

$\tau_1$ : ثابت زمانی پیشانی موج صاعقه

$\tau_2$ : ثابت زمانی پشت موج صاعقه

در مطالعات حالت گذرا، ضربه صاعقه مطابق شکل (۹-۱۵) با یک منبع جریان ایده آل موازی با یک مقاومت به مقدار بین ۱ تا ۲ کیلو اهم، مدل می‌شود.



شکل (۹-۱۵). مدلسازی ضربه صاعقه (مدل جریان صاعقه)

### بررسی احتمال وقوع صاعقه با مشخصه معین

هر صاعقه دارای یک موج اصلی و چندین موج فرعی می‌باشد. موج اصلی دارای جریان با دامنه بالا (۲ تا ۲۰۰ کیلو آمپر) می‌باشد. شکل موجهای فرعی مشابه موج اصلی صاعقه بوده اما نسبت به موج اصلی دارای دامنه جریان، زمان پیشانی و زمان پشت موج کوچکتر می‌باشند. تابع توزیع احتمال وقوع صاعقه اصلی و فرعی، توزیع نرمال می‌باشد. بنابراین احتمال وقوع صاعقه با دامنه جریان  $I$  از رابطه زیر تعیین می‌شود:

۱- current steepness factor



$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{\hat{I}}\right)^n} \quad (9-37)$$

مقادیر  $n$  و  $\hat{I}$  برحسب نوع صاعقه از جدول (9-4) بدست می‌آیند.

جدول (9-4). راهنمای انتخاب پارامترهای صاعقه [IEEE]

$n$	$\hat{I}$	پارامتر
2	$5C$	بار ضربه برگشتی صاعقه منفی اول
2/6	$31kA$	جریان پیک ضربه برگشتی صاعقه منفی اول
4	$24kA/\mu s$	شیب جریان ضربه برگشتی صاعقه منفی اول
1/7	$35ms$	فاصله زمانی بین صاعقه ای
2/2	$1C$	بار ضربه برگشتی صاعقه منفی فرعی
2/7	$12kA$	جریان پیک ضربه برگشتی صاعقه منفی فرعی
2/1	$40kA/\mu s$	شیب جریان ضربه برگشتی صاعقه منفی فرعی
2	$85C$	بار ضربه صاعقه مثبت
1/5	$34kA$	جریان پیک ضربه برگشتی صاعقه مثبت

### 11-9 سؤال و تمرین

1. پارامترهای مدل مداری برای یک الکتروود میله‌ای مسی افقی به قطر 2 سانتی متر و طول 2/5 متر که در عمق 0/5 متری مدفون می‌باشد را محاسبه کنید. ضریب نفوذپذیری الکتریکی و مغناطیسی خاک را به ترتیب 80 و 1 و مقاومت ویژه آن را 90 در نظر بگیرید.
2. انواع مدل‌های برقگیر را توضیح دهید.
3. پارامترهای مدل‌های مختلف سیستم زمین برای خاک چند لایه را محاسبه نمایید.
4. برای دکلهای بتنی و چوبی، مدار معادل مناسبی برای امپدانس موجی پیشنهاد کنید.

## فصل ۱۰

### مطالعات هماهنگی عایقی برای یک شبکه قدرت نمونه

#### ۱۰-۱ مقدمه

مدلسازی و شبیه سازی رفتار تجهیزات سیستم در برابر پدیده های گذرای می تواند نقش موثری در انتخاب و بهره برداری مناسب سیستم قدرت داشته باشد و در جلوگیری از وقوع حوادث مخرب در سیستم کمک نماید. برای بررسی هماهنگی عایقی در سیستم های قدرت باید اطلاعات کاملی از تجهیزات سیستم در دسترس باشند.

برای مدلسازی و تحلیل حالت های گذرای سیستم قدرت، از نرم افزارهای متعددی مثل <sup>1</sup>ATP/EMTP، CDGES، PSCAD، EMTDC<sup>2</sup> و MATLAB می توان استفاده نمود. در ادامه یک خط انتقال در محیط نرم افزار EMTP-ATP مورد مطالعه قرار می گیرد.

#### ۱۰-۲ بررسی ساختار شبکه تحت مطالعه

خطوط انتقال یکی از بخش های حیاتی سیستم قدرت می باشند و اغلب به

---

۱- Alternative Transient Program/ Electromagnetic Transient Program

۲- Electromagnetic transient with DC analysis

خاطر گستردگی زیاد و عبور از نواحی با شرایط آب و هوایی متفاوت، در معرض اصابت صاعقه و اثرات ثانویه آن قرار دارند. به کارگیری برقگیر خط می‌تواند تا حد زیادی دامنه اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه را کاهش دهد و باعث بهبود عملکرد خطوط در برابر اثرات صاعقه شود. در این قسمت برخورد صاعقه به یک خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت و تاثیر بکارگیر برقگیر خط، در محیط نرم افزار EMTP-ATP شبیه سازی و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. برای این منظور از مدل حالت گذرای هر یک از اجزای خط انتقال مذکور شامل هادی خط انتقال، دکل، زنجیره مقرر، سیستم زمین پای دکل، برقگیر خط و همچنین از مدل صاعقه با دامنه و شکل موج‌های گوناگون استفاده می‌شود.

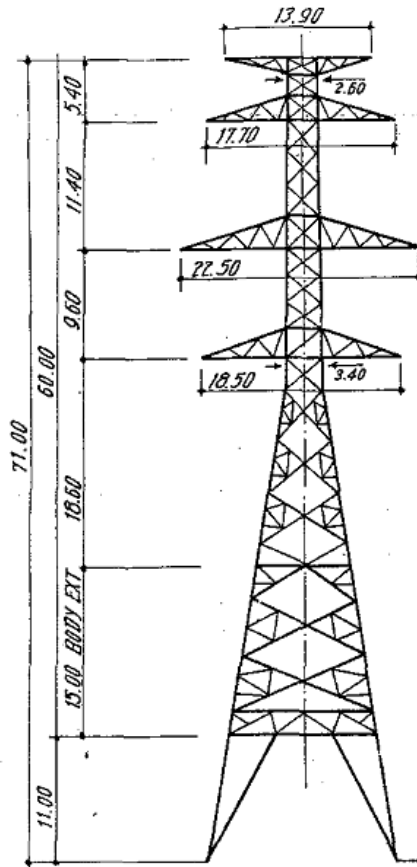
خط انتقال مورد بررسی یک خط ۴۰۰ kV دو مداره با باندل سه تایی می‌باشد. ابعاد دکل‌های مورد استفاده در این خط در شکل (۱-۱۰) نشان داده شده است. این خط انتقال در منطقه‌ای صاعقه‌خیز با عدد کرونیک ۲۰ روز در سال نصب گردیده است. همانطور که در شکل (۱-۱۰) مشاهده می‌گردد این خط دارای دو سیم محافظ بوده که در ارتفاع ۵/۴ متر بالاتر از بالاترین فاز نصب شده اند.

به دلایل اقتصادی سیم‌های محافظ قابلیت جذب تمام دامنه جریان‌های صاعقه پایینتر از جریان بحرانی ( $I_c$ ) را ندارند. مطابق رابطه (۱-۱۰)، حداقل دامنه جریان صاعقه‌ای که توسط سیم محافظ قابل جذب می‌باشد محاسبه می‌گردد.

$$I_{gm} = \left[ \frac{(h+y)(2(1-\gamma \sin \alpha))}{A} \right]^{1/6}, \quad (\text{kA}) \quad (10-1)$$

که در آن،  $h$  ارتفاع سیم محافظ بر حسب متر،  $y$  ارتفاع هادی فاز بر حسب متر،  $\alpha$  زاویه بین سیم محافظ و هادی فاز و  $\gamma$  نسب فاصله برخورد سیم محافظ به هادی فاز (معمولا برابر ۱) می‌باشد. با توجه به رابطه بالا حداقل جریان برابر ۲۲ kA می‌باشد. جریان‌های با دامنه بالاتر توسط سیم‌های محافظ جذب

می‌گردند. البته جریان‌های با دامنه پایین‌تر با توجه به اینکه در چه ناحیه‌ای به خط انتقال نزدیک می‌شوند احتمال جذب توسط هادی فاز را دارند. در این شبیه‌سازی‌ها جریان‌های صاعقه با دامنه تا ۱۰۰ kA به دکل اعمال می‌گردند.



شکل (۱۰-۱). نمایی از یک نوع دکل خط انتقال ۴۰۰ kV

### ۳-۱۰ مدل‌سازی شبکه

در ادامه، مدل حالت گذرای هر یک از اجزای خط انتقال مذکور در محیط

نرم افزار EMTP-ATP مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۱-۳-۱۰ مدل خط انتقال

خط انتقال در نرم افزار EMTP-ATP توسط روش های گوناگونی مدل می گردد. یکی از بخشهای پر کاربرد در این نرم افزار مدل LCC خط انتقال می باشد. برای شبیه سازی خط انتقال بین دکلها از این مدل استفاده می گردد. در این مدل خط انتقال به صورت مدل  $\pi$  گسترده با در نظر گرفتن وابستگی فرکانسی عناصر آن مدل می شود. یکی از روشهای مرسوم در این بخش برای تحلیل حالت گذرای خط انتقال مدل J.Marti می باشد. در این مدل، خط انتقال در بازه فرکانسی و گام های فرکانسی مشخص شده مدلسازی می شود. در این روش ابتدا بایستی اطلاعات درستی از مشخصات هندسی خط انتقال و سیم محافظ در اختیار باشد. سپس در قسمت data مشخصات هادی های فاز اعم از قطر هادی، مقاومت واحد طول هادی و نحوه قرارگیری آن بر روی دکل و همچنین ارتفاع هادی در وسط اسپن وارد می گردد. این اطلاعات برای سیم محافظ نیز همانند هادی وارد میشود. در وارد کردن مشخصات جایگیری هادی ها، یک هادی به عنوان مبدا در نظر گرفته می شود و موقعیت بقیه هادی ها نسبت به آن تعیین می شود.

در شکل (۲-۱۰) یک نمونه از اطلاعات وارد شده برای خط انتقال مذکور نشان داده شده است.

در شکل (۳-۱۰) مدل فرکانسی انتخاب شده و سایر اطلاعات خط انتقال همانند طول خط (فاصله بین دو دکل مجاور) نشان داده شده است. در این مدل اثر پوستی نیز لحاظ گردیده است.

Line/Cable Data: line400

#	Ph.no	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0	1.58	0.05501	-4.2	61.2	48.8	45.7	0	3
2	2	0	1.58	0.05501	-8.6	49.8	37.8	45.7	0	3
3	3	0	1.58	0.05501	-4.6	40.2	28.2	45.7	0	3
4	4	0	1.58	0.05501	18.1	61.2	48.8	45.7	0	3
5	5	0	1.58	0.05501	22.5	49.8	37.8	45.7	0	3
6	6	0	1.58	0.05501	18.5	40.2	28.2	45.7	0	3
7	7	0.5	0.63	0.642	0	71	61	0	0	0
8	7	0.5	0.63	0.642	13.9	71	61	0	0	0

شکل (۲-۱۰). نمونه ای از اطلاعات وارد شده در مدل LCC خط انتقال

Line/Cable Data: line400

Model Data Nodes

System type: Overhead Line #Ph: 7

Transposed  
 Auto bundling  
 Skin effect  
 Segmented ground  
 Real transf. matrix

Units:  Metric  English

Standard data: Rho [ohm\*m] 20, Freq. init [Hz] 0.005, Length [km] 0.42,  Set length in icon

Model Type:  Bergeron  PI  JMarti  Semlyen  Noda

Data: Decades 8, Points/Dec 10, Freq. matrix [Hz] 50000, Freq. SS [Hz] 50,  Use default fitting

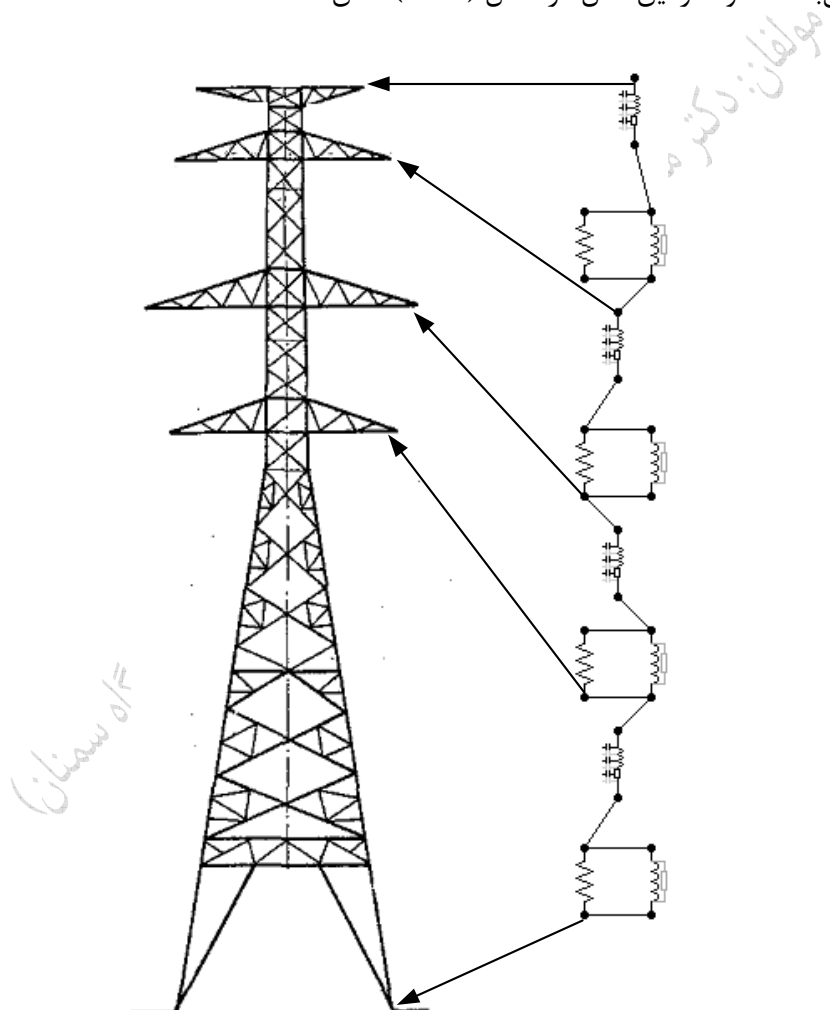
Comment: Order: 0 Label:  Hide

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

شکل (۳-۱۰). صفحه انتخاب نوع مدل فرکانسی و تعیین طول خط در LCC

## ۲-۳-۱۰ مدل دکل خط انتقال

در اینجا برای مدل کردن دکل خط انتقال از روش چند قسمتی استفاده شده است. در این مدل دکل به چهار قسمت تقسیم شده و هر قسمت نیز شامل یک مدل خط انتقال بدون تلفات (امپدانس موجی) به همراه یک مقاومت و سلف می‌باشد. نمونه از این مدل در شکل (۴-۱۰) نشان داده شده است.



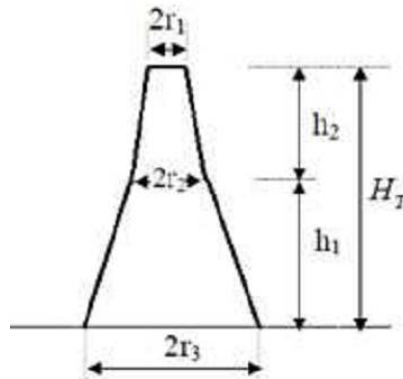
شکل (۴-۱۰). مدار معادل دکل خط انتقال ۴۰۰ kV در نرم افزار EMTP-ATP

برای محاسبه امپدانس موجی با توجه به شکل ظاهری دکل از رابطه (۱۰-۲) استفاده می‌گردد.

$$Z_t = 60 \ln \left\{ \cot \left[ 0.5 \tan^{-1} \left( r_{ave} / H_t \right) \right] \right\} \quad (10-2)$$

$$r_{ave} = \frac{r_1 h_2 + r_2 H_t + r_3 h_1}{H_t}$$

که  $r_i$  و  $h_i$  مقادیر شعاع و ارتفاع معادل دکل می‌باشند که با تبدیل دکل به شکل (۱۰-۵) قابل استخراج می‌باشند.



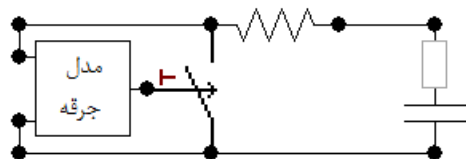
شکل (۱۰-۵). مدل ساده شده دکل خط انتقال جهت محاسبه امپدانس موجی آن

### ۳-۱۰-۳ مدل زنجیره مفره

برای مدلسازی حالت گذرا، زنجیره مفره‌ها با یک خازن به همراه یک کلید وابسته به ولتاژ مدل می‌شوند. خازن در این مدل از قرار گرفتن ۲۳ مفره برای سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلوولت حاصل می‌گردد که مقدار آن یک پیکوفاراد در نظر گرفته شده است. همچنین برای در نظر گرفتن وابستگی جرقه به زمان از رابطه (۹-۲۳) استفاده شده است. این رابطه توسط بلوک models به همراه یک کلید TSCS مدل گردیده و مقدار طول زنجیره مفره نیز ۴ متر در نظر گرفته شده است. در بلوک models ولتاژ دو سر زنجیره مفره با ولتاژ محاسبه شده توسط رابطه (۹-۹)



۲۳) مقایسه می‌گردد و زمانی که ولتاژ دو سر زنجیره مفره بیشتر از ولتاژ محاسبه شده گردد، فرمان قطع به کلید داده می‌شود. در شکل (۶-۱۰) مدل زنجیره مفره و مدل جرقه در نرم افزار نشان داده شده است.



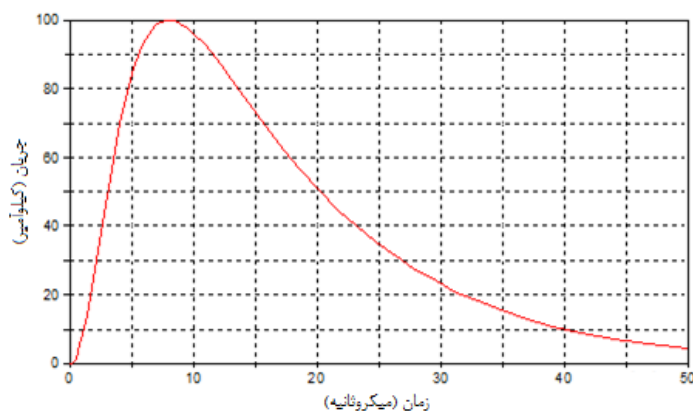
شکل (۶-۱۰). مدل زنجیره مفره به همراه جرقه در نرم افزار

#### ۴-۳-۱۰ مدل صاعقه

عموما صاعقه در تحلیل‌های حالت گذرای خطوط انتقال بصورت یک منبع جریان موازی با یک امپدانس (کمتر از ۲۰۰۰ اهم) مدل می‌گردد. مقدار امپدانس در این شبیه سازی ۴۰۰ اهم در نظر گرفته شده است. مشخصات اصلی شکل موج صاعقه، مقدار پیک، زمان پیشانی موج و زمان پشت موج می‌باشند. بهترین مدل برای صاعقه در نرم افزار EMTP-ATP مدل Heidler می‌باشد که با رابطه زیر بیان می‌گردد.

$$i(t) = \frac{I_p * k^n}{1 + k^n} e^{-t/\tau_2} \quad (۱۰-۳)$$

در این رابطه،  $k = t/\tau_1$ ، زمان بین صفر تا پیک جریان،  $\tau_2$  زمان بین صفر تا ۳۷٪ پیک جریان در پشت موج،  $n$  ضریب شیب موج (معمولا برابر ۲) و  $I_p$  مقدار پیک جریان می‌باشد. شکل (۷-۱۰) موج تولید شده توسط این مدل برای صاعقه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰-۷). شکل موج صاعقه توسط مدل Heidler

#### ۵-۳-۱۰ مدل سیستم زمین دکل

در اینجا از مدل ساده امپدانس برای زمین دکل استفاده گردیده است. مقدار امپدانس بین ۵ تا ۱۰۰ اهم متغیر در نظر گرفته شده تا تاثیر مقاومت‌های گوناگون بر احتمال وقوع قوس برگشتی مورد بررسی قرار گیرد.

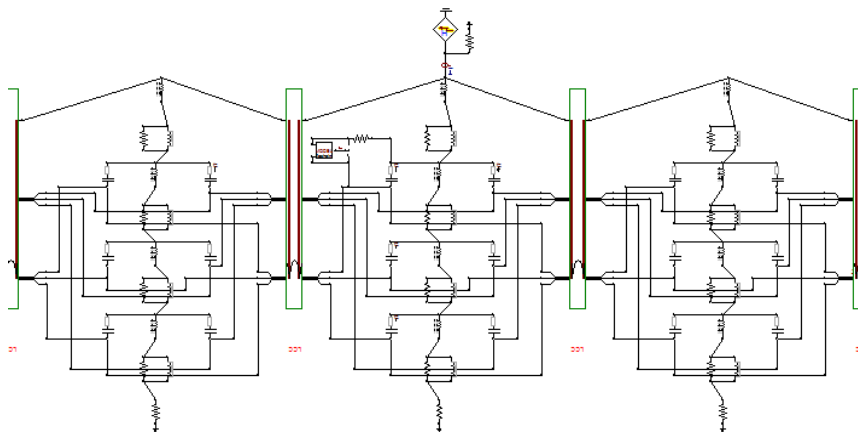
#### ۶-۳-۱۰ مدل برقگیر

در این شبیه سازی از مدل Pinceti-Giannetoni استفاده شده که مقادیر سلفها با توجه به مقدار ولتاژ باقیمانده برای موج جریان  $20/8 \mu$  برقگیر تعیین می‌گردد و مقدار مقاومت نیز  $1 M\Omega$  می‌باشد. مقدار مقاومت غیر خطی نیز با توجه به ولتاژ باقیمانده تعیین شده است.

#### ۷-۳-۱۰ شبیه سازی خط انتقال

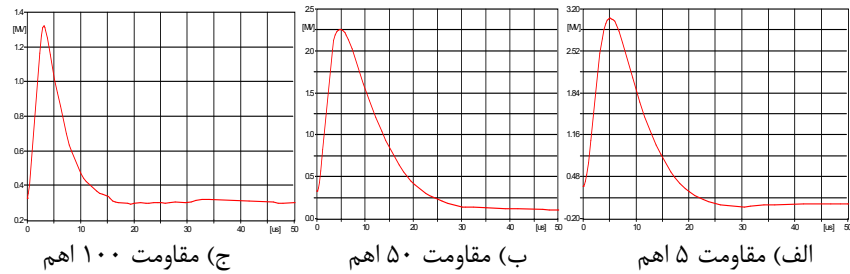
در این قسمت به بررسی اضافه ولتاژهای ایجاد شده ناشی از برخورد صاعقه به

دکل پرداخته می‌شود. مقدار اضافه ولتاژهای ایجاد شده در خط در تعیین هماهنگی عایقی خط انتقال و پست‌های متصل به آن نقش اساسی دارد. در مدل سازی خط انتقال عموماً ۳ تا ۵ دکل مجاور محل اصابت صاعقه به خط (از هر طرف) در نظر گرفته می‌شوند. برای چشم پوشی از موجهای برگشتی از نقاط انتهایی خط، خط مذکور به صورت یک خط بلند در نظر گرفته شده تا در طول زمان شبیه سازی هیچ برگشت موجی وجود نداشته باشد. شکل (۸-۱۰) نمای بخشی از خط انتقال شبیه سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۱۰). نمایی از خط انتقال شبیه سازی شده در نرم افزار EMTP-ATP

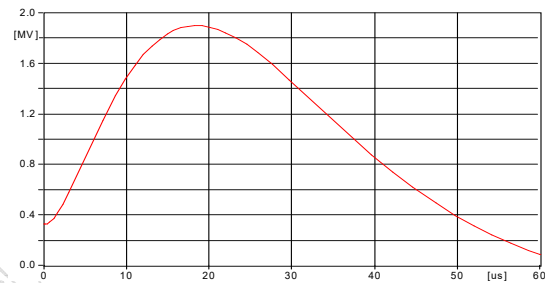
با توجه به شکل بالا، صاعقه به یک دکل خط انتقال اصابت نموده است و طبیعتاً بیشترین اضافه ولتاژ به زنجیره مقره‌های این دکل اعمال می‌گردد. در شکل (۹-۱۰) تغییرات اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مقره بالایی دکل برای مقادیر مختلف مقاومت زمین نشان داده شده است. دامنه جریان صاعقه ۱۰۰ kA با شکل موج استاندارد  $\mu 20/8S$  می‌باشد.



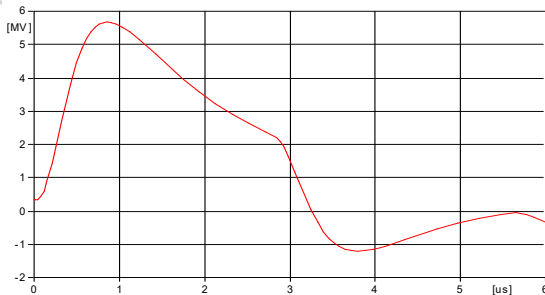
شکل (۱۰-۹). تاثیر مقاومت زمین بر دامنه اضافه ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مفره

همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش مقاومت زمین پای دکل، دامنه اضافه ولتاژهای دو سر زنجیره مفره نیز افزایش می‌یابد و به ازای مقاومت زمین ۱۰۰ اهم، مقدار آن به ۳ MV می‌رسد.

در شکل (۱۰-۱۰)، اثر شکل موج صاعقه بر دامنه اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مفره برای زمین پای دکل با مقاومت ۱۰۰ اهم، نشان داده شده است.



الف) جریان صاعقه با شکل موج ۱/۲ و دامنه ۱۰۰ کیلوآمپر

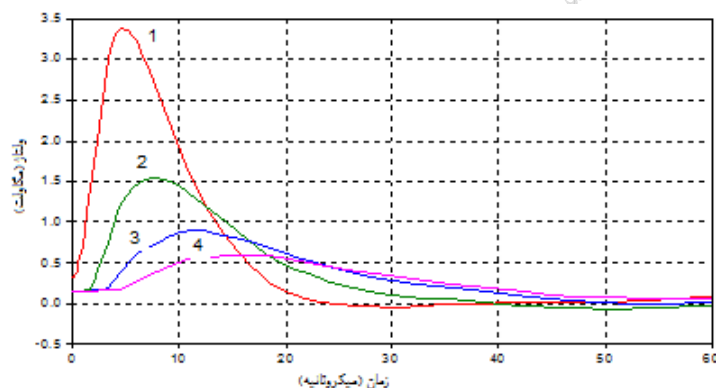


ب) جریان صاعقه با شکل موج ۳۰/۶۰ و دامنه ۱۰۰ کیلوآمپر

شکل (۱۰-۱۰). تاثیر شکل موج جریان صاعقه بر دامنه اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مفره

همان طور که مشاهده می‌گردد با افزایش شیب موج جریان صاعقه، دامنه اضافه ولتاژ دو سر زنجیره مفره نیز به شدت افزایش می‌یابد. این امر به دلیل بازگشت موج های انتقال یافته به نقطه مورد تحلیل قبل از رسیدن آن به مقدار حداکثر می‌باشد.

موج صاعقه با عبور از سیم محافظ سبب ایجاد اضافه ولتاژهایی بر روی زنجیره مفره‌های دکل‌های مجاور نیز می‌گردد. شکل (۱۰-۱۱) این اضافه ولتاژها را بر روی زنجیره مفره بالایی سه دکل مجاور نشان می‌دهد. در این شکل موج جریان صاعقه دارای دامنه  $100 \text{ kA}$  و شکل موج آن استاندارد می‌باشد و مقاومت زمین  $100$  اهم لحاظ گردیده است.

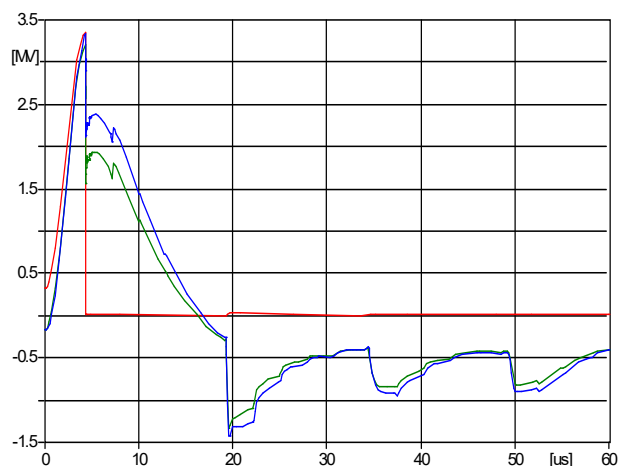


شکل (۱۰-۱۱). اضافه ولتاژهای ایجاد شده بر روی زنجیره مفره بالایی دکل‌های مجاور

همان طور که مشاهده می‌گردد با دور شدن از محل اصابت صاعقه دامنه اضافه ولتاژهای ایجاد شده (بدلیل پدیده میرایی که در مسیر عبور جریان ایجاد می‌گردد) کاهش یافته است.

برای بررسی وقوع جرقه برگشتی بر روی زنجیره مفره‌ها از مدل جرقه بیان شده در قسمت قبل استفاده می‌گردد. در این حالت مدل موازی با زنجیره مفره‌های بالایی، میانی و پایینی دکل (مورد اصابت)، قرار می‌گیرد. صاعقه با دامنه  $kA$

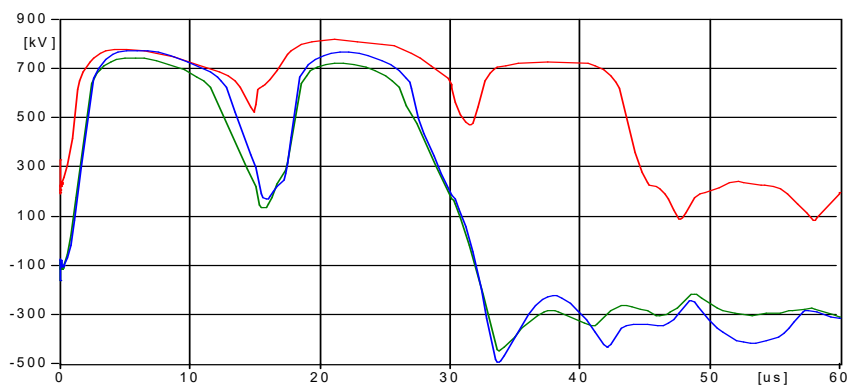
۱۰۰ و شکل موج استاندارد به دکل اعمال می‌گردد. مقدار مقاومت زمین نیز در بدترین شرایط، ۱۰۰ اهم در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۰-۱۲) نتایج اضافه ولتاژهای ایجاد شده برای زنجیره مقره‌های دکل مورد اصابت نشان داده شده است.



شکل (۱۰-۱۲). وقوع جرقه برگشتی بر روی زنجیره مقره‌های دکل مورد اصابت

با توجه به شکل بالا وقوع جرقه بر روی زنجیره مقره‌ها قابل مشاهده می‌باشد. در واقع با وقوع صاعقه‌ای با دامنه ۱۰۰ kA با شکل موج استاندارد و مقاومت زمین ۱۰۰ اهمی بر روی تمامی زنجیره مقره‌های دکل مورد اصابت صاعقه، جرقه برگشتی اتفاق می‌افتد.

برای جلوگیری از وقوع جرقه برگشتی بر روی زنجیره مقره و بالا بردن قابلیت اطمینان خط انتقال، می‌توان با نصب برقگیر اضافه ولتاژهای صاعقه را کنترل نمود. لذا برقگیرهای خط انتقال برای سطح ولتاژ ۴۰۰ کیلو ولت بر روی زنجیره مقره‌های دکل مورد اصابت نصب می‌گردند. این برقگیرها دارای ولتاژ باقیمانده ۸۰۰ کیلوولت برای جریان صاعقه ۱۰ کیلوآمپری با شکل موج استاندارد می‌باشند. در این حالت، شکل (۱۰-۱۳) ولتاژ دو سر زنجیره مقره‌ها را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰-۱۳). ولتاژ دو سر زنجیره مقره‌های دکل مورد اصابت صاعقه با حضور برقگیر

بخاطر وجود برقگیر ولتاژ دو سر زنجیره مقره‌ها به سطح ولتاژ باقیمانده برقگیر محدود شده است. بنابراین حفاظت مناسبی برای این زنجیره مقره‌ها با وجود این برقگیر حاصل شده است. زنجیره مقره‌های دکل‌های مجاور نیز تا حدودی تحت پوشش برقگیر قرار دارند. اما با دور شدن از برقگیر تاثیر آن بر کاهش دامنه ولتاژ کاهش می‌یابد. بنابراین جایابی مناسب برقگیرها می‌تواند در کاهش دامنه اضافه ولتاژهای صاعقه موثر باشد. همچنین اگر صاعقه به دکل‌های نزدیک پست اصابت کند، بایستی برای حفاظت تجهیزات پست، در ورودی خط انتقال به پست نیز برقگیر مناسب نصب گردد.

#### ۴-۱۰ مطالعات هماهنگی عایقی برای یک خط انتقال نمونه

در ادامه به محاسبات هماهنگی عایقی برای یک خط انتقال ۴۰۰ کیلوولت پرداخته می‌شود. اطلاعات کلی این خط تحت مطالعه مطابق جدول (۱۰-۱) می‌باشد.

جدول (۱۰-۱). اطلاعات خط انتقال تحت مطالعه

مشخصات خط	واحد	مقدار
ولتاژ نامی	کیلوولت	۴۰۰
حداکثر ولتاژ	کیلوولت	۴۲۰
تعداد مدار	عدد	۲
طول خط	کیلومتر	۲۵۰
کلاس آلودگی منطقه	-	سنگین
حداقل / حداکثر دمای منطقه	درجه سانتیگراد	+۴۲ / -۱۲/۵
ارتفاع از سطح دریا (طراحی)	متر	۱۸۰۰
تعداد روزهای صاعقه دار در سال (طراحی)	روز	۲۵
رطوبت نسبی	درصد	۳۵/۵
سرعت باد	متر بر ثانیه	۲۵
اسپن اقتصادی خط	متر	۳۶۰
ارتفاع دکل	متر	۴۵
حداکثر مقاومت سیستم زمین پای دکل	اهم	۱۰
ابعاد مقره بشقابی	میلیمتر	۲۵۴ X ۱۴۶

#### ۱۰-۴-۱ محاسبه استقامت عایقی زنجیره مقره

زنجیره مقره خطوط انتقال فشارقوی که به منظور تامین سطح عایقی سیم هادی نسبت به بدنه دکل (زمین) و تأمین فاصله هوایی مجاز بکار می‌رود باید طوری طراحی گردد که در برابر اضافه ولتاژهای غیر عادی سیستم دارای استقامت مناسب باشد.

##### ۱۰-۴-۱-۱ تعیین استقامت عایقی زنجیره مقره بر مبنای اضافه ولتاژ

###### ناشی از رعد و برق

با توجه به عدد کرونیك (IKL) منطقه احداث خط انتقال مذکور، سطح استقامت عایقی خط در مقابل صاعقه محاسبه میگردد. همچنین با توجه به ولتاژ خط و



طول مسیر فرض می‌شود که در طی بازه زمانی یک‌ساله اصابت صاعقه فقط یک و نیم بار باعث قطعی برق گردد. بنابراین ضریب عملکرد خط ناشی از اصابت صاعقه برابر ۱/۵ مورد قطعی در سال در هر ۱۰۰ کیلومتر از طول خط خواهد بود. با توجه به ارتفاع دکلها، تعداد کل اصابت صاعقه به ازای هر صد کیلومتر از خط در طول یک ساله برابر است با:

$$m = 43 \sqrt{\frac{h}{25}} \times \frac{IKL}{32.5} = 43 \times \sqrt{\frac{30}{25}} \times \frac{25}{32.5} = 36.25$$

اگر فرض شود فقط ۵۰ درصد تعداد صاعقه‌هایی که به خط برخورد می‌کند، باعث عبور جریان از دکل و تولید جرقه و متعاقب آن سبب قطعی برق می‌گردد، آنگاه مقدار M برحسب تعداد صاعقه در هر ۱۰۰ کیلومتر از طول خط در طول یکسال سال، برابر خواهد بود با:

$$M = 0.5 \times m = 18.125$$

به عبارت دیگر، به ازای هر ۱۸/۱۲۵ برخورد صاعقه به دکل، ۱/۵ قطعی (خروج خط) اتفاق خواهد افتاد. بنابراین درصد احتمال جرقه ناشی از برخورد رعد و برق روی دکل که باعث قطعی گردد بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P = \frac{1.5 * 100}{18.125} = 5\%$$

با توجه به احتمال فوق برای جریان صاعقه، مقدار جریان صاعقه ( $I_C$ ) براساس استاندارد IEEE، از رابطه (۴-۱۰) محاسبه می‌شود:

$$P(I_C) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_C}{31}\right)^{2.6}} \quad (۴-۱۰)$$

$$0.05 = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_C}{31}\right)^{2.6}} \Rightarrow I_C \cong 96(kA)$$

براساس جریان صاعقه، مقدار ولتاژ ایجاد شده در دو سر زنجیره مفره با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_c = \frac{k_1/\alpha \times V_{50\%} - V_m \times \sqrt{2/3}}{(k_2 - C)Z_t}$$

$V_m$ : حداکثر ولتاژ خط (۴۲۰ کیلوولت)

$k_1$ : ضریب تصحیح شکل موج استاندارد صاعقه (برابر ۱/۳۱)

$k_2$ : ضریب تصحیح توزیع پتانسیل در راس برج به پتانسیل بازوی دکل (۰/۹)

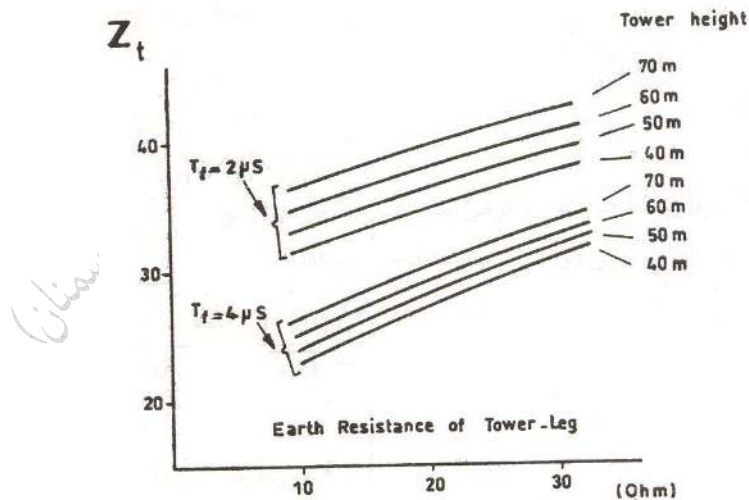
$\alpha$ : ضریب تصحیح شرایط جوی با توجه به ارتفاع از سطح دریا، که برای ارتفاع ۱۸۰۰ متر) برابر است با:

$$\alpha = 1.1 + 0.1 \frac{H - 1000}{1000} = 1.18$$

$C$ : ضریب کوپلینگ بین هادی و سیم محافظ هوائی (۰/۳۲)

$Z_t$ : امپدانس موجی برج در برابر امواج با زمان پیشانی ۲ میکروثانیه (منحنی شکل (۱۴-۱۰)).

با توجه به مقدار مقاومت زمین پای دکل (۱۰ اهم)، مقدار امپدانس موجی دکل براساس منحنی شکل (۱۴-۱۰)، حدود ۳۳ اهم می‌باشد.



شکل (۱۴-۱۰). مقدار امپدانس موجی دکل برحسب ارتفاع دکل و مقاومت زمین پای دکل

بنابراین مقدار ولتاژ استقامت ۵۰٪ برابر است با:

$$I_C = \frac{k_1/\alpha \times V_{50\%} - V_m \times \sqrt{2/3}}{(k_2 - C)Z_t} \Rightarrow V_{50\%} = 2013(kV)$$

با توجه به ولتاژ استقامت ۵۰٪ ( $V_{50\%}$ ) و جایگذاری آن در رابطه (۱۰-۵)، مقدار طول موثر زنجیره مقره (فاصله هوایی دو سر زنجیره مقره) بدست می‌آید:

$$l_m = \frac{V_{50\%} - 80}{0.55} \quad (۱۰-۵)$$

$$l_m = \frac{2013 - 80}{0.55} = 3515(mm)$$

بنابراین تعداد مقره مورد نیاز در صورت عدم نصب شاخک برق‌گیر در دو سر زنجیره مقره، و برای زنجیره مقره با آرایش V شکل برابر است با:

$$N_m = \frac{l_m}{146} = \frac{3515}{146} \cong 24$$

### ۲-۱-۴-۱۰ تعیین حداقل فاصله هوایی هادی در فرکانس قدرت

حداقل فاصله هوایی در حالت فرکانس قدرت (حالت دائمی) برای خط ۴۰۰ کیلوولت مفروض و با توجه به پارامترهای زیر محاسبه می‌گردد.

$$E = \frac{\sqrt{2/3} \times V_m \times C_e \times K_H \times C_F}{\delta} \quad (۱۱-۶)$$

$V_m$ : حداکثر ولتاژ خط (۴۲۰ کیلوولت)

$C_e$ : ضریب خطای اتصال فاز به زمین (۱/۴) برای سیستم زمین شده موثر

$K_H$ : ضریب تصحیح برای رطوبت هوا (۱/۰۴)

$C_F$ : ضریب آلودگی (۱/۲)

$\delta$ : چگالی نسبی هوا (۰/۷۳۷۳)

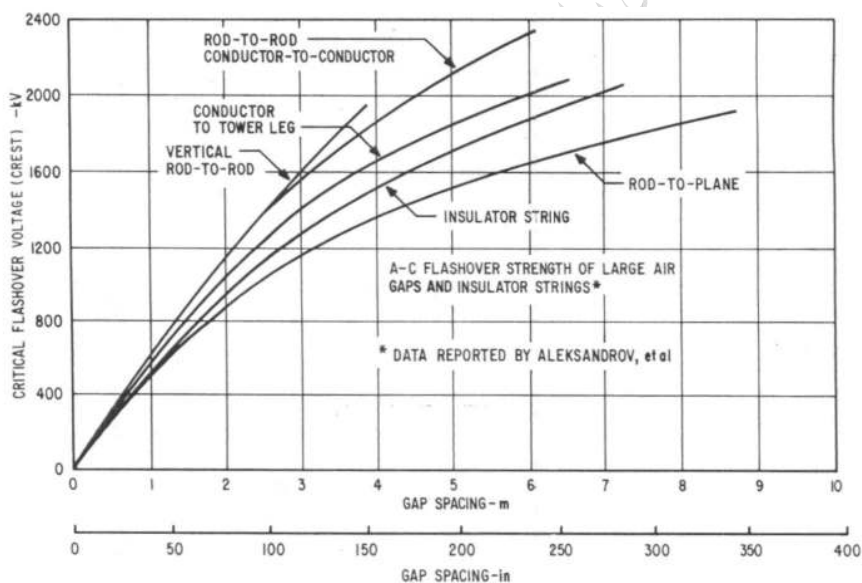
پس از جایگذاری در رابطه فوق:

$$E = 819(kV)$$

با در نظر گرفتن انحراف معیار ۲٪، برای فاصله هوایی ولتاژ بحرانی جرقه بصورت زیر است:

$$CFO = \frac{E}{(1 - 3\sigma)} \approx 871 (kV)$$

مقدار حداقل فاصله هوایی مورد نیاز برحسب ولتاژ بحرانی جرقه (۸۷۱ کیلوولت)، با توجه به شکل (۱۰-۱۵) برابر ۱۸۰۰ میلیمتر می‌باشد.



شکل (۱۰-۱۵). مقدار ولتاژ بحرانی جرقه براساس فاصله هوایی

### ۳-۱-۴-۱۰ محاسبات هماهنگی عایقی براساس اضافه ولتاژ کلیدزنی

برای محاسبات هماهنگی عایقی برای اضافه ولتاژ کلیدزنی، دو روش مختلف وجود دارد:

الف- روش نیمه احتمالی<sup>۱</sup>

ب- روش احتمالی<sup>۲</sup>

عموماً از روش نیمه احتمالی برای ولتاژهای کمتر از ۲۳۰ کیلوولت و از روش احتمالی برای ولتاژهای ۲۳۰ کیلوولت و بالاتر استفاده می‌گردد.

در ادامه روش احتمالی جهت محاسبه فاصله هوایی لازم ارائه گردیده است:

- نسبت اضافه ولتاژ انتها به ابتدای خط:  $SR/SS$

- اضافه ولتاژ ناشی از کلید زنی:  $S.O.V = 2.5P.u$

- انحراف معیار مربوط به توزیع نرمال تنش:  $\delta_s = 15\%$

- انحراف معیار مربوط به توزیع نرمال ایزولاسیون:  $\delta = 5\%$

- تعداد دکل:  $N_r = 300$

- نرخ قطعی ناشی از جرعه کلید زنی:  $S.O.R = 0.01$

- نرخ قطعی پلاریته مثبت:  $S.S.F.R = 0.05$

- ارتفاع از سطح دریا:  $h = 2.2km$

بر اساس اطلاعات فوق و با استفاده از منحنی شکل (۱۰-۱۶) مقدار نرخ اضافه ولتاژ بدست می‌آید.

$$R = 1.2$$

$$CFO = R \times S.O.V = 3.125$$

$$CFO_N = CFO \times V_m / TCF = 1028(kV)$$

برای اعمال تاثیر شرایط جوی بر ولتاژ بحرانی جرعه، نسبت چگالی هوا ( $\delta$ ) به رطوبت نسبی از رابطه زیر بدست می‌آید.

۱- Deterministic/Semi- Probabilistic

۲- Probabilistic

$$\frac{\delta}{HCF} = 1.53 - 0.147 \times 2.2 = 1.2$$

بنابراین:

$$CFO_S = \frac{CFO_N}{(\delta / HCF)^N}$$

$$N = 1.12 - 0.12 \times S$$

$S(m)$ : فاصله هوایی، برابر است با

$$S = \frac{7.3}{\left(\frac{3830}{CFO_S}\right) - 1}$$

به روش سعی و خطا، مقادیر  $S$  و  $CFO_N$  بدست می‌آید:

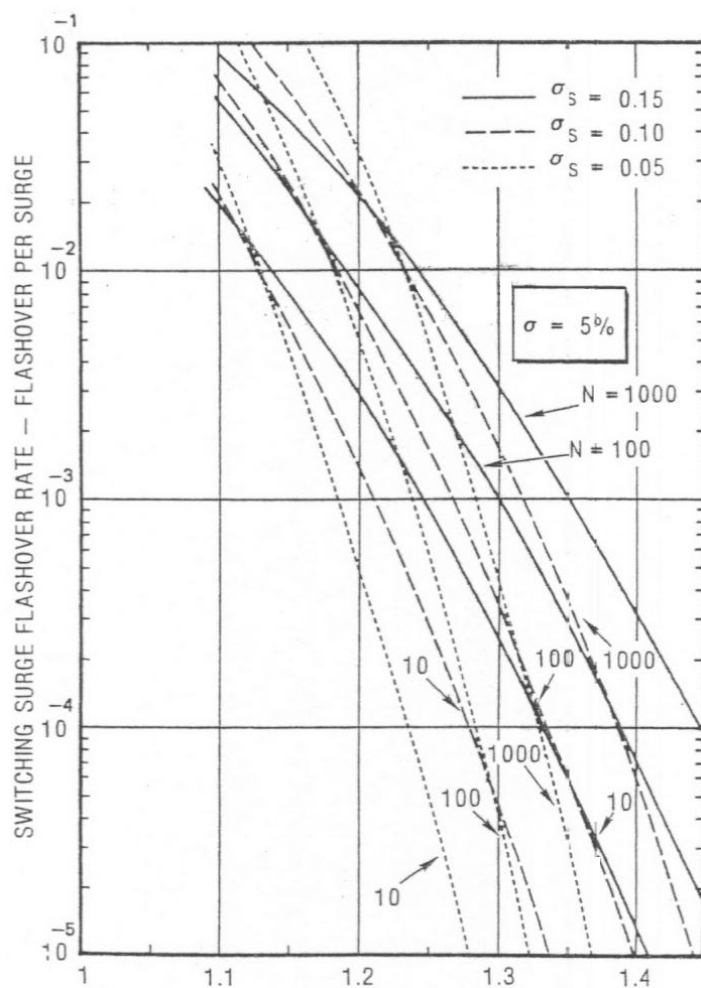
$$N = 0.76$$

$$CFO_N = 1115(kV)$$

$$S = 3.4(m)$$

تعداد مقره مورد نیاز:

$$n = \frac{3.4m}{0.146m} = 24$$



شکل (۱۰-۱۶). نرخ جرقه براساس نسبت استقامت به تنش به ازای مقادیر مختلف N

#### ۴-۱-۴ تعیین تعداد مقره‌ها براساس سطح آلودگی منطقه

سطح آلودگی منطقه براساس استاندارد IEC ۶۰۸۱۵، متوسط می‌باشد. بنابراین حداقل فاصله خزشی مورد نیاز به ازای هر کیلوولت ولتاژ فاز-فاز، برابر ۱۶ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای خط ۴۰۰ کیلوولت تحت بررسی،

تعداد مقرر مورد نیاز برابر است با:

$$n = \frac{420kV \times 16mm}{292mm} \cong 24$$

### ۵-۱۰ سؤال و تمرین

- ۱- برای یک پست ۲۳۰/۶۳ کیلوولت، محاسبات هماهنگی عایقی برای شرایط استاندارد انجام شود.
- ۲- تاثیر تغییرات مقاومت زمین پای دکل بر احتمال وقوع قوس برگشتی در خطوط انتقال را مورد بررسی قرار دهید.

دکتر احمد غلامی (انتشارات دانشگاه سمنان)



## فصل ۱۱

### آزمایشهای فشارقوی مرتبط با هماهنگی عایقی

#### ۱-۱ مقدمه

تجهیزات فشارقوی اجزای اصلی سیستم قدرت در بخشهای تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی می‌باشند. تجهیزاتی همانند ژنراتورها، ترانسفورماتورهای قدرت و اندازه گیری، کابل‌های قدرت، خازنها و کلیدها علاوه بر نقش کلیدی در سیستم دارای قیمت بسیار زیاد و هزینه نصب و نگهداری بالایی هستند. عایق تجهیزات الکتریکی از بخشهای اساسی آنها می‌باشد به طوریکه عموماً عمر مفید تجهیزات الکتریکی فشارقوی را با عمر عایقی آنها می‌سنجند. وظیفه اصلی عایق‌های الکتریکی، جداسازی قسمت تحت پتانسیل تجهیزات نسبت به قسمت زمین شده یا با پتانسیل متفاوت می‌باشد. عایق‌ها به مرور زمان در اثر تنش‌های الکتریکی و محیطی وارده، دچار تخریب یا تضعیف میشوند. لذا آزمایش‌های گوناگونی در مراحل ساخت، پس از ساخت، قبل و بعد از حمل به محل نصب، قبل از بهره‌برداری و در طول بهره‌برداری بر روی عایق تجهیزات الکتریکی به منظور کنترل کیفیت و حصول اطمینان از عملکرد صحیح آنها صورت می‌گیرد. آزمایشات عایقی را می‌توان به دو دسته کلی آزمایش‌های عایقی مخرب<sup>۱</sup> و آزمایش‌های عایقی غیر مخرب<sup>۲</sup> تقسیم نمود. در آزمایش‌های عایقی مخرب، ولتاژ

۱- Destructive Insulation Test (DT)

۲- Non-Destructive Insulation Test (NDT)

اعمالی جهت آزمایش، بیشتر از ولتاژ کار عادی تجهیز می‌باشد، که در حین فرآیند آزمایش، احتمال تخریب تجهیز نیز وجود دارد. ولی در آزمایش‌های غیر مخرب، ولتاژ و شدت میدان الکتریکی در حدود ولتاژ کار دائمی تجهیز مورد آزمایش می‌باشد. البته مبنای ولتاژ برای آزمایش عایقی مخرب به ولتاژ نامی دستگاه و نوع دستگاه بستگی دارد.

همچنین آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب تجهیزات علاوه بر ولتاژ و جریان، از جنبه‌های دیگر نیز انجام می‌شود.

## ۲-۱۱ مشخصات آزمایش‌های عایقی براساس استانداردها

تجهیزات سیستم قدرت دارای بخش‌های عایقی مختص به خود می‌باشند که برای هرکدام از این تجهیزات آزمایش‌های مربوط به آن در استانداردهای گوناگون ارائه شده است. برای بررسی این آزمایش‌ها نیاز به آشنایی بعضی مفاهیم و آزمایش‌های مشترک می‌باشد که این بخش به معرفی آنها پرداخته است.

### ۱-۲-۱۱ انواع شکست در آزمایش‌های عایقی

#### الف) شکست مخرب<sup>۱</sup>

وقتی که عایق تحت آزمایش بر اثر تنش‌های الکتریکی دچار تخریب و شکست الکتریکی کامل می‌شود و ولتاژ قابل تحمل در دو سر عایق به صفر می‌رسد، تخلیه مخرب در عایق ایجاد می‌گردد. این نوع تخلیه در کلیه عایق‌ها می‌تواند اتفاق

<sup>۱</sup>- Destructive discharge

بیافتد که در عایقهای مایع به جرقه<sup>۱</sup> و در عایقهای گاز به تخلیه الکتریکی<sup>۲</sup> و در عایقهای جامد به سوراخ شدگی<sup>۳</sup> معروف می‌باشد.

(ب) شکست مخرب ناپایدار<sup>۴</sup>

تخلیه‌ای است که در عایق تحت آزمایش بصورت لحظه‌ای اتفاق می‌افتد و سبب تولید قوس الکتریکی و کاهش ولتاژ به مقدار صفر یا یک مقدار خیلی کم بصورت لحظه‌ای می‌گردد.

(ج) شکست غیر مخرب<sup>۵</sup>

تخلیه‌ای که در عایق بدون کاهش ولتاژ به صفر یا یک مقدار خیلی کم اتفاق می‌افتد. این نوع تخلیه به تخلیه جزئی<sup>۶</sup> نیز معروف است.

## ۲-۲-۱۱ انواع عایق‌های تجهیزات فشارقوی

عایق‌ها از لحاظ استقامت در برابر آزمایش‌های فشارقوی به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند:

(الف) عایق‌های غیر خود ترمیم<sup>۷</sup>

این عایق‌ها در اثر ایجاد یک تخلیه مخرب در هنگام آزمایش، کارایی خود را بطور کامل از دست می‌دهند و نمی‌توان دوباره از آنها استفاده نمود. لذا فقط برخی از

۲- Sparkover

۳- Flashover

۴- Puncture

۱- Non-sustained destructive discharge

۲- Non- destructive discharge

۳- Partial discharge

۴- Non-self-restoring insulation

آزمایشهای فشارقوی روی اینگونه از عایقها صورت می‌پذیرد. از جمله این عایقها عایقهای چینی، شیشه‌ای و پلیمری می‌باشند که با قرار گرفتن در ولتاژی بیش از آستانه تحمل شان، دچار شکست کامل می‌شوند. لذا تعداد آزمایش‌هایی که روی اینگونه از عایقها انجام می‌شود محدود می‌باشد و هیچگونه شکستی در آنها قابل قبول نمی‌باشد.

### ب) عایق‌های خود ترمیم<sup>۱</sup>

عایق‌هایی که پس از ایجاد تخلیه الکتریکی در آنها دوباره به روند کار عادی خود باز می‌گردند به عایق‌های خود ترمیم معروف‌اند. در آزمایش اینگونه از عایقها عامل محدود کننده آزمایش‌های عایقی، محدودیتهای موجود در انجام آزمایش می‌باشد. ولتاژ استقامت اینگونه از عایقها با روش‌های آماری که در استانداردها مانند IEC 60060 ارائه شده است، بدست می‌آید.

### ج) عایق‌های ترکیبی

بعضی از تجهیزات الکتریکی همانند مقره‌های عبوری و ترانسفورماتورها شامل هر دو نوع عایق خود ترمیم و غیر خود ترمیم می‌باشند. در این تجهیزات نمی‌توان تعداد زیادی از آزمایشها را به دلیل وجود عایق‌های غیر خود ترمیم انجام داد و از طرفی هم با تعداد کم آزمایش نمی‌توان انتخاب مناسبی را برای عایق خود ترمیم داشت.

## ۳-۲-۱۱ انواع آزمایش‌های عایقی

### ۳-۲-۱۱-۱ آزمایش‌های تحت شرایط خشک

۱- Self-restoring insulation

اینگونه آزمایش‌ها معمولاً برای عایق‌های داخلی و در شرایط محیطی و کاری تجهیز مورد آزمایش، انجام می‌گیرد.

### ۲-۳-۱۱ آزمایش‌های تحت شرایط مرطوب

در این آزمایش آب با ویژگی‌هایی که در جدول (۱-۱۱) ارائه شده است بصورت قطره بر روی تجهیز تحت آزمایش پاشیده می‌شود. این آزمایش برای تجهیزات با حداکثر ولتاژ نامی ۸۰۰ kV انجام می‌گیرد.

جدول (۱-۱۱). ویژگی آب مورد استفاده در آزمایش‌های تحت شرایط مرطوب

ویژگی	واحد	مقدار آزمایش (مقدار مجاز خطا)
دمای آب	درجه سانتی‌گراد	$(15 \pm)$
مقاومت ویژه الکتریکی آب	$\Omega.m$	$100(15 \pm)$
مدت زمان انجام آزمایش	ثانیه	۶۰

### ۲-۳-۱۱ آزمایش‌های با ولتاژ مستقیم

ولتاژ مستقیم در این آزمایش‌ها توسط یکسوسازها تولید می‌گردد که بایستی توان لازم جهت شارژ خازن‌های عایق تجهیز مورد آزمایش را داشته باشد. حداکثر مقدار مجاز ریپل ولتاژ مستقیم ۳٪ می‌باشد. در این آزمایش جریان عبوری از تجهیز اندازه‌گیری می‌گردد. این جریان دارای سه مولفه خازنی، دائمی مقاومتی و تخلیه جزئی می‌باشد. برای اندازه‌گیری این جریان‌ها، دستگاه اندازه‌گیری باید دارای رنج وسیعی باشد تا بتواند این جریان‌ها را بدرستی ثبت کند. انواع آزمایش‌های با ولتاژ مستقیم بصورت زیر دسته‌بندی می‌گردند.

**- آزمایش ولتاژ استقامت**

در این آزمایش، ابتدا ولتاژ با دامنه کم به تجهیز اعمال می‌گردد تا از اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی جلوگیری گردد، سپس این ولتاژ به آرامی افزایش می‌یابد. نرخ افزایش ولتاژ باید به حدی باشد تا دستگاه‌های اندازه‌گیری قادر به ثبت جریان باشند و همچنین عایق دچار تنش الکتریکی در حین افزایش ولتاژ نگردد. معمولا نرخ افزایش برابر ۲٪ ولتاژ نامی در ثانیه می‌باشد. مدت زمان آزمایش به نوع تجهیز (ظرفیت خازنی و مقاومتی عایق) بستگی دارد، ولی اگر زمانی در آزمایش اشاره نشد عموما یک دقیقه در نظر گرفته می‌شود.

**- آزمایش ولتاژ تخلیه مخرب**

در این آزمایش ولتاژ آنقدر افزایش می‌یابد تا تخلیه کامل در عایق اتفاق بیفتد و مقدار آن ولتاژ ثبت می‌گردد.

**۴-۳-۲-۱۱ آزمایش‌های با ولتاژ متناوب**

در این آزمایش معمولا مقدار فرکانس ولتاژ اعمالی بین ۴۵ هرتز تا ۶۵ هرتز می‌باشد. منبع تولید این ولتاژ بایستی در جریان‌های نشتی بالا و تخلیه‌های غیر مخرب دچار افت ولتاژ نگردد. ویژگی کامل ترانسفورماتورهای تولید ولتاژ آزمایش در استاندارد IEC 60060 ارائه شده است. آزمایش‌های با ولتاژ متناوب عبارتند از:

**- آزمایش ولتاژ استقامت**

نحوه انجام این آزمایش همانند آزمایش ولتاژ استقامت با ولتاژ مستقیم می‌باشد.

**- آزمایش ولتاژ تخلیه مخرب**

همانند ولتاژ مستقیم، ولتاژ به آرامی آنقدر افزایش می‌یابد تا تخلیه کامل در عایق اتفاق بیفتد و سپس ولتاژ مورد نظر ثبت می‌گردد.

### ۵-۳-۲-۱۱ آزمایش‌های با ولتاژ ضربه صاعقه

در این آزمایش دو نوع ولتاژ، ولتاژ ضربه صاعقه کامل و ولتاژ ضربه صاعقه بریده شده به تجهیز اعمال می‌گردد. ولتاژ ضربه صاعقه کامل شامل مدت زمان پیشانی موج  $1/2$  میکروثانیه و زمان پشت موج  $50$  میکروثانیه می‌باشد. مقدار دامنه این ولتاژ بستگی به ولتاژ نامی تجهیز مورد آزمایش دارد که در استاندارد مربوط آن تجهیز بیان شده است. ولتاژ صاعقه بریده شده، ولتاژ صاعقه کاملی است که پس از  $2$  تا  $5$  میکروثانیه مقدار دامنه آن به صفر می‌رسد. آزمایش ولتاژ استقامت برای ضربه صاعقه، به سه صورت زیر قابل انجام می‌باشد.

#### - آزمایش ولتاژ استقامت با روش الف

در این آزمایش  $3$  ولتاژ ضربه صاعقه با پلاریته و دامنه برابر با ولتاژ استقامت ضربه نامی تجهیز به آن اعمال می‌گردد. در این حالت نباید در عایق هیچ شکستی اتفاق بیفتد.

#### - آزمایش ولتاژ استقامت با روش ب

در این آزمایش  $15$  ضربه صاعقه با پلاریته و دامنه مشخص به تجهیز اعمال می‌گردد به شرطی که در عایق خود ترمیم آن حداقل  $2$  شکست و در عایق غیر خود ترمیم هیچ شکستی اتفاق نیفتد.

#### - آزمایش ولتاژ استقامت با روش ج

در این آزمایش  $3$  ضربه صاعقه با پلاریته و دامنه مشخص به تجهیز اعمال می‌گردد، اگر هیچ شکستی اتفاق نیفتد تجهیز آزمایش را به سلامت سپری کرده

است. اگر بیش از یک شکست اتفاق بیفتد، تجهیز از لحاظ عایقی مورد تایید نمی‌باشد. ولی اگر یک شکست در عایق خود ترمیم اتفاق بیفتد، ۹ ضربه صاعقه اضافی به آن اعمال می‌کنند که در هیچکدام از این ۹ ضربه نبایستی شکستی اتفاق بیفتد تا تجهیز به سلامت از این آزمایش بیرون آید. همچنین این آزمایش به صورت آماری نیز انجام می‌شود که جزئیات آن در استاندارد IEC 60060 ارائه شده است.

### ۶-۳-۲-۱۱ آزمایش با ولتاژ ضربه کلیدزنی

در این آزمایش مدت زمان پیشانی موج ولتاژ کلیدزنی ۲۵۰ میکروثانیه و مدت زمان پشت موج آن ۲۵۰۰ میکروثانیه می‌باشد. دامنه ولتاژ کلیدزنی به تجهیز مورد نظر بستگی دارد که در استاندارد مربوطه مشخص گردیده است. نحوه انجام آزمایش همانند آزمایش‌های با ولتاژ ضربه صاعقه می‌باشد.

### ۳-۱۱ آزمایش عایقی کلیدهای قدرت

کلیدهای قدرت در دو حالت کلی وضعیت تیغه باز و تیغه بسته مورد آزمایش عایقی قرار می‌گیرند. در هر کدام از این حالات، ولتاژ به یکی از کنتاکتهای کلید اعمال می‌شود و مابقی کنتاکتها به همراه قسمت بیرونی عایق کلید به سیستم زمین متصل می‌گردند.

اگر در کلید قدرت از شاخک یا حلقه برقگیر استفاده شده باشد، باید آنها را جدا نمود ولی اگر از حلقه کرونا جهت تعدیل توزیع پتانسیل استفاده شده باشد باید در طول آزمایش در محل خود باقی بماند.

برای آزمایش عایقی کلیدهای قدرت، سه نوع آزمایش صورت می‌گیرد، که به اختصار به آنها پرداخته می‌شود.



### ۱-۳-۱۱ آزمایش ولتاژ استقامت کوتاه مدت با فرکانس قدرت

این آزمایش برای تمامی کلیدهای قدرت انجام می‌گیرد که مقدار ولتاژ اعمالی به کلید در جدول (۱۱-۲) ارائه شده است. این ولتاژ به مدت یک دقیقه برای هر دو شرایط خشک و مرطوب (برای کلیدهای داخلی) به کلید اعمال می‌گردد. در فرآیند آزمایش هیچ شکستی نباید در عایق کلید اتفاق بیفتد. ولی در آزمایش شرایط مرطوب، عایق‌های خود ترمیم کلید می‌توانند تنها یکبار دچار شکست گردند که مشکلی را در فرآیند بهره‌برداری ایجاد نمی‌کند.

### ۲-۳-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه

در این آزمایش بر اساس استاندارد IEC 60060، ۱۵ ولتاژ ضربه با مقدار نامی به کلید اعمال می‌گردد که عایق‌های خود ترمیم مجاز به ۲ شکست و عایق‌های غیر خود ترمیم مجاز به شکستی نمی‌باشند. این روند با دو پلاریته مثبت و منفی برای تمامی کلیدها انجام می‌گیرد. همچنین در هنگام اعمال پلاریته معکوس به کلید بهتر است ابتدا سه ضربه با ۸۰٪ ولتاژ نامی به کلید اعمال گردد تا بار الکتریکی ذخیره شده در آن تخلیه گردد. دامنه این ولتاژ در جدول (۱۱-۲) ارائه شده است.

### ۳-۳-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه کلیدزنی

این آزمایش تنها برای کلیدهای با ولتاژ نامی بالاتر از ۲۴۵ کیلوولت انجام می‌گیرد. شکل موج ولتاژ اعمالی در این آزمایش براساس استاندارد می‌باشد که هم در شرایط خشک و هم در شرایط خیس (برای عایق‌های داخلی) با هر دو

پلاریته مثبت و منفی انجام می‌گیرد. دامنه این ولتاژ نیز در جدول (۲-۱۱) آورده شده است.

جدول (۲-۱۱). سطوح عایقی نامی کلیدهای قدرت

مقدار حداکثر ولتاژ استقامت نامی ضربه صاعقه (کیلوولت)	مقدار حداکثر ولتاژ استقامت نامی کلیدزنی (کیلوولت)	مقدار موثر ولتاژ استقامت نامی کوتاه مدت (کیلوولت)	مقدار موثر ولتاژ نامی (کیلوولت)
۲۰	-	۱۰	۳/۶
۴۰			
۴۰	-	۲۰	۷/۲
۶۰			
۶۰	-	۲۸	۱۲
۷۵			
۹۵	-	۵۰	۲۴
۱۲۵			
۱۴۵	-	۷۰	۳۶
۱۷۰			
۳۲۵	-	۱۴۰	۷۲/۵
۵۵۰			
۶۵۰	-	۲۳۰	۱۴۵
۸۵۰			
۹۵۰	-	۳۶۰	۲۴۵
۱۰۵۰			
۱۳۰۰	۹۵۰	۵۲۰	۴۲۰
۱۴۲۵	۱۰۵۰		

#### ۴-۱۱ آزمایش عایقی مقره‌ها

عایق مقره‌های فشارقوی عموماً از جنس چینی، شیشه و کامپوزیت می‌باشند. در ادامه به بررسی انواع آزمایش‌های عایقی که بر روی مقره‌ها انجام می‌گیرد پرداخته شده است.

##### ۴-۱-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه

در این آزمایش ولتاژ شکست ۵۰٪ مطابق استاندارد IEC 60060 انتخاب می‌شود. در این آزمایش چند بار ولتاژ با مقدار برابر  $V$  به مقره اعمال می‌گردد و اگر حداقل یک جرقه اتفاق بیفتد مقدار ولتاژ به اندازه  $\Delta V$  افزایش می‌یابد و در غیر این صورت ولتاژ به همان اندازه کاهش می‌یابد. در نهایت مقدار ولتاژ جرقه ۵۰٪ پس از اعمال ضریب تصحیح شرایط محیطی باید بزرگتر از ولتاژ اسقامت ضربه صاعقه استاندارد باشد تا مقره این آزمایش را به سلامت سپری کند.

##### ۴-۲-۱۱ آزمایش ولتاژ اسقامت با فرکانس قدرت در شرایط مرطوب

این آزمایش براساس استاندارد IEC 60060 انجام می‌گیرد که مقدار ولتاژ اعمالی پس از تصحیح شرایط محیطی، به مدت یک دقیقه به مقره اعمال می‌گردد. در طول آزمایش نباید هیچ سوراخ‌شدگی در مقره ایجاد گردد.

##### ۴-۳-۱۱ آزمایش ولتاژ استقامت سوراخ‌شدگی

این آزمایش می‌تواند هم با ولتاژ فرکانس قدرت و هم با ولتاژ ضربه انجام گیرد. برای جلوگیری از ایجاد جرقه روی سطح مقره، مقره را در یک ظرف پر از یک ماده عایقی مناسب (مقاومت ویژه عایق بین  $10^6$  تا  $10^8 \Omega.m$ ) قرار می‌دهند. ولتاژ به آرامی افزایش می‌یابد تا سوراخ شدگی در مقره ایجاد گردد.

### ۵-۱۱ آزمایش عایقی مقره‌های عبوری

آزمایش عایقی مقره‌های عبوری در دمای محیط بین ۱۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌گیرد. آزمایش عایقی مقره‌های عبوری به پنج آزمایش ولتاژ استقامت فرکانس قدرت، ولتاژ استقامت ضربه صاعقه، ولتاژ استقامت کلیدزنی، اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی و اندازه‌گیری تخلیه جزئی تقسیم می‌شوند.

#### ۱-۵-۱۱ ولتاژ استقامت فرکانس قدرت

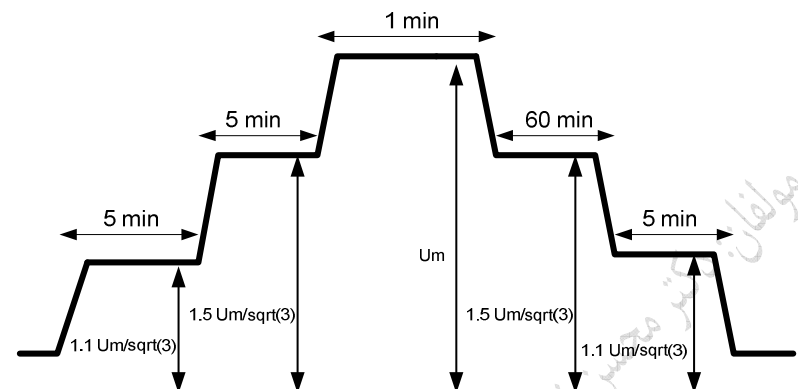
این آزمایش در شرایط خشک برای تمامی مقره‌های عبوری و در شرایط مرطوب برای مقره‌های عبوری بیرونی با ولتاژ نامی کمتر از ۲۴۵ کیلوولت انجام می‌گیرد. مقدار ولتاژ اعمالی در این آزمایش در جدول (۱۱-۳) ارائه شده و مدت زمان اعمال آزمایش نیز یک دقیقه می‌باشد. در طول آزمایش نباید هیچ تخلیه یا سوراخ‌شدگی اتفاق بیفتد. ولی اگر یک‌بار اتفاق افتاد، آزمایش دوباره انجام می‌شود و اگر این‌بار هیچ سوراخ‌شدگی اتفاق نیفتاد مقره عبوری سالم است. این آزمایش از نوع آزمایش رایج<sup>۱</sup> و آزمایش نوعی<sup>۲</sup> می‌باشد.

همچنین نوع دیگری از آزمایش با ولتاژ فرکانس قدرت وجود دارد که برای مقره‌های عبوری با ولتاژ نامی بیشتر از ۱۷۰ کیلوولت انجام می‌گیرد. نحوه اعمال ولتاژ در این آزمایش در شکل (۱۱-۱) نشان داده شده است. در طول انجام این آزمایش نباید هیچ تخلیه الکتریکی یا سوراخ‌شدگی در عایق اتفاق بیفتد. این

۱-Routine test

۲-Type test

آزمایش که از نوع آزمایش‌های نوعی می‌باشد به آزمایش با ولتاژ فرکانس قدرت طولانی مدت معروف است.



شکل (۱۱-۱). پروفیل ولتاژ برای آزمایش با ولتاژ فرکانس قدرت

## ۲-۵-۱۱ آزمایش ولتاژ استقامت ضربه صاعقه

این آزمایش برای تمامی مقره‌های عبوری انجام می‌گیرد که نحوه انجام بر اساس استاندارد IEC 60060 می‌باشد. در این آزمایش ۱۵ ولتاژ ضربه با پلاریته مثبت و ۱۵ ولتاژ ضربه با پلاریته منفی اعمال می‌گردد. البته برای مقره‌های عبوری ترانسفورماتور با ولتاژ نامی بالاتر از ۷۲/۵ کیلوولت مراحل اعمال ضربه صاعقه بصورت زیر می‌باشد:

- ۱۵ ضربه صاعقه با پلاریته مثبت
- یک ضربه صاعقه با پلاریته منفی و دامنه ۱۱۰٪ ولتاژ BIL
- ۵ ضربه صاعقه بریده شده با پلاریته منفی و دامنه ۱۲۱٪ ولتاژ BIL
- ۱۴ ضربه صاعقه با پلاریته منفی و دامنه ۱۱۰٪ ولتاژ BIL

در طول فرآیند آزمایش نباید هیچ سوراخ‌شدگی اتفاق بیفتد و تعداد مجاز تخلیه الکتریکی در طول آزمایش برای هر پلاریته ۲ مورد می‌باشد. این آزمایش از نوع

آزمایش نوعی می‌باشد ولی در آزمایش رایج نحوه اعمال ولتاژ متفاوت می‌باشد، که در استاندارد IEC 60137 توضیح داده شده است.

### ۳-۵-۱۱ آزمایش ولتاژ استقامت کلیدزنی

این آزمایش در شرایط مرطوب تنها برای مقره های عبوری بیرونی و در شرایط خشک برای تمامی مقره های عبوری با ولتاژ نامی بالاتر از ۲۴۵ کیلوولت انجام می‌گیرد. دامنه ولتاژ آزمایش در جدول (۱۱-۳) مشخص شده است. در این آزمایش ۱۵ ضربه با پلاریته مثبت و ۱۵ ضربه با پلاریته منفی به مقره عبوری اعمال می‌گردد. در فرآیند آزمایش نباید هیچ سوراخ‌شدگی اتفاق بیفتد و حداکثر دو تخلیه الکتریکی مجاز به وقوع در هنگام آزمایش می‌باشد. این آزمایش نیز در فهرست آزمایش‌های نوعی می‌باشد.

جدول (۱۱-۳). سطوح عایقی مقره های عبوری

مقدار موثر ولتاژ استقامت فرکانس قدرت (کیلوولت)				حداکثر ولتاژ کلیدزنی نامی (کیلوولت)	مقدار حداکثر ولتاژ صاعقه نامی (کیلوولت)	مقدار موثر حداکثر ولتاژ نامی تجهیز (کیلوولت)
سایر مقره های عبوری (شرایط مرطوب)	سایر مقره های عبوری (شرایط خشک)	مقره عبوری GIS (شرایط خشک)	مقره عبوری ترانسفورماتور (شرایط خشک)			
۱۰	۱۰	-	۱۱	-	۴۰	۳/۶
۲۰	۲۰	-	۲۲	-	۶۰	۷/۲
۲۸	۲۸	-	۳۰	-	۷۵	۱۲
۵۰	۵۰	-	۵۵	-	۱۲۵	۲۴
۷۰	۷۰	-	۷۷	-	۱۷۰	۳۶
۱۴۰	۱۴۰	-	۱۵۵	-	۳۲۵	۷۲/۵
۱۸۵	۱۸۵	-	۲۰۵	-	۴۵۰	۱۴۵

۲۳۰	۲۳۰		۲۵۵		۵۵۰	
۲۷۵	۲۷۵		۳۰۵		۶۵۰	
۳۹۵	۳۹۵	۴۳۵	۴۳۵	۶۵۰ ۷۵۰ ۸۵۰	۹۵۰	۲۴۵
۴۶۰	۴۶۰	۴۶۰	۵۰۵	۷۵۰ ۸۵۰	۱۰۵۰	
-	۵۷۰	۵۹۵	۶۳۵	۱۰۵۰	۱۳۰۰	
-	۶۳۰	۶۵۰	۶۹۵	۱۰۵۰	۱۴۲۵	۴۲۰
-	۶۸۰	-	۷۵۰	۱۱۷۵	۱۵۵۰	

#### ۴-۵-۱۱ آزمایش اندازه‌گیری ضریب تلفات عایقی (tagδ)

این آزمایش با استفاده از پل شرینگ انجام می‌شود. حداکثر مقدار قابل قبول ضریب تلفات برای عایق‌های مختلف مطابق جدول (۴-۱۱) می‌باشد.

جدول (۴-۱۱). حداکثر مقدار مجاز ضریب تلفات عایقی برای مقره‌های عبوری

نوع عایق مقره عبوری	حداکثر مقدار مجاز ضریب تلفات عایقی با ولتاژ $(1/0.5 \times U_m / \sqrt{3})$
کاغذ آغشته در روغن	۰/۰۰۷
کاغذ آغشته در رزین	۰/۰۰۷
کاغذ پیچیده در رزین	۰/۰۱۵
نوار داخل گاز	۰/۰۰۵
گاز	۰/۰۰۵
رزین	۰/۰۱۵

### ۵-۱۱-۵ آزمایش اندازه‌گیری تخلیه جزئی

این آزمایش بر اساس استاندارد IEC 60270 صورت می‌گیرد. این اندازه‌گیری در طول آزمایش ولتاژ استقامت فرکانس قدرت انجام می‌شود. حداکثر مقدار قابل قبول تخلیه جزئی نیز در جدول (۵-۱۱) آورده شده است.

جدول (۵-۱۱). حداکثر مقدار مجاز تخلیه جزئی

نوع عایق مقره عبوری	حداکثر مقدار مجاز تخلیه جزئی با ولتاژ $(1/0.5 \times U_m / \sqrt{3})$
کاغذ آغشته در روغن	۵
کاغذ آغشته در رزین	۵
کاغذ پیچیده در رزین	۱۰۰
نوار داخل گاز	۵
گاز	۵
رزین	۵

### ۶-۱۱-۱۱ آزمایش عایقی تجهیزات حفاظتی

بر روی تجهیزات حفاظتی دو آزمایش عایقی با ولتاژ ضربه و ولتاژ فرکانس قدرت انجام می‌گیرد. این آزمایش‌ها قبل از نصب تجهیز و در شرایط خشک با دمای محیط بین ۱۵ تا ۳۵ درجه و رطوبت نسبی بین ۴۵٪ تا ۷۵٪ و فشار هوا بین ۸۰۰ تا ۱۰۶۰ میلی‌بار صورت می‌گیرد. آزمایش ضربه به جهت اطمینان از توانایی استقامت عایق جامد تجهیز حفاظتی در برابر ولتاژ ضربه احتمالی در حین بهره برداری و آزمایش ولتاژ فشار قوی با فرکانس قدرت برای ارزیابی عایق در مقابل اضافه ولتاژهای موقتی می‌باشد. این آزمایش‌ها از گروه آزمایش‌های نوعی می‌باشند که در ادامه به اختصار بررسی می‌گردند.



### ۱-۶-۱۱ آزمایش ولتاژ استقامت ضربه

در این آزمایش ۵ ولتاژ ضربه استاندارد بر اساس IEC 60060 با پلاریته مثبت و منفی به تجهیز اعمال می‌گردد. مقدار حداکثر ولتاژ ضربه از جدول (۱۱-۶) بدست می‌آید. در حین فرآیند آزمایش نیز نباید هیچ شکستی در عایق تجهیز رخ دهد تا تجهیز به سلامت از آزمایش بیرون آید.

جدول (۱۱-۶). مقادیر نامی آزمایش ولتاژ صاعقه تجهیز حفاظتی

ولتاژ نامی تجهیز حفاظتی (ولت)	ولتاژ نامی ضربه صاعقه (ولت)
۵۰	۸۰۰
۱۰۰	۱۵۰۰
۱۵۰	۲۵۰۰
۳۰۰	۴۰۰۰
۶۰۰	۶۰۰۰
۱۰۰۰	۸۰۰۰

### ۲-۶-۱۱ آزمایش ولتاژ فشار قوی با فرکانس قدرت

دامنه این ولتاژ بر اساس ولتاژ نامی تجهیز حفاظتی در جدول (۱۱-۷) ارائه شده است. فرکانس این ولتاژ بین ۴۵ تا ۶۵ هرتز می‌باشد. همچنین می‌توان این آزمایش را با ولتاژ مستقیم با دامنه  $1/4$  برابر ولتاژ AC انجام داد. مدت زمان آزمایش یک دقیقه می‌باشد که در طول آزمایش نباید هیچ شکستی در عایق اتفاق بیفتد.

جدول (۷-۱۱). آزمایش ولتاژ AC

ولتاژ نامی عایقی (ولت)	ولتاژ آزمایش AC (کیلوولت)
تا ۶۳	۰/۵
۱۲۵	۲
۱۶۰	۲
۲۰۰	۲
۲۵۰	۲
۳۲۰	۲
۴۰۰	۲
۵۰۰	۲
۶۳۰	۲/۳
۸۰۰	۲/۶
۱۰۰۰	۳

### ۷-۱۱ آزمایش عایقی ترانسفورماتورها

آزمایش‌های عایقی مورد نیاز برای ترانسفورماتورهای قدرت را می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی نمود.

#### ۷-۱۱-۱ آزمایش ولتاژ استقامت AC با منبع مجزا

یک منبع ولتاژ تکفاز با ولتاژی برابر آنچه در جدول (۷-۱۱) درج شده، به تک تک ترمینال‌های ترانسفورماتور (در حالیکه مابقی سیم‌پیچ‌ها، هسته و بدنه زمین شده‌اند) به مدت یک دقیقه اعمال می‌گردد. در طول آزمایش نباید هیچ کاهش ولتاژی اتفاق بیفتد.

## ۲-۷-۱۱ آزمایش ولتاژ AC القایی

این آزمایش در فرکانس قدرت و با ولتاژ مشخص شده در جدول (۱۱-۸) به مدت یک دقیقه انجام می‌گیرد. برای ترانسفورماتورهای با ولتاژ نامی بیشتر از ۷۲/۵ کیلوولت بعد از این آزمایش، آزمایش اندازه‌گیری تخلیه جزئی نیز انجام می‌گیرد. این آزمایش به دو صورت کوتاه مدت و بلند مدت و با توجه به نوع سیم‌پیچی ترانسفورماتور (یکنواخت و غیریکنواخت) انجام می‌گیرد.

### ۱-۲-۷-۱۱ آزمایش ولتاژ AC القایی کوتاه مدت برای ترانسفورماتور با

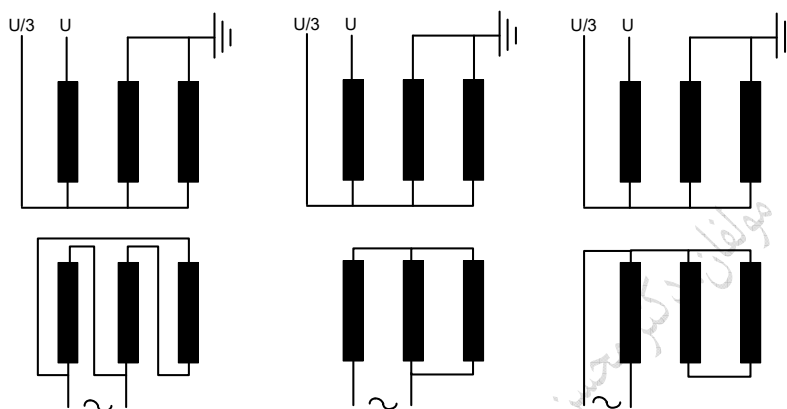
#### سیم‌پیچی یکنواخت

این آزمایش بصورت فاز به فاز بین سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور انجام می‌گیرد. مدت زمان انجام آزمایش در قسمت قبل ذکر شده است که در طول این مدت نباید هیچ کاهش ولتاژی در ترانسفورماتور مشاهده شود.

### ۲-۲-۷-۱۱ آزمایش ولتاژ AC القایی کوتاه مدت برای ترانسفورماتور با

#### سیم‌پیچی غیریکنواخت

در بعضی از ترانسفورماتورهای فشار قوی طرف ستاره زمین می‌گردد. بنابراین مرکز ستاره نیاز به عایق‌بندی همانند سر سیم‌پیچ‌های فشار قوی ندارد. یعنی طرف زمین شده ستاره با ولتاژ نامی کمتری عایق‌بندی می‌گردد. در شکل (۱۱-۲) روش‌های مختلف آزمایش ولتاژ القایی ترانسفورماتور سه فاز ستاره - مثلث بر اساس استاندارد IEC 60076 نشان داده شده است. در حین این آزمایش نیز نباید هیچ کاهش ولتاژی مشاهده گردد تا ترانسفورماتور با موفقیت آزمایش را پشت سر بگذارد.



شکل (۲-۱۱). اتصالات مختلف ترانسفورماتور با سیم‌پیچی غیریکنواخت در آزمایش ولتاژ القایی

### ۳-۲-۷-۱۱ آزمایش ولتاژ AC القایی بلند مدت برای ترانسفورماتورهای با

#### سیم‌پیچی یکنواخت و غیریکنواخت

این آزمایش به صورت فاز به فاز بر اساس استاندارد IEC 60076 انجام می‌گیرد. دامنه ولتاژ اعمالی در این آزمایش در جدول (۱۱-۸) و نحوه اعمال ولتاژ نیز همانند شکل (۱۱-۱) می‌باشد. در طول آزمایش نیز نباید هیچ کاهش ولتاژی مشاهده گردد.

### ۳-۲-۷-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه

در این آزمایش ابتدا یک ضربه با ولتاژ بین ۵۰٪ تا ۷۵٪ ولتاژ نامی با مشخصات استاندارد به یک ترمینال ترانسفورماتور (در حالیکه مابقی ترمینال‌ها، بدنه و نوترال با یک امپدانس کم زمین شده‌اند) اعمال می‌گردد. سپس ۳ ضربه با ولتاژ

نامی اعمال می‌شود که در هیچ‌کدام از این ضربات نباید شکستی در عایق ترانسفورماتور، سیم‌پیچی و مقره های عبوری رخ دهد.  
**۴-۷-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه بریده شده**

دامنه ولتاژ اعمالی در این آزمایش ۱/۱ برابر دامنه ولتاژ ضربه نامی می‌باشد. نحوه اعمال ولتاژ در این آزمایش به ترتیب زیر می‌باشد:

- یک ضربه کامل با ولتاژ کمتر از نامی
- یک ضربه کامل با ولتاژ نامی
- یک یا چند ضربه بریده شده یا ولتاژ کمتر از نامی
- دو ضربه بریده شده یا ولتاژ نامی
- دو ضربه کامل با ولتاژ نامی

برای ارزیابی عایق در این آزمایش، بین نوسانات ولتاژ یا جریان در دو حالت ضربه صاعقه بریده با ولتاژ کمتر از نامی و برابر با ولتاژ نامی مقایسه صورت گیرد.

#### ۵-۷-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه کلیدزنی

ولتاژ اعمالی در این آزمایش دارای زمان پیشانی موج ۱۰۰ تا ۲۵۰ میکروثانیه و زمان پشت موج ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ میکروثانیه می‌باشد. ابتدا یک ولتاژ با دامنه بین ۵۰٪ تا ۷۵٪ ولتاژ نامی و سپس سه ولتاژ با دامنه نامی به یک فاز (در حالیکه دو فاز دیگر با یک مقاومت ۱۰ تا ۲۰ کیلو اهم زمین شده باشد) اعمال می‌گردد. زمانی عایق سالم در نظر گرفته می‌شود که افت ولتاژ ناگهانی یا ناپیوستگی در جریان اندازه‌گیری شده در نول مشاهده نگردد.

جدول (۸-۱۱). مقادیر نامی ولتاژ استقامت برای آزمایش عایقی ترانسفورماتور

مقدار موثر حداکثر ولتاژ نامی تجهیز (کیلوولت)	ولتاژ استقامت نامی با منبع جدا و AC القایی	پیک ولتاژ استقامت نامی صاعقه (کیلوولت)	پیک ولتاژ استقامت نامی کلیدزنی (کیلوولت)
۷۲/۵	۱۴۰	۳۵۰	-
۱۴۵	۱۸۵	۴۵۰	-
	۲۳۰	۵۵۰	
	۲۷۵	۶۵۰	
۲۴۵	۳۲۵	۶۵۰	۵۵۰
	۳۶۰	۷۵۰	۶۵۰
	۳۹۵	۸۵۰	۷۵۰
	۴۶۰	۹۵۰	۸۵۰
۴۲۰	۴۶۰	۱۰۵۰	۸۵۰
	۵۱۰	۱۱۷۵	۹۵۰
	۵۷۰	۱۳۰۰	۱۰۵۰

### ۸-۱۱ آزمایش عایقی کابلها

آزمایشهای عایقی بر روی کابل‌های فشار قوی شامل آزمایش ولتاژ، آزمایش اندازه‌گیری مقاومت عایقی در دمای محیط، آزمایش اندازه‌گیری مقاومت عایقی در حداکثر دمای کاری هادی، آزمایش ولتاژ ۶۰ دقیقه و آزمایش ولتاژ ضربه می‌باشد.

#### ۸-۱۱-۱ آزمایش ولتاژ استقامت

این آزمایش برای تمامی کابل‌ها با سطوح ولتاژی مختلف و به مدت ۵ دقیقه بین هادی اصلی و صفحه فلزی دور آن (محافظ مکانیکی یا الکترومغناطیسی) انجام می‌گیرد. مقدار ولتاژ اعمالی آزمایش تکفاز از رابطه (۱۱-۱) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} U_{\text{test}}(\text{kV}) &= 2.5 U_0 + 2 & 1(\text{kV}) \leq U_0 \leq 3(\text{kV}) \\ U_{\text{test}}(\text{kV}) &= 3.5 U_0 & 6(\text{kV}) \leq U_0 \end{aligned} \quad (11-1)$$

که در آن،  $U_0$  ولتاژ نامی کابل می‌باشد. این مقدار ولتاژ برای آزمایش عایقی بین کابل‌ها در حالت سه هسته‌ای  $\sqrt{3}$  برابر می‌گردد. اگر این آزمایش با ولتاژ DC انجام شود مقدار ولتاژ اعمالی باید  $2/4$  برابر ولتاژ آزمایش در حالت AC باشد. در حین آزمایش نباید هیچ شکستی در عایق کابل اتفاق بیفتد.

## ۲-۸-۱۱ اندازه‌گیری مقاومت عایقی در دمای محیط

این آزمایش اولین آزمایش الکتریکی است که بر روی کابل انجام می‌شود. ابتدا ۱۰ تا ۱۵ متر از کابل انتخاب می‌گردد و تمام روکش آن بجز عایق اصلی جدا می‌گردد و کابل در آب با دمای محیط به مدت ۱ ساعت قرار می‌گیرد. سپس یک ولتاژ DC بین ۸۰ تا ۵۰۰ ولت به مدت ۱ تا ۵ دقیقه بین هادی و آب اعمال می‌گردد. در نهایت با بدست آوردن مقاومت R با استفاده از رابطه (۱۱-۲) مقدار مقاومت ویژه حجمی کابل محاسبه می‌گردد.

$$\rho = \frac{2\pi \times L \times R}{\ln \frac{D}{d}} \quad (11-2)$$

$\rho$ : مقاومت ویژه حجمی  $\Omega \cdot \text{cm}$

R: مقاومت اندازه‌گیری شده عایق  $\Omega$

L: طول کابل cm

D: قطر خارجی عایق mm

d: قطر داخلی عایق mm

ضریب ثابت مقاومت عایقی نیز از رابطه (۱۱-۳) بدست می‌آید.

$$K_i (\text{M}\Omega/\text{km}) = 10^{-11} \times 0.367 \times \rho \quad (11-3)$$

جهت ارزیابی عایق کابل با استفاده از نتایج بدست آمده، مقایسه‌ای با مقادیر نامی جدول (۱۱-۹) صورت می‌گیرد.

جدول (۱۱-۹). مشخصات نامی آزمایش عایقی کابل

XLPE	EPR	PVC	نوع روکش کابل
۹۰	۹۰	۷۰	حداکثر دمای مجاز (C°)
-	-	۱۰ <sup>۱۳</sup>	مقاومت ویژه حجمی (۱ kV ≤ U <sub>o</sub> ≤ ۳ kV)
۱۰ <sup>۱۲</sup>	۱۰ <sup>۱۲</sup>	۱۰ <sup>۱۰</sup>	دمای محیط (Ω.cm)
-	-	۱۰ <sup>۱۴</sup>	حداکثر دمای کاری هادی (Ω.cm)
-	-	۱۰ <sup>۱۴</sup>	مقاومت ویژه حجمی (۶ kV ≤ U <sub>o</sub> ≤ ۳۰ kV)
-	۱۰ <sup>۱۲</sup>	۱۰ <sup>۱۱</sup>	دمای محیط (Ω.cm)
-	-	۳۶/۷	حداکثر دمای کاری هادی (Ω.cm)
۳/۶۷	۳/۶۷	۰/۰۳۷	ضریب مقاومت عایقی (۱ kV ≤ U <sub>o</sub> ≤ ۳ kV)
-	-	۳۶۷	دمای محیط (MΩ.km)
-	۳/۶۷	۰/۳۷	حداکثر دمای کاری هادی (MΩ.km)
-	-	۳۶۷	ضریب مقاومت عایقی (۶ kV ≤ U <sub>o</sub> ≤ ۳۰ kV)
-	۳/۶۷	۰/۳۷	دمای محیط (MΩ.km)
-	-	۰/۳۷	حداکثر دمای کاری هادی (MΩ.km)

## ۲-۸-۱۱ آزمایش اندازه‌گیری مقاومت عایقی در حداکثر دمای کاری هادی

در این آزمایش ۱۰ تا ۱۵ متر از کابل را در آب با دمایی برابر با حداکثر دمای کاری هادی به مدت حداقل ۱ ساعت قرار می‌دهند و سپس یک ولتاژ DC ۸۰ تا ۵۰۰ ولت به مدت ۱ تا ۵ دقیقه به هادی و آب اعمال می‌گردد. مقاومت ویژه حجمی با استفاده از رابطه مذکور و مقاومت اندازه‌گیری شده بدست می‌آید. در



نهایت مقاومت ویژه حجمی و ضریب ثابت مقاومت عایقی جهت ارزیابی عایق کابل با مقادیر نامی مطابق جدول (۹-۱۱) مقایسه می‌گردد.

### ۳-۸-۱۱ آزمایش ولتاژ ۶۰ دقیقه

در این آزمایش نیز ۱۰ تا ۱۵ متر از کابل در آب با دمای محیط به مدت یک ساعت قرار می‌گیرد و ولتاژ AC برابر با  $4U_0$  به آن اعمال می‌گردد. شرط کارکرد درست عایق کابل این است که هیچ شکستی در طول آزمایش رخ ندهد.

### ۴-۸-۱۱ آزمایش با ولتاژ ضربه

آزمایش ضربه بر روی کابل در دمایی برابر با ۵ تا ۱۰ درجه بیشتر از دمای هادی در شرایط نامی اعمال می‌گردد. ۱۰ ضربه با پیک مثبت و ۱۰ ضربه با پیک منفی به کابل اعمال می‌گردد که در هیچ کدام از این آزمایش‌ها نباید شکستی رخ دهد.

علاوه بر آزمایش‌های مذکور، پس از نصب کابل نیز آزمایش‌هایی به جهت ارزیابی عایق کابل و نصب درست آن انجام می‌گیرد. آزمایش‌های پس از نصب کابل به دو دسته به شرح زیر تقسیم می‌شوند.

### ۵-۸-۱۱ آزمایش ولتاژ DC غلاف بیرونی کابل

ولتاژ DC برابر با ۴ کیلوولت به ازای هر میلی‌متر ضخامت غلاف بیرونی بین هادی لایه زیرین غلاف و یک الکتروود بیرونی متصل به غلاف اعمال می‌گردد. حداکثر ولتاژ در این آزمایش ۱۰ کیلوولت می‌باشد. غلاف بیرونی به مدت یک دقیقه تحت این ولتاژ قرار می‌گیرد که در طول این مدت نباید شکستی در آن رخ دهد.

### ۶-۸-۱۱ آزمایش عایقی کابل

این آزمایش به دو دسته زیر تقسیم می‌گردد. آزمایش AC: آزمایش با ولتاژی برابر با ولتاژ فاز به فاز نامی سیستم به مدت ۵ دقیقه یا با ولتاژی برابر با ولتاژ فاز به زمین به مدت ۲۴ ساعت بین هادی و محافظ مکانیکی کابل اعمال می‌گردد. در طول این مدت نباید شکستی در عایق کابل اتفاق بیفتد.

آزمایش DC: این آزمایش با ولتاژی برابر با  $4U_0$  به مدت ۱۵ دقیقه به عایق کابل اعمال می‌گردد که باید قادر به تحمل آن باشد.

### ۹-۱۱ آزمایش برقگیرها

آزمایش‌های عایقی برقگیر به منظور ارزیابی استقامت عایق بیرونی آن صورت می‌گیرد. میزان ولتاژ اعمالی در این آزمایش‌ها با در نظر گرفتن شرایط محیطی تعیین می‌گردد.

#### ۱-۹-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه صاعقه

این آزمایش در شرایط خشک و بر اساس استاندارد IEC 60060 انجام می‌گیرد. در این آزمایش ۱۵ ولتاژ ضربه با پلاریته مثبت و ۱۵ ولتاژ ضربه با پلاریته منفی به برقگیر اعمال می‌گردد. دامنه این ولتاژها  $1/3$  برابر ولتاژ حفاظت صاعقه برقگیر می‌باشد. در هر پلاریته نباید هیچ شکستی در عایق برقگیر رخ دهد و یا حداکثر دو تخلیه الکتریکی در اطراف محفظه برقگیر رخ داده باشد.

#### ۲-۹-۱۱ آزمایش ولتاژ ضربه کلیدزنی

این آزمایش برای برقگیرهای با جریان نامی ۱۰ و ۲۰ کیلوآمپر و با ولتاژ نامی بزرگتر از ۲۰۰ کیلوولت براساس استاندارد IEC ۶۰۰۶۰ و برای برقگیرهای بیرونی در شرایط مرطوب انجام می‌گیرد. در این آزمایش ۱۵ ولتاژ کلیدزنی با پلاریته مثبت و ۱۵ ولتاژ با پلاریته منفی به برقگیر اعمال می‌گردد که دامنه آن ۱/۲۵ برابر ولتاژ حفاظت کلیدزنی برقگیر می‌باشد. در هر پلاریته ولتاژ نباید هیچ شکستی رخ دهد و یا حداکثر ۲ جرقه اتفاق بیفتد.

### ۳-۹-۱۱ آزمایش ولتاژ فرکانس قدرت

این آزمایش برای برقگیرهای بیرونی در شرایط مرطوب و برای برقگیرهای درونی در شرایط خشک انجام می‌گیرد. برای برقگیرهای با جریان نامی ۱/۵، ۲/۵ و ۵ کیلوآمپر و برقگیرهای با کارکرد مکرر، دامنه ولتاژ اعمالی برابر ۰/۸۸ ولتاژ حفاظت صاعقه برقگیر و برای برقگیرهای با جریان نامی ۱۰ و ۲۰ کیلوآمپر ۱/۰۶ ولتاژ حفاظت کلیدزنی برقگیر به مدت یک دقیقه می‌باشد. به طور کلی انواع آزمایشهای رایج برای تجهیزات الکتریکی مطابق جدول (۱۱-۱۰) می‌باشد.

جدول (۱۱-۱۰). انواع آزمایشهای رایج برای تجهیزات فشارقوی

عنوان آزمایش	نوع تجهیز
<ul style="list-style-type: none"> <li>- آزمایش جرقه فرکانس قدرت</li> <li>- آزمایش آلودگی</li> <li>- آزمایش ولتاژ پسماند</li> <li>- آزمایش ضربه جریان بالا (کوتاه مدت، بلند مدت و کار دائمی)</li> </ul>	برقگیرها
<ul style="list-style-type: none"> <li>- آزمایش ضریب تلفات</li> <li>- آزمایش تخلیه جزئی (PD)</li> <li>- آزمایش ولتاژ استقامت در فرکانس قدرت</li> <li>- آزمایش ولتاژ استقامت ضربه (صاعقه و کلیدزنی)</li> </ul>	کابلها

<p>- آزمایش اضافه ولتاژهای القایی - آزمایش تخلیه جزئی - آزمایش ولتاژ استقامت ضربه (صاعقه و کلیدزنی)</p>	<p>ترانسفورماتورها و ماشینهای دوار</p>
<p>- آزمایش فرکانس قدرت: الف- آزمایش جرقه خشک و مرطوب ب- ولتاژ استقامت خشک و مرطوب (یک دقیقه) - آزمایش ولتاژ ضربه (صاعقه و کلیدزنی): الف- آزمایش ولتاژ استقامت ضربه ب- آزمایش ولتاژ جرقه ضربه ج- آزمایش آلودگی</p>	<p>مقره‌های فشارقوی</p>
<p>- آزمایش ضریب تلفات عایقی - آزمایش تخلیه جزئی و تخلیه سطحی - آزمایش ولتاژ استقامت فرکانس قدرت مرطوب (یک دقیقه) - آزمایش تخلیه قابل مشاهده فرکانس قدرت - آزمایش ولتاژ ضربه: الف- آزمایش استقامت تمام موج ب- آزمایش استقامت موج بریده ج- آزمایش موج ضربه کلیدزنی</p>	<p>مقره‌های عبوری</p>
<p>- آزمایش استقامت ولتاژ ضربه (خشک) - آزمایش استقامت یک دقیقه فرکانس قدرت (خشک) - آزمایش استقامت یک دقیقه فرکانس قدرت (مرطوب)</p>	<p>کلیدها</p>

### ۱۰-۱۱ آزمایشهای رایج برای عایق تجهیزات

به طور کلی در میان انواع آزمایشهای عایقی مذکور، آزمایش استقامت دی الکتریک (HI-POT)<sup>۱</sup> و آزمایش مقاومت DC عایق رایجتر می‌باشند.

<sup>۱</sup>- High Potential

### ۱-۱۰-۱۱ استقامت دی الکتریک (HI-POT)

هدف از انجام آزمایش استقامت دی الکتریک یا HI-POT، تعیین استقامت عایقی عایق بین بخشهای فلزی تجهیزات (ترانسفورماتورها، کابلها،...) می باشد. در این آزمایش، یک ولتاژ بالاتر از ولتاژ نامی هادی، به هادیها و متعلقات تجهیز تحت تست اعمال می گردد و سپس میزان جریان ناشی جاری شده در عایق اندازه گیری می شود. در اینصورت اگر شکست الکتریکی اتفاق نیفتد و میزان جریان ناشی عبوری از عایق از مقدار معین کمتر باشد، عایق تجهیز دارای استقامت طبیعی خود می باشد ولی اگر جریان ناشی از مقدار مجاز بیشتر باشد، عایق دچار نقص بوده و باید اقدامات مناسب انجام شود. به عبارت دیگر، با انجام آزمایش HI-POT (اندازه گیری میزان جریان ناشی)، احتمال وقوع شکست دی الکتریک در عایق هادیهای تجهیزات مورد بررسی قرار می گیرد.

لازم به ذکر است که در حالت کلی، تقریباً همه عایقها (حتی در ولتاژهای کمتر از ولتاژ نامی) دارای جریان ناشی جزئی می باشند. این جریان ناشی می تواند ناشی از عواملی مانند ظرفیت خازنی عایق، مقاومت عایق، پدیده کرونا و اثرات الکتروشیمیایی باشد. اما اگر عایق مورد آزمایش، آسیب دیده یا زدگی داشته باشد، مقدار جریان ناشی آن بسیار زیاد خواهد بود. افزایش جریان ناشی می تواند منجر به تخریب کامل عایق شود. از اینرو آزمایش دی الکتریک یکی از مناسبترین روشهای تشخیص آسیب دیدگی عایق تجهیزات در مراحل مختلف ساخت، حمل، نصب و بهره برداری می باشد.

با توجه به مشخصات تجهیز، آزمایش دی الکتریک می تواند به دو صورت تحت اعمال ولتاژ AC یا DC انجام شود. در جدول (۱۱-۱۱) مزایا و معایب این دو روش بیان شده است.

جدول (۱۱-۱۱). مقایسه آزمایش دی الکتریک به روش AC و DC

مزایای آزمایش HI-POT با ولتاژ AC	مزایای آزمایش HI-POT با ولتاژ DC
<ul style="list-style-type: none"> <li>- به علت تغییر متناوب پلاریته شکل موج اعمالی، نیازی به افزایش آهسته ولتاژ نیست.</li> <li>- پس از اتمام آزمایش نیازی به تخلیه الکتریکی تجهیز تحت آزمایش نمی‌باشد.</li> <li>- این آزمایش در هر دو پلاریته مثبت و منفی می‌تواند به عایق اعمال گردد.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- قابلیت انجام با یک سطح جریان بسیار کوچک، مصرف توان کمتر و احتمال خطر کمتر برای کاربر.</li> <li>- دقت بیشتر در اندازه گیری جریان نشتی.</li> <li>- تنها روش قابل استفاده برای آزمایش برخی از تجهیزات و مدارات که در آنها از دیود، خازن و ... استفاده شده است.</li> </ul>

روش انجام آزمایشهای HI-POT طبق استاندارد IEC به صورت زیر می‌باشد:

#### الف - آزمایش DC:

توسط دستگاه HI-POT یک ولتاژ DC معادل چهار برابر ولتاژ نامی فاز، به مدت ۱۵ دقیقه به تجهیز اعمال می‌گردد. در صورت سلامت کابل یا تجهیز مورد آزمایش، میزان حداکثر جریان نشتی نباید از ۵ میلی آمپر بیشتر شود (مقدار موثر: ۳/۵ میلی آمپر). ولتاژ فوق را باید به تدریج و در بازه دو دقیقه اعمال نمود.

#### ب - آزمایش AC:

آزمایش HI-POT به روش AC، به دو صورت زیر انجام می‌گیرد:

۱- به مدت ۵ دقیقه ولتاژی معادل ولتاژ خط (فاز به فاز) بین یکی از هادی‌ها و سایر بخشهای فلزی یا هادیها اعمال می‌شود.

۲- ولتاژی برابر با ولتاژ نامی، به مدت ۲۴ ساعت و همانند شرایط بهره برداری به هادی اعمال می‌گردد.

### ۲-۱۰-۱۱ آزمایش اندازه گیری مقاومت عایقی یا آزمایش میگر

آزمایش مقاومت عایقی یا آزمایش میگر، برای تعیین مقاومت عایقی تجهیزات نسبت به زمین یا یکدیگر انجام می‌گیرد. مقاومت عایقی معمولاً برحسب مگا اهم اندازه گیری می‌شود. مقدار مقاومت عایقی با ولتاژ اعمالی تغییر می‌کند. از اینرو مقایسه هر اندازه گیری باید در همان ولتاژ انجام گیرد.

### ۱۱-۱۱ سؤال و تمرین

- ۱- انواع آزمایشهای عایقی تجهیزات فشار قوی را بیان نمائید.
- ۲- نحوه اجرای آزمایش اندازه گیری مقاومت عایقی و آزمایش HI-POT عایق تجهیزات را توضیح دهید.
- ۳- آزمایشهای کارخانه‌ای (FAT) و آزمایشهای محل نصب (SAT) برای یک تجهیز فشارقوی مثل ترانسفورماتور را بیان نمائید.

## مراجع

[۱] استاندارد وزارت نیرو- جلد ۲۳۳، "استاندارد طراحی بهینه پستهای ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت - معیارهای طراحی و مهندسی هماهنگی عایقی".

[۲] استاندارد وزارت نیرو - جلد ۲۱۳، "استاندارد طراحی بهینه پستهای ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت - معیارهای طراحی و مهندسی سیستم زمین".

[۳] نشریه شماره ۲-۴۴۵، "مشخصات فنی و عمومی اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال، سیستم حفاظت از صاعقه در خطوط هوایی انتقال نیرو".

[۴] نشریه شماره ۲-۴۲۶، "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - مقره های خطوط انتقال نیرو" - (جلد دوم).

[۵] نشریه شماره ۲-۴۲۹، "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - مقره های پست های فشار قوی"، جلد دوم.

[۶] نشریه شماره ۴۸۵، "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه در پست های فشار قوی".

[۷] نشریه شماره ۳۰۱، "مشخصات فنی، عمومی و اجرائی سیستم حفاظت از صاعقه در خطوط هوایی انتقال نیرو - حفاظت خطوط انتقال انرژی در برابر اصابت صاعقه"، جلد دوم.

[۸] نشریه شماره ۴۳۵، "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - هماهنگی عایقی در پست های فشار قوی".

[۹] نشریه شماره ۲-۵۰۱، "مشخصات فنی، عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال - برقگیرها در پست های فشار قوی"، جلد دوم.

[۱۰] IEC 60071-1: Insulation Co-Ordination, Definitions, Principles And Rules.

[۱۱] IEC 60071-2: Insulation Co-Ordination, Application Guide.

[۱۲] IEC-TR 60071-4: Computational Guide to Insulation. Coordination and Modeling of Electrical Networks.

[۱۳] IEC 60038: IEC Standard Voltages.

[۱۴] IEC 60909-4: Surge arresters -Part 4: Metal-Oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems.

[۱۵] IEC 60099-5: Surge Arresters - Part 5: Selection And Application Recommendations.

[۱۶] IEC-TS 60815-1: Selection And Dimensioning Of High-Voltage Insulators Intended For Use In Polluted Conditions - Part 1: Definitions, Information And General Principles.

[۱۷] IEC 62271-100: High Voltage Switchgear and Control-gear-Part 100: High Voltage Alternating Current Circuit Breakers.



- [١٨] IEC 60056: High Voltage Alternating Current Circuit Breakers.
- [١٩] IEEE C37.011: IEEE Guide for the Application Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers.
- [٢٠] IEEE 32: IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices.
- [٢١] IEEE 80: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [٢٢] IEEE 142: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
- [٢٣] IEEE 1313.1: IEEE Standard For Insulation Coordination-Definitions, Principles And Rules.
- [٢٤] IEEE 1313.2: IEEE Standard For The Application Of Insulation Coordination.
- [٢٥] IEC 60060-1: High Voltage Test Techniques.
- [٢٦] IEEE 998: IEEE Guide For Insulation Direct Lightning Stroke Shielding Of Substations.
- [٢٧] IEEE C.62.22: IEEE Guide For The Application Of Metal-Oxide Surge Arresters For Alternating-Current Systems.
- [٢٨] IEC 62305-1: Protection Against Lightning, Part-1: General Principles.
- [٢٩] NFC17-102: Protection of Structures & Open Areas against Lightning.
- [٣٠] IEC 60694: Common Specifications For High Voltage Switchgear And Control-gear Standards.
- [٣١] IEC 60383-1: Insulators For Overhead Lines With A Nominal Voltage Above 1000 V, Ceramic Or Glass Insulator Units For AC Systems, Definitions, Test Methods And Acceptance Criteria.
- [٣٢] IEC 60173: Insulated Bushings For Alternative Voltages Above 1000 V.
- [٣٣] IEC 60076-3: Power Transformer- Insulation Levels, Dielectric Tests And External Clearances In Air.
- [٣٤] IEC 60502-1: Power cables With Extruded Insulation And Their Accessories For Rated Voltages For 1 kV ( $U_m=1.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV)- Cables for rated voltages of 1 kV ( $U_m=1.2$  kV) and 3 kV ( $U_m=3.6$  kV).
- [٣٥] IEC 60502-2: Power Cables With Extruded Insulation And Their Accessories For Rated Voltages For 1 kV ( $U_m=1.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV)- Cables for rated voltages of 6 kV ( $U_m=7.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m=36$  kV).
- [٣٦] CIGRE W.G. 13-02: Switching Overvoltages in EHV and UHV Systems With Special Reference To Closing And Reclosing Transmission Lines. Electra 30 (1973).
- [٣٧] CIGRE WG 33.02: Phase-to-phase Insulation Co-ordination: Part 1: Switching Overvoltages In Three-Phase Systems. Electra 64 (1979).
- [٣٨] CIGRE WG 33.03: Phase-to-phase Insulation Co-ordination: Part 2: Switching Impulse Strength Of Phase-To-Phase External Insulation. Electra 64 (1979).

- [٣٩] CIGRE WG 33.06: Phase-to-phase Insulation Co-ordination: Part 3: Design And Testing Of Phase-To-Phase Insulation. Electra 64 (1979).
- [٤٠] CIGRE TF 33-03.03: Phase-To-Phase Insulation Co-Ordination: Part 4: The Influence Of Non-Standard Conditions On The Switching Impulse Strength Of Phase-To-Phase Insulation. Electra 64 (1979).
- [٤١] CIGRE WG 33.01: Guide To Procedures For Estimating The Lightning Performance Of Transmission Lines. CIGRE Technical Brochure No. 63 (1991).
- [٤٢] CIGRE WG 33-07: Guidelines For The Evaluation Of The Dielectric Strength Of External Insulation. CIGRE Technical Brochure No. 72 (1992).
- [٤٣] Juan A. Martinez-Velasco; "Power System Transients – Parameter Determination"; Taylor & Francis Group; 2010.
- [٤٤] J. C. Das; "Transients in electrical systems"; Mc Graw Hill; 2010.
- [٤٥] A. R. Hileman; "Insulation Coordination for Power Systems"; Marcel Dekker, Inc., New York, 1999.
- [٤٦] Allen Greenwood, "Electrical Transients In Power Systems", John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 1991.
- [٤٧] H. Peterson, "Transients in Power System", Dover publications, New York.
- [٤٨] Bewley, L.W., "Traveling Waves And Transmission Systems", Dover publications, New York
- [٤٩] Merlin Gerin, "Cahier Technique" Publications: n° 151: "Overvoltages and Insulation Coordination in MV and HV".
- [٥٠] Gallagher, P.J. and Pearmain, A.J., "High Voltage Measurement, Testing and Design", John Wiley and Sons, New York, 2001.
- [٥١] Electric Power Research Institute (EPRI), "Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above", 2nd Edition, 1982.
- [٥٢] Berger. K, R.B. Anderson and H. Kroeninger; "Parameters of lightning flashes", Electra, vol 41, pp. 23-37, 1975.
- [٥٣] R.B. Anderson, A.J. Eriksson "lightning parameters for engineering application", Electra, vol 69, pp. 65-102, 1980.
- [٥٤] IEEE Working Group On Lightning Performance Of Transmission Lines, "A Simplified Method For Estimating The Lightning Performance Of Transmission Lines", IEEE Trans. on PA&S, Apr. 1985, pp. 919-932.
- [٥٥] S. Rusck, "Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low-Voltage Net-Works," Trans. Roy. Inst. Technol. (KTH), no. 120, 1958.

- [٥٦] L.M. Zhou and S.A. Boggs, "Effect of Shielded Distribution Cables on Lightning Induced Overvoltages in A Distribution System", IEEE Trans on Power Delivery, Vol. 17, No. 2, April 2002, p.p. 569-574.
- [٥٧] M. De Nogriss, D. Perin, and A. Pigini, "Design of External Insulation for AC Systems under Polluted Conditions," CESI Technical Brochure, 1992.
- [٥٨] I. Kimoto, K. Kito, and T. Takatori, "Anti-Pollution Design Criteria for Line and Station Insulators," IEEE Trans. on PA&& 1972, pp. 317-327.
- [٥٩] A. Ametani et al., "Frequency-Dependent Impedance of Vertical Conductors and A Multi-Conductor Tower Model," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 141, no. 4, pp. 339-345, July 1994.
- [٦٠] Y. Baba and M. Ishii, "Numerical Electromagnetic Field Analysis On Lightning Surge Response Of Tower With Shield Wire," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 3, pp. 1010-1015, July 2000.
- [٦١] L. Grcev and F. Dawalibi, "An Electromagnetic Model For Transients In Grounding Systems," IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 4, pp. 1773-1781, Oct. 1990.
- [٦٢] IEEE Working Group 3.4.11. "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No 1, pp. 302-309, 1992.
- [٦٣] P. Pinceti, M. Giannettoni, "A Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters", IEEE Trans. On Power Delivery, vol.14, No 2, 1999, pp. 393-398.
- [٦٤] F. Fernandez, R. Diaz, "Metal Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations", The International Conference on Power System Transients IPAT'01, Rio De Janeiro, Brazil, Paper 14, 20-24 June 2001.