جمهوری اسلامی ایران

مشخصات فنی عمومی و اجرایی
پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال
هماهنگی عایقی در پست های فشار قوی

نشریه شماره۴۵۳

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور
معاونت نظارت راهبردی
دفتر نظام فنی اجرایی
http://tec.mporg.ir

وزارت نیرو – شرکت توانیر
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق
www.tavanir.ir

جمهوری اسلامی ایران

مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال هماهنگی عایقی درپست های فشارقوی

نشریه شماره ۴۵۳

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور
معاونت نظارت راهبردی
دفتر نظام فنی اجرایی
http://tec.mporg.ir

وزارت نیرو – شرکت توانیر
طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی صنعت برق
www.tavanir.ir

بسمه تعالی

ریاست جمهوری
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	**شماره:** ۱۰۰/۹۳۷۳
	تاریخ: ۱۳۸۸/۲/۷

موضوع:
مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال- هماهنگی عایقی در پست‌های فشار قوی

به استناد آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی، موضوع ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/٤/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۴۵۳ دفتر نظام فنی اجرایی، با عنوان «**مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست‌ها، خطوط فوق توزیع و انتقال- هماهنگی عایقی در پست‌های فشار قوی**» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور، پیمانکاران و عوامل دیگر می‌توانند از این نشریه به عنوان راهنما استفاده کنند و در صورتی که روش‌ها، دستورالعمل‌ها و راهنمای بهتری در اختیار داشته باشند، رعایت مفاد این بخشنامه الزامی نیست.

عوامل یاد شده باید نسخه‌ای از دستورالعمل‌ها، روش‌ها یا راهنماهای جایگزین را به دفتر نظام فنی اجرایی ارسال کنند.

امیرمنصور برقعی
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

586064

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور با استفاده از نظر کارشناسان برجسته، مبادرت به تهیه این دستورالعمل نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این رو، ***از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی، مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:***

۱- شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.

۲- ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.

۳- در صورت امکان، متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.

۴- نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.

کارشناسان این دفتر نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه: تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علی شاه
معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، دفتر نظام فنی اجرایی

سازمان مرکزی- تهران ۱۱۴۹۹۴۳۱۴۱- خیابان صفی علی شاه
http://tec.mporg.ir

بسمه تعالی

پیشگفتار

در اجرای ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور و بـه منظـور تعمـیم اسـتانداردهای صنعت برق و ایجاد هماهنگی و یکنواختی در طراحی و اجرای پروژه‌های مربوط به تولید، انتقـال و توزیـع نیـروی بـرق، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور (معاونت نظارت راهبردی – دفتر نظـام فنـی اجرائـی) بـا همکـاری وزارت نیرو – شرکت توانیر(دفتر استانداردهای فنی، مهندسی، اجتماعی و زیسـت محیطـی) در قالـب طـرح «ضـوابط و معیارهای فنی صنعت برق» اقدام به تهیه مجموعه کاملی از استانداردهای مورد لزوم نموده است.

نشریه حاضر با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها ، خطوط فوق توزیع و انتقال – همـاهنگی عـایقی در پست ها ی فشار قوی» در بر گیرنده مباحث مربوط به هماهنگی عایقی شامل کلیات و تعاریف، معیارهـای طراحـی و مهندسی برای حصول به هماهنگی عایقی مطلوب، الزامات استاندارد و محاسبات عایقی کلیه تجهیزات پست های فشـار قوی می باشد.

معاونت نظارت راهبردی به این وسیله از کوشش‌های دست‌اندرکاران به ثمر رسیدن این نشریه و همچنین سازمان‌هـا و شرکت‌های مهندسی مشاور که با اظهارنظرهای سازنده خود این معاونت را در جهت غنا بخشیدن به آن یاری نموده‌اند سپاسگزاری و قدردانی نموده و توفیق روزافزون آنان را از درگاه ایزد یکتا آرزومند است.

معاون نظارت راهبردی

۱۳۸۸

مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فـوق توزیـع و انتقـال - همـاهنگی عایقی در پست های فشار قوی - نشریه شماره ۴۵۳

تهیه کننده

این مجموعه به وسیله شرکت مهندسین مشاور نیرو با همکاری آقایان مهندسین شهرام کاظمی، یزدان اعرابیان و آقای دکتر عارف درودی تهیه و تدوین شده است و توسط آقای اسماعیل زارعی مورد ویراستاری قرار گرفته است.

کمیته فنی

این نشریه همچنین در کمیته فنی طرح با مشارکت مجری و مشاور طرح و نمایندگان شرکت‌های مهندسی مشاور تحت پوشش وزارت نیرو به شرح زیر بررسی، اصلاح و تصویب شده است.

آقای مهندس جمال بیاتی	وزارت نیرو – سازمان توانیر – مجری طرح
آقای مهندس بهمن الله مرادی	سازمان توسعه برق ایران
آقای دکتر عارف درودی	مهندسین مشاور نیرو
آقای مهندس حامد نفیسی	مهندسین مشاور نیرو
آقای مهندس سید حسن عرب اف	مهندسین مشاور قدس نیرو
آقای مهندس بهروز قهرمانی	سازمان توسعه برق ایران
آقای مهندس سید جمال الدین واسعی	پژوهشگاه نیرو
آقای مهندس امیر رضا یزدان دوست	مهندسین مشاور قدس نیرو
آقای مهندس مرتضی یعقوبی شریف	شرکت مشانیر
آقای مهندس احسان الله زمانی	وزارت نیرو – سازمان توانیر – دبیر کمیته فنی طرح

مسـوولیت کنتـرل و بررسـی نشـریه در راسـتای اهـداف دفترنظـام فنـی اجرائـی بـه عهـده آقایـان مهندسـین پرویز سیداحمدی و محمدرضا طلاکوب بوده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول ـ اهداف، کلیات و تعاریف

۱-۱- کلیات ۳

۱-۲- تعاریف ۷

۱-۲-۱- هماهنگی عایقی ۷

۱-۲-۲- عایق خارجی ۸

۱-۲-۳- عایق داخلی ۸

۱-۲-۴- عایق بازگشت‌پذیر ۸

۱-۲-۵- عایق بازگشت‌ناپذیر ۸

۱-۲-۶- ترمینال آرایش عایقی ۸

۱-۲-۷- آرایش عایقی ۹

۱-۲-۸- ولتاژ نامی یک سیستم ۹

۱-۲-۹- حداکثر ولتاژ یک سیستم ۱۰

۱-۲-۱۰- حداکثر ولتاژ برای تجهیز ۱۰

۱-۲-۱۱- سیستم با نوترال ایزوله ۱۰

۱-۲-۱۲- سیستم با نوترال مستقیماً زمین شده ۱۰

۱-۲-۱۳- سیستم با نوترال زمین شده از طریق امپدانس ۱۰

۱-۲-۱۴- سیستم با نوترال زمین شده به صورت تشدیدی ۱۰

۱-۲-۱۵- ضریب خطای زمین ۱۰

۱-۲-۱۶- اضافه ولتاژ ۱۱

۱-۲-۱۷- دسته‌بندی ولتاژها و اضافه ولتاژها ۱۱

۱-۲-۱۸- زمان پیشانی موج ۱۲

۱-۲-۱۹- زمان پشت موج ۱۲

۱-۲-۲۰- شکل موج‌های ولتاژ استاندارد ۱۲

۱-۲-۲۱- اضافه ولتاژهای معرف ۱۳

۱-۲-۲۲- وسیله محدودکننده اضافه ولتاژ ۱۳

۱-۲-۲۳- سطح حفاظتی در برابر موج ضربه صاعقه (یا کلیدزنی) ۱۳

۱-۲-۲۴- معیار عملکرد ۱۴
۱-۲-۲۵- ولتاژ تحمل ۱۴
۱-۲-۲۶- ولتاژ تحمل هماهنگی ۱۴
۱-۲-۲۷- ضریب هماهنگی ۱۴
۱-۲-۲۸- شرایط جوی مبنای استاندارد ۱۵
۱-۲-۲۹- ولتاژ تحمل مورد نیاز ۱۵
۱-۲-۳۰- ضریب اصلاح شرایط جوی ۱۵
۱-۲-۳۱- ضریب ایمنی ۱۵
۱-۲-۳۲- ولتاژ تحمل استاندارد ۱۵
۱-۲-۳۳- ضریب تبدیل آزمون ۱۶
۱-۲-۳۴- سطح عایقی نامی ۱۶
۱-۲-۳۵- سطح عایقی استاندارد ۱۶
۱-۲-۳۶- آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد ۱۶
۱-۳- مراحل حصول به هماهنگی عایقی ۱۹
۱-۳-۱- کلیات ۱۹
۱-۳-۲- تعیین اضافه ولتاژهای معرف ۱۹
۱-۳-۳- تعیین ولتاژهای تحمل هماهنگی ۲۰
۱-۳-۴- تعیین ولتاژهای تحمل مورد نیاز ۲۰
۱-۳-۵- انتخاب سطح عایقی نامی ۲۱
۱-۳-۶- لیست ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت ۲۲
۱-۳-۷- لیست ولتاژهای تحمل موج ضربه استاندارد ۲۲
۱-۳-۸- رده‌بندی جهت حداکثر ولتاژ برای تجهیز ۲۲
۱-۳-۹- انتخاب سطوح عایقی استاندارد ۲۲
۱-۴- الزامات آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد ۲۶
۱-۴-۱- الزامات عمومی ۲۶
۱-۴-۲- آزمونهای ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت استاندارد ۲۶
۱-۴-۳- آزمونهای ولتاژ تحمل موج ضربه استاندارد ۲۷
۱-۴-۴- وضعیت آزمونی جایگزین ۲۸
۱-۴-۵- آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد عایق فاز به فاز و طولی برای تجهیزات در رده I ۲۸
۱-۴-۶- آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد عایق فاز به فاز و طولی برای تجهیزات در رده II ۲۹

فصل دوم ـ دستورالعمل‌های کاربردی جهت حصول به رویه هماهنگی عایقی

۲-۱- کلیات ۳۳
۲-۲- تنش‌های ولتاژی معرف شرایط سرویس واقعی ۳۳
۲-۲-۱- منشاء و دسته‌بندی تنش‌های ولتاژی ۳۳
۲-۲-۲- مشخصه‌های وسایل محدودکننده اضافه ولتاژ ۳۴
۲-۲-۲-۱- کلیات ۳۴
۲-۲-۲-۲- برقگیرهای نوع مقاومت غیرخطی با فواصل هوائی سری ۳۵
۲-۲-۲-۳- برقگیرهای اکسید فلز بدون فواصل هوایی ۳۵
۲-۲-۳- ولتاژها و اضافه ولتاژهای معرف ۳۶
۲-۲-۳-۱- ولتاژهای فرکانس قدرت دائمی ۳۶
۲-۲-۳-۲- اضافه ولتاژهای موقت ۳۶
۲-۲-۳-۳- اضافه ولتاژهای با شیب کند ۴۱
۲-۲-۳-۴- اضافه ولتاژهای با شیب تند ۵۰
۲-۲-۳-۵- اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند ۵۶
۲-۳- ولتاژ تحمل هماهنگی ۵۷
۲-۳-۱- مشخصه‌های تحمل عایقی ۵۷
۲-۳-۱-۱- تأثیر پلاریته و شکل موج‌های اضافه ولتاژ ۵۸
۲-۳-۱-۲- عایق فاز به فاز و طولی ۵۹
۲-۳-۱-۳- تأثیر شرایط جوی بر روی عایق خارجی ۶۰
۲-۳-۱-۴- احتمال تخلیه مخرب عایق ۶۰
۲-۳-۲- معیار عملکرد ۶۳
۲-۳-۳- رویه‌های هماهنگی عایقی ۶۳
۲-۳-۳-۱- رویه‌های هماهنگی عایقی برای ولتاژ و اضافه ولتاژ موقت فرکانس قدرت ۶۴
۲-۳-۳-۲- رویه‌های هماهنگی عایقی برای اضافه ولتاژهای با شیب کند ۶۵
۲-۳-۳-۳- رویه‌های هماهنگی عایقی برای اضافه ولتاژهای با شیب تند ۶۹
۲-۴- ولتاژ تحمل موردنیاز ۷۰
۲-۴-۱- کلیات ۷۰
۲-۴-۲- اصلاح شرایط جوی ۷۰
۲-۴-۲-۱- کلیات ۷۰
۲-۴-۲-۲- تصحیح ارتفاع ۷۱
۲-۴-۳- ضرایب ایمنی ۷۲
۲-۴-۳-۱- پیری ۷۳

۲-۴-۳-۲- پراکندگی تولید و مونتاژ ۷۳
۲-۴-۳-۳- عدم قطعیت در مورد ولتاژ تحمل ۷۳
۲-۴-۳-۴- ضرایب ایمنی پیشنهادی ۷۳
۲-۵- ولتاژ تحمل استاندارد ۷۴
۲-۵-۱- کلیات ۷۴
۲-۵-۱-۱- ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد ۷۴
۲-۵-۱-۲- ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد ۷۴
۲-۵-۲- ضرایب تبدیل آزمون ۷۵
۲-۵-۲-۱- رده ولتاژی I ۷۵
۲-۵-۲-۲- رده ولتاژی II ۷۶
۲-۶- فواصل هوایی در پست‌های فشار قوی ۷۷
۲-۷- نمونه‌ای از رویه هماهنگی عایقی در پست فشار قوی ۸۰
۲-۷-۱- مرحله اول: تعیین مقادیر اضافه ولتاژهای معرف ۸۲
۲-۷-۱-۱- ولتاژ فرکانس قدرت ۸۲
۲-۷-۱-۲- اضافه ولتاژهای موقت ۸۲
۲-۷-۱-۳- اضافه ولتاژهای با شیب کند ۸۳
۲-۷-۱-۴- اضافه ولتاژهای با شیب تند ۸۴
۲-۷-۲- مرحله دوم: تعیین مقادیر ولتاژهای تحمل هماهنگی ۸۴
۲-۷-۲-۱- اضافه ولتاژهای موقت ۸۴
۲-۷-۲-۲- اضافه ولتاژهای با شیب کند ۸۵
۲-۷-۲-۳- اضافه ولتاژهای با شیب تند ۸۶
۲-۷-۳- مرحله سوم: تعیین مقادیر ولتاژهای تحمل مورد نیاز ۸۶
۲-۷-۳-۱- ضریب ایمنی ۸۷
۲-۷-۳-۲- ضریب تصحیح شرایط جوی ۸۷
۲-۷-۳-۳- ولتاژهای تحمل مورد نیاز ۸۷
۲-۷-۴- مرحله چهارم: تبدیل به ولتاژهای تحمل نرمالیزه شده برای رده ولتاژی I ۹۰
۲-۷-۴-۱- تبدیل به ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت ۸۸
۲-۷-۴-۲- تبدیل به ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه ۸۹
۲-۷-۵- انتخاب مقادیر ولتاژ تحمل استاندارد ۸۹
پیوست (۲-۱): اضافه ولتاژهای انتقالی در ترانسفورماتورها ۹۶

منابع و مراجع ۱۰۳

فصل ۱

اهداف، کلیات و تعاریف

هدف از این فصل آشنایی با اصول و مبانی هماهنگی عایقی در پست‌های فشار قوی می‌باشد. ارائه کلیات و تعاریف مربوطه، رویه هماهنگی عایقی مطابق با استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ و برخی نیازمندیها برای انجام آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد از جمله مباحثی هستندکه در این فصل از گزارش ارائه شده‌اند.

۱-۱- کلیات

فراهم نمودن انرژی الکتریکی بهینه و مطمئن برای مشترکین، اولین و اساسی‌ترین هدف هر شرکت برق می‌باشد. از این رو در تمامی حوزه‌ها از تولید و انتقال تا توزیع و مصرف و در کلیه مراحل از برنامه‌ریزی و طراحی تا بهره‌برداری و نگهداری، انرژی الکتریکی می‌بایستی با دو اصل حداکثر قابلیت اطمینان و حداقل هزینه همراه باشد. در بیشتر موارد نه تنها دو جنبه فوق با یکدیگر هماهنگ و سازگار نیستند، بلکه در جهات مخالف هم حرکت می‌کنند. به این معنی که افزایش قابلیت اطمینان یک سیستم الکتریکی مستلزم صرف هزینه‌های بیشتری خواهد بود. تأمین مشخصه‌های ایده‌آل برای سیستم بگونه‌ای که تحت هر شرایطی با هیچگونه قطعی روبرو نباشیم، نه تنها قابل امکان، بلکه منطقی نیز نمی‌باشد. زیرا خطرات و خسارات ناشی از قطع برق در هر سیستم منجر به هزینه‌هایی می‌شود که می‌تواند با هزینه‌های مربوط به تأسیس و راهبری آن مقایسه شده و لذا می‌توان با حصول نوعی سازش میان عملکرد سیستم و هزینه‌های مربوطه، به طرح بهینه‌ای از سیستم دست یافت.

در عمل فرآیند سازش میان جنبه‌های فنی و اقتصادی سیستم‌های الکتریکی به کمک اصول و شاخص‌های قابلیت اطمینان انجام می‌گیرد. براساس اصول قابلیت اطمینان سیستم‌های الکتریکی، ارزیابی و برآورد مشخصه‌هایی از سیستم نظیر استمرار تغذیه[1] یا تداوم بار، وقفه[2] و برقراری مجدد تغذیه[3] به کمک شاخص‌هایی همچون تعداد خروج‌ها[4] و مدت زمان استمرار خروج‌ها[5] انجام می‌گیرد. این مشخصه‌ها به عوامل مختلفی نظیر ذخیره پیش‌بینی شده برای تأمین بار موردانتظار، امکانات گوناگون در نظر گرفته شده برای تغذیه بارها، احتمال وقوع خرابی و خطا در تجهیزات و نهایتاً امکانات تدارک دیده شده جهت تعمیرات و مدت زمان تعمیرات بستگی دارد. به عنوان مثال در پست‌های با عایق گاز[6] (GIS) اگر چه که احتمال بروز مشکلات عایقی ناچیز است، اما زمان تعمیر عیوب عایقی در این قبیل پست‌ها به مراتب بیشتر از مدت زمان مورد نیاز جهت تعمیر عیوب مشابه در پست‌های با عایق هوا[7] می‌باشد. لذا برای دستیابی به یک طراحی بهینه عموماً شاخص‌های قابلیت اطمینان مورد نظر جهت طراحی پست‌های با عایق گاز به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که احتمال وقوع خطا[8] در این قبیل پست‌ها در مقایسه با احتمال وقوع خطا در پست‌های با عایق هوا بسیار کوچکتر باشد.

1. Service continuity
2. Interruption
3. Service restoration
4. Frequency of outages
5. Duration of outages
6. Gas insulated substations
7. Air insulated substations
8. Risk of failure

پدیده شکست عایقی از متداولترین انواع خطاهایی است که باعث اختلال در کار عادی سیستم گردیده و به این ترتیب قابلیت اطمینان پست‌های فشار قوی را در رابطه با تعداد و مدت زمان قطعی‌ها تحت تأثیر قرار می‌دهند. اگر فقط ولتاژهای عادی بهره‌برداری[1] در سیستم وجود می‌داشتند، شاید با طراحی مناسب سیستم عایقی امکان حذف خطاهایی از این دست فراهم می‌گردید. ولی در عمل سیستم عایقی علاوه بر ولتاژهای عادی بهره‌برداری، مورد تهدید دسته دیگری از تنشهای ولتاژی[2] قرار می‌گیرند که اضافه ولتاژ نامیده می‌شوند.

همانطوریکه قبلاً نیز اشاره گردید، بدلایل فنی و اقتصادی نمی‌توان آنچنان سیستم عایقی بوجود آورد که در برابر کلیه این اضافه ولتاژها از استقامت عایقی کافی برخوردار باشد. لذا ناچار از دستیابی به نوعی سازش میان خسارات ناشی از قطع برق و اضافه هزینه‌های ناشی از افزایش استقامت عایقی تجهیزات هستیم. اگر چه که بیان اخیر به نظر ساده و روان می‌رسد، ولی در عمل بدلیل مشکلات عدیده‌ای که نمونه‌ای از آنها در زیر ذکر می‌شود، به یکی از مشکل‌ترین مسائل صنعت برق تبدیل شده است:

- اضافه ولتاژها محدود به چند نوع نبوده و از تنوع و طیف گسترده‌ای برخوردارند و این مسئله کار طبقه‌بندی و مطالعه آنها را دشوار می‌سازد. اضافه ولتاژها معمولاً با مشخصه‌هایی از قبیل علت، شکل موج، دامنه، مدت زمان استمرار، فرکانس، پلاریته، ماهیت آماری، لحظه ظهور در مقایسه با سایر ولتاژها و غیره مطالعه، طبقه‌بندی و توصیف می‌گردند.
- در یک سیستم الکتریکی تنوع زیادی در عایقهای بکار گرفته شده دیده می‌شود. این طیف شامل عایقهای جامد نظیر چینی، مواد ترکیبی، کاغذ و چوب، عایقهای مایع نظیر انواع روغنهای عایقی و عایقهای گاز نظیر هوا و گاز SF_6 می‌باشد. در اغلب تجهیزات بجای یک عایق از یک سیستم عایقی استفاده می‌کنند و این مسئله موجب پیچیده شدن مطالعه، تحقیق و آزمایش روی مشخصه‌های عایقی تجهیزات خواهد شد. علاوه بر این، هر یک از انواع سیستم‌های عایقی واکنشهای متفاوتی نسبت به هر یک از مشخصه‌های اضافه ولتاژها از خود نشان می‌دهند. به عنوان مثال سیستم‌های عایقی که از روغن بعنوان عایق استفاده می‌کنند (نظیر ترانسفورماتورهای قدرت و اندازه‌گیری روغنی و یا کابلهای روغنی) در مقایسه با سیستم‌های عایقی خشک (نظیر موتورها، ژنراتورها و کابلهای دارای سیستم عایقی خشک) استقامت عایقی بیشتری در برابر اضافه ولتاژها با شیب تند از خود نشان می‌دهند. چنین اضافه ولتاژهایی ممکن است در اثر وارد عمل شدن جرقه گیرها[3] روی شبکه ظاهر شوند که اصطلاحاً به آنها عنوان موج بریده[4] اطلاق می‌گردد. به عنوان مثال دوم می‌توان از فواصل هوایی[5] که به وفور در سیستم‌های قدرت کاربرد می‌یابند و برای ایمنی تجهیزات و افراد می‌بایستی رعایت گردند، نام برد. استقامت عایقی فواصل هوایی در برابر نوع ویژه‌ای از اضافه ولتاژها به نام اضافه ولتاژهای کلیدزنی[6] با افزایش فاصله الکترودها بصورت غیرخطی افزایش می‌یابد. علاوه بر این استقامت

1. Normal operation voltages
2. Voltage stresses
3. Spark gaps
4. Chopped wave
5. Air clearance
6. Switching over voltages

عایقی هوا در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا با پلاریته مثبت کمتر است. به عنوان یک نمونه دیگر از این مسائل، می‌توان به عایقهای بازگشت‌پذیر[1] و عایقهای بازگشت‌ناپذیر[2] اشاره نمود.

- فرآیند شکست عایقی [3] اساساً یک پدیده احتمالی است. فرآیند مذکور مستلزم ظهور اضافه‌ولتاژی در سیستم و عدم استقامت عایق یا سیستم عایقی در مواجهه با آن است. هر یک از دو پدیده، ظهور اضافه ولتاژ در سیستم و نیز عدم استقامت عایق یا سیستم عایقی دارای ماهیت احتمالی بوده و در عمل توسط روابط یا منحنی‌های ریاضی توصیف می‌گردند. به همین دلیل است که با فرض ثابت بودن تمام مشخصات یک اضافه ولتاژ، حداکثر با یک احتمال معین می‌توان اظهار عقیده نمود که آیا پدیده شکست در عایق یا سیستم عایقی به وقوع می‌پیوندد یا نه.
- شکل میدان الکتریکی یکی دیگر از عوامل موثر در پدیده شکست عایقی است که معمولاً توسط آرایش الکترودی (شکل و فاصله الکترودها) توصیف می‌گردد. اثر این عامل با مدلسازی آرایشهای الکترودی متنوعی که در یک سیستم الکتریکی وجود دارند و محدودکردن آنها به چند گروه در نظر گرفته می‌شود. هر چه توزیع میدان الکتریکی، که تابعی از آرایش الکترودی است، ناهمگون‌تر گردد استقامت عایقها نیز کاهش می‌یابد.
- شرایط محیطی[4] نظیر شرایط آب و هوایی مانند درجه حرارت هوا، رطوبت، باران، مه، شبنم و فشار هوا و شرایط محلی مانند ارتفاع از سطح دریا و آلودگی از عوامل مؤثر بر استقامت الکتریکی بخش خارجی عایق‌ها یا سیستم‌های عایقی بوده و از همه مهمتر این شرایط برای یک محل مشخص تابع زمان می‌باشند. این مشکل، ارزیابی و برآورد شرایط آب و هوایی منطقه در یک دوره دراز مدت معقول و جستجوی شرایط نامناسب در میان آنها را برای طراحی بخش خارجی سیستم‌های عایقی ضروری می‌سازد. بدیهی است که این شرایط محیطی بر روی بخش داخلی عایق‌ها یا سیستم‌های عایقی بی‌تاثیر یا دارای تاثیر ناچیز است.
- پدیده پیری در عایقها[5] پدیده‌ای است که طی آن یک عایق یا سیستم عایقی به مرور زمان و بر اثر تحمل انواع تنشهای الکتریکی، مکانیکی و حرارتی فرسوده شده و استقامت عایقی اولیه خود را بتدریج و به مرور زمان از دست می‌دهد. فرآیند وقوع این پدیده بسیار پیچیده بوده و در حال حاضر مورد مطالعه کمیته‌های تحقیقاتی مختلف است. بدیهی است که در یک طراحی عایقی خوب و مطمئن، پدیده فوق‌الذکر باید مدنظر قرار گیرد.

موارد فوق بخشی از مشکلات عدیده‌ای است که در هنگام انتخاب سطوح استقامت عایقی تجهیزات مختلف یک پست فشارقوی وجود دارد. بر این اساس مطالعات مربوط به انتخاب سطوح استقامت عایقی تجهیزات مختلف یک پست فشار قوی، به منظور دست‌یابی به درجه اطمینان قابل قبولی از تعداد و مدت قطعی‌ها در اثر شکست عایقی و از طرف دیگر صرف هزینه معقول جهت نیل به این هدف (طرح بهینه)، در سه مرحله به شرح ذیل دنبال می‌گردد:

1. Self restoring insulations
2. Non – self restoration insulations
3. Insulation breakdown
4. Environmental conditions
5. Insulation ageing

مرحله اول: کاهش احتمال و شدت بروز اضافه ولتاژها در سیستم

با طراحی مناسب سیستم حفاظت از صاعقه خطوط انتقال نیرو (سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه و شبکه زمین برجها) می‌توان احتمال و شدت بروز اضافه ولتاژهایی که بواسطه صاعقه بوجود می‌آیند را کاهش داد. یک سیستم حفاظت از برخورد مستقیم صاعقه مناسب به میزان قابل توجهی احتمال برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز خطوط انتقال نیرو را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر با طراحی مناسب شبکه زمین برجهای خطوط انتقال نیرو می‌توان احتمال وقوع پدیده قوس برگشتی[1] را در صورت برخورد صاعقه به سیم‌های زمین یا برجهای خطوط انتقال نیرو کاهش داد.

استفاده از تجهیزاتی نظیر مقاومت‌های پیش وصل در کلیدها[2]، کلیدزنی سنکرون و استفاده از کلیدهای فاقد قوس مجدد[3] می‌تواند شدت اضافه ولتاژهای کلیدزنی را به نحو چشم‌گیری کاهش داد.

همچنین با طراحی مناسب سیستم قدرت (سیستم زمین، سیستم کنترل تحریک ژنراتورها، سیستم‌های حفاظتی، استفاده از راکتورهای موازی و غیره) می‌توان دامنه و مدت زمان وقوع اضافه ولتاژهای موقت[4] را در سیستم به حداقل رساند.

مرحله دوم: کنترل اضافه ولتاژهای ظاهرشده در سیستم

به کمک وسایل حفاظت کننده‌ای همچون برقگیرها[5] و جرقه‌گیرها[6] (به عنوان پشتیبان) می‌توان اضافه ولتاژهایی را که اجباراً در سیستم ظاهر می‌شوند را تا یک حد قابل پیش‌بینی محدود کرد. این حد توسط سطوح حفاظتی[7] وسایل حفاظت‌کننده مشخص می‌شود.

مرحله سوم: تعیین استقامت عایقی تجهیزات

پس از مشخص شدن سطوح حفاظتی وسایل حفاظت‌کننده می‌توان با در نظر گرفتن یک حاشیه ایمنی[8]، استقامت عایقی تجهیزات را برای هر دسته از اضافه ولتاژها بدست آورد. تحت چنین شرایطی فرض می‌شود که تجهیزات از استقامت قابل قبولی در برابر ولتاژها برخوردار هستند. در این انتخاب مواردی همچون عدم قطعیت‌های اجتناب‌ناپذیر در پیش‌بینی اضافه ولتاژها و همچنین استقامت عایقی تجهیزات و اثرات نامطلوب فاصله میان وسیله حفاظت‌کننده و موضع تحت حفاظت (انعکاس امواج سیار و افت ولتاژ در هادی‌های برقگیر) نیز می‌بایستی در نظر گرفته شود.

1. Back flashover
2. Preinsertion resistors
3. Restrike free
4. Temporary overvoltages
5. Surge arresters
6. Spark gaps
7. Protection levels
8. Safety margin

نتیجه‌گیری: همان طوری که گفته شد باتوجه به اساسی‌ترین اصل در امر برق‌رسانی (افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه) جهت کاهش شدت قطعی‌های سیستم از لحاظ تعداد و مدت، می‌باید استقامت عایقی تجهیزات را بالا برد ولی ملاحظات اقتصادی و فنی در این مسئله محدودیت ایجاد می‌نماید. برای حل مشکل، اولین قدم کاهش احتمال و شدت بروز اضافه ولتاژها و قدم دوم کنترل اضافه ولتاژهای ظاهر شده در سیستم توسط وسایل حفاظت‌کننده (برق‌گیرها و جرقه‌گیرها) می‌باشد. پس از تعیین سطوح حفاظتی برق‌گیرها یا جرقه‌گیرها در برابر اضافه ولتاژها می‌توانیم قدم سوم را که تعیین استقامت عایقی تجهیزات با لحاظ نمودن یک حاشیه حفاظتی است، برداریم. در کلیه مراحل فوق توجه ویژه به مسائل زیر تعیین‌کننده خواهد بود:

- محاسبه و یا پیش‌بینی اضافه ولتاژها در سیستم و استقامت عایقی تجهیزات در برابر آنها یک مسئله آماری است و با یک احتمال مشخص می‌توان از شدت یک اضافه ولتاژ یا از استقامت عایقی یک وسیله صحبت کرد.
- لحاظ کردن عوامل محیطی (دما، ارتفاع، فشار، رطوبت و آلودگی) در استقامت عایقی تجهیزات و تفکیک عایق‌ها به خارجی و داخلی و مدلسازی اجزاء و شبکه از لحاظ شکل الکترود با اشکال موجود جهت استفاده از ضرایب تصحیح‌کننده.
- در نظر گرفتن اثرات نامطلوب وجود فاصله میان وسیله حفاظت‌کننده و موضوع تحت حفاظت.
- ملاحظات مربوط به تعداد و محل نصب برق‌گیرها در پست‌های فشارقوی.
- توجه به این مسئله که وسایل حفاظت‌کننده عمدتاً برای حفاظت شبکه در برابر اضافه ولتاژهای کلیدزنی و صاعقه به کار می‌روند. هرچند برق‌گیرها عموماً برای حفاظت اضافه ولتاژهای موقتی به کار نمی‌آیند (مورد استثنا وجود دارد). ولی با این حال این دسته از اضافه ولتاژها در تعیین سطوح حفاظتی برق‌گیرها نقش عمده‌ای دارند.

۱-۲- تعاریف

درخصوص مبحث هماهنگی عایقی در پست‌های فشار قوی، حداقل تعاریف که از استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ استفاده شده است، شامل موارد ذیل می‌گردد:

۱-۲-۱- هماهنگی عایقی[1]

هماهنگی عایقی عبارت است از انتخاب استقامت عایقی تجهیزات با توجه به ولتاژهای احتمالی ظاهر شده در سیستم و مشخصه‌های وسایل حفاظت‌کننده در دسترس، بطوریکه احتمال تنشهای ولتاژی تحمیل شده به تجهیزات (که باعث معیوب شدن عایق بندی تجهیزات و یا وقفه در تداوم بار می‌شود) به یک سطح قابل قبول از نظر اقتصادی و عملیاتی تقلیل یابد.

1. Insulation coordination

۱-۲-۲- عایق خارجی[1]

فواصل هوایی و سطوحی از عایق جامد تجهیز که با هوای آزاد در تماس بوده و در معرض تنش‌های الکتریکی و تاثیرات آب و هوایی و سایر شرایط خارجی (همچون آلودگی، رطوبت، حشرات موذی و غیره) می‌باشند.

توجه:

عایق خارجی یا به صورت بدون حفاظ و یا به صورت محافظت‌شده در برابر شرایط آب و هوایی طراحی می‌شود که در حالت نخست عایق در فضای باز و در حالت دوم در داخل یک حفاظ بسته مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد.

۱-۲-۳- عایق داخلی[2]

بخش‌های جامد، مایع یا گازی داخلی عایق تجهیز که در برابر آثار آب و هوایی و سایر شرایط خارجی محافظت شده‌اند.

۱-۲-٤- عایق بازگشت‌پذیر[3]

عایقی که خواص عایقی خود را پس از یک تخلیه مخرب[4] مجدداً به طور کامل بدست می‌آورد.

۱-۲-۵- عایق بازگشت ناپذیر[5]

عایقی که خواص عایقی خود را پس از یک تخلیه مخرب از دست بدهد و یا اینکه قادر نباشد خواص عایقی خود را مجدداً به طور کامل بدست آورد.

توجه:

تعاریف ذکر شده در بندهای ۱-۲-۴ و ۱-۲-۵ تنها هنگامی که تخلیه بواسطه اعمال یک ولتاژ آزمون در حین یک آزمایش عایقی ایجاد شده است مصداق می‌یابند، چرا که تخلیه‌هایی که در حین سرویس به وقوع می‌پیوندند ممکن است باعث از دست رفتن کامل یا جزئی خواص عایقی اولیه یک عایق بازگشت‌پذیر شوند.

۱-۲-٦- ترمینال آرایش عایقی[6]

هر نوعی از الکترودها که بتوان بین هر جفت از آنها ولتاژی را اعمال نمود که عایق را تحت تنش قرار دهد. انواع ترمینال عبارتند از:

- **ترمینال فاز**[7] که در شرایط سرویس بین آن و نوترال، ولتاژ فاز به نوترال سیستم اعمال می‌شود.

1. External insulation
2. Internal insulation
3. Self- restoring insulation
4. Disruptive discharge
5. Non- self- restoring insulation
6. Insulation configuration terminal
7. Phase terminal

- **ترمینال نوترال**[1] که نشان‌دهنده، یا متصل شونده، به نقطه نوترال سیستم است (مانند ترمینال نوترال ترانسفورماتور).
- **ترمینال زمین**[2] همواره مستقیماً به شبکه زمین متصل می‌شود (مانند تانک ترانسفورماتورها، پایه سکسیونرها، استراکچر برجها و غیره).

۱-۲-۷- آرایش عایقی[3]

آرایش هندسی کاملی از عایق موجود در سرویس، شامل عایق و کلیه ترمینال‌ها می‌باشد. این آرایش در برگیرنده کلیه المانهایی (عایق وهادی) است که رفتار دی‌الکتریک عایق را تحت تأثیر قرار می‌دهند. آرایش‌های عایقی زیر به رسمیت شناخته شده‌اند:

- **سه فاز**[4]: دارای سه ترمینال فاز، یک ترمینال نوترال و یک ترمینال زمین می‌باشد.
- **فاز به زمین**[5]: یک آرایش عایقی سه فاز که دو ترمینال فاز آن نادیده گرفته شده‌اند و جز در حالتهای خاص، ترمینال نوترال آن زمین شده است.
- **فاز به فاز**[6]: یک آرایش عایقی سه فاز که یک ترمینال فاز آن نادیده گرفته شده است. در حالتهای خاصی، ترمینال‌های نوترال و زمین نیز نادیده گرفته می‌شوند.
- **طولی**[7]: دارای دو ترمینال فاز و یک ترمینال زمین می‌باشد. ترمینال‌های فاز به یک فاز سیستم سه فاز تعلق دارند که به صورت موقت به دو بخش برقدار مستقل مجزا از هم تبدیل شده‌اند (همچون وضعیت باز وسایل کلیدزنی). چهار ترمینال متعلق به دو فاز دیگر نادیده یا به صورت زمین شده در نظر گرفته می‌شوند. در حالات خاص یکی از دو ترمینال فاز، زمین شده فرض می‌گردد.

۱-۲-۸- ولتاژ نامی یک سیستم[8]

یک مقدار تقریبی مناسب از ولتاژ که برای معین نمودن یا شناسایی سیستم مورد استفاده قرار گرفته است.

1. Neutral terminal
2. Earth terminal
3. Insulation configuration
4. Three- phase
5. Phase- to- earth
6. Phase- to- phase
7. Longitudinal
8. Nominal voltage of a system

۱-۲-۹- حداکثر ولتاژ یک سیستم[1]

حداکثر مقداری از ولتاژ بهره‌برداری که تحت شرایط عادی بهره‌برداری در هر زمان و در هر مکانی از سیستم به وقوع می‌پیوندد.

۱-۲-۱۰- حداکثر ولتاژ برای تجهیز[2] (U_m)

حداکثر مقداری از ولتاژ موثر فاز به فاز که براساس آن عایق و سایر مشخصه‌های مربوطه تجهیز طراحی می‌شوند.

۱-۲-۱۱- سیستم با نوترال ایزوله[3]

سیستمی که در آن نقطه نوترال، جز برای اتصالات امپدانس بالا جهت مقاصد حفاظتی یا اندازه‌گیری، عمداً زمین نشده است.

۱-۲-۱۲- سیستم با نوترال مستقیماً زمین شده[4]

سیستمی که نقطه یا نقاط نوترال آن مستقیماً به زمین متصل شده‌اند.

۱-۲-۱۳- سیستم با نوترال زمین شده از طریق امپدانس[5]

سیستمی که نقطه یا نقاط نوترال آن از طریق امپدانس‌هایی (به منظور کاهش جریان‌های خطای زمین) زمین شده است.

۱-۲-۱٤- سیستم با نوترال زمین شده به صورت تشدیدی[6]

سیستمی که در آن یک یا تعدادی از نقاط نوترال از طریق راکتانس‌هایی به زمین متصل شده‌اند. این راکتانس‌ها تقریباً مؤلفه خازنی جریان خطای تکفاز به زمین را خنثی می‌نمایند.

توجه:

با زمین نمودن نوترال یک سیستم به صورت تشدیدی، جریان باقی‌مانده خطا به اندازه‌ای محدود می‌شود که به ازای آن قوس ناشی از خطا در هوا معمولاً به خودی خود خاموش می‌شود.

۱-۲-۱۵- ضریب خطای زمین[7]

در یک مکان معین از سیستم سه فاز و برای یک آرایش سیستمی مشخص، نسبت حداکثر مقدار موثر ولتاژ فرکانس قدرت فاز به زمین بر روی یک فاز سالم در حین یک خطای زمین، که یک یا تعدادی از فازها را در هر نقطه سیستم تحت تأثیر قرار می‌دهد، به مقدار مؤثر ولتاژ فرکانس قدرت قابل حصول در هر نقطه و در غیاب هر گونه خطا را ضریب خطای زمین می‌نامند.

1. Highest voltage of a system
2. Highest voltage for equipment
3. Isolated neutral system
4. Solidly earthed system
5. Impedance earthed neutral system
6. Resonant earthed neutral system
7. Earth fault factor

۱-۲-۱۶- اضافه ولتاژ

هر ولتاژ بین یک هادی فاز و زمین یا بین هادی‌های فاز که دارای مقدار پیک بزرگتر از مقدار پیک متناظر با حداکثر ولتاژ برای تجهیز می‌باشد.

توجه:

- جز در مواردی که صریحاً مشخص شود، مبنای مقادیر پیک اضافه ولتاژ که بر حسب پریونیت بیان شده‌اند $\frac{U_m \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ است.
- برای هر آرایش عایقی، اضافه ولتاژ عبارت است از هر ولتاژ بین ترمینالهای این آرایش در صورتی که مقدار آن از پیک ولتاژ فرکانس قدرت بالاتر باشد. در این حالت، کلیه ترمینالهای فاز تجهیز با ولتاژی برابر U_m برق‌دار شده‌اند.

۱-۲-۱۷- دسته‌بندی ولتاژها و اضافه ولتاژها

ولتاژها و اضافه ولتاژها مطابق شکل و مدت زمان تداوم آنها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند (به جدول ۱-۱ مراجعه شود):

الف ـ ولتاژ فرکانس قدرت دائمی[1]

ولتاژ فرکانس قدرتی که به صورت دائم به هر جفت از ترمینالهای یک آرایش عایقی اعمال می‌شود و دارای مقدار مؤثر ثابتی می‌باشد.

ب ـ اضافه ولتاژ موقت[2]

ولتاژ فرکانس قدرتی است که دارای مدت زمان تداوم نسبتاً طولانی می‌باشد.

توجه:

این اضافه ولتاژ ممکن است غیرمیرا یا با میرایی ضعیف باشد. در برخی موارد فرکانس آن ممکن است چندین بار بزرگتر یا کوچکتر از فرکانس قدرت باشد.

ج ـ اضافه ولتاژ گذرا[3]

اضافه ولتاژ کوتاه مدتی در محدوده چندمیلی ثانیه یا کمتر که به صورت نوسانی یا غیرنوسانی بوده و معمولاً به سرعت میرا می‌شود.

اضافه ولتاژهای گذرا به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- **اضافه ولتاژهای با شیب کند[4]:** اضافه ولتاژهایی که معمولاً تک پلاریته بوده و دارای زمان پیک $20\,\mu s \leq T_p \leq 5000\,\mu s$ و زمان پشت موج $T_2 \leq 20\ ms$ هستند.

1. Continuous power frequency voltage
2. Temporary overvoltage
3. Transient overvoltage
4. Slow – front overvoltage

- **اضافه ولتاژهای با شیب تند[1]:** اضافه ولتاژهایی که معمولاً تک پلاریته بوده و دارای زمان پیک $0/1\mu s \leq T_1 \leq 20\mu s$ و زمان پشت موج $T_2 \leq 300\ \mu s$ هستند.
- **اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند[2]:** اضافه ولتاژهایی که معمولاً تک پلاریته بوده و دارای زمان پیک $T_1 \leq 0/1\mu s$، مدت زمان تداوم کل موج کوچکتر از ۳ میلی‌ثانیه هستند. نوسانهای سوارشده بر شکل موج دارای فرکانسی در گستره ۳۰ کیلوهرتز تا ۱۰۰ مگاهرتز می‌باشند.

د ـ اضافه ولتاژهای ترکیب‌شده[3] (موقت، شیب تند، شیب بسیارتند)

اضافه ولتاژهایی که از دو مولفه ولتاژی تشکیل شده و به صورت همزمان بین هر یک از دو ترمینال فازی یک عایق فاز به فاز (یا طولی) و زمین اعمال شده است. این اضافه ولتاژ بوسیله مؤلفه‌ای که دارای مقدار پیک بزرگتر است طبقه‌بندی می‌شود.

۱-۲-۱۸- زمان پیشانی موج[4]

زمان رسیدن به پیک مقدار موج را زمان رسیدن به قله یا پیشانی موج می‌گویند.

۱-۲-۱۹- زمان پشت موج[5]

زمان بین ولتاژ صفر و ولتاژی که به ٪۵۰ مقدار پیک کاهش می‌یابد را زمان رسیدن به نصف مقدار یا پشت موج می‌گویند.

۱-۲-۲۰- شکل موج‌های ولتاژ استاندارد

شکل موج‌های ولتاژی زیر استاندارد شده می‌باشند (به جدول ۱-۱ مراجعه شود):

الف ـ ولتاژ فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد[6]

یک ولتاژ سینوسی با فرکانس بین ۴۸ هرتز تا ۶۲ هرتز و مدت زمان تداوم ۶۰ ثانیه.

ب ـ موج ضربه کلیدزنی استاندارد[7]

یک موج ضربه ولتاژ که دارای زمان پیشانی موج ۲۵۰ میکروثانیه و زمان پشت موج ۲۵۰۰ میکروثانیه است.

1. Fast – front overvoltage
2. Very – fast – front overvoltage
3. Combined overvoltage
4. Time to crest
5. Time to half value
6. Standard short duration power frequency voltage
7. Standard switching impulse

ج ـ موج ضربه صاعقه استاندارد[1]

یک موج ضربه ولتاژ که دارای زمان پیشانی موج ۱/۲ میکروثانیه و زمان پشت موج ۵۰ میکروثانیه می‌باشد.

د ـ موج ضربه کلیدزنی ترکیب شده استاندارد[2]

این موج ضربه ولتاژی از دو مؤلفه با مقدار پیک یکسان اما پلاریته‌های مخالف تشکیل شده است. پلاریته مثبت، یک موج کلیدزنی استاندارد است و پلاریته منفی نیز یک موج ضربه کلیدزنی می‌باشد که زمانهای پیک و پشت موج آن نمی‌بایستی کمتر از مقادیر متناظر در موج با پلاریته مثبت باشد. هر دو موج می‌بایستی در زمان یکسانی به مقدار پیک خودشان برسند. بنابراین مقدار پیک ولتاژ ترکیب شده برابر مجموع مقادیر پیک اجزای تشکیل‌دهنده موج خواهد بود.

توجه:

اطلاعات جامع‌تر درخصوص شکل موج‌های استاندارد در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ ارائه شده‌اند.

۱-۲-۲۱- اضافه ولتاژهای معرف[3] (U_{rp})

اضافه ولتاژهای فرضی که قادر هستند اثر دی‌الکتریکی یکسانی (مشابه اثر اضافه ولتاژهای متعلق به یک کلاس معین که در شرایط سرویس واقعی و به جهت عوامل مختلف ایجاد می‌شوند) را بر روی عایق ایجاد نمایند. این اضافه ولتاژهای فرضی از ولتاژهایی با شکل موج استاندارد از کلاس مربوطه تشکیل شده‌اند و ممکن است با یک مقدار یا مجموعه‌ای از مقادیر و یا توزیع فراوانی مقادیری که مشخصه کننده شرایط سرویس می‌باشند، مشخص شوند.

توجه:

این تعریف به طور مشابه برای ولتاژ فرکانس قدرت دائمی، که معرف اثر ولتاژ بهره‌برداری بر روی عایق می‌باشد، نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۲-۲۲- وسیله محدودکننده اضافه ولتاژ

وسیله‌ای که مقادیر پیک اضافه ولتاژها یا مدت زمان تداوم آنها و یا هردو را محدود می‌نماید. این قبیل وسایل در دو گروه وسایل پیش‌گیری کننده[4] (همچون مقاومت پیش وصل در کلیدها) و وسایل حفاظت‌کننده[5] (همچون برقگیرها) طبقه‌بندی می‌شوند.

۱-۲-۲۳- سطح حفاظتی در برابر موج ضربه صاعقه (یا کلیدزنی)[6]

حداکثر مقدار پیک ولتاژ مجاز بر روی ترمینالهای یک وسیله حفاظتی که تحت شرایطی معین در معرض امواج ضربه صاعقه (یا کلیدزنی) قرار گرفته است.

---

1. Standard lightning impulse
2. Standard combined switching impulse
3. Representative overvoltages
4. Preventing devices
5. Protecting devises
6. Lightning (or switching) impulse protective level

۱-۲-۲٤- معیار عملکرد[1]

مبنایی که براساس آن عایق به گونه‌ای انتخاب می‌شود که احتمال بروز تنش‌های ولتاژی اعمال شده بر روی تجهیز (که می‌توانند منجر به صدمه دیدن تجهیز یا وقفه در سرویس‌دهی شوند) تا یک حد قابل قبول از لحاظ اقتصادی و بهره‌برداری کاهش یابد. این معیار عموماً بر حسب نرخ خطای قابل قبول (تعداد خطاها در سال، مدت زمان بین دو خطای متوالی، احتمال وقوع خطا و غیره) آرایش عایقی بیان می‌گردد.

۱-۲-۲۵- ولتاژ تحمل[2]

مقداری از ولتاژ آزمون که تحت شرایط مشخصی از یک آزمون تحمل اعمال شده و در حین آزمون تنها تعداد مشخصی از تخلیه‌های مخرب پذیرفته می‌شود. ولتاژ تحمل به صورت زیر مشخص می‌گردد:

- **ولتاژ تحمل فرضی مرسوم**[3]: هنگامی که تعداد تخلیه‌های مخرب قابل قبول برابر صفر باشد. فرض می‌شود که این ولتاژ متناظر با احتمال تحمل ۱۰۰٪ =P_w است.
- **ولتاژ تحمل آماری**[4]: هنگامی که تعداد تخلیه‌های مخرب قابل قبول به یک احتمال تحمل مشخص نسبت داده می‌شوند. در این گزارش این احتمال مشخص متناظر با احتمال تحمل ۹۰٪ =P_w است.

توجه:

در این گزارش، ولتاژهای تحملی که برای عایق‌های بازگشت‌ناپذیر مشخص می‌شوند متناظر با ولتاژ تحمل مرسوم فرضی و ولتاژهای تحملی که برای عایق‌های بازگشت پذیر مشخص می‌شوند متناظر با ولتاژ تحمل آماری خواهند بود.

۱-۲-۲٦- ولتاژ تحمل هماهنگی[5] (U_{cw})

برای هر رده ولتاژی، مقداری از ولتاژ تحمل آرایش عایقی که در شرایط سرویس واقعی قادر به برآوردن معیار عملکرد است.

۱-۲-۲۷- ضریب هماهنگی[6] (K_c)

ضریبی که می‌بایستی در مقدار ولتاژ معرف (U_{rp}) ضرب شده تا مقدار ولتاژ تحمل هماهنگی (U_{cw}) حاصل شود.

1. Performance criterion
2. Withstand voltage
3. Conventional assumed withstand voltage
4. Statistical withstand voltage
5. Coordination withstand voltage
6. Coordination factor

۱-۲-۲۸- شرایط جوی مبنای استاندارد[1]

شرایط جوی مبنای استاندارد عبارتند از:

- درجه حرارت $t_0 = ۲۰^\circ C$
- فشار $b_0 = ۱۰۱/۳$ kpa (۱۰۱۳ mbar)
- رطوبت مطلق $h_{ao} = ۱۱ gr/m^3$

۱-۲-۲۹- ولتاژ تحمل مورد نیاز[2] (U_{rw})

ولتاژ آزمونی که عایق می‌بایستی در یک آزمون تحمل استاندارد تحمل نماید تا اطمینان حاصل گردد که عایق قادر است معیار عملکرد را هنگامی‌که تحت شرایط سرویس واقعی در معرض کلاس مشخصی از اضافه ولتاژها قرار می‌گیرد و برای کل مدت زمان سرویس‌دهی مورد انتظار، برآورده نماید. شکل موج ولتاژ تحمل موردنیاز (U_{rw}) مشابه شکل موج ولتاژ تحمل هماهنگی (U_{cw}) است و بر مبنای کلیه شرایط آزمون تحملی که برای تحقیق آن انتخاب شده است مشخص می‌شود.

۱-۲-۳۰- ضریب اصلاح شرایط جوی[3] (K_a)

ضریبی که می‌بایستی، برای لحاظ نمودن میزان اختلاف موجود بین میانگین شرایط جوی حاکم در شرایط سرویس واقعی با شرایط جوی مبنای استاندارد، به ولتاژ تحمل هماهنگی اعمال شود. این ضریب تنها به عایق‌های خارجی اعمال می‌شود.

۱-۲-۳۱- ضریب ایمنی[4] (K_s)

ضریب کلی که پس از اعمال ضریب اصلاح شرایط جوی (در صورت نیاز) می‌بایستی به ولتاژ تحمل هماهنگی (U_{cw}) اعمال شود تا ولتاژ تحمل موردنیاز (U_{rw}) بدست آید. این ضریب برای لحاظ نمودن سایر اختلافات ممکن بین شرایط سرویس واقعی و شرایط حاکم در حین آزمون تحمل استاندارد اعمال می‌شود.

۱-۲-۳۲- ولتاژ تحمل استاندارد[5] (U_w)

مقدار استانداردی از ولتاژ آزمون که در یک آزمون تحمل استاندارد اعمال می‌شود. این ولتاژ یک مقدار نامی برای عایق بوده و ثابت می‌نماید که عایق یک یا تعدادی از ولتاژهای تحمل مورد نیاز را برآورده می‌نماید.

1. Standard reference atmospheric conditions
2. Required withstand voltage
3. Atmospheric correction factor
4. Safety factor
5. Standard withstand voltage

۱-۲-۳۳- ضریب تبدیل آزمون[1] (K_t)

در مواردی که ولتاژ تحمل استاندارد با شکلی متفاوت انتخاب شود، ضریبی که به ولتاژ تحمل موردنیاز (U_{rw}) اعمال می‌شود تا حد پایین ولتاژ آزمون تحمل استاندارد به دست آید (که فرض می‌شود تجهیز می‌تواند آن را تحمل نماید) را ضریب تبدیل آزمون گویند.

۱-۲-۳٤- سطح عایقی نامی[2]

یک مجموعه از ولتاژهای تحمل استاندارد که مشخص‌کننده استقامت دی‌الکتریک عایق هستند.

۱-۲-۳۵- سطح عایقی استاندارد[3]

یک سطح عایقی نامی که متناظر با حداکثر ولتاژ برای تجهیز (U_m) است و در جداول (۱-۲) و (۱-۳) مقادیر آن جهت سطوح ولتاژی مختلف ارائه شده است.

۱-۲-۳٦- آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد[4]

یک آزمون عایقی که در شرایط مشخصی انجام می‌شود تا ثابت شود که عایق با یک ولتاژ تحمل استاندارد مطابقت دارد. این آزمونها عبارتند از:

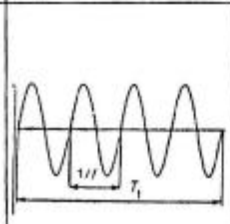
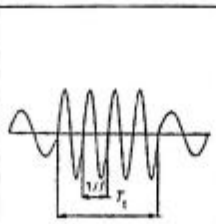
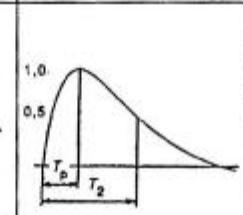
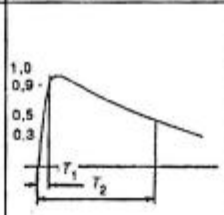
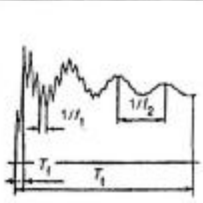
- آزمونهای فرکانس قدرت کوتاه‌مدت
- آزمونهای موج ضربه کلیدزنی
- آزمونهای موج ضربه صاعقه
- آزمونهای ولتاژ ترکیب‌شده

توجه:

- اطلاعات جزئی‌تر در رابطه با آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ ارائه شده‌اند. در جدول (۱-۱) نیز شکل موج‌های ولتاژ آزمون نشان داده شده‌اند.
- آزمونهای ولتاژ تحمل موج ضربه با شیب بسیار تند در صورت نیاز می‌بایستی توسط استاندارد مربوط به تجهیز موردنظر مشخص شوند.

1. Test conversion factor
2. Rated insulation level
3. Standard insulation level
4. Standard withstand voltage test

جدول ۱-۱: دسته‌بندی و شکل موج تنش‌های ولتاژی و اضافه ولتاژها

کلاس	فرکانس پایین		گذرا		
	دائمی	موقتی	شیب کند	شیب تند	شیب بسیار تند
شکل موج ولتاژ					
محدوده شکل موج‌های ولتاژ	f = 50 Hz or 60 Hz $T_t \geq 3\,600$ s	10 Hz < f < 500 Hz 3 600 s ≥ T_t ≥ 0,03 s	5 000 µs ≥ T_p > 20 µs $T_2 \leq 20$ ms	20 µs ≥ T_1 > 0,1 µs $T_2 \leq 300$ µs	100 ns ≥ T_1 > 3 ns 0,3 MHz < f_1 < 100 MHz 30 kHz < f_2 < 300 kHz $T_t \leq 3$ ms
شکل موج استاندارد	f = 50 Hz or 60 Hz T_t #	48 Hz ≤ f ≤ 62 Hz T_t = 60 s	T_p = 250 µs T_2 = 2 500 µs	T_1 = 1,2 µs T_2 = 50 µs	#
آزمون تحمل استاندارد	#	آزمون ولتاژ فرکانسی قدرت کوتاه‌مدت	آزمون موج ضربه کلیدزنی	آزمون موج ضربه صاعقه	#

توسط استانداردهای مربوط به تجهیز مشخص می‌شود.

جدول ۱-۲: سطوح عایقی استاندارد در رده ولتاژ I ($1\ kV < U_m \leq 245\ kV$)

مطابق استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ مربوط به شبکه برق ایران

ولتاژ نامی سیستم (کیلوولت موثر فاز به فاز)	حداکثر ولتاژ برای تجهیز U_m (کیلوولت موثر فاز به فاز)	ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد (کیلوولت موثر)	ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد (کیلوولت پیک)
۱۱	۱۲	۲۸	۶۰
			۷۵
			۹۵
۲۰	۲۴	۵۰	۹۵
			۱۲۵
			۱۴۵
۳۳	۳۶	۷۰	۱۴۵
			۱۷۰
۶۳/۶۶	۷۲/۵	۱۴۰	۳۲۵
۱۳۲	۱۴۵	(۱۸۵)	(۴۵۰)
		۲۳۰	۵۵۰
		۲۷۵	۶۵۰
۲۳۰	۲۴۵	(۲۷۵)	(۶۵۰)
		(۳۲۵)	(۷۵۰)
		۳۶۰	۸۵۰
		۳۹۵	۹۵۰
		۴۶۰	۱۰۵۰

توجه: اگر بررسی‌ها نشان دهد که مقادیر ارائه شده در داخل پرانتزها قادر به اثبات برآورده شدن ولتاژهای تحمل فاز به فاز موردنیاز نمی‌باشند، آزمونهای تحمل فاز به فاز تکمیلی مورد نیاز خواهند بود.

جدول ۱-۳: سطوح عایقی استاندارد در رده ولتاژی II ($U_m > 245\ kV$)

مطابق استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ مربوط به شبکه برق ایران

ولتاژ نامی سیستم (کیلوولت موثر فاز به فاز)	حداکثر ولتاژ برای تجهیز U_m (کیلوولت موثر فاز به فاز)	موج ضربه کلیدزنی استاندارد			ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد (کیلوولت پیک)
		عایق طولی* (کیلوولت پیک)	فاز به زمین (کیلوولت پیک)	فاز به زمین (نسبت به مقدار پیک فاز به زمین)	
۴۰۰	۴۲۰	۸۵۰	۸۵۰	۱/۶	۱۰۵۰
					۱۱۷۵
		۹۵۰	۹۵۰	۱/۵	۱۱۷۵
					۱۳۰۰
		۹۵۰	۱۰۵۰	۱/۵	۱۳۰۰
					۱۴۲۵

* مقدار مولفه موج ضربه آزمون ترکیبی مربوطه

۱-۳- مراحل حصول به هماهنگی عایقی

۱-۳-۱- کلیات

روش حصول به هماهنگی عایقی عبارت است از انتخاب یک مجموعه از ولتاژهای تحمل استاندارد جهت عایق. این روش در شکل (۱-۱) نشان داده شده است و مراحل آن در بندهای ۱-۳-۲ تا ۱-۳-۵ تشریح می‌شوند. بهینه‌سازی روش نشان داده شده در شکل (۱-۱) ممکن است مستلزم تجدیدنظر در برخی از اطلاعات ورودی و تکرار بخشی از آن باشد.

ولتاژهای تحمل استاندارد می‌بایستی با توجه به اعداد داده شده در بندهای ۱-۳-۶ و ۱-۳-۷ انتخاب شوند. مجموعه ولتاژهای استاندارد انتخاب شده یک سطح عایقی نامی را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این اگر ولتاژهای تحمل استاندارد مطابق بند ۱-۳-۹ با یک U_m یکسان تطبیق یابد، این مجموعه یک سطح عایقی استاندارد را تشکیل خواهد داد.

۱-۳-۲- تعیین اضافه ولتاژهای معرف (U_{rp})

ولتاژها و اضافه ولتاژهایی که عایق را تحت تنش قرار می‌دهند می‌بایستی بر حسب اندازه، شکل موج و مدت زمان تداومشان و به کمک تحلیل‌هایی که شامل انتخاب و مکان‌یابی وسایل محدودکننده اضافه ولتاژ می‌باشد، تعیین شوند.

برای هر دسته از اضافه ولتاژها، این تحلیل‌ها می‌بایستی با در نظر گرفتن مشخصه عایق منجر به تعیین یک اضافه ولتاژ معرف شود.

اضافه ولتاژ معرف می‌تواند بوسیله:

- یک مقدار حداکثر فرضی، یا
- یک مجموعه از مقادیر پیک، یا
- یک توزیع آماری کامل از مقادیر پیک

مشخص گردد (در روش آخر ممکن است لازم باشد که مشخصات تکمیلی از شکل موج‌های اضافه ولتاژ نیز در نظر گرفته شود).

در صورتی که مناسب بودن استفاده از یک مقدار حداکثر فرضی برای مشخص نمودن اضافه ولتاژ معرف مورد پذیرش قرار گیرد، اضافه ولتاژ معرف جهت انواع اضافه ولتاژها می‌بایستی مشخصات ذیل را دارا باشد:

- برای ولتاژ فرکانس قدرت دائمی: یک ولتاژ فرکانس قدرت که مقدار مؤثر آن معادل با حداکثر ولتاژ سیستم و با مدت زمان تداومی متناظر با طول عمر تجهیز می‌باشد.
- برای اضافه ولتاژهای موقت: یک ولتاژ فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد که مقدار موثر آن معادل با حداکثر مقدار فرض شده برای اضافه ولتاژهای موقت تقسیم بر $\sqrt{2}$ است.
- برای اضافه ولتاژهای با شیب کند: یک موج ضربه کلیدزنی استاندارد که مقدار پیک آن معادل با حداکثر مقدار فرض شده برای اضافه ولتاژهای با شیب کند است.
- برای اضافه ولتاژهای با شیب تند: یک موج ضربه صاعقه استاندارد که مقدار پیک آن معادل با حداکثر مقدار فرض شده برای اضافه ولتاژهای با شیب تند می‌باشد.

- برای اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند: مشخصات این دسته از اضافه ولتاژها توسط استانداردهای مربوط به تجهیز مورد نظر مشخص می‌شود.
- برای اضافه ولتاژهای فاز به فاز با شیب کند: یک موج ضربه کلیدزنی ترکیبی استاندارد که مقدار پیک آن معادل با مقدار پیک حداکثر مقدار فرض شده برای اضافه ولتاژهای فاز به فاز با شیب کند است.

توجه:

نسبت واقعی[1] (α) مشخصه‌ای مفید است که از تقسیم مقدار پیک مؤلفه منفی (U^-) به مقدار پیک $(U^+ + U^-)$ حداکثر اضافه ولتاژ فاز به فاز فرض شده در حالت کار به دست می‌آید $(\alpha = \frac{U^-}{U^+ + U^-})$.

- برای اضافه ولتاژهای طولی با شیب کند (یا شیب تند): یک ولتاژ ترکیبی که شامل یک موج ضربه کلیدزنی (یا صاعقه) استاندارد و یک ولتاژ فرکانس قدرت می‌باشد. مقادیر پیک این ولتاژها معادل با دو مقدار پیک حداکثر مقدار فرضی مربوط به خودشان بوده و لحظه به پیک رسیدن موج ضربه همزمان با لحظه به پیک رسیدن ولتاژ فرکانس قدرت در پلاریته مخالف است.

۱-۳-۳- تعیین ولتاژهای تحمل هماهنگی (U_{cw})

تعیین ولتاژهای تحمل هماهنگی عبارت است از تعیین حداقل مقادیر ولتاژهای تحمل عایق که بموجب آن معیار عملکرد، تحت شرایطی که عایق در معرض اضافه ولتاژهای معرف شرایط سرویس واقعی قرار می‌گیرد، برآورده می‌گردد. ولتاژهای تحمل هماهنگی عایق دارای شکل موجی مشابه اضافه ولتاژهای معرف از دسته مربوطه بوده و مقادیر آنها از حاصلضرب مقادیر اضافه ولتاژهای معرف (U_{rp}) در ضریب هماهنگی (K_c) حاصل می‌شوند. مقدار ضریب هماهنگی به دقت برآورد اضافه ولتاژهای معرف و نحوه ارزیابی مشخصه‌های اضافه ولتاژها و عایق، به صورت تجربی یا آماری، بستگی دارد.

ولتاژهای تحمل هماهنگی را می‌توان به صورت ولتاژهای تحمل مرسوم فرضی و یا به صورت ولتاژهای تحمل آماری تعیین نمود. این موضوع بر تعیین ولتاژهای تحمل و مقادیر ضریب هماهنگی تأثیر می‌گذارد.

شبیه‌سازی پدیده‌های اضافه ولتاژ همراه با ارزیابی همزمان احتمال خطا، به کمک مشخصه‌های عایق مربوطه، امکان تعیین مستقیم ولتاژهای تحمل هماهنگی آماری را فراهم می‌کند، بدون آنکه نیازی به تعیین اضافه ولتاژهای معرف باشد.

۱-۳-٤- تعیین ولتاژهای تحمل موردنیاز (U_{rw})

تعیین ولتاژهای تحمل موردنیاز عایق عبارت است از تبدیل ولتاژهای تحمل هماهنگی به شرایط آزمون استاندارد مناسب. این کار با ضرب نمودن ولتاژهای تحمل هماهنگی در ضرایب خاصی، که مغایرتهای موجود بین شرایط حاکم بر سرویس واقعی و شرایط حاکم بر آزمون‌های تحمل استاندارد را خنثی می‌نمایند، صورت می‌گیرد.

1. Actual ratio

ضرایب اشاره شده می‌بایستی به جهت خنثی نمودن موارد به شرح ذیل اعمال شوند:

- تفاوت‌ها در مونتاژ تجهیز
- پراکندگی در کیفیت محصول[1]
- کیفیت نصب
- پیر شدن عایق در طی طول عمر پیش‌بینی شده
- سایر عوامل ناشناخته دیگر

با این حال، اگر این ضرایب را نتوان به صورت مجزا برآورد نمود، می‌بایستی یک ضریب ایمنی کلی که از طریق تجربه بدست آمده است را جهت انجام محاسبات پذیرفت.

در مورد عایق‌های خارجی همچنین می‌بایستی ضریب شرایط محیطی نیز اعمال گردد.

۱-۳-۵- انتخاب سطح عایقی نامی

انتخاب سطح عایقی نامی عبارت است از انتخاب اقتصادی‌ترین مجموعه از ولتاژهای تحمل استاندارد عایق (U_W)، به نحوی که اطمینان حاصل نمود کلیه ولتاژهای تحمل موردنیاز پوشش داده شده‌اند.

ولتاژ تحمل فرکانس قدرت دائمی عایق، که معادل با حداکثر ولتاژ برای تجهیز می‌باشد، طوری انتخاب می‌شود که مقدار استاندارد U_m معادل یا بزرگتر از ولتاژ تحمل فرکانس قدرت دائمی مورد نیاز باشد.

استانداردکردن آزمونها و همچنین انتخاب ولتاژهای آزمون مربوطه برای اثبات مطابقت با U_m بوسیله استانداردهای مربوط به تجهیز مورد نظر صورت می‌گیرد (به عنوان مثال آزمونهای آلودگی و آزمونهای بازبینی تخلیه جزئی).

ولتاژهای تحمل مورد استفاده جهت تائید برآورده‌شدن ولتاژهای تحمل موقت، با شیب کند و با شیب تند مورد نیاز برای عایق فاز به زمین، فاز به فاز و طولی ممکن است با شکل موجی مشابه شکل موج ولتاژ تحمل مورد نیاز یا با یک شکل موجی متفاوت انتخاب شوند، که تصمیم‌گیری در این رابطه به مشخصه‌های ذاتی عایق مرتبط می‌شود.

مقدار ولتاژ تحمل به نحوی از لیست ولتاژهای تحمل ارائه شده در بندهای ۱-۳-۶ و ۱-۳-۷ انتخاب می‌شوند که بزرگتر یا مساوی مقادیر زیر باشند:

- ولتاژ تحمل مورد نیاز درحالتی که هر دو دارای شکل موج یکسانی هستند.
- در حالتی که ولتاژهای تحمل مورد نیاز دارای شکل موج‌های متفاوتی می‌باشند، ولتاژ تحمل مورد نیاز ضرب شده در ضریب تبدیل آزمون.

توجه:

این روش ممکن است امکان تحقیق چند ولتاژ تحمل مورد نیاز را به کمک یک ولتاژ تحمل استاندارد مجزا فراهم نماید و از این رو منجر به کاهش تعداد ولتاژهای تحمل استانداردی که می‌بایستی به عنوان سطح عایقی نامی معرفی شوند گردد (به بند ۱-۳-۹ مراجعه نمایید).

1. Dispersion in the product quality

انتخاب ولتاژ تحمل استاندارد برای تأیید مطابقت با ولتاژ تحمل مورد نیاز با شیب بسیار تند می‌بایستی بوسیله استانداردهای مربوط به تجهیز تعیین شوند.

۱-۳-٦- لیست ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت

مقادیر موثر زیر که بر حسب کیلوولت بیان شده‌اند، استاندارد شده می‌باشند:

۱۰	۲۰	۲۸	۳۸	۵۰	۷۰	۹۵	۱۴۰
۱۸۵	۲۳۰	۲۷۵	۳۲۵	۳۶۰	۳۹۵	۴۶۰	۵۱۰
۵۷۰	۶۳۰	۶۸۰					

۱-۳-۷- لیست ولتاژهای تحمل موج ضربه استاندارد

مقادیر پیک زیر که برحسب کیلوولت بیان شده‌اند، استاندارد شده می‌باشد:

۲۰	۴۰	۶۰	۷۵	۹۵	۱۲۵	۱۴۵	۱۷۰	۲۵۰
۳۲۵	۴۵۰	۵۵۰	۶۵۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۰۵۰	۱۱۷۵
۱۳۰۰	۱۴۲۵	۱۵۵۰	۱۶۷۵	۱۸۰۰	۱۹۵۰	۲۱۰۰	۲۲۵۰	۲۴۰۰

۱-۳-۸- رده‌بندی جهت حداکثر ولتاژ برای تجهیز

حداکثر ولتاژ برای تجهیز در دو رده زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- **رده I** : $1\ kV < U_m \leq 245\ kV$ این رده هر دو سیستم انتقال و توزیع را پوشش می‌دهد. بنابراین در هنگام انتخاب سطح عایقی نامی تجهیز دیدگاه‌های مختلف بهره‌برداری در این قبیل سیستم‌ها می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد.
- **رده II**: $U_m > 245\ kV$ این رده اساساً سیستم‌های انتقال را پوشش می‌دهد.

۱-۳-۹- انتخاب سطوح عایقی استاندارد

استاندارد IEC براساس تجربیات حاصله از بهره‌برداری و براساس معیارهای منطبق بر استانداردهای این سازمان، رابطه بین ولتاژهای تحمل استاندارد و حداکثر ولتاژ برای تجهیز را استاندارد نموده است.

ولتاژهای تحمل استاندارد مرتبط با حداکثر ولتاژ برای تجهیز جهت شبکه فوق توزیع و انتقال برق ایران در جداول (۱-۲) و (۱-۳) نشان داده شده‌اند. مجموعه‌ای از ولتاژهای تحمل که به یک U_m مشخص منتهی می‌شوند یک سطح عایقی استاندارد را تشکیل می‌دهند. مجموعه‌هایی از ولتاژهای تحمل که برای یک U_m مشخص قابل استخراج می‌باشد به عنوان سطوح عایقی استاندارد تعریف می‌شوند (به عنوان مثال برای U_m برابر با ۲۴۵ کیلوولت پنج سطح عایقی استاندارد وجود دارد و برای U_m برابر ۴۲۰ کیلوولت سه سطح عایقی موجود می‌باشد).

توجه:

اگر برای آزمون ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی، استانداردهای مربوط به تجهیز، مقدار مؤلفه مثبت موج ضربه را کوچکتر از مقدار مؤلفه منفی مشخص نموده باشند، ولتاژ تحمل مورد نیاز عایق خارجی تأیید شده نمی‌باشد مگر اینکه یک ضریب تبدیل آزمون مناسب معرفی شود.

علاوه بر این، موارد زیر برای عایق‌های فاز به فاز و طولی استاندارد شده‌اند:

- برای عایق فاز به فاز در رده I، مقادیر فاز به فاز ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت و موج ضربه صاعقه استاندارد، معادل مقادیر مربوطه فاز به زمین ولتاژهای تحمل (جدول ۱-۲) می‌باشند. با این حال، مقادیر مشخص شده در پرانتزها ممکن است برای تایید برآورده شدن ولتاژهای تحمل مورد نیاز فاز به فاز کافی نباشند و لذا آزمونهای تحمل فاز به فاز تکمیلی مورد نیاز باشد.
- برای عایق فاز به فاز در رده II، مقدار فاز به فاز ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد معادل با مقدار فاز به زمین ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه می‌باشد.
- برای عایق طولی در رده I، ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت و موج ضربه صاعقه استاندارد معادل با ولتاژهای تحمل فاز به زمین مربوطه (جدول ۱-۲) می‌باشند.
- برای عایق طولی در رده II، مؤلفه موج ضربه کلیدزنی استاندارد ولتاژ تحمل ترکیبی در جدول (۱-۳) ارائه شده است که در این حالت مقدار پیک مولفه فرکانس قدرت در پلاریته مخالف معادل $\frac{U_m \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ است. همچنین مؤلفه موج ضربه صاعقه استاندارد ولتاژ تحمل ترکیبی معادل با ولتاژ تحمل فاز به زمین مربوطه (جدول ۱-۳) بوده و در این حالت مقدار پیک مولفه فرکانس قدرت در پلاریته مخالف معادل $\frac{0.7\times U_m \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ می‌باشد.

در جداول (۱-۲) و (۱-۳) اغلب بیش از یک سطح عایقی استاندارد جهت یک مقدار معین از حداکثر ولتاژ برای تجهیز ارائه شده‌اند تا امکان اعمال معیارهای عملکرد یا الگوهای اضافه ولتاژ مختلف مقدور گردد. در هر رده ولتاژی، جهت معین نمودن سطح عایقی استاندارد تجهیز تنها کافی است که دو ولتاژ تحمل استاندارد به شرح ذیل مشخص شوند:

- **برای تجهیزات رده I:**

الف ـ ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد و

ب ـ ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد

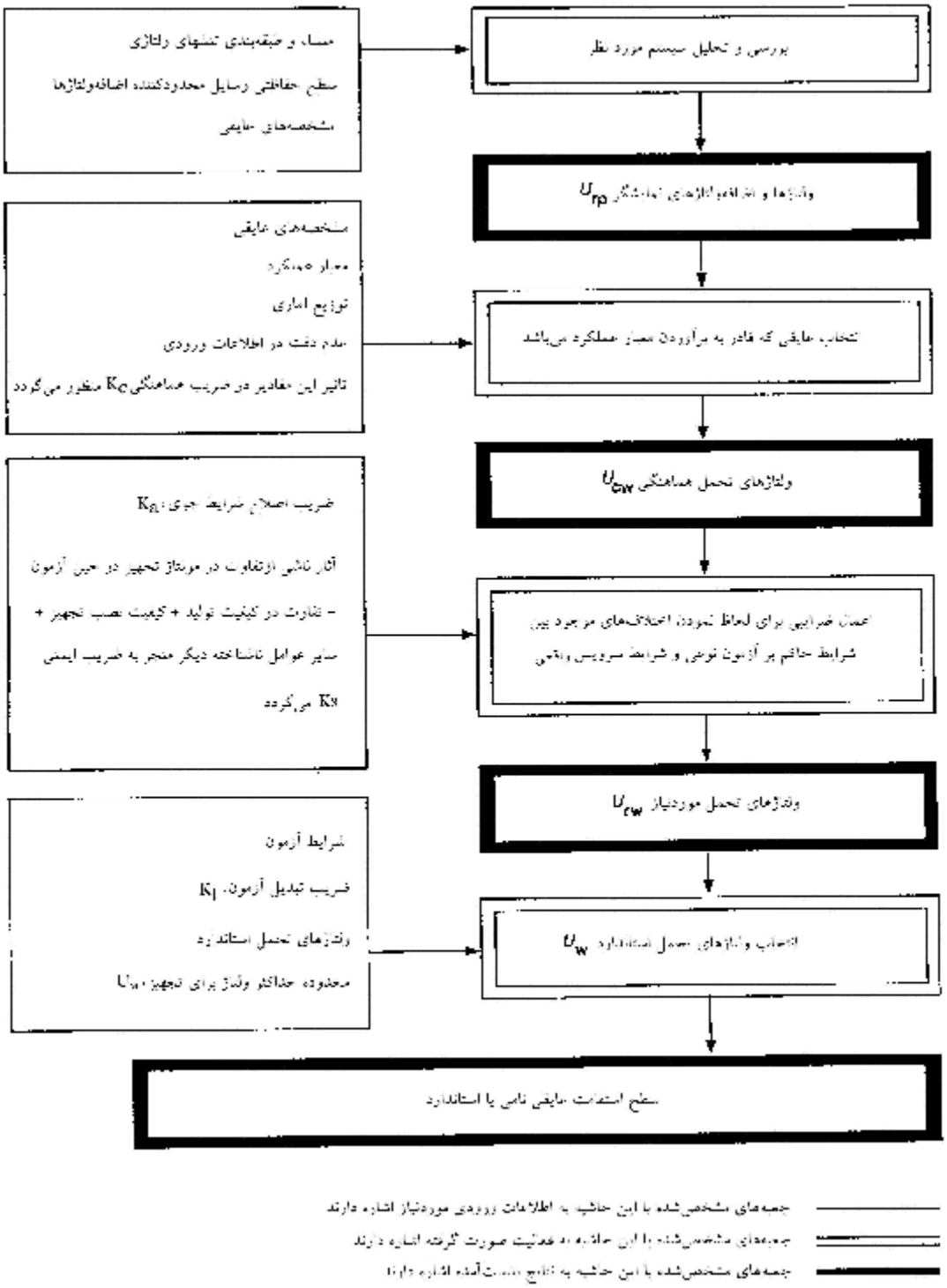
- **برای تجهیزات رده II:**

الف ـ ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد و

ب ـ ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد

با این حال، با توجه به نتایج قضاوت‌های فنی و اقتصادی ممکن است ولتاژهای تحمل تکمیلی دیگری نیز به موارد فوق اضافه شوند. تحت چنین شرایطی توصیه‌های ارائه شده در بندهای ۱-۳-۲ تا ۱-۳-۸ می‌بایستی در هر حالت دنبال شوند. موارد خاص زیر، نمونه‌هایی از این وضعیت می‌باشند:

- در مورد عایق خارجی و برای مقادیر حداکثری از U_m که در رده I قرار دارند، ممکن است مشخص نمودن یک موج ضربه کلیدزنی استاندارد به جای یک ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد اقتصادی‌تر باشد.
- در مورد عایق داخلی در رده II، وجود اضافه ولتاژهای موقت بزرگ ممکن است مستلزم مشخص نمودن یک ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد باشد.



شکل ۱-۱ : رویه هماهنگی عایقی جهت تعیین سطح عایقی نامی یا استاندارد

۱-٤- الزامات آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد

۱-٤-۱- الزامات عمومی

آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد به منظور اثبات این موضوع که ولتاژ تحمل واقعی عایق، با توجه به یک ضریب اطمینان قابل قبول، کوچکتر از ولتاژ تحمل متناظر مشخص شده برای آن نمی‌باشد انجام می‌شوند.

ولتاژهای اعمال شده در آزمونهای ولتاژ تحمل، جز در مواردی که در استانداردهای مربوطه تجهیز مشخص شده‌اند، ولتاژهای تحمل استاندارد می‌باشند.

در حالت کلی، آزمونهای ولتاژ تحمل شامل آزمونهای خشکی است که در یک وضعیت استاندارد به عمل آیند (آرایش آزمون بوسیله استانداردهای مربوطه تجهیز مشخص می‌شوند و شرایط جوی مبنای استاندارد نیز اعمال می‌شوند). با این حال، برای عایق خارجی که در برابر شرایط جوی محافظت نشده است، آزمونهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت و موج ضربه کلیدزنی استاندارد شامل آزمونهای با شرایط مرطوب بوده که مطابق شرایط توصیف شده در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ انجام می‌شوند.

در حین آزمونهای با شرایط مرطوب، بارش می‌بایستی به طور همزمان بر روی کلیه قسمتهای هوایی و سطح عایق که تحت ولتاژ می‌باشد اعمال گردد.

چنانچه شرایط جوی در آزمایشگاه محل انجام آزمون با شرایط جوی مبنای استاندارد مغایرت داشته باشد، ولتاژهای آزمون می‌بایستی مطابق دستورالعمل‌های ارائه شده در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ اصلاح شوند.

کلیه ولتاژهای تحمل ضربه می‌بایستی برای هر دو پلاریته کنترل شوند. در مواردی که استانداردهای مربوطه تجهیز تنها یک پلاریته را جهت انجام این قبیل آزمونها مشخص نموده باشند لزومی به انجام آزمونها با استفاده از دو پلاریته نمی‌باشد.

در صورتی که ثابت شده باشد که یکی از شرایط خشک یا مرطوب، یا یک پلاریته مشخص و یا ترکیبی از این دو منجر به حداقل ولتاژ تحمل می‌شود، آنگاه فقط کافی است که ولتاژ تحمل برای این شرایط ویژه تحقیق شود.

خطاهای عایقی که در حین آزمون به وقوع می‌پیوندند مبنای پذیرش یا رد نمونه آزمون می‌باشند. معیارهای پذیرش یا رد می‌بایستی از استانداردهای مربوطه تجهیز اقتباس گردند.

در مواقعیکه ولتاژ تحمل استاندارد عایق فاز به فاز (یا طولی) معادل با ولتاژ تحمل استاندارد عایق فاز به زمین است، پیشنهاد می‌شود که آزمونهای عایق فاز به فاز (یا طولی) و آزمونهای فاز به زمین همراه باهم، با اتصال یکی از دو ترمینال فاز به زمین، انجام شوند.

۱-٤-۲- آزمونهای ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد

آزمون ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت عبارت است از یکبار اعمال ولتاژ تحمل استاندارد مربوطه به ترمینالهای آرایش عایقی.

جز در مواردی که بوسیله استانداردهای مربوط به تجهیز مشخص شده‌اند، عایق در صورتی آزمون را با موفقیت پشت سر خواهد گذاشت که هیچگونه تخلیه مخربی صورت نگیرد. با این حال، اگر یک تخلیه مخرب بر روی عایق بازگشت‌پذیر در حین

آزمون با شرایط مرطوب اتفاق بیفتد، آزمون ممکن است یکبار دیگر تکرار شود و تجهیز در صورتی آزمون را با موفقیت پشت سر خواهد گذشت که هیچ‌گونه تخلیه مخرب دیگری صورت نگیرد.

هنگامی که انجام آزمون مقدور نباشد (همچون ترانسفورماتورهای با عایق غیریکنواخت)، استانداردهای مربوط به تجهیز می‌توانند فرکانسهایی تا حدود چند صد هرتز و مدت زمان استمرار کوتاهتر از یک دقیقه را جهت انجام آزمون مشخص نمایند. جز در سایر موارد توافق شده، ولتاژهای آزمون می‌بایستی یکسان باشند.

۱-٤-۳- آزمونهای ولتاژ تحمل موج ضربه استاندارد

یک آزمون ولتاژ تحمل موج ضربه استاندارد عبارت است از اعمال ولتاژ تحمل موج ضربه استاندارد مربوطه، به تعداد دفعات مشخص، به ترمینال‌های آرایش عایقی. جهت تایید این موضوع که ولتاژهای تحمل با یک درجه اطمینان قابل قبولی، که به صورت تجربی حاصل شده، پوشش داده شده‌اند رویه‌های آزمونی متفاوتی ممکن است انتخاب گردد.

رویه آزمون می‌بایستی مطابق استانداردهای مربوط به تجهیز از رویه‌های آزمونی به شرح ذیل که به طور کامل در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ تشریح شده‌اند، انتخاب شوند:

- آزمون تحمل سه موج ضربه که در آن هیچ‌گونه تخلیه مخربی پذیرفته نمی‌باشد.
- آزمون تحمل پانزده موج ضربه که در مورد عایق بازگشت‌پذیر تا دو تخلیه مخرب در آن پذیرفته است.
- آزمون تحمل سه موج ضربه که در مورد عایق بازگشت پذیر یک تخلیه مخرب در آن پذیرفته می‌باشد، چنانچه این تخلیه مخرب اتفاق بیفتد، تعداد نه موج ضربه دیگر به تجهیز اعمال می‌شود و در این حین هیچگونه تخلیه مخربی پذیرفته نخواهد بود.
- آزمون تحمل بالا و پایین[1] با هفت موج ضربه در هر سطح که در مورد عایق بازگشت‌پذیر تخلیه‌های مخرب پذیرفته می‌باشد.
- آزمون تحمل بالا و پایین با یک موج ضربه در هر سطح که تنها زمانی که انحراف معیار Z، مطابق تعریف ارائه شده در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰، مشخص باشد پیشنهاد می‌شود. مقادیر پیشنهاد شده در آنجا، $Z = 6\%$ برای امواج ضربه کلیدزنی و $Z = 3\%$ برای امواج ضربه صاعقه، تنها و تنها زمانی می‌بایستی مورد استفاده قرار گیرد که مشخص باشد که به ترتیب $Z \leq 6\%$ و $Z \leq 3\%$ می‌باشند. در غیر اینصورت سایر روشها می‌بایستی مورد استفاده قرار گیرند.

در کلیه رویه‌های آزمونی تشریح شده فوق هیچگونه تخلیه مخربی نباید بر روی عایق بازگشت‌ناپذیر مشاهده گردد.

هیچگونه مفهوم آماری را نمی‌توان برای آزمون تحمل سه موج ضربه، که در آن هیچگونه تخلیه‌ای نمی‌بایستی صورت گیرد، ارائه نمود (P_w برابر ۱۰۰ درصد فرض می‌شود). استفاده از این آزمون به مواردی از آزمون عایق بازگشت ناپذیر محدود می‌شود که تحت آن اعمال تعداد زیادی از امواج ضربه ممکن است منجر به صدمه دیدن عایق گردد.

1. Up & down

در هنگام انتخاب یک آزمون برای تجهیزی که در آن عایق بازگشت‌ناپذیر به صورت موازی با عایق بازگشت‌پذیر قراردارد، می‌بایستی توجه نمود که در برخی از رویه‌های آزمونی، ولتاژهای بزرگتر از ولتاژ تحمل نامی ممکن است اعمال شده و تخلیه‌های مخرب متعددی نیز به وقوع بپیوندند.

۱-٤-٤- وضعیت آزمونی جایگزین[1]

مواقعیکه انجام آزمونهای تحمل در وضعیت آزمون استاندارد بسیار پر هزینه یا بسیار مشکل و یا حتی غیرممکن باشد، استانداردهای مربوط به تجهیز می‌بایستی بهترین راه حل را جهت اثبات ولتاژهای تحمل استاندارد مربوطه مشخص نمایند. یکی از راهها انجام آزمون در شرایط جایگزین می‌باشد.

یک وضعیت آزمونی جایگزین عبارت است از یک یا تعدادی شرایط آزمون متفاوت (آرایش‌های آزمون، مقادیر یا انواع ولتاژهای آزمون وغیره). بنابراین ضروری است ثابت شود که شرایط فیزیکی برای ایجاد تخلیه مخرب، نسبت به شرایط استاندارد، تغییر نکرده‌اند.

توجه: یک مثال نوعی، استفاده از منبع ولتاژ منفرد برای آزمون‌های عایق طولی به جای استفاده از آزمون ولتاژ ترکیبی می‌باشد. در این مورد، دلیل ذکر شده در بالا درباره توسعه تخلیه مخرب، یک شرط بسیار دقیق برای قبول جایگزین می‌باشد.

۱-٤-٥- آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد عایق فاز به فاز و طولی برای تجهیزات در رده I

- آزمونهای فرکانس قدرت

برای برخی از تجهیزات با $132\,kV \le U_m \le 245\,kV$، عایق فاز به فاز (یا طولی) ممکن است نیازمند ولتاژ تحمل فرکانس قدرتی بزرگتر از ولتاژ تحمل فرکانس قدرت فاز به زمین جدول (۱-۲) باشد. در برخی موارد، آزمون ترجیحاً می‌بایستی با دو منبع ولتاژ به عمل آید. یک ترمینال می‌بایستی با ولتاژ تحمل فرکانس قدرت فاز به زمین برقدار شود و دیگری با ولتاژی معادل با اختلاف بین ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت فاز به فاز (یا طولی) و فاز به زمین. ترمینال زمین می‌بایستی زمین شود.

آزمون می‌تواند به صورت زیر نیز انجام شود:

- با دو منبع ولتاژ فرکانس قدرت معادل در فاز مخالف که هر کدام از آنها یک ترمینال فاز را به اندازه نصف ولتاژ تحمل فرکانس قدرت عایق فاز به فاز (یا طولی) برقدار می‌نمایند. ترمینال زمین می‌بایستی زمین شود.
- با یک منبع ولتاژ فرکانس قدرت. ترمینال زمین می‌تواند دارای ولتاژی فرضی نسبت به زمین، مناسب جهت ممانعت از بروز تخلیه‌های مخرب به زمین یا به ترمینال زمین باشد.

- آزمونهای موج ضربه صاعقه

عایق فاز به فاز (یا طولی) ممکن است نیازمند ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه‌ای بزرگتر از ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه فاز به زمین استاندارد باشد. در چنین مواردی، آزمونهای مربوطه می‌بایستی فوراً پس از آزمونهای عایق فاز به زمین با افزایش ولتاژ بدون تغییر آرایش آزمون به عمل آیند. در هنگام ارزیابی نتایج آزمون، موج‌های ضربه‌ای که منجر به تخلیه مخرب به زمین شده‌اند در نظر گرفته نمی‌شوند.

1. Alternative test situation

در مواقعیکه تعداد تخلیه‌ها به زمین اجازه انجام آزمون را مقدور نمی‌سازد، یک آزمون ترکیبی می‌بایستی اتخاذ گردد. این آزمون ترکیبی دارای یک مؤلفه موج ضربه معادل با ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه فاز به زمین و یک مولفه فرکانس قدرت با مقدار پیک معادل با اختلاف بین ولتاژهای تحمل موج ضربه صاعقه فاز به فاز (یا طولی) و فاز به زمین در پلاریته مخالف می‌باشد. به روش دیگر، برای عایق خارجی، استانداردهای مربوط به تجهیز ممکن است مشخص نمایند که عایق فاز به زمین افزایش یابد.

۱-٤-٦- آزمونهای ولتاژ تحمل استاندارد عایق فاز به فاز و طولی برای تجهیزات در رده II

آزمون تحمل ولتاژ ترکیبی می‌بایستی جهت حصول به نیازمندیهای ذیل به عمل آید:

- آرایش آزمون می‌بایستی به شیوه مناسبی آرایش موجود در سرویس واقعی را شبیه‌سازی نماید، بویژه با توجه به تأثیر صفحه زمین.
- هر مولفه از ولتاژ آزمون می‌بایستی مقدار مشخص شده در بند ۱-۳-۹ را دارا باشد.
- ترمینال زمین می‌بایستی به زمین متصل شود.
- در آزمونهای فاز به فاز، ترمینال فاز سوم می‌بایستی برداشته و یا زمین شود.
- در آزمونهای طولی، ترمینالهای دو فاز دیگر می‌بایستی برداشته و یا اینکه زمین شوند.

آزمون می‌بایستی برای کلیه ترکیبات ممکن از ترمینالهای فاز تکرار شود، مگر اینکه عدم لزوم این کار به لحاظ تقارن الکتریکی اثبات شده باشد.

همچنین آزمون تحمل موج ضربه صاعقه عایق طولی تجهیز در رده II، تحمل موج ضربه صاعقه فاز به زمین تجهیز در وضعیت باز را نیز تایید می‌نماید.

در هنگام ارزیابی نتایج آزمون، هر تخلیه مخربی که رخ دهد منظور خواهد شد. جزئیات بیشتر در رابطه با این آزمونها در استانداردهای مربوط به تجهیزات و استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ ارائه شده‌اند.

برای کاربردهای ویژه، استانداردهای مربوط به تجهیزات ممکن است آزمونهای تحمل موج ضربه صاعقه عایق طولی در رده II را به طور مشابه به تجهیزات موردنظر برای رده I نیز توسعه دهند.

فصل ۲

دستورالعمل‌های کاربردی جهت حصول به رویه هماهنگی عایقی

هدف از این فصل ارائه دستورالعملهای کاربردی جهت حصول به هماهنگی عایقی در پست‌های فشار قوی ۶۳ الی ۴۰۰ کیلوولت ایران می‌باشد. در پایان فصل نیز یک مثال کاربردی جهت آشنایی با رویه طراحی ارائه می‌گردد.

۲-۱- کلیات

در فصل اول اصول و مبانی هماهنگی عایقی در پست‌های فشار قوی ارائه گردید. در این فصل دستورالعملهای کاربردی که دقیقاً منطبق بر رویه هماهنگی عایقی تشریح شده در فصل اول می‌باشند، دنبال می‌گردد. این دستورالعملها بر مبنای استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ بوده و جهت انواع عایق‌های فاز به زمین، فاز به فاز و طولی قابل استفاده هستند.

رویه توصیف شده در این فصل بر این موضوع تأکید دارد که در ابتدا کلیه انواع اضافه ولتاژهایی که در سیستم به وقوع می‌پیوندند، صرفنظر از محدوده حداکثر ولتاژ برای تجهیز، می‌بایستی در نظر گرفته شوند. تنها در پایان رویه هماهنگی عایقی و هنگام تعیین ولتاژهای استاندارد، این اصل که یک تنش ولتاژی خاص در شرایط سرویس واقعی بوسیله یک ولتاژ تحمل استاندارد پوشش داده می‌شود اعمال می‌گردد. همچنین در این مرحله، ارتباط بین سطوح عایقی استاندارد و حداکثر ولتاژ برای تجهیز نیز ارائه می‌شود.

۲-۲- تنش‌های ولتاژی معرف شرایط سرویس واقعی

۲-۲-۱- منشاء و دسته‌بندی تنش‌های ولتاژی

تنش‌های ولتاژی مطابق بند ۱-۲-۱۷ بر حسب پارامترهای مناسبی همچون شکل و مدت زمان تداوم آنها دسته‌بندی می‌شوند. تنش‌های ولتاژی که در چهارچوب این دسته‌بندی قرار می‌گیرند دارای چندین منشاء به شرح ذیل می‌باشند:

- ولتاژهای فرکانس قدرت دائمی: این ولتاژها حاصل بهره‌برداری از سیستم تحت شرایط بهره‌برداری معمول می‌باشند.
- اضافه ولتاژهای موقت: این اضافه ولتاژها می‌توانند بواسطه خطاها، عملیات‌های کلیدزنی همچون جداسازی بار، شرایط تشدید[1]، پدیده‌های غیرخطی (تشدید آهنی[2]) و یا ترکیبی از آنها حاصل شوند.
- اضافه ولتاژهای با شیب کند: این اضافه ولتاژها می‌توانند بواسطه خطاها، عملیات‌های کلیدزنی یا برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز خطوط هوایی حاصل شوند.
- اضافه ولتاژهای با شیب تند: این اضافه ولتاژها می‌توانند بواسطه عملیات‌های کلیدزنی، برخوردهای صاعقه یا خطاها بوجود آیند.
- اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند: این اضافه ولتاژها می‌توانند بواسطه بروز خطاها یا عملیاتهای کلیدزنی در پست‌های با عایق گازی ایجاد شوند.

1. Resonance
2. Ferroresonance

- اضافه ولتاژهای ترکیبی: این اضافه ولتاژها ممکن است هر یک از منشاءهای فوق را دارا باشند. آنها بین فازهای یک سیستم (فاز به فاز) یا بر روی فاز مشابهی از یک سیستم که از هم جدا شده‌اند (طولی) بوقوع می‌پیوندند.

در بند ۲-۲-۳ کلیه تنش‌های ولتاژی فوق، بجز اضافه ولتاژهای ترکیبی، جداگانه تشریح می‌شوند. در هنگام تشریح هر یک از این تنش‌های ولتاژی، هر جا که مناسب باشد توضیحاتی راجع به اضافه ولتاژهای ترکیبی نیز ارائه خواهد شد.

در کلیه دسته‌بندیهای تنش‌های ولتاژی، انتقالی که از طریق ترانسفورماتورها صورت می‌گیرد نیز می‌بایستی در نظر گرفته شود. اطلاعات جزئی‌تر مرتبط با این موضوع در پیوست ۲-۱ ارائه شده است.

به طور کلی، کلیه انواع اضافه ولتاژها می‌توانند در هر دو رده ولتاژی I و II وجود داشته باشد. با این حال، تجربه نشان داده است که در یک رده ولتاژی مشخص برخی اضافه ولتاژها از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. در هر حال، می‌بایستی توجه نمود که اطلاع دقیق از مشخصات تنش‌ها (مقادیر پیک و شکل موجها) تنها با مطالعات دقیقی که از مدلهای مناسبی برای سیستم و مشخصه‌های وسایل محدودکننده اضافه ولتاژها استفاده نموده‌اند، بدست می‌آید.

۲-۲-۲- مشخصه‌های وسایل محدودکننده اضافه ولتاژ

۲-۲-۲-۱- کلیات

دو نوع از وسایل حفاظتی استاندارد شده عبارتند از:

- برقگیرهای نوع مقاومت غیرخطی با فواصل هوایی سری
- برقگیرهای اکسید فلز بدون فواصل هوایی

در سالیان گذشته جرقه‌گیرها نیز به عنوان یک وسیله دیگر محدودکننده اضافه ولتاژ در نظر گرفته می‌شدند که امروزه استفاده از آنها به شدت محدود شده است. چنانچه از انواع دیگری از وسایل حفاظتی استفاده به عمل می‌آید، عملکرد حفاظتی آنها می‌بایستی توسط سازنده تشریح و تعیین شود و یا اینکه توسط آزمونهای ویژه‌ای احراز گردد.

به علت تفاوت در مشخصه‌ها و درجه حفاظتی حاصل شده بوسیله هر یک از انواع وسایل محدودکننده اضافه ولتاژها، انتخاب نوع وسیله محدودکننده اضافه ولتاژ به عوامل مختلفی همچون اهمیت تجهیزی که قرار است تحت حفاظت قرار گیرد، نتیجه بروز وقفه در سرویس‌دهی و غیره وابسته است. امروزه برقگیرهای اکسید فلز بدون فواصل هوایی عمده‌ترین وسیله حفاظتی بوده که در ادامه این فصل مشخصه‌های این قبیل وسایل حفاظتی از نقطه‌نظر هماهنگی عایقی در نظر گرفته شده و بحث روی این‌گونه وسایل متمرکز خواهد بود.

و نهایتاً اینکه وسایل حفاظتی می‌بایستی به منظور محدودنمودن دامنه‌های اضافه ولتاژهای اعمالی به تجهیز حفاظت شده بوسیله آنها به گونه‌ای طراحی و نصب شوند که دامنه اضافه ولتاژ در وسیله حفاظتی و هادی‌های متصل به آن از یک حد قابل قبول فراتر نرود. یک نکته اساسی این است که ولتاژ ایجاد شده در پایانه‌های وسیله حفاظتی در هر لحظه قبل و در حین عملکرد آن می‌بایستی در تعیین مشخصه‌های حفاظتی در نظر گرفته شود.

۲-۲-۲-۲- برق‌گیرهای نوع مقاومت غیرخطی با فواصل هوائی سری

مشخصات برق‌گیرهایی که شامل مقاومت غیرخطی سیلیکون کربید با فواصل هوائی سری هستند در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۹۹ آورده شده است. با این وجود، زمانی که برق‌گیر شامل مقاومت غیرخطی اکسید فلز با فاصله هوائی سری باشد، مشخصاتش با آنچه در IEC شماره ۱-۶۰۰۹۹ آورده شده، متفاوت خواهد بود.

نحوه انتخاب برق‌گیرها در IEC شماره ۵-۶۰۰۹۹ آورده شده است.

۲-۲-۲-۲-۱- مشخصه‌های حفاظتی مربوط به اضافه ولتاژهای با شیب تند

مشخصه‌های حفاظتی برق‌گیر به وسیله ولتاژهای زیر مشخص می‌شوند:

- ولتاژ جرقه[1] برای موج صاعقه کامل
- ولتاژ باقیمانده در جریان تخلیه نامی انتخاب شده
- پیشانی موج ولتاژ جرقه

سطح حفاظتی در برابر موج ضربه صاعقه برابر حداکثر مقادیر زیر انتخاب می‌شود:

- ولتاژ جرقه ماکزیمم با موج ۱/۲/۵۰ µs
- ولتاژ باقیمانده ماکزیمم در جریان تخلیه نامی انتخاب شده

چنین برآوردی از سطوح حفاظتی منجر به یک مقدار معرف می‌شود که در حالت کلی تقریبی قابل قبول خواهد بود.

۲-۲-۲-۲-۲- مشخصه‌های حفاظتی مربوط به اضافه ولتاژهای با شیب کند

حفاظت برق‌گیر به وسیله ولتاژ جرقه برای شکل موج‌های ضربه معین شده در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۹۹ مشخص می‌گردد.

سطح حفاظتی در برابر موج ضربه کلیدزنی برق‌گیر، ماکزیمم ولتاژ جرقه برای این شکل موج‌ها است.

اگر برق‌گیر شامل فواصل فعال[2] باشد ولتاژ نهائی برق‌گیر که هنگام تخلیه موج کلیدزنی از خود نشان می‌دهد باید از سازنده درخواست گردد، چراکه ممکن است از ولتاژ جرقه بالاتر باشد.

۲-۲-۲-۳- برقگیرهای اکسید فلز بدون فواصل هوایی

مشخصات و تعاریف مربوط به برقگیرهای اکسید فلز به همراه توصیه‌هایی جهت انتخاب و استفاده از آنها در استاندارد IEC شماره‌های ۴-۶۰۰۹۹ و ۵-۶۰۰۹۹ و همچنین گزارشی از مجموعه حاضر تحت عنوان" مشخصات فنی، عمومی و اجرایی برقگیرها در پست‌های فشارقوی" ارائه شده است.

1. Sparkover
2. Active gaps

۲-۲-۳-۱- مشخصه‌های حفاظتی مربوط به اضافه ولتاژهای با شیب تند

حفاظت یک برقگیر اکسید فلز در مقابل اضافه ولتاژهای با شیب تند بوسیله ولتاژهای زیر مشخص می‌شود:

- ولتاژ باقی‌مانده در جریان تخلیه نامی انتخاب شده
- ولتاژ باقی‌مانده در موج ضربه جریان با شیب تند[1]

برای مقاصد هماهنگی عایقی، سطح حفاظتی برقگیر در برابر موج ضربه صاعقه برابر حداکثر ولتاژ باقی‌مانده در جریان تخلیه نامی انتخاب شده در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲-۳-۲- مشخصه‌های حفاظتی مربوط به اضافه ولتاژهای با شیب کند

حفاظت برقگیر بوسیله ولتاژ باقی‌مانده در جریان‌های موج ضربه کلیدزنی معین شده‌ای مشخص می‌گردد.

برای مقاصد هماهنگی عایقی، سطح حفاظتی برقگیر در برابر موج ضربه کلیدزنی برابر حداکثر ولتاژ باقی‌مانده در جریانهای موج ضربه کلیدزنی معین شده‌ای در نظر گرفته می‌شود.

چنین برآوردی از سطوح حفاظتی منجر به یک مقدار معرف می‌شود که در حالت کلی تقریبی قابل قبول خواهد بود. جهت کسب اطلاعات بیشتر در رابطه با عملکرد حفاظتی برقگیرهای اکسید فلز می‌بایستی به استاندارد IEC شماره ۴-۶۰۰۹۹ مراجعه نمود.

۲-۲-۳- ولتاژها و اضافه‌ولتاژهای معرف

۲-۲-۳-۱- ولتاژهای فرکانس قدرت دائمی

تحت شرایط عادی بهره‌برداری، دامنه ولتاژ فرکانس قدرت می‌تواند مقدار کمی تغییر نموده و مقدار آن از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت باشد. با این حال برای مقاصد طراحی و هماهنگی عایقِی، ولتاژ فرکانس قدرت دائمی معرف می‌بایستی ثابت و معادل با حداکثر ولتاژ سیستم درنظر گرفته شود.

۲-۲-۳-۲- اضافه ولتاژهای موقت

اضافه ولتاژهای موقت بواسطه دامنه، شکل موج و مدت زمان تداوم آنها مشخص می‌شوند. کلیه این پارامترها به منشأ اضافه ولتاژها وابسته بوده و حتی ممکن است دامنه و شکل موج‌ها در مدت زمان تداوم اضافه ولتاژ تغییر نماید.

برای مقاصد هماهنگی عایقی، فرض می‌شود که اضافه ولتاژ موقت معرف دارای شکل موج ولتاژ فرکانس قدرت کوتاه مدت استاندارد (یک دقیقه‌ای) باشد. دامنه این اضافه ولتاژ می‌تواند بوسیله یک مقدار (حداکثر مقدار فرض‌شده)، یک مجموعه از مقادیر پیک یا یک توزیع آماری کامل از مقادیر پیک مشخص شود. در انتخاب مقدار اضافه ولتاژ موقت معرف می‌بایستی موارد زیر را لحاظ نمود:

- دامنه و مدت زمان تداوم اضافه ولتاژ واقعی در شرایط سرویس

1. Steep current impulse

- مشخصه تحمل دامنه / مدت زمان تداوم ولتاژ فرکانس قدرت عایق

چنانچه مشخصه آخر ناشناخته باشد، برای سادگی می‌توان دامنه اضافه ولتاژ را برابر با حداکثر اضافه ولتاژ واقعی، که مدت زمان واقعی تداوم آن کمتر از یک دقیقه است، در نظر گرفت و مدت زمان تداوم آن نیز معادل یک دقیقه فرض شود.

در موارد ویژه، ممکن است یک رویه آماری جهت توصیف اضافه ولتاژ معرف به کمک توزیع فراوانی دامنه / مدت زمان تداومی از اضافه ولتاژهای موقت مورد انتظار در شرایط سرویس واقعی به کار گرفته شود (به بند ۲-۳-۳-۱ مراجعه نمایید).

۲-۲-۳-۲-۱- خطاهای زمین

خطای فاز به زمین ممکن است منجر به اضافه ولتاژهای فاز به زمینی شود که دو فاز دیگر را تحت تأثیر قرار دهد. اضافه ولتاژهای موقت عموماً بین فازها یا عایق طولی به وقوع نمی‌پیوندد. شکل موج اضافه ولتاژ مشابه ولتاژ فرکانس قدرت می‌باشد.

دامنه اضافه ولتاژ ناشی از خطای زمین به نحوه زمین شدن نقطه نوترال سیستم و محل خطا وابسته است. در پیوست B استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ اطلاعاتی در این زمینه ارائه شده است. در آرایش‌های شبکه‌ای نرمال، دامنه اضافه ولتاژ معرف می‌بایستی معادل با مقدار حداکثر آن فرض شود. آرایش‌های شبکه‌ای غیرنرمال، همچون شبکه‌ای که به طور معمول به صورت نوترال زمین شده است اما دارای بخش‌هایی با نوترال غیر زمین شده نیز می‌باشد، می‌بایستی به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته و احتمال وقوع خطا تحت چنین شرایطی نیز در نظر گرفته شود.

مدت زمان تداوم اضافه ولتاژ مطابق مدت زمان تداوم خطا (تا بر طرف شدن آن) می‌باشد. در سیستم‌های با نوترال زمین شده این مدت زمان عموماً کمتر از یک ثانیه است. در سیستم‌های با نوترال زمین شده تشدیدی مجهز به رفع‌کننده‌های خطا این زمان عموماً کمتر از ۱۰ ثانیه بوده و در سیستم‌های بدون رفع‌کننده خطای زمین این مدت زمان می‌تواند چندین ساعت نیز به طول بیانجامد. در چنین مواردی، ممکن است لازم باشد تا ولتاژ فرکانس قدرت دائمی سیستم معادل با مقدار اضافه ولتاژ موقت در حین خطای زمین در نظر گرفته شود.

توجه:

می‌بایستی به این واقعیت توجه نمود که حداکثر ولتاژ فرکانس قدرتی که ممکن است بر روی یک فاز سالم در حین وقوع یک خطای زمین به وقوع بپیوندد نه تنها به ضریب خطای زمین بلکه به مقدار ولتاژ بهره‌برداری در لحظه خطا نیز بستگی دارد که عموماً می‌توان آن را برابر حداکثر ولتاژ سیستم فرض نمود.

۲-۲-۳-۲-۲- جداسازی بار

اضافه ولتاژهای موقت فاز به زمین و طولی ناشی از جداسازی بار به مقدار بار جداشده، آرایش سیستم پس از جداسازی و مشخصات منابع (قدرت اتصال کوتاه در محل پست، سرعت و تنظیم ولتاژ ژنراتورها و غیره) وابسته می‌باشد.

افزایش هر سه ولتاژ فاز به زمین یکسان بوده و بنابراین اضافه ولتاژهای نسبی یکسانی در فاز به فاز به وقوع می‌پیوندد. این افزایش در حالت جداسازی بار در انتهای یک خط انتقال بلند ممکن است از اهمیت ویژه‌ای (اثر فرانتی[1])برخوردار باشد و آنها اساساً تجهیزاتی را که در پست دوردست و در سمت تغذیه کلیدهای بازشده قراردارند تحت تأثیر قرار می‌دهند.

اضافه ولتاژهای موقت طولی به میزان اختلاف زاویه فاز پس از جداسازی شبکه بستگی دارند و بدترین حالت هنگامی است که یک فاز، اختلاف فازی معادل با ۱۸۰ درجه را با فاز مشابه خود دارا باشد.

توجه:

از نقطه نظر اضافه ولتاژها، می‌بایستی بین انواع آرایش‌های مختلف سیستم تمایز قائل شد. به عنوان مثال موارد زیر بدترین حالت‌هایی هستند که ممکن است در نظر گرفته شوند:

- سیستم‌هایی با خطوط نسبتاً کوتاه و مقادیر بزرگی از قدرت اتصال کوتاه در محل پست‌ها، که تحت چنین شرایطی اضافه ولتاژهای کوچکی اتفاق می‌افتد.
- سیستم‌هایی با خطوط طویل و مقادیر کوچکی از قدرت اتصال کوتاه در محل پست‌ها، که در سطوح ولتاژی فشار قوی و در مراحل اولیه احداث و بهره‌برداری از آنها متداول می‌باشد، که تحت چنین شرایطی در صورت جداسازی ناگهانی یک بار بزرگ، اضافه ولتاژهای فوق‌العاده بالایی ممکن است بوقوع بپیوندد.

در هنگام تحلیل اضافه ولتاژهای موقت، پیشنهاد می‌شود که موارد مطرح شده در ذیل مورد توجه قرار گیرند (در توضیحات زیر، یک پریونیت بر مبنای ولتاژی معادل با $\frac{\sqrt{2}U_s}{\sqrt{3}}$ است که U_s حداکثر ولتاژ سیستم است):

- در سیستم‌های کمتر توسعه‌یافته[2]، جداسازی کامل بار می‌تواند منجر به ایجاد اضافه ولتاژهای فاز به زمینی شود که دامنه آنها عموماً کمتر از ۱/۲ پریونیت می‌باشد. مدت زمان تداوم اضافه ولتاژ به عملکرد تجهیز کنترل ولتاژ سیستم وابسته بوده و ممکن است تا چند دقیقه نیز به طول بیانجامد.
- در سیستم‌های توسعه یافته[3]، پس از یک جداسازی کامل بار، اضافه ولتاژهای فاز به زمین ممکن است به میزان ۱/۵ پریونیت و یا حتی بیشتر (موقعیکه آثار فرانتی یا تشدید بوقوع بپیوندند) نیز برسد. مدت زمان تداوم این اضافه ولتاژها ممکن است در محدوده چندین ثانیه باشد.

توجه:

سیستم‌های توسعه یافته، سیستم‌هایی هستند که در آنها از عناصر جدیدتری مانند عناصر FACTS و DFACTS و رله‌های میکروپروسسوری و عددی استفاده می‌شود و این شبکه‌ها نیز بسیار گسترده و به هم پیوسته می‌باشند.

- چنانچه بارهای جداشده صرفاً بارهای استاتیک باشد، اضافه ولتاژ موقت طولی عموماً معادل با اضافه ولتاژ فاز به زمین است. در سیستم‌هایی که در قسمت جداشده دارای موتور یا ژنراتور می‌باشند، جداسازی شبکه می‌تواند منجر به یک

1. Ferranti effect
2. Moderately extended systems
3. Extended systems

اضافه ولتاژ طولی شود که شامل دو مؤلفه اضافه ولتاژ فاز به زمین بوده که در فاز مخالف هم قرار دارند. تحت چنین شرایطی حداکثر دامنه اضافه ولتاژ طولی عموماً کمتر از ۲/۵ پریونیت است (مقادیر بزرگتر از این مقدار نیز می‌تواند در موارد مورد انتظاری همچون شبکه‌های فشار قوی بسیار توسعه‌یافته مشاهده گردد).

۲-۲-۳-۲-۳- تشدید و تشدید آهنی

اضافه ولتاژهای موقت ناشی از تشدید و تشدید آهنی عموماً زمانی به وقوع می‌پیوندند که اجزای خازنی بزرگ (همچون خطوط، کابل‌ها و خطوط با جبرانسازی سری) و اجزای سلفی (همچون ترانسفورماتورها و راکتورهای موازی) که دارای مشخصه مغناطیسی غیرخطی می‌باشند، برقدار شده یا در معرض جداسازی بار قرار می‌گیرند.

دامنه اضافه ولتاژهای موقت ناشی از پدیده تشدید می‌تواند به مقادیر فوق‌العاده بزرگی برسد. از وقوع این قبیل اضافه ولتاژها می‌بایستی ممانعت بعمل آورد و یا به کمک روشهایی که در ادامه، جهت محدودکردن دامنه اضافه ولتاژهای موقت، پیشنهاد می‌شود دامنه آنها را محدود نمود. بنابراین عموماً نمی‌بایستی آنها را مبنای انتخاب ولتاژ نامی برقگیر یا طراحی عایق قرار داد، مگر اینکه روشهای اصلاحی پیشنهاد شده جوابگو نباشد.

۲-۲-۳-۲-٤- اضافه ولتاژهای طولی در حین سنکرون کردن

اضافه ولتاژهای طولی موقت معرف این پدیده براساس اضافه ولتاژ مورد انتظار در شرایط سرویس واقعی بدست می‌آید که دارای دامنه‌ای معادل با دو برابر ولتاژ بهره‌برداری فاز به زمین و مدت زمان تداومی معادل با چند ثانیه تا چند دقیقه می‌باشند.

علاوه بر این، در صورتی که سنکرون کردن مکرراً اتفاق افتد، احتمال وقوع یک خطای زمین و اضافه ولتاژ ناشی از آن نیز می‌بایستی در نظر گرفته شود. در چنین مواردی، دامنه اضافه ولتاژ معرف برابر مجموع حداکثر اضافه ولتاژ فرض‌شده خطای زمین بر روی یک پایانه و ولتاژ کار دائم در فاز مخالف و در سمت دیگر پایانه در نظر گرفته می‌شوند.

۲-۲-۳-۲-۵- ترکیب اضافه ولتاژهای موقت از منشاءهای مختلف

اضافه ولتاژهای موقت که دارای منشاءهای مختلفی می‌باشند را می‌بایستی تنها پس از بررسی دقیق احتمال وقوع همزمان آنها به صورت ترکیبی در نظر گرفت. چنین ترکیب‌هایی ممکن است منجر به مقادیر نامی بزرگتری برای برقگیرها و در نتیجه سطوح حفاظتی و عایقی بزرگتری گردد. این موضوع تنها در صورتی که احتمال وقوع همزمان قابل توجه باشد مورد بررسی فنی و اقتصادی قرار می‌گیرد.

الف ـ خطای زمین همراه با جداسازی بار

ترکیب خطای زمین با جداسازی بار زمانی می‌تواند به وقوع بپیوندد که در حین بروز یک خطا بر روی خط، ابتدا کلید سمت بار باز شده و بار جداشده منجر به یک اضافه ولتاژ جداسازی بار در سمتی که هنوز خطا پایدار است گردد. این وضعیت تا زمانی که کلید سمت تغذیه باز شود به طول می‌انجامد.

ترکیب خطای زمین با جداسازی بار علاوه بر این زمانی می‌تواند به وقوع بپیوندد که یک بار بزرگ بی‌برق شده و اضافه ولتاژ موقت ناشی از این وضعیت منجر به یک خطای زمین بر روی مابقی سیستم گردد. با این حال احتمال وقوع چنین وضعیتی، در

مواقعی که اضافه ولتاژهای ناشی از تغییربار به خودی خود کوچک بوده و خطای پس از آن تنها در شرایط وخیمی همچون آلودگی سنگین محتمل می‌باشد، ناچیز است.

علاوه بر این ترکیب موردنظر می‌تواند بواسطه بروز خطا بر روی یک خط انتقال و متعاقب آن، خطا در بازشدن کلید بوقوع بپیوندد. اگر چه که احتمال وقوع این پدیده کوچک است اما قابل صرفنظر کردن نمی‌باشد، چرا که این پدیده‌ها از لحاظ آماری مستقل نیستند. بروز این پدیده در سیستمی شامل یک ژنراتور که از طریق یک ترانسفورماتور به خط طویل دچار خطا شده متصل است، می‌تواند منجر به اضافه ولتاژ قابل توجه‌ای بر روی فازهای سالم گردد. این اضافه ولتاژ از یک اضافه ولتاژ گذرا با شیب کند و یک اضافه ولتاژ موقت با مدت تداوم متغیر، که تابع مشخصات و واکنش‌های تنظیم‌کننده‌های سرعت و ولتاژ ژنراتور می‌باشد، تشکیل شده است.

اگر وقوع چنین ترکیباتی از اضافه ولتاژهای موقت محتمل باشد پیشنهاد می‌شود جهت حصول اطمینان مطالعات سیستمی مناسبی به عمل آید. بدون انجام این مطالعات، ممکن است لازم به نظر برسد که این ترکیبات در نظر گرفته شود اما این نتیجه‌گیری به دلایل ذیل بسیار بدبینانه می‌باشد:

- ضریب خطای زمین وقتیکه به اضافه ولتاژ جداسازی بار مرتبط می‌شود تغییر می‌نماید.
- آرایش سیستم پس از تغییر بار دچار تغییر می‌شود. به عنوان مثال، ضریب خطای زمین در ترانسفورماتورهای ژنراتور با نوترال زمین شده پس از جداشدن از سیستم کوچکتر از یک است.
- برای ترانسفورماتورهای سیستم از دست دادن کل بار نامی متداول نمی‌باشد.

ب ـ سایر ترکیبات

هر چند که می‌بایستی از بروز پدیده تشدید ممانعت به عمل آید، اما ترکیبات آن با سایر عوامل می‌بایستی تنها به صورت یک نتیجه اضافی از این تشدیدها در نظر گرفته شود. با این حال در برخی سیستم‌ها ممانعت از بروز پدیده تشدید بسهولت مقدور نیست و برای چنین سیستم‌هایی ضروری است که مطالعات دقیق‌تری در این رابطه به عمل آید.

۲-۲-۳-۲-٦- محدود نمودن اضافه ولتاژهای موقت

الف ـ اضافه ولتاژهای خطای زمین

اضافه ولتاژهای خطای زمین به پارامترهای سیستم وابسته بوده و تنها با انتخاب این پارامترها در حین طراحی سیستم می‌توان آنها را کنترل نمود. عموماً دامنه این قبیل اضافه ولتاژها درسیستم‌های با نوترال زمین شده از وخامت کمتری برخوردار هستند. با این حال در مورد سیستم‌های با نوترال زمین شده یک استثناء وجود دارد و این مورد شامل سیستم‌هایی می‌شود که در برخی حالت‌های غیرمعمول یک بخش جداشده از آن می‌تواند شامل ترانسفورماتورهایی با نوترال ایزوله شده باشد. در چنین مواردی، مدت زمان اضافه ولتاژهای بزرگ ناشی از خطاهای زمین در بخش جداشده را می‌توان با زمین نمودن سریع در این نوترال‌ها کنترل نمود. این کار به کمک کلید یا برقگیرهای نوترالی که به طور ویژه‌ای جهت اتصال کوتاه کردن نوترال پس از خطا انتخاب شده‌اند، انجام می‌پذیرد.

ب ـ تغییرات شدید بار

اضافه ولتاژهای ناشی از تغییرات شدید بار را می‌توان بـه کمـک راکتورهـای مـوازی، خازنهـای سـری یـا جبـران‌کننـده‌هـای استاتیک[1] تحت کنترل قرار داد.

ج ـ تشدید و تشدید آهنی

اضافه ولتاژهای ناشی از تشدید و تشدید آهنی را می‌بایستی با تغییردادن فرکانس تشدید سیستم، به کمک تغییرآرایش سیسـتم یا مقاومت‌های میراکننده، محدود نمود.

۲-۲-۳-۲-۷- محدودنمودن اضافه ولتاژهای موقت با استفاده از برقگیرها

معمولاً انتخاب ولتاژ نامی برقگیر بر مبنای اضافه ولتاژ موقت مورد انتظار و با در نظـر گـرفتن ظرفیـت اتـلاف انـرژی برقگیـر صورت می‌گیرد. در حالت کلی، تطبیق ظرفیت نامی برقگیر با تنش اضافه ولتاژ موقت در رده ولتاژی II حـادتر اسـت، چـرا کـه در این رده ولتاژی حواشی لحاظ شده کوچکتر از رده ولتاژی I می‌باشند. معمولاً ظرفیت انرژی برقگیر تحت تنش اضافه ولتـاژ موقـت برحسب یک مشخصه اندازه ـ مدت زمان تداوم، که توسط سازنده ارائه می‌گردد، بیان می‌شود.

برای مقاصد عملی، برقگیرها نمی‌بایستی اضافه ولتاژهای موقت را محدود نمایند. یک مورد استثنا وجـود دارد کـه از برقگیرهـا به منظور محدودکردن و یا حتی ممانعت از بروز اضافه ولتاژهای موقتی که بواسطه آثار تشدید بوجود مـی‌آینـد اسـتفاده بـه عمـل می‌آید. برای چنین کاربردی، مطالعات دقیقی می‌بایستی بر روی تنش‌های حرارتی اعمال شده بر روی برقگیرها صورت گیرد تـا از اعمال بار اضافی به آنها ممانعت به عمل آید.

۲-۲-۳-۳- اضافه ولتاژهای با شیب کند

اضافه ولتاژهای با شیب کند دارای زمان پیشانی از چند ده تا چند هزار میکروثانیه و زمان پشت موجهـایی در همـین محـدوده بوده و ماهیت نوسانی دارند. منشاء این قبیل اضافه ولتاژها عموماً موارد ذیل می‌باشد:

- برقدار کردن و برقدار نمودن مجدد خط انتقال
- خطاها و برطرف نمودن خطا
- جداسازی‌های بار
- کلیدزنی جریانهای خازنی و اندوکتیو
- برخورد صاعقه به هادی‌های فاز خطوط هوایی انتقال نیرو در فواصل دوردست

تنش ولتاژی معرف بوسیله دو پارامتر زیر مشخص می‌شود:

الف ـ شکل موج ولتاژ معرف

ب ـ دامنه معرف که می‌تواند حداکثر مقدار فرضی از اضافه ولتاژ یا یک توزیع آماری از مقادیر اضافه ولتاژ باشد.

1. Static compensator

شکل موج ولتاژ معرف عبارت است از موج ضربه کلیدزنی استاندارد (زمان پیشانی ۲۵۰ میکروثانیه و زمان پشت موج معادل با ۲۵۰۰ میکروثانیه) می‌باشد. دامنه موج ولتاژ معرف برابر دامنه اضافه ولتاژ در نظر گرفته شده، مستقل از زمان پیشانی واقعی آن، می‌باشد. با این حال، در برخی سیستم‌های رده ولتاژی II، ممکن است اضافه ولتاژهایی با زمان پیشانی بسیار طولانی بوقوع بپیوندند و لذا دامنه موج ولتاژ معرف با در نظر گرفتن تأثیر مدت زمان پیشانی موج بر روی تحمل دی‌الکتریک عایق استخراج گردد.

توزیع احتمالی اضافه ولتاژها، در غیاب عملکرد برقگیر، بوسیله مقدار ۲ درصد آن، انحراف معیار آن و مقدار بریده شده[1] آن مشخص می‌گردد. توزیع احتمالی اضافه ولتاژها را می‌توان با یک توزیع نرمال (گوسی[2])، در حد فاصل مقدار ۵۰ درصد و مقدار بریده شده‌ای که فرض می‌شود بالاتر از آن هیچ مقداری وجود ندارد، تقریب زد. یک راه جایگزین دیگر برای نمایش توزیع احتمالی اضافه ولتاژها استفاده از یک توزیع وی‌بال[3] اصلاح شده است. اطلاعات جزئی‌تر در این رابطه در پیوست C استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده است.

حداکثر مقدار فرض شده برای اضافه ولتاژ معرف معادل با مقدار بریده شده اضافه ولتاژها یا معادل با سطح حفاظتی برقگیر در برابر موج ضربه کلیدزنی، هر کدام که مقدار کوچکتری دارند، درنظر گرفته می‌شود.

۲-۲-۳-۳-۱- اضافه ولتاژهای ناشی از برقدار کردن[4] و برقدار نمودن مجدد[5] خط انتقال

برقدار کردن یا برقدار نمودن مجدد خط انتقال به صورت سه فاز موجب ایجاد اضافه ولتاژهای کلیدزنی بر روی کلیه فازهای خط انتقال می‌شود. بنابراین، هر عمل کلیدزنی منجر به تولید سه اضافه ولتاژ فاز به زمین و متعاقباً سه اضافه ولتاژ فاز به فاز می‌شود.

برای سهولت در ارزیابی اضافه ولتاژها جهت مقاصد کاربردی چند روش مفید ارائه شده است. بسته به تعداد اضافه ولتاژها در هر بار عملیات کلیدزنی، دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد:

روش فاز ـ پیک[6]:

در هر بار کلیدزنی حداکثر مقدار پیک اضافه ولتاژ ایجادشده بر روی هر فاز نسبت به زمین یا بین ترکیب فازها در توزیع احتمال اضافه ولتاژ لحاظ می‌شود، یعنی اینکه هر بار کلیدزنی منجر به سه مقدار پیک برای توزیع احتمال اضافه ولتاژ معرف می‌شود. سپس این توزیع می‌بایستی برای هر یک از سه عایق موجود در هر بخش عایقی، فاز به زمین، فاز به فاز یا طولی یکسان فرض شود.

1. Truncation value
2. Gaussian
3. Weibull distribution
4. Energization
5. Re-energization
6 . Phase – peak method

روش وضعیت ـ پیک[1]:

در هر بار کلیدزنی حداکثر مقدار اضافه ولتاژهای ایجادشده در کلیه فازها نسبت به زمین یا بین کلیه فازها در تابع احتمال اضافه ولتاژ لحاظ می‌شود، یعنی اینکه هر بار کلیدزنی منجر به یک مقدار برای توزیع اضافه ولتاژ معرف می‌شود. سپس این توزیع به یک عایق از همان نوع اعمال می‌شود.

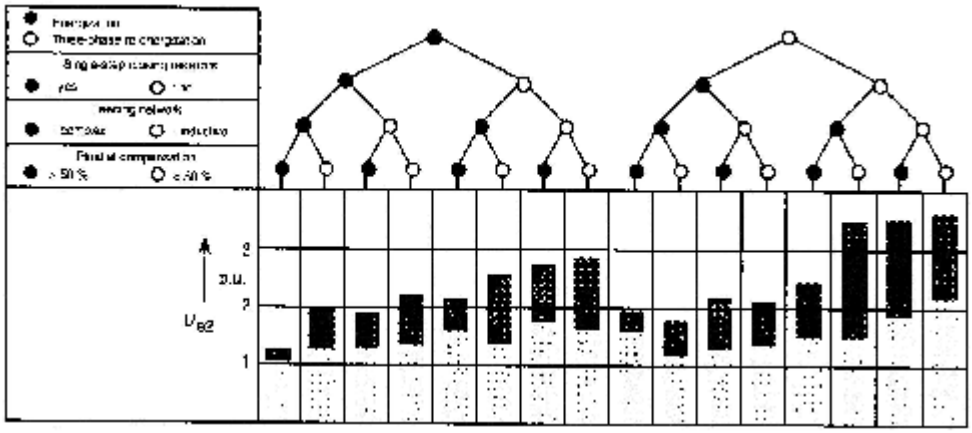
دامنه اضافه ولتاژهای ایجاد شده به جهت برقدار نمودن خط انتقال به چندین عامل همچون نوع کلید (وجود یا عدم وجود مقاومت وصل)، ماهیت و قدرت اتصال کوتاه شینه‌ای که از طریق آن خط برقدار می‌شود، ماهیت جبران‌سازی استفاده شده و طول خط برقدار شده، وضعیت انتهایی خط (مدار باز، ترانسفورماتور یا برقگیر) و غیره بستگی دارد.

برقدار نمودن مجدد به صورت سه فاز ممکن است به جهت وجود شارژهای[2] باقی‌مانده بر روی خط منجر به ایجاد اضافه ولتاژهای بزرگی با شیب کند گردد. در لحظه برقدار نمودن مجدد، دامنه اضافه ولتاژ باقی‌مانده بر روی خط (به جهت شارژ باقی‌مانده) ممکن است به بزرگی اندازه پیک اضافه ولتاژ موقت باشد. تخلیه این شارژ باقی‌مانده به تجهیزاتی که همچنان متصل به خط باقی می‌مانند، هدایت سطحی مقره‌ها، شرایط کرونای هادی‌های فاز و زمان وصل مجدد بستگی دارد.

در سیستم‌های با ولتاژ بالا که برقدار نمودن مجدد یا وصل مجدد به صورت تکفاز صورت می‌گیرد، اضافه ولتاژهای ایجادشده بزرگتر از اضافه ولتاژهایی که بواسطه برقدارنمودن خط ایجاد می‌شوند نیستند. با این حال، در مورد خطوطی که آثار تشدید یا فرانتی ممکن است قابل توجه باشد، وصل مجدد تکفاز می‌تواند منجر به اضافه ولتاژهای بزرگتری نسبت به برقدار نمودن سه فاز گردد.

توزیع احتمال کامل دامنه اضافه ولتاژها را تنها از طریق شبیه‌سازی دقیق عملیات کلیدزنی، به کمک نرم‌افزار یا تحلیل‌گرهای گذرا[3]، می‌توان بدست آورد و مقادیر نوعی همچون موارد نشان داده شده در شکل (۲-۱) را تنها می‌بایستی به عنوان یک راهنمای تقریبی در نظر گرفت. کلیه ملاحظات مربوط به اضافه ولتاژهایی است که در انتهای باز خط ظاهر می‌شوند. اضافه ولتاژهای ایجادشده در ابتدای خط ممکن است اساساً کوچکتر از آنهایی باشند که در انتهای باز خط ظاهر می‌شوند. مطابق توضیحات ارائه‌شده در پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱، شکل (۲-۱) می‌تواند برای هر دو روش فاز ـ پیک و وضعیت ـ پیک مورد استفاده قرار گیرد.

1. Case- peak method
2. Trapped charges
3. Transient analyzers



شکل ۲-۱: محدوده اضافه ولتاژهای ۲ درصد با شیب کند در انتهای باز خط به جهت برقدار نمودن یا برقدار کردن مجدد خط

الف ـ اضافه ولتاژهای فاز به زمین

یک رویه برای برآورد تابع احتمال اضافه ولتاژهای معرف فاز به زمین در پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده است. به عنوان یک راهنمای تقریبی، شکل (۲-۱) محدوده مقادیر اضافه ولتاژ ۲ درصدی (هر پریونیت بر مبنای $\frac{\sqrt{2}\times U_S}{\sqrt{3}}$) را نشان می‌دهد که ممکن است بین فاز و زمین در غیاب برقگیرها به وقوع بپیوندند. اطلاعات ارائه شده در شکل (۲-۱) بر مبنای مطالعات و نتایج میدانی متعددی می‌باشد که آثار اغلب پارامترهای تعیین‌کننده اضافه ولتاژها را لحاظ نموده است.

شکل (۲-۱) می‌بایستی به عنوان یک شاخص جهت بررسی این مسئله که آیا اضافه ولتاژها برای یک عایق مشخص می‌توانند به اندازه کافی بزرگ و مسئله‌ساز باشند یا نه مورد استفاده قرار گیرد. اگر چنین باشد، از محدوده مقادیر اضافه ولتاژ مشخص می‌شود که چه اقداماتی می‌تواند جهت محدودنمودن آنها به عمل آید. برای این منظور، مطالعات دقیق‌تری مورد نیاز خواهد بود.

مطابق پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱، به کمک مقادیر اضافه ولتاژ ۲ درصدی فاز به زمین (مقادیر U_{e2} از شکل ۲-۱)، تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژهای معرف فاز به زمین ناشی از برقدارکردن و برقدار نمودن مجدد خط انتقال را می‌توان به کمک روابط زیر نمایش داد:

- روش فاز ـ پیک

$$\begin{cases} \sigma_e = 0.25(U_{e2} - 1) \\ U_{et} = 1.25U_{e2} - 0.25 \end{cases} \qquad (۱-۲)$$

- روش وضعیت ـ پیک

$$\begin{cases} \sigma_e = 0.17(U_{e2} - 1) \\ U_{et} = 1.13U_{e2} - 0.13 \end{cases} \qquad (۲-۲)$$

که در آنها:

U_{e2}: مقدار اضافه ولتاژ ۲ درصدی فاز به زمین، بر حسب پریونیت

σ_e: انحراف معیار تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژهای فاز به زمین، برحسب پریونیت

U_{et}: مقدار بریده شده تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژهای فاز به زمین، بر حسب پریونیت می‌باشد.

ب ـ اضافه ولتاژهای فاز به فاز

جهت ارزیابی اضافه ولتاژهای فاز به فاز یک پارامتر اضافی مورد نیاز است. چنانچه عایقی به نحوه تقسیم اضافه ولتاژ فاز به فاز به دو مؤلفه فاز به زمین حساس باشد، انتخاب یک لحظه ویژه می‌بایستی با توجه به مشخصه‌های عایق صورت گیرد. دو لحظه انتخاب شده عبارتند از:

- لحظه پیک اضافه ولتاژ فاز به فاز

این لحظه، زمانی را نشان می‌دهد که اضافه ولتاژ فاز به فاز در حداکثر مقدار خود قرار دارد. لحظه فوق نشان‌دهنده حداکثر تنش برای کلیه آرایش‌های عایقی است که در آنها تحمل دی‌الکتریک بین فازها به تفکیک اجزای اضافه ولتاژ فاز به فاز حساس نمی‌باشد. مثال‌های نوعی از چنین عایق‌هایی عبارتند از عایق مابین سیم‌پیچ‌ها یا فواصل هوایی کوچک.

- اضافه ولتاژ فاز به فاز در لحظه پیک اضافه ولتاژ فاز به زمین

اگر چه این لحظه منجر به مقادیر اضافه ولتاژ کوچکتری نسبت به لحظه پیک اضافه ولتاژ فاز به فاز می‌شود، اما ممکن است برای آرایش‌های عایقی‌ای که در آنها تحمل عایقی ما بین فازها متأثر از نحوه تقسیم اضافه ولتاژ فاز به فاز است، بسیار حادتر باشد. مثال‌های نوعی از چنین عایق‌هایی عبارتند از فواصل هوایی بزرگی که در مورد آنها لحظه پیک اضافه ولتاژ فاز به زمین با پلاریته مثبت حادتر بوده یا پست‌های با عایق گازی (سه فاز در محفظه بسته) که در مورد آنها پیک اضافه ولتاژ فاز به زمین با پلاریته منفی وضعیت وخیم‌تری را ایجاد می‌کند.

مشخصه‌های آماری اضافه ولتاژهای فاز به فاز و نسبت‌های مابین مقادیر متعلق به دو لحظه اشاره شده فوق در پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده‌اند. در این پیوست نتیجه‌گیری شده که برای کلیه انواع عایق، بجز برای فواصل هوایی در رده ولتاژی II، اضافه ولتاژ معرف مابین فازها معادل با پیک اضافه ولتاژ فاز به فاز خواهد بود. برای فواصل هوایی در رده ولتاژی II و بویژه برای ولتاژهای معادل یا بزرگتر از ۵۰۰ کیلوولت، اضافه ولتاژ معرف فاز به فاز می‌بایستی از طریق پیک‌های اضافه ولتاژ فاز به زمین و فاز به فاز، به شیوه‌ای که در این پیوست ارائه شده است، تعیین شود.

مقدار اضافه ولتاژ فاز به فاز ۲ درصدی را می‌توان به صورت تقریبی از اضافه ولتاژ فاز به زمین تعیین نمود. در شکل (۲-۲) محدوده‌ای از نسبت‌های ممکن بین مقادیر ۲ درصدی اضافه ولتاژهای فاز به فاز و فاز به زمین را نشان می‌دهد. خط بالای این منحنی به اضافه ولتاژهای برقدار نمودن مجدد سریع به صورت سه فاز و خط پایین به اضافه ولتاژهای برقدار نمودن سه فاز اختصاص دارد.

مطابق پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱، به کمک مقادیر اضافه ولتاژ ۲ درصدی فاز به فاز (مقادیر U_{P2} حاصل از شکل ۲-۱ و ۲-۲)، تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژهای معرف فاز به فاز ناشی از برقدارکردن و برقدار نمودن مجدد خط انتقال را می‌توان به کمک روابط زیر نمایش داد:

- روش فاز ـ پیک

$$\begin{cases}\sigma_P = 0.25(U_{P2} - 1.73)\\ U_{Pt} = 1.25U_{P2} - 0.43\end{cases} \quad (۲-۳)$$

- روش وضعیت ـ پیک

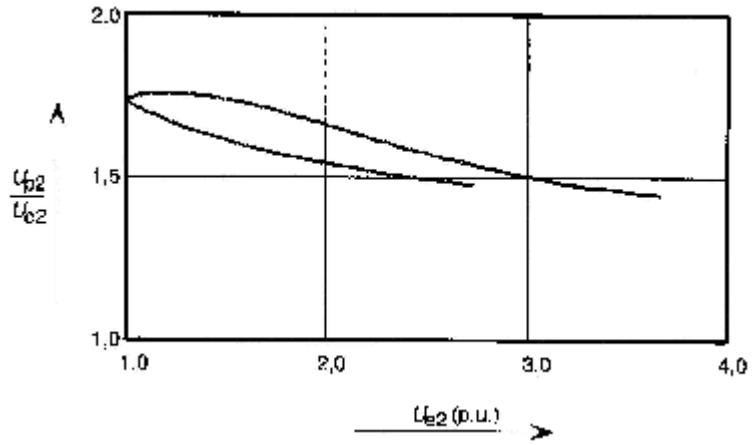
$$\begin{cases}\sigma_P = 0.17(U_{P2} - 1.73)\\ U_{Pt} = 1.14U_{P2} - 0.24\end{cases} \quad (۲-۴)$$

که در آنها:

U_{P2}: مقدار اضافه ولتاژ ۲ درصدی فاز به فاز، بر حسب پریونیت

σ_P: انحراف معیار تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژهای فاز به فاز، برحسب پریونیت

U_{Pt}: مقدار بریده شده تابع توزیع احتمال اضافه ولتاژهای فاز به فاز، بر حسب پریونیت می‌باشد.



شکل ۲-۲: نسبت بین مقادیر ۲ درصدی اضافه ولتاژهای با شیب کند فاز به فاز و فاز به زمین

ج ـ اضافه ولتاژهای طولی

اضافه ولتاژهای طولی، بین پایانه‌ها و در حین برقدار کردن یا برقدار نمودن مجدد ایجاد شده و شامل ولتاژ بهره‌برداری دائمی در یک پایانه و اضافه ولتاژ کلیدزنی در پایانه دیگر می‌باشد. در سیستم‌های سنکرون‌شده[1]، حداکثر مقدار پیک اضافه ولتاژ کلیدزنی و ولتاژ بهره‌برداری دارای پلاریته یکسانی بوده و عایق طولی تحت اضافه ولتاژ کوچکتری نسبت به عایق فاز به زمین قرار می‌گیرد.

1. Synchronized

با این حال، عایق طولی ما بین سیستم‌های غیرسنکرون می‌تواند در معرض اضافه ولتاژهای برقدار نمودن در یک پایانه و پیک ولتاژ معمول بهره‌برداری در پلاریته مخالف در پایانه دیگر قرار گیرد.

در مورد اجزا اضافه ولتاژ با شیب کند، اصولی مشابه عایق‌های فاز به زمین اعمال می‌شود.

د ـ حداکثر مقادیر فرض‌شده برای اضافه ولتاژها

اگر هیچ حفاظتی بوسیله برقگیر اعمال نشده باشد، حداکثر مقدار فرض‌شده برای اضافه ولتاژ ناشی از برقدارکردن یا برقدار نمودن مجدد عبارت است از:

- برای اضافه ولتاژ فاز به زمین برابر مقدار بریده شده U_{et}
- برای اضافه ولتاژ فاز به فاز برابر مقدار بریده شده U_{pt} یا برای عایق خارجی در رده ولتاژی II، مقدار تعیین شده مطابق پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱، که هر دو به دو المان هم‌اندازه با پلاریته‌های مخالف هم تقسیم‌بندی شده‌اند.
- برای اضافه ولتاژ طولی برابر مقدار بریده شده U_{pt} اضافه ولتاژ فاز به زمین حاصل از برقدار نمودن در یک پایانه و پیک پلاریته مخالف ولتاژ معمول بهره‌برداری در پایانه دیگر.

این تعریف از حداکثر مقدار اضافه ولتاژ طولی بر این فرض استوار است که فرکانس‌های قدرت در هر دو پایانه به گونه‌ای سنکرون شده‌اند (از طریق پیک مسیر موازی) که اضافه ولتاژهای طولی ناشی از برقدار کردن مجدد لازم نیست به صورت مجزا در نظر گرفته شود (زیرا اثر هر گونه شارژ باقی‌مانده با لحاظ نمودن این فرض در نظر گرفته می‌شود).

۲-۲-۳-۳-۲- اضافه ولتاژهای ناشی از خطا و برطرف نمودن خطا

اضافه ولتاژهایی با شیب کند در شروع و پایان خطا، بواسطه تغییر ولتاژ از ولتاژ بهره‌برداری به اضافه ولتاژ موقت در فازهای سالم و بازگشت از مقداری نزدیک به صفر به ولتاژ بهره‌برداری در فاز خطا دیده، ایجاد می‌شوند. هر دو منشاء ذکرشده تنها منجر به اضافه ولتاژهایی بین فاز و زمین می‌شوند. اضافه ولتاژهای ایجادشده بین فازها را می‌توان نادیده گرفت. به کمک روابط زیر می‌توان تخمین‌های محافظه‌کارانه‌ای از حداکثر مقدار مفروض برای اضافه ولتاژ معرف U_{et} بدست آورد:

آغاز خطا: $U_{et} = (2k-1)\times\frac{U_s\times\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ کیلوولت (۵-۲)

برطرف شدن خطا: $U_{et} = 2\times\frac{U_s\times\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ کیلوولت پیک (۶-۲)

که در آنها k ضریب خطای زمین می‌باشد.

در رده ولتاژی I، اضافه ولتاژهای ناشی از خطای زمین را می‌بایستی جهت سیستم‌هایی که نوترال ترانسفورماتورهای آنها ایزوله یا زمین شده به صورت تشدیدی می‌باشند، در نظر گرفت. در چنین سیستم‌هایی ضریب خطای زمین تقریباً معادل با $\sqrt{3}$ است. برای این سیستم‌ها هماهنگی عایقی را می‌توان بر مبنای حداکثر مقدار مفروض برای اضافه ولتاژ انجام داد و در نظر گرفتن احتمال وقوع دامنه‌های آنها موردنیاز نمی‌باشد.

در رده ولتاژی II، چنانچه اضافه ولتاژهای ناشی از برق‌دار کردن یا برقدار نمودن مجدد به مقادیر کوچکتر از ۲ پریونیت کنترل شده باشند، اضافه ولتاژهای ناشی از خطا و برطرف شدن خطا می‌بایستی به دقت مورد بررسی قرار گیرند. بویژه اگر تدابیری جهت کاهش آنها به همان اندازه صورت نگرفته باشد.

۲-۲-۳-۳-۳- اضافه ولتاژهای ناشی از جداسازی بار

اضافه ولتاژهای با شیب کند ناشی از جداسازی بار تنها در سیستم‌هایی از رده ولتاژی II که اضافه‌ولتاژهای برقدار کردن و برقدار نمودن مجدد به مقادیر کوچکتر از ۲ پریونیت محدود شده‌اند دارای اهمیت هستند. در چنین مواردی، بررسی این قبیل اضافه ولتاژها بویژه در حضور ترانسفورماتورهای ژنراتور یا خطوط انتقال طویل موردنیاز خواهد بود.

۲-۲-۳-۳-٤- اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی جریانهای اندوکتیو و خازنی

کلیدزنی جریانهای اندوکتیو یا خازنی می‌تواند منجر به اضافه ولتاژهایی شود که مستلزم بررسی باشند. به طور ویژه، عملیاتهای کلیدزنی زیر می‌بایستی مورد توجه قرار گیرند:

- قطع جریانهای راه‌اندازی موتورها
- قطع جریانهای اندوکتیو، همچون هنگام قطع جریان مغناطیس‌کننده یک ترانسفورماتور یا قطع جریان یک راکتور موازی.
- کلیدزنی و عملکرد کوره‌های قوس[1] و ترانسفورماتورهای آنها، که ممکن است برش جریان[2] را بدنبال داشته باشند.
- کلیدزنی کابل‌های فاقد بار و کلیدزنی بانک‌های خازنی
- قطع جریانها بوسیله فیوزهای فشار قوی

قوس‌های مجدد[3] کلیدها که در حین قطع جریانهای خازنی (قطع خطوط فاقد بار، کابل‌ها یا بانک‌های خازنی) بوقوع می‌پیوندند ممکن است منجر به تولید اضافه ولتاژهای خطرناکی شود و لذا استفاده از کلیدهای فاقد قوس مجدد[4] ضروری می‌باشد. علاوه بر این، در هنگام برقدار نمودن بانک‌های خازنی (بویژه بانک‌های خازنی غیرزمین‌شده)، ملاحظات ویژه‌ای جهت ارزیابی اضافه ولتاژهای فاز به فاز می‌بایستی به عمل آید (به بند ۲-۳-۴-۳ مراجعه نمایید).

۲-۲-۳-۳-۵- اضافه ولتاژهای صاعقه با شیب کند

در سیستم‌های با خطوط طویل (بزرگتر از ۱۰۰ کیلومتر)، اضافه ولتاژهای صاعقه با شیب کند از برخوردهای دوردست صاعقه به هادی‌های فاز ناشی می‌شوند (هنگامی که جریان صاعقه به اندازه‌ای کوچک است که قادر به ایجاد قوس در عایق خط نبوده و یا برخورد در فاصله‌ای رخ می‌دهد که به اندازه کافی از محل موردنظر جهت بررسی تولید اضافه ولتاژ با شیب کند دور است).

---

1. Arc furnaces
2. Current chopping
3. Restrikes
4 . Restrike free

از آنجا که زمانهای پشت موج جریانهای صاعقه به ندرت بیشتر از ۲۰۰ میکروثانیه می‌باشند، اضافه ولتاژهایی با دامنه بزرگ و زمانهای تا قله بحرانی برای عایق بوقوع نمی‌پیوندند. بنابراین، اضافه ولتاژهای صاعقه با شیب کند برای هماهنگی عایقی از اهمیت ناچیزی برخوردار بوده و معمولاً از آنها صرفنظر می‌گردد.

۲-۲-۳-۳-٦- محدود نمودن اضافه ولتاژهای با شیب کند

استفاده از مقاومت‌های وصل در کلیدها روش بسیار متداولی است که جهت محدودن نمودن اضافه ولتاژهای کلیدزنی خط به کار می‌رود. سایر روش‌ها همچون کلیدزنی سنکرون و استفاده از واریستورها موازی محفظه‌های قطع‌کننده را هم می‌توان جهت محدودنمودن اضافه ولتاژهای ناشی از برقدار نمودن خط و کلیدزنی اندوکتیو و خازنی مورد استفاده قرار داد.

ترانسفورماتورهای ولتاژ اندوکتیوی که به پایانه‌های خط متصل می‌شوند به نحو چشم‌گیری شارژ باقی‌مانده بر روی هادی‌های فاز را پس از بازنمودن خط کاهش می‌دهند. بنابراین اضافه ولتاژهای با شیب کند ناشی از وصل مجدد خط به سطحی مشابه برقدارنمودن خط محدود می‌شوند.

۲-۲-۳-۳-۷- استفاده از برقگیر جهت حفاظت درمقابل اضافه ولتاژهای با شیب کند

برقگیرهای اکسید فلز بدون فواصل هوایی را می‌توان جهت حفاظت درمقابل اضافه ولتاژهای با شیب کند، در سیستم‌های با اضافه ولتاژهای موقت متوسط، استفاده نمود. می‌بایستی به این نکته توجه نمود زمانی که برقگیرها به منظور محدود نمودن اضافه ولتاژهای با شیب کند در انتهای خطوط انتقال طویل نصب می‌شوند، اضافه ولتاژها در میانه خط ممکن است اساساً بزرگتر از مقدار ظاهرشده در انتهای خط باشند. به عنوان یک قانون کلی می‌توان فرض نمود که برقگیرهای اکسید فلز دامنه اضافه ولتاژ فاز به زمین (برحسب کیلوولت پیک) را به حدود دو برابر ولتاژ نامی برقگیر (برحسب کیلوولت مؤثر) محدود می‌نمایند. این بدان معنی است که برقگیرهای اکسید فلز برای محدودکردن اضافه ولتاژهای با شیب کند ناشی از برق‌دارنمودن و برق‌دارکردن مجدد خط و کلیدزنی جریان‌های اندوکتیو و خازنی مناسب هستند، اما در حالت کلی برای محدودکردن اضافه ولتاژهای با شیب کند ناشی از خطاهای زمین و برطرف کردن خطا، به علت آنکه انتظار می‌رود دامنه آنها بسیار کوچکتر از موارد قبلی باشد (جز در حالت وقوع خطا در خطوطی که به صورت سری جبران شده‌اند)، مناسب نمی‌باشند.

اضافه ولتاژهای ناشی از برقدارنمودن و برقدارکردن مجدد خط منجر به عبور جریانهایی از برقگیر می‌شوند که دامنه آنها کمتر از حدود ۰/۵ تا ۲ کیلوآمپر است. برای این گستره جریانی، اطلاع از اندازه دقیق جریان به جهت مشخصه فوق‌العاده غیرخطی مواد اکسیدفلز چندان مهم نخواهد بود. اندک وابستگی‌ای که برقگیرهای اکسیدفلز درخصوص زمانهای پیشانی موج جریان از خود نشان می‌دهند نیز درمورد اضافه ولتاژهای با شیب کند ناچیز بوده و می‌توان از آن صرفنظر نمود. علاوه‌براین، لحاظنمودن آثار ناشی از وجود فاصله بین برقگیرها و تجهیزات موجود داخل پست ضرورتی ندارد.

برقگیرها عموماً به صورت فاز به زمین نصب می‌شوند و می‌بایستی توجه نمود که اگر برقگیرهای اکسید فلز جهت محدودنمودن اضافه ولتاژهای با شیب کند تا حدی کوچکتر از ۷۰ درصد مقدار ۲ درصد اضافه ولتاژ فاز به زمین کنترل نشده مورد استفاده قرار گیرند، اضافه ولتاژهای فاز به فاز می‌توانند به حدود دو برابر سطح حفاظتی فاز به زمین برقگیر برسند. در این صورت، اضافه ولتاژ فاز به فاز از دو مولفه فاز به زمین با نسبت مساوی (به بند ۲-۳-۳-۳-۱ مراجعه نمایید) تشکیل خواهد شد.

حداکثر مقدار فرض شده برای اضافه ولتاژ معرف فاز به زمین معادل با سطح حفاظتی برقگیر، یعنی $U_{rp}=U_{ps}$، خواهد بود.

برای اضافه ولتاژهای فاز به فاز، حداکثر مقدار فرض شده معادل با دو برابر سطح حفاظتی برقگیر یا مقدار بریده شده اضافه ولتاژهای فاز به فازی که مطابق پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ تعیین شده است، هرکدام که کوچکتر هستند، می‌باشد. اگر اضافه ولتاژهای فاز به فاز کوچکتری موردنیاز باشند می‌بایستی برقگیرهای دیگری را مابین فازها نصب نمود.

در کلیه مواردِ استفاده از برقگیرها جهت کنترل اضافه ولتاژهای با شیب کند، می‌بایستی باتوجه به سیکل کاری مورد نیاز و نیازمندیهای اتلاف انرژی، کلاس مناسبی را از برقگیر انتخاب نمود.

۲-۲-۳-٤- اضافه ولتاژهای با شیب تند

۲-۲-۳-٤-۱- اضافه ولتاژهای صاعقه مؤثر بر پست‌ها

اضافه ولتاژهای صاعقه در پست‌ها و نرخ وقوع آنها به عوامل زیر بستگی دارد:

- عملکرد صاعقه خطوط هوایی متصل به پست
- جانمایی پست[1]، ابعاد و به طور ویژه تعداد خطوط متصل به پست
- مقدار لحظه‌ای ولتاژ بهره‌برداری در لحظه برخورد صاعقه

وخامت اضافه ولتاژهای صاعقه برای تجهیزات پست با ترکیب سه عامل ذکرشده فوق تعیین می‌شود. دامنه اضافه ولتاژها (در غیاب برقگیر) معمولاً برای مبنا قراردادن هماهنگی عایقی براساس این مقادیر بسیار بزرگ می‌باشند. با این وجود در برخی موارد، بطور ویژه درمورد پست‌هایی که توسط کابل به یکدیگر متصل هستند، حفاظت ذاتی فراهم شده بوسیله امپدانس موجی پایین کابل‌ها ممکن است دامنه اضافه ولتاژهای صاعقه را به مقادیر کوچک مناسبی کاهش دهد. اطلاعات جزئی‌تر در این رابطه در پیوست F استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده است.

برای عایق فاز به فاز و طولی، مقدار لحظه‌ای ولتاژ فرکانس قدرت در پایانه‌های مخالف می‌بایستی درنظر گرفته شود. برای عایق فاز به فاز می‌توان فرض نمود که آثار ولتاژ فرکانس قدرت و تزویج مابین هادی‌های خط هوایی یکدیگر را خنثی می‌نمایند و بنابراین پایانه مخالف را زمین شده فرض نمود. با این حال برای عایق طولی چنین موضوعی مصداق پیدا نمی‌کند و بنابراین مقدار لحظه‌ای ولتاژ فرکانس قدرت در پایانه مخالف می‌بایستی درنظر گرفته شود.

الف _ برخوردهای مستقیم صاعقه

خطای سیستم حفاظت از صاعقه موجب برخورد مستقیم صاعقه به هادی فاز خط انتقال می‌شود که در لحظه برخورد، هادی فاز هر مقداری از ولتاژ بهره‌برداری را می‌تواند دارا باشد.

اثر ولتاژ فرکانس قدرت در پایانه مخالف یک عایق طولی به صورت زیر درنظر گرفته می‌شود:

- محاسبه نرخ‌های بازگشتی صاعقه برای مقادیر لحظه‌ای مختلفی از ولتاژ بهره‌برداری.

1. Substation layout

- ارزیابی احتمال خطای عایقی برای ترکیبات مختلفی از مؤلفه‌های اضافه ولتاژ. معمولاً مجموع دو مؤلفه، پارامتری قطعی[1] می‌باشد.
- تعیین نرخ خطای عایقی براساس مجموع اضافه ولتاژ صاعقه و مقدار لحظه‌ای ولتاژ فرکانس قدرت.
- اعمال معیار عملکرد به این نرخ خطای مورد انتظار جهت تعیین مجموع مورد نیاز از دو مؤلفه.

اگر این مجموع به یک مؤلفه موج ضربه صاعقه معادل با اضافه ولتاژ صاعقه فاز به زمین معرف و یک مؤلفه فرکانس قدرت تقسیم‌بندی شود، مؤلفه ولتاژ فرکانس قدرت کوچکتر از پیک ولتاژ بهره‌برداری فاز به زمین خواهد بود. مشخص شده است که لحاظ یک ضریب ۰/۷ می‌تواند مناسب باشد. این بدان معنی است که برای خطای سیستم حفاظت از صاعقه، اضافه ولتاژ معرف طولی می‌بایستی متشکل از اضافه ولتاژ صاعقه معرف نسبت به زمین در یک پایانه و ۰/۷ پیک ولتاژ بهره‌برداری فاز به زمین در پلاریته معکوس در پایانه دیگر باشد.

ب- قوس‌های برگشتی

قوس‌های برگشتی اغلب بر روی فازی بوقوع می‌پیوندند که حداکثر مقدار لحظه‌ای از ولتاژ فرکانس قدرت را در پلاریته مخالف دارا باشد. این بدان معنی است که برای پست‌ها، اضافه ولتاژ صاعقه طولی معرف می‌بایستی معادل با مجموع ولتاژ صاعقه معرف در یک پایانه و پیک ولتاژ بهره‌برداری فاز به زمین در پلاریته معکوس در پایانه دیگر باشد.

۲-۲-۳-٤-۲- اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی‌ها و خطاها

اضافه ولتاژهای کلیدزنی با شیب تند هنگامی رخ می‌دهند که تجهیزی از طریق اتصال با طول کوتاه، عمدتاً در داخل پست‌ها، به سیستم متصل و یا از آن جدا شود. همچنین اضافه ولتاژهای با شیب تند زمانی که عایق خارجی دچار قوس می‌شود نیز امکان بروز می‌یابند. چنین پدیده‌هایی می‌توانند منجر به تنش‌های وخیمی بر روی عایق داخلی مجاورشان (همچون سیم‌پیچ‌ها) گردند.

اگرچه طبیعت این اضافه ولتاژها نوسانی است، اما جهت مقاصد هماهنگی عایقی شکل موج اضافه‌ولتاژ معرف را می‌توان متناظر با شکل موج ضربه صاعقه استاندارد (موج $۱/۲/۵۰\,\mu s$) درنظر گرفت. با این حال، توجه خاصی می‌بایستی به تجهیزات دارای سیم‌پیچ، به جهت تنشهای بزرگ اعمال شده به آنها، معطوف گردد.

حداکثر مقدار پیک اضافه ولتاژها به نوع و رفتار تجهیز کلیدزنی وابسته است. از آنجا که پیک این قبیل اضافه ولتاژها معمولاً کوچکتر از مقادیری است که توسط صاعقه ایجاد می‌شوند، اهمیت آنها به چند مورد خاص محدود می‌شود. بنابراین، از لحاظ فنی مشخص شده که دامنه اضافه ولتاژ معرف با مقادیر حداکثر زیر قابل بیان است (پریونیت برمبنای $\frac{\sqrt{2}\times U_S}{\sqrt{3}}$):

- کلیدزنی کلید بدون قوس مجدد: ۲ پریونیت
- کلیدزنی کلید با قوس مجدد: ۳ پریونیت
- کلیدزنی با سکسیونر: ۳ پریونیت

1. Decisive parameter

چنانچه احتمال وقوع همزمان اضافه ولتاژهای کلیدزنی با شیب تند بر روی بیش از یک فاز قابل توجه باشد، می‌توان فرض نمود که اضافه ولتاژهای فاز به فاز بزرگتر از اضافه ولتاژهای فاز به زمین به وقوع نمی‌پیوندند. تحت چنین شرایطی حداکثر مقادیر مفروض فوق را می‌توان جهت بررسی اهمیت چنین اضافه ولتاژهایی مورد استفاده قرارداد. چنانچه این اضافه ولتاژها تعیین‌کننده ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه عایق باشند انجام بررسی‌های دقیق‌تری پیشنهاد می‌گردد.

۲-۲-۳-٤-۳- محدود نمودن وقوع اضافه ولتاژهای با شیب تند

وقوع اضافه ولتاژهای صاعقه را می‌توان با طراحی مناسب خطوط هوایی محدود نمود. معیارهای طراحی که امکان استفاده از آنها جهت محدودکردن رخدادهای اضافه ولتاژ صاعقه مقدور می‌باشد، عبارتند از:

- برای برخورد مستقیم صاعقه به هادی‌های فاز: انتخاب تعداد و محل مناسب برای سیم‌های حفاظت از صاعقه.
- برای قوس‌های برگشتی: کاهش امپدانس شبکه زمین پایه برج‌ها یا ارتقاء عایقی.

در برخی موارد، بازوهای زمین شده یا جرقه‌گیرهایی که در نزدیکی پست‌ها نصب شده‌اند سعی در محدودنمودن دامنه اضافه ولتاژهای صاعقه ورودی به پست‌ها را دارند. با این وجود، چنین ابزارهایی منجر به افزایش احتمال قوس الکتریکی در مجاورت پست می‌شوند که نتیجه آن ایجاد امواج ضربه با شیب تند است. علاوه‌براین، توجه خاصی نیز می‌بایستی به وضعیت سیستم حفاظت از صاعقه و نحوه زمین‌شدن برج‌های مجاور پست معطوف گردد تا احتمال وقوع قوس برگشتی در این منطقه کاهش یابد.

شدت اضافه ولتاژهای با شیب تندی که بواسطه عملیاتهای کلیدزنی به وقوع می‌پیوندند را می‌توان با انتخاب مناسب تجهیزات کلیدزنی (کلیدهای فاقد قوس مجدد، با مشخصه برش جریانی کوچک، مجهز به مقاومت وصل یا بازنمودن یا کلیدزنی سنکرون و غیره) محدود نمود.

۲-۲-۳-٤-٤- استفاده از برقگیرها جهت حفاظت در مقابل اضافه ولتاژهای با شیب تند

حفاظت فراهم شده بوسیله برقگیرها درمقابل اضافه ولتاژهای با شیب تند به عوامل زیر بستگی دارد:

- دامنه و شکل موج اضافه ولتاژ
- مشخصه حفاظتی برقگیر
- دامنه و شکل موج جریان عبوری از برقگیر
- امپدانس موج و ظرفیت خازنی تجهیز تحت حفاظت
- فاصله بین برقگیر و تجهیز تحت حفاظت شامل اتصالات زمین (به شکل ۲-۳ مراجعه نمایید).
- تعداد و امپدانس موجی خطوط متصل به پست

عموماً جهت حفاظت درمقابل اضافه ولتاژهای صاعقه برقگیرهایی با جریانهای تخلیه نامی به شرح ذیل مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- برای سیستم‌های با U_m در رده ولتاژی I : ۵ کیلوآمپر یا ۱۰ کیلوآمپر
- برای سیستم‌های با U_m در رده ولتاژی II : ۱۰ کیلوآمپر یا ۲۰ کیلوآمپر

هنگامی که جریان‌های تخلیه‌شده ازطریق برقگیر بزرگتر از مقدار جریان تخلیه نامی آن باشد، می‌بایستی تحقیق نمود که ولتاژهای باقی‌مانده متناظر هنوز در محدوده قابل قبول قرار دارند.

برای تعیین انرژی جذب شده (به جهت صاعقه) توسط برقگیرهای نصب شده در پست، معمولاً کافی است فرض نمود که دامنه اضافه ولتاژ صاعقه معرف موردانتظاری که به پست می‌رسد معادل ولتاژ تحمل ۵۰ درصد موج ضربه صاعقه عایق خط هوایی متصل به پست است. با این حال، برای محاسبه کل انرژی جذب شده این احتمال را نیز می‌بایستی درنظر گرفت که یک آذرخش[1] ممکن است از چندین ضربه تشکیل شده باشد.

مشخصه‌های حفاظتی یک برقگیر تنها در محل قرارگیری آن معتبر است. افزایش فاصله بین برقگیر و تجهیز تحت حفاظت منجر به کاهش حفاظت فراهم‌شده برای این تجهیز می‌شود و درحقیقت اضافه ولتاژ اعمال شده به تجهیز با افزایش این فاصله به مقداری بالاتر از سطح حفاظتی برقگیر افزایش می‌یابد. بنابراین، به جهت لحاظنمودن آثار ناشی از وجود فاصله بین برقگیر و محل تجهیز تحت حفاظت می‌بایستی وضعیت اضافه ولتاژهای ظاهرشده در پایانه تجهیز مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه‌براین، اگر اثر ناشی از طول برقگیر در تعیین مشخصه‌های حفاظتی آن صرفنظر گردد، هنگام ارزیابی میزان محدودسازی اضافه ولتاژها توسط برقگیر این طول می‌بایستی به طول اتصالات برقگیر اضافه شود. برای برقگیرهای اکسید فلز بدون فواصل هوایی، زمان واکنش مواد تشکیل‌دهنده برقگیر می‌تواند صرفنظر شده و طول برقگیر به طول اتصالات برقگیر اضافه شود.

برای تخمین ابتدایی از اضافه ولتاژ معرف در محل تجهیز تحت حفاظت از روابط زیر می‌توان استفاده نمود. با این حال، برای حفاظت ترانسفورماتور، روابط زیر می‌بایستی با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد چراکه یک ظرفیت خازنی بزرگتر از چند صد پیکوفاراد ممکن است منجر به اضافه ولتاژهای بزرگتری گردد:

$$U_{rp} = U_{pl} + 2ST \qquad U_{pl} \geq 2ST \tag{۷-۲}$$

$$U_{rp} = U_{pl} \qquad U_{pl} < 2ST \tag{۸-۲}$$

که در آنها:

U_{rp}: دامنه اضافه ولتاژ معرف، برحسب کیلوولت

U_{pl} : سطح حفاظتی برقگیر درمقابل موج ضربه صاعقه، برحسب کیلوولت

S : شیب موج ضربه اعمالی، برحسب کیلوولت بر میکروثانیه و

T : زمان سیر موج ضربه صاعقه که از رابطه زیر تعیین می شود:

$$T = \frac{L}{C} \tag{۹-۲}$$

که در آن:

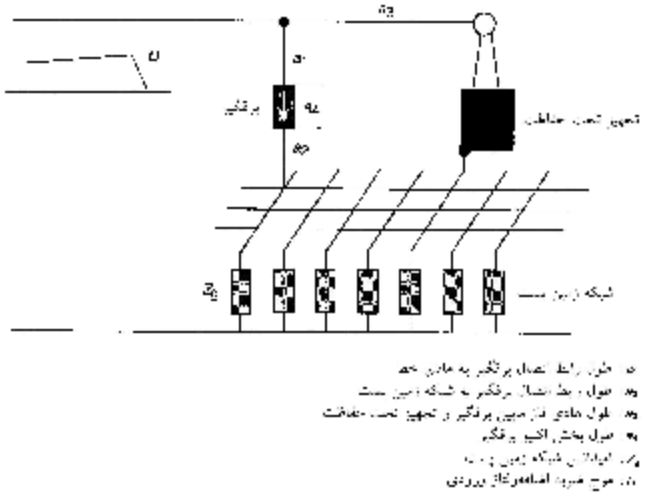
C= سرعت نور ($۳۰۰\ m/\mu s$) و L طول فواصل نشان داده شده در شکل (۲-۳) می‌باشد، یعنی:

$$L = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$$

1. Lightning flash

مقادیر شیب موج ضربه اعمالی می‌بایستی برمبنای عملکرد صاعقه خطوط هوایی متصل شده به پست و میزان نرخ خطای پذیرفته شده در داخل پست انتخاب شود. توزیع احتمال دامنه اضافه ولتاژ صاعقه معرف در پست را می‌توان به کمک محاسبات اضافه ولتاژ گذرا، با درنظرگرفتن عملکرد خطوط انتقال، رفتار موجی خطوط هوایی و پست، عملکرد عایق تجهیز و برقگیرها براساس دامنه و شکل موج اضافه ولتاژ، تعیین نمود. نحوه انجام این مطالعات در پیوست F استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده است. به عنوان یک پیشنهاد کلی، وابستگی تحمل عایقی به شکل موج اضافه ولتاژ نیز می‌بایستی در هنگام تعیین دامنه موج معرف درنظر گرفته شود. این موضوع به ویژه درمورد عایق خارجی و عایق روغن- کاغذ، که منحنی ولت- زمان آن ممکن است حاکی از نقاطی باشد که دامنه معرف اساساً از مقادیر پیک اضافه ولتاژ کوچکتر باشند، حائز اهمیت است.

برای پست‌های با عایق گاز یا برای عایق جامد این تفاوت ناچیز بوده و لذا دامنه اضافه‌ولتاژ معرف معادل مقدار پیک اضافه ولتاژ درنظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۳: دیاگرامی از یک برقگیر که جهت حفاظت یک تجهیز مورد استفاده قرار گرفته است.

جهت برآورد توزیع احتمال اضافه‌ولتاژ صاعقه معرف، روشی ساده در پیوست F استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده است. حداکثر مقدار مفروض برای دامنه اضافه‌ولتاژ صاعقه معرف برابر با مقدار بریده شده توزیع احتمال و یا یک مقدار تجربی بدست آمده از بررسی سیستم‌های موجود می‌باشد.

برای پست‌ها یا قسمت‌هایی از پست که هیچ برقگیری نصب نشده است، مهمترین پارامتر دامنه اضافه‌ولتاژ ورودی است. اما برای پست‌هایی که بوسیله برقگیرها محافظت می‌شوند، مهمترین پارامتر شیب اضافه ولتاژ ورودی و فاصله بین برقگیر و تجهیز تحت حفاظت خواهد بود.

شیب موج ضربه اضافه ولتاژ اساساً بوسیله آثار کرونا بر روی خط هوایی کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که شیب موج ورودی تنها در مواقعی که صاعقه در فاصله مشخصی از پست به خط انتقال برخورد نماید می‌تواند منجر به اضافه ولتاژی با دامنه قابل توجه گردد. ضربات متعدد دیگری که به همراه یک آذرخش به وقوع می‌پیوندند، صرفنظر از اندازه موج ضربه، شیب کوچکتری را دارا خواهند بود.

در روش ساده ارائه شده در پیوست F استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ فرض شده است که در برج مجاور پست، به علت دارابودن مقاومت پایه برجی در حد شبکه زمین پست، پدیده قوس برگشتی به وقوع نمی‌پیوندد. لذا حداقل فاصله بین پست و نقطه برخورد صاعقه‌ای که می‌تواند منجر به پدیده قوس برگشتی شود، معادل یک اسپن از خط هوایی متصل به پست خواهد بود. مطابق توضیحات ارائه شده در پیوست مذکور شیب موج معرف ضربه ورودی به پست، S_{rp}، از رابطه ذیل قابل تعیین است:

$$S_{rp} = \frac{1}{K_{co}(L_{sp} + L_t)} \qquad (۲-۱۰)$$

$$L_t = \frac{R_t}{R_{km}} \qquad (۲-۱۱)$$

که در آنها:

K_{co}: ثابت میرایی کرونا برحسب $\mu s/(kV.m)$ بوده که از جدول (۲-۱) استخراج می‌گردد.

L_{sp}: طول اسپن خط هوایی متصل به پست برحسب متر است.

L_t: طول قسمتی از خط هوایی متصل به پست بوده که نرخ قوس الکتریکی ناشی از صاعقه آن معادل با نرخ بازگشتی مورد نظر است.

R_t: نرخ بازگشتی اضافه ولتاژ پذیرفته شده برمبنای معکوس سال ($1/year$) است.

R_{km}: نرخ خروج خط هوایی در سال که جهت طراحی نخستین کیلومتر از طول خط هوایی در مجاورت پست لحاظ شده است (این پارامتر معمولاً برمبنای (۱۰۰km.year)/۱ بیان می‌شود).

درمواقعی که بیش از یک خط هوایی به پست متصل است، شیب اولیه موج ضربه ورودی که از رابطه (۲-۱۰) بدست می‌آید می‌تواند به تعداد خطوط متصل به پست تقسیم شود. با این حال، تاکید می‌شود که تعداد خطوط می‌بایستی متناظر با حداقل تعدادی از خطوط درنظر گرفته شوند که با درنظرگرفتن خروج‌های ممکن درحین طوفانهای صاعقه‌دار در مدار باقی می‌مانند.

با جاگذاری رابطه (۲-۱۰) در رابطه (۲-۷) مقدار معرف اضافه ولتاژ صاعقه از روابط ذیل قابل محاسبه خواهد بود:

$$U_{rp} = U_{pl} + \left(\frac{A}{n} \times \frac{L}{L_{sp} + L_t}\right) \qquad (۲-۱۲)$$

$$A = \frac{2}{K_{co}C} \qquad (۲-۱۳)$$

که در آنها n حداقل خطوط متصل به پست (n =۱ یا n =۲) بوده و مقدار پارامتر A در جدول (۲-۱) برای انواع آرایش‌های هادی‌های فاز خط انتقال (با فرض یک قوس تکفاز به زمین) ارائه شده است. درمورد برجهای فولادی، وقوع قوس‌های الکتریکی بر روی بیش از یک برج درحین برخورد تنها یک صاعقه، کاهش بیشتری از اضافه ولتاژهای صاعقه را بدنبال خواهد داشت. برای چنین خطوطی مقدار ضریب A براساس تجربه انتخاب می‌شود.

جدول ۲-۱: ثابت میرایی کرونا K_{co} و پارامتر A برای انواع خطوط هوایی

آرایش هادی	$K_{co}(\mu s/kV.m)$	A(kV)
یک هادی	$۱/۵ \times ۱۰^{-۶}$	۴۵۰۰
باندل دوتایی	$۱/۰ \times ۱۰^{-۶}$	۷۰۰۰
باندل سه یا چهارتایی	$۰/۶ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۰۰۰
باندل شش یا هشت‌تایی	$۰/۴ \times ۱۰^{-۶}$	۱۷۰۰۰

۲-۲-۳-۵- اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند

اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند بواسطه عملکرد سکسیونرها یا بروز خطا در داخل پست‌های با عایق گاز (به جهت شکست دی‌الکتریک سریع الکترود گازی) بوجود می‌آیند و موج ضربه تقریباً غیرمیرایی را در داخل پست منتشر می‌کنند. در نقاط خروجی از فضای گازدار پست، همچون بوشینگ، دامنه این قبیل اضافه ولتاژها به سرعت کاهش می‌یابد و زمان پیشانی آنها معمولاً به محدوده‌ای مشابه اضافه‌ولتاژهای با شیب تند افزایش می‌یابد. اضافه‌ولتاژهای با شیب بسیار تند همچنین ممکن است در ترانسفورماتورهای نوع خشک ولتاژ متوسطی که با اتصالات کوتاهی به تجهیزات سوئیچگیر متصل شده‌اند نیز بوجود بیایند.

شکل موج این نوع اضافه‌ولتاژ با افزایشی سریع تا مقدار پیک آن در زمانی کمتر از ۰/۱ میکروثانیه همراه است. برای قطع‌کننده‌ها این زمان پیشانی نوعاً با نوسانهایی که دارای فرکانس‌هایی بالاتر از یک مگاهرتز می‌باشند دنبال می‌شود. مدت زمان تداوم اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند کمتر از ۳ میلی‌ثانیه بوده، اما ممکن است چندین بار رخ دهند. دامنه اضافه ولتاژ به ساختار قطع‌کننده و آرایش پست بستگی دارد. می‌توان فرض نمود که امکان کاهش حداکثر مقادیر به ۲/۵ پریونیت قابل حصول می‌باشد. با این حال، این اضافه‌ولتاژها ممکن است منجر به اضافه ولتاژهای موضعی بزرگ در محل ترانسفورماتورهایی شوند که به طور مستقیم به شبکه متصل می‌گردند.

وقوع خطا در داخل پست‌های با عایق گازی، تجهیزات آن را (همچون ترانسفورماتور) به واسطه بروز اضافه‌ولتاژها تحت تنش قرار می‌دهد. شکل و دامنه اضافه‌ولتاژ به نوع اتصال تجهیز به پست با عایق گاز و محل خطا در داخل پست بستگی دارد. این اضافه‌ولتاژها دارای دامنه‌هایی تا ۱/۶ برابر ولتاژهای شکست بوده و شامل فرکانس‌هایی تا ۲۰ مگاهرتز در داخل پست می‌باشند.

بر روی پایانه‌های تجهیزی که با یک خط هوایی ولتاژ بالا به پست با عایق گازی متصل شده است، نوسانهای اضافه‌ولتاژها، نشان‌دهنده فرکانس‌هایی در محدوده ۰/۲ مگاهرتز تا ۲ مگاهرتز و دامنه‌هایی تا ۱/۵ برابر ولتاژ جرقه است. تحت چنین حالتی امکان حفاظت تجهیز بوسیله برقگیر مقدور خواهد بود. با این حال، فرکانس موج در اضافه ولتاژها هنوز ممکن است موجب تنشهای داخلی بزرگی در سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور به جهت تشدیدهای جزئی سیم‌پیچ‌ها[1] گردد. در این حالات می‌توان از روش‌های حفاظتی جایگزین دیگری که به کمک مطالعات دقیق مورد تایید قرار گرفته‌اند استفاده نمود. یکی از این روش‌ها می‌تواند تغییر(کاهش) فرکانس به وسیله نصب خازن اضافی باشد.

1. Part – winding resonances

در خصوص اضافه‌ولتاژهای شیب تند، اضافه‌ولتاژ معرف نمی‌تواند برآورد شود زیراکه استانداردسازی مناسبی در حال حاضر در این زمینه موجود نیست. با این حال انتظار می‌رود که اضافه ولتاژهای با شیب بسیار تند تأثیری بر روی انتخاب ولتاژهای تحمل نامی نداشته باشند.

۲-۳- ولتاژ تحمل هماهنگی

۲-۳-۱- مشخصه‌های تحمل عایقی

در کلیه موارد، هدایت ازطریق انتقال ذرات باردار[1] انجام می‌گیرد. هادی‌ها دارای تعداد زیادی از الکترونهای نسبتاً آزاد می‌باشند که با اعمال میدان الکتریکی به رانش درخواهند آمد، درحالیکه عایق‌ها تعداد الکترونهای آزاد بسیار کمتری را دارا هستند. هنگامی‌که تنش الکتریکی در یک عایق تا حدی به اندازه کافی بزرگ افزایش می‌یابد، مقاومت در طول عایق از مقداری بزرگ به مقداری کوچک (در محدوده آنچه که در هادی‌ها وجود دارد) کاهش می‌یابد. پدیده فوق، شکست نامیده می‌شود.

شکست در سه مرحله اساسی به شرح ذیل به وقوع می‌پیوندد:

- یونیزاسیون اولیه در یک نقطه یا نقاط
- ظاهرشدن یک کانال یونیزاسیون ازطریق الکترودها
- متصل‌شدن الکترودها و تبدیل‌شدن به یک تخلیه خودنگهدار[2]

عوامل متعددی تحمل دی‌الکتریک عایق را تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. این عوامل عبارتند از:

- دامنه، شکل موج، مدت زمان تداوم و پلاریته ولتاژ اعمالی
- توزیع میدان الکتریکی در عایق: میدان الکتریکی همگن یا غیرهمگن، الکترودهای مجاور با الکترود مورد نظر و پتانسیل آنها
- نوع عایق: گاز، مایع، جامد و یا ترکیب آنها. ناخالصی موجود و وجود غیرهمگنی‌های موضعی
- وضعیت فیزیکی عایق: درجه حرارت، فشار و سایر شرایط محیطی، تنش‌های مکانیکی و غیره. آثار بجای مانده از تنش‌های اعمال‌شده به عایق در گذشته نیز ممکن است دارای اهمیت باشند.
- تغییرشکل عایق تحت تنش، آثار شیمیایی، آثار سطح هادی و غیره.

شکست در هوا به شدت به آرایش الکترودی و پلاریته و شکل موج تنش ولتاژی اعمال‌شده وابسته است. علاوه‌براین، شرایط جوی نسبی نیز تحمل شکست را صرفنظر از شکل موج و پلاریته تنش اعمالی تحت تاثیر قرار می‌دهد. اطلاعاتی که ازطریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی برای تحمل شکست هوا استخراج شده‌اند به شرایط جوی استانداردی ارجاع می‌شوند که در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ آمده است:

- درجه حرارت: $۲۰^{\circ}C$

1. Charged particles
2. Self – sustaining discharge

- فشار: ۱۰۱/۳ kpa (۱۰۱۳ mbar)
- رطوبت مطلق: ۱۱ g/m^3

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی علاوه‌براین برای شرایط غیراستانداردی شامل چگالی هوای کم، رطوبت نسبی بالا، آلودگی، یخ و برف، درجه حرارت‌های بالا و وجود ذرات سوختی بعمل آمده‌اند.

برای عایقی که در فضای باز قرار گرفته است، آثار رطوبت، باران و آلودگی سطحی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشند. همچنین استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ رویه‌های آزمونی برای عایق خارجی در شرایط خشک و رطوبی مشخص نموده است. برای کلیدخانه با عایق گازی که در محفظه بسته [1] قرار می‌گیرند، اثر فشار و دمای داخلی به همراه غیرهمگنی‌های محلی و ناخالصی‌ها نقش اصلی را برعهده دارند.

در عایق مایع، ذرات ناخالصی، حبابهای ایجادشده بوسیله آثار شیمیایی و فیزیکی یا تخلیه‌های محلی می‌توانند به شدت منجر به کاهش تحمل عایقی گردند. همچنین توجه به این موضوع نیز حائز اهمیت است که میزان تخریب شیمیایی عایق[2] نیز می‌تواند در طول زمان افزایش یابد. این مسائل درمورد عایق جامد نیز مصداق دارد. در کلیه حالات فوق، تحمل الکتریکی عایق می‌تواند بوسیله تنش‌های مکانیکی نیز تحت تاثیر قرار گیرد.

علاوه‌براین فرآیند شکست دارای ماهیتی آماری بوده و این موضوع نیز می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد. به جهت خاصیت بازیافت‌پذیری عایق بازگشت‌پذیر، پاسخ آماری این نوع عایق‌ها به تنش‌ها را می‌توان با انجام آزمونهای مناسبی بدست آورد. بنابراین، عایق بازگشت‌پذیر نوعاً بوسیله ولتاژ تحمل آماری متناظر با احتمال تحمل ۹۰ درصد توصیف می‌گردد. برای عایق بازگشت‌ناپذیر، طبیعت آماری استقامت را عموماً نمی‌توان با انجام آزمایش بدست آورد و از این‌رو یک ولتاژ تحمل متناظر با احتمال تحمل ۱۰۰ درصد برای آن فرض می‌گردد.

باد بر روی طراحی عایق تأثیر می‌گذارد، بویژه درمورد خطوط هوایی که زنجیره مقره‌های آنها دارای قابلیت جابجایی می‌باشند. معمولاً اثر باد تنها در هنگام انتخاب فواصل الکترودی بر مبنای تحمل ولتاژ فرکانس قدرت و موج ضربه کلیدزنی حائز اهمیت می‌باشد.

در بندهای ۲-۳-۱-۱ تا ۲-۳-۱-۴ اطلاعاتی در زمینه عوامل مختلف مؤثر بر واکنش یک عایق در قبال تنش‌های ولتاژی اعمال‌شده به آن ارائه می‌گردد.

۲-۳-۱-۱- تأثیر پلاریته و شکل موج‌های اضافه ولتاژ

۲-۳-۱-۱-۱- تأثیر پلاریته اضافه ولتاژ

در آرایش‌های الکترودی که در کاربردهای ولتاژ بالا مشاهده می‌گردند، در اغلب موارد هادی برقدار بیشتر از هادی زمین‌شده تحت تنش قرار می‌گیرد. برای عایق هوایی، اگر الکترود تحت بیشترین تنش دارای بار الکتریکی مثبت باشد، ولتاژ شکست

1. Metal – enclosed gas – insulated switchgears
2. Chemical degradation of the insulation

الکترود کوچکتر از حالتی خواهد بود که این الکترود با بار الکتریکی منفی تحت تنش قرار می‌گیرد. دلیل این امر آن است که توسعه پدیده یونیزاسیون تحت تنش مثبت بسیار آسان‌تر از حالتی که تنش منفی اعمال می‌شود صورت می‌گیرد.

هنگامی که هر دو الکترود، به میزان تقریباً یکسانی تحت تنش قرار می‌گیرند، دو فرآیند شکست با هر دو مشخصه‌های مثبت و منفی به وقوع خواهد پیوست. اگر مشخص باشد که کدام پلاریته برای یک سیستم عایقی و آرایش الکترودی معین از وخامت بیشتری برخوردار است، طراحی برمبنای آن پلاریته خواهد بود، درغیراینصورت هر دو پلاریته می‌بایستی درنظر گرفته شوند.

۲-۳-۱-۱-۲- تأثیر شکل موج اضافه ولتاژ

برای امواج ضربه، درحالت کلی شکل موج ضربه نیز بر ولتاژ شکست تأثیر می‌گذارد. برای امواج ضربه با شیب کند، استقامت عایق خارجی بیشتر به پیشانی موج ضربه وابسته است تا پشت آن. پشت موج ضربه تنها در مواقعی که بر روی سطح عایق خارجی آلودگی قرار دارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌گردد. درمورد عایق داخلی فرض می‌شود که تحمل عایق تنها بواسطه مقدار پیک موج ضربه تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

برای عایق خارجی، نوعاً برای هر فاصله هوایی یک زمان رسیدن به پیک وجود دارد که به ازای آن، فاصله هوایی دارای حداقل ولتاژ شکست می‌باشد و به آن، زمان تا پیک بحرانی[1] اطلاق می‌گردد. معمولاً این زمان در محدوده زمانهای تا پیک اضافه ولتاژهای با شیب کند است. برای فواصل هوایی در رده ولتاژی I این ویژگی ناچیز بوده و می‌توان از آن صرفنظر نمود. برای فواصل مورد استفاده در رده ولتاژی II، برای کلیه کاربردها این حداقل ولتاژ شکست معادل با ولتاژ شکست در زمان تا پیک استاندارد ۲۵۰ میکروثانیه خواهد بود. این بدین معنی است که استفاده از ولتاژ تحمل عایقی تحت شکل موج استاندارد ۲۵۰/۲۵۰۰ μs منجر به طراحی عایقی محافظه‌کارانه جهت اضافه ولتاژهای با شیب کند خواهد شد. برای برخی سیستم‌ها که در آنها اضافه ولتاژهای با شیب کند دارای زمانهای پیشانی بزرگتر از مقدار استاندارد می‌باشند، استفاده از تحمل‌های عایقی بزرگتری در این زمانهای پیشانی می‌تواند مفیدتر باشد.

ولتاژ شکست عایق خارجی تحت تنش‌های موج ضربه صاعقه با افزایش مدت زمان تداوم پشت موج کاهش می‌یابد. برای ولتاژهای تحمل، این کاهش ناچیز بوده و ولتاژ شکست معادل با مقدار ولتاژ شکست تحت موج ضربه صاعقه استاندارد ۱/۲/۵۰ µs درنظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۱-۲- عایق فاز به فاز و طولی

تحمل دی‌الکتریک ساختارهای عایقی فاز به فاز و طولی به نسبت بین دو مؤلفه ولتاژی در دو پایانه بستگی دارد. این وابستگی برای عایق خارجی مورد استفاده در رده ولتاژی II یا پست‌های تابلویی[2] از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد.

برای عایق خارجی در رده ولتاژی II، پاسخ عایق به اضافه ولتاژهای کلیدزنی فاز به فاز به نسبت بین مؤلفه‌های تنش ولتاژی مثبت و منفی وابسته است. بنابراین آزمونهای موردنظر جهت تحقیق ولتاژ تحمل موردنیاز می‌بایستی به‌گونه‌ای طراحی شوند که این پدیده در آنها منعکس گردد.

1. Critical time to peak
2. Tree phase metal – enclosed substations

شکل موج اضافه‌ولتاژ معرف استانداردشده مطابق استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ عبارت است از یک اضافه ولتاژ ترکیبی که دارای دو مؤلفه همزمان با پلاریته معکوس هستند. مؤلفه مثبت، یک موج ضربه کلیدزنی استاندارد است و مؤلفه منفی موج ضربه‌ای با مقادیر زمان پیشانی موج و زمان پشت موج کوچکتر از مقادیر متناظر مؤلفه مثبت. بنابراین برای عایقی که با مقدار نسبی دو مؤلفه تحت تنش قرار گرفته است، دامنه اضافه‌ولتاژ واقعی می‌بایستی به مقدار معرف، با درنظرگرفتن مشخصه‌های پاسخ عایق تبدیل شود. اطلاعات جزئی‌تر در این رابطه در پیوست D استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده است.

برای ساختارهای عایقی طولی، مؤلفه‌های ولتاژی بوسیله اضافه‌ولتاژهای معرف مشخص می‌شوند (به بند ۲-۲ مراجعه نمایید).

مقادیر انحراف معیاری که در بند ۲-۳-۱-۴ ارائه خواهد شد ممکن است برای تحمل عایق فاز به فاز و طولی خارجی هم قابل استفاده باشد، به شرطی که ولتاژ جرقه ۵۰ درصد به صورت مجموع مؤلفه‌های اعمال شده به دو پایانه درنظر گرفته شود.

۲-۳-۱-۳-تأثیر شرایط جوی بر روی عایق خارجی

ولتاژهای جرقه برای فواصل هوایی به چگالی و رطوبت موجود در هوا وابسته می‌باشند. تحمل عایقی با افزایش رطوبت مطلق، تا نقطه‌ای که تقطیر[1] بر روی سطوح مقره به وقوع می‌پیوندند، افزایش می‌یابد. همچنین استقامت عایقی با کاهش چگالی هوا کاهش می‌یابد. جزئیات مربوط به تأثیر چگالی هوا و رطوبت مطلق بر روی ولتاژهای جرقه در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ برای انواع مختلف تنش‌های ولتاژی ارائه شده است.

در هنگام تعیین ولتاژ تحمل هماهنگی، می‌بایستی به این مسئله توجه نمود که شرایط نامساعد از دیدگاه تحمل عایقی (رطوبت مطلق پایین، فشار هوای کم و درجه حرارت بالا) معمولاً همزمان با هم به وقوع نمی‌پیوندند. علاوه‌براین، در یک مکان مشخص، اصلاحات قابل اعمال به تغییرات رطوبت و درجه حرارت محیط برای کلیه مقاصد کاربردی یکدیگر را خنثی می‌نمایند. بنابراین، برآورد تحمل دی‌الکتریک را معمولاً می‌توان براساس متوسط شرایط محیطی آن محل انجام داد.

چنانچه درمورد مقره‌ها احتمال می‌رود که بواسطه یخ، برف، شبنم و مه ولتاژ تحمل کاهش یابد، این آثار می‌بایستی درنظر گرفته شوند.

۲-۳-۱-٤- احتمال تخلیه مخرب عایق

در حال حاضر هیچگونه روشی جهت تعیین احتمال تخلیه مخرب یک قطعه عایق بازگشت‌ناپذیر دردسترس نیست. بنابراین، فرض می‌شود که احتمال تحمل چنین عایق‌هایی در مقدار ولتاژ تحمل تعریف شده برای آنها از صفر به ۱۰۰ درصد تغییر می‌نماید.

برای عایق بازگشت‌پذیر، توانایی عایق در تحمل تنش‌های دی‌الکتریک ایجادشده بواسطه اعمال شکل موج معینی از موج ضربه را می‌توان با روابط آماری توصیف نمود. روش‌هایی که می‌بایستی جهت تعیین منحنی احتمال تحمل دی‌الکتریک عایق دنبال گردند در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ ارائه شده‌اند. برای یک عایق مشخص و برای امواج ضربه‌ای با شکل موج معین و مقادیر پیک متفاوت U، احتمال تخلیه P را می‌توان با هر مقدار ممکن U ارتباط داده و بدین وسیله رابطه P=P(U) را استنتاج

1. Condensation

نمود. معمولاً تابع P به صورت یکنواخت با مقادیر U افزایش می‌یابد. منحنی منتجه را می‌توان توسط سه پارامتر به شرح ذیل مشخص نمود:

U_{50}: متناظر با مقداری از ولتاژ که به ازای آن به احتمال ۵۰ درصد، عایق دچار شکست شده یا قادر به تحمل خواهد بود.

Z : انحراف معیاری که نشان‌دهنده پراکندگی ولتاژهای جرقه است. این پارامتر به صورت اختلاف بین ولتاژهای متناظر با احتمال‌های شکست ۵۰ درصد و ۱۶ درصد تعریف می‌شود، یعنی اینکه:

$$Z=U_{50}-U_{16} \qquad (۱۴-۲)$$

U_0: ولتاژ بریده شده تابع احتمال بوده و معادل حداکثر ولتاژی است که به ازای مقادیر کوچکتر از آن انتظار نمی‌رود تخلیه مخربی صورت گیرد. با این حال، تعیین این مقدار از ولتاژ به کمک آزمونهای واقعی امکان‌پذیر نیست.

معمولاً احتمال P بوسیله یک تابع ریاضی (توزیع احتمال تجمعی) ارائه می‌شود که توسط پارامترهای U_{50}، Z و U_0 به طور کامل مشخص می‌شود. در تابع توزیع گوسی مرسوم، مقدار U_{50} یا میانه و انحراف معیار Z مستقیماً از رابطه (۲-۱۴) بدست می‌آیند. مقدار بریده شده تابع احتمال اغلب برای سادگی درنظر گرفته نمی‌شود.

برای استفاده از روش آماری جهت هماهنگی عایقی اضافه ولتاژهای با شیب کند، استفاده از توزیع احتمال تجمعی وی بال اصلاح‌شده‌ای که توسط رابطه (۲-۱۵) توصیف شده است نسبت به توزیع گوسی دارای مزایای متعددی می‌باشد (این مزایا در پیوست C استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ ارائه شده‌اند). رابطه (۲-۱۵) نشان‌دهنده یک تابع تجمعی وی بال می‌باشد که پارامترهای آن جهت مطابقت با تابع احتمال تجمعی گوسی در نقاط احتمال ۵۰ درصد و ۱۶ درصد و جهت برش تابع توزیع در $U_{50}-NZ$ انتخاب شده‌اند.

$$\begin{cases} P(U)=1-0.5^{(1+\frac{x}{N})\gamma} \\ x=\dfrac{U-U_{50}}{Z} \end{cases} \qquad (۱۵-۲)$$

که در آن:

X: تعداد انحراف معیارهای متناظر با مقدار U

N: تعداد انحراف معیارهای متناظر باولتاژ بریده شده U_0 می‌باشد که $P(U_0)=0$.

در یک انحراف معیار از تابع احتمال گوسی (x=-1) مقدار رابطه (۲-۱۵) برابر P(U) = ۰/۱۶ است. اگر N=۴ انتخاب شود، آنگاه مقدار دقیق γدر رابطه (۲-۱۵) می‌بایستی برابر ۴/۸۳ باشد. مقدار تقریبی ۵= γ خطای قابل توجهی را بدنبال نداشته به نحوی که توزیع وی بال مطابق رابطه (۲-۱۶) را می‌توان جهت مقاصد این گزارش مورد استفاده قرار داد:

$$P(U)=1-0.5^{(1+\frac{x}{4})^5} \qquad (۱۶-۲)$$

در شکل (۲-۴) توزیع وی بال اصلاح‌شده همراه با توزیع گوسی نشان داده شده‌اند که تطابق دو توزیع به خوبی نمایان است. شکل (۲-۵) توزیع‌های مشابهی را بر روی مقیاس احتمال گوسی نمایش می‌دهد. برای محاسبات آماری عملکرد مورد انتظار در شرایط سرویس واقعی، می‌بایستی از اطلاعات دقیقی که از سرویس واقعی یا آزمونهای آزمایشگاهی حاصل آمده‌اند استفاده شود.

در صورت عدم دسترسی به چنین اطلاعاتی، مقادیر ذیل که بواسطه نتایج آزمونهای متعدد بدست آمده‌اند، جهت انجـام محاسـبات آماری پیشنهاد می‌شوند:

$Z=0.03\ U_{50}$ (kV) : برای امواج ضربه صاعقه

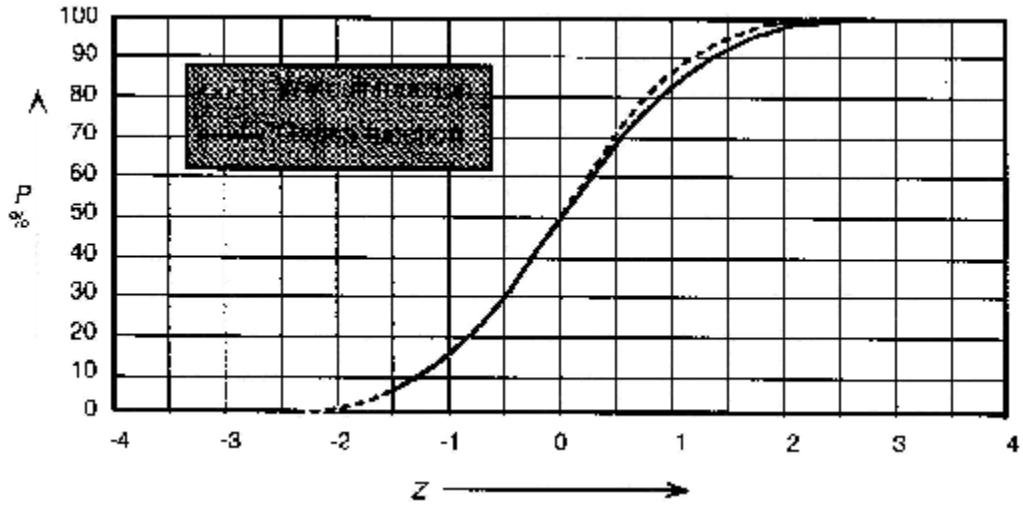
$Z=0.06\ U_{50}$ (kV) : برای امواج ضربه کلیدزنی

تأثیر شرایط جوی در هنگام استخراج مقادیر فوق لحاظ شده‌اند.

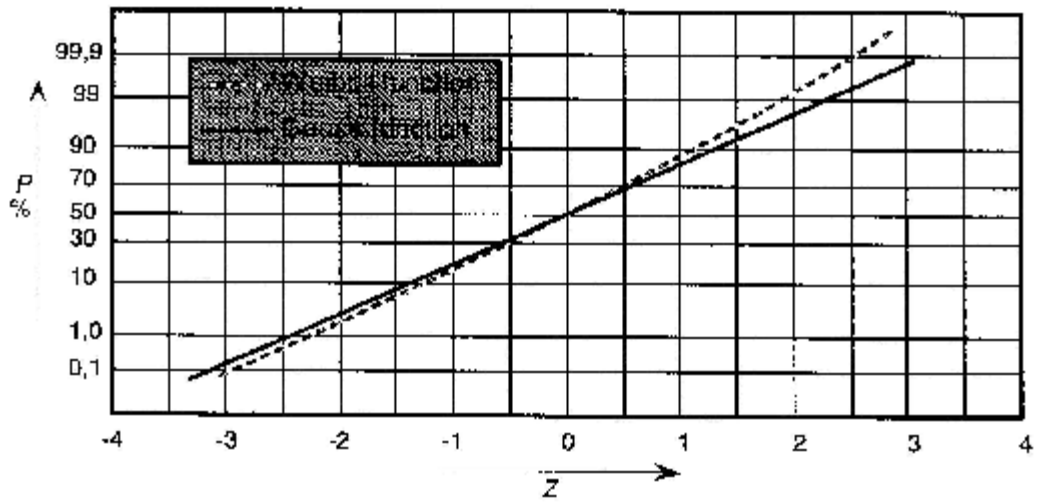
مطابق استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱، پارامتر U_{10} (که از رابطه ۲-۱۵ بدست می‌آید) متناظر با احتمال تحمـل ۹۰ درصـدی می‌باشد که توسط رابطه زیر با تابع توزیع احتمال تحمل مرتبط می‌شود:

$$U_{10} = U_{50} - 1.3\ Z \qquad (۱۷-۲)$$

در پیوست C استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ اطلاعات جزئی‌تر و فرمول‌های آماری آورده شده‌اند. همچنین پیوسـت G ایـن استاندارد نیز حاوی اطلاعاتی جهت تعیین تحمل شکست عایق هوا تحت انواع تنش‌های ولتاژی مختلف می‌باشد.



شکل ۲-٤: مقایسه توابع احتمال توزیع گوسی و توزیع وی بال براساس مقیاس خطی



شکل ۲-۵: مقایسه توابع احتمال توزیع گوسی و توزیع وی بال براساس مقیاس گوسی

۲-۳-۲- معیار عملکرد

معیار عملکرد موردانتظار از عایق در شرایط سرویس واقعی میزان نرخ خطای قابل قبول (R_a)می‌باشد. عملکرد عایقی در یک سیستم براساس تعداد خطاهای عایقی در حین سرویس مورد قضاوت قرار می‌گیرد. بروز خطا در قسمتهای مختلف شبکه می‌تواند نتایج متفاوتی را بدنبال داشته باشد. به عنوان مثال، در یک سیستم حلقوی، بروز یک خطای دائمی بر روی خط یا وصل مجدد ناموفق به جهت امواج ضربه با شیب کند به اندازه بروز خطا بر روی شینه یا خطاهای مشابه در یک شبکه شعاعی وخیم نخواهد بود. بنابراین، نرخ خطای قابل قبول در یک شبکه از یک نقطه به نقطه دیگر بسته به نتایج خطا در هر یک از این نقاط متغیر خواهد بود.

مقادیر نوعی نرخ خطای قابل قبول را می‌توان ازطریق آمارگیری خطای سیستم‌های موجود و همچنین پروژه‌هایی که بر مبنای چنین آمارهایی طراحی شده‌اند بدست آورد. برای تجهیزات، نرخ خطای قابل قبول(R_a) به جهت اضافه ولتاژها بسته به مدت زمان تعمیر آنها بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۴ خطا در هر سال می‌باشد. برای خطوط هوایی، نرخ خطای قابل قبول به جهت صاعقه در محدوده ۰/۱ تا ۲۰ خطا در هر سال و در هر ۱۰۰ کیلومتر از طول خط متغیر است (مقادیر بزرگ نرخ خطا به خطوط توزیع مربوط می‌باشند). مقادیر متناظر برای نرخ خطای قابل قبول به جهت اضافه ولتاژهای کلیدزنی در محدوده یک تا ۱۰ بار خطا در هر ۱۰۰ بار کلیدزنی قرار می‌گیرند. مقادیر قابل قبول برای نرخ خطا عموماً در محدوده‌های ذکرشده فوق قرار دارند.

۲-۳-۳- رویه‌های هماهنگی عایقی

تعیین ولتاژهای تحمل هماهنگی شامل تعیین حداقل مقادیر ولتاژهای تحملی از عایق است که معیار عملکرد را هنگامی که عایق تحت شرایط سرویس واقعی و درمعرض اضافه ولتاژهای معرف قرار می‌گیرد برآورده نمایند.

دو روش برای هماهنگی عایقی جهت اضافه ولتاژهای گذرا مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از: روش غیر آماری (قطعی)[1] و روش آماری[2]. با این حال بسیاری از روش‌های کاربردی ترکیبی از این دو روش می‌باشند. به عنوان مثال، برخی از ضرایب مورد استفاده در روش غیرآماری بواسطه ملاحظات آماری استخراج شده‌اند و برخی تغییرات آماری در روش‌های آماری حذف شده‌اند.

- **روش غیر آماری**

روش غیر آماری زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که هیچگونه اطلاعات آماری از نرخ خطای تجهیز در شرایط سرویس واقعی موجود نباشد.

درمورد این روش هماهنگی عایقی موارد زیر می‌بایستی در نظر گرفته شود:

- وقتی که عایق بوسیله ولتاژ تحمل فرض شده آن مشخص می‌شود ($P_w = ٪۱۰۰$)، مقدار این ولتاژ معادل با ولتاژ تحمل هماهنگی در نظر گرفته می‌شود. تحت چنین شرایطی، ولتاژ تحمل هماهنگی از حاصلضرب اضافه ولتاژ معرف

1. Deterministic method
2. Statistical method

(یک حداکثر مقدار مفروض) در ضریب هماهنگی (K_C) بدست می‌آید. ضریب K_C جهت لحاظنمودن عدم قطعیت فرضیات در برآورد این دو مقدار (حداکثر مقدار مفروض برای اضافه ولتاژ معرف و ولتاژ تحمل فرض شده برای عایق) درنظر گرفته می‌شود.

- وقتی که عایق توسط ولتاژ تحمل آماری آن مشخص می‌شود ($P_w = ٪۹۰$)، همچون عایق خارجی، مقدار ضریب K_C می‌بایستی علاوه بر مورد فوق، اختلاف مابین این ولتاژ و ولتاژ تحمل فرض‌شده را نیز لحاظ نماید.

در صورت استفاده از روش هماهنگی عایقی غیرآماری، هیچگونه ارجاعی به نرخ خطای محتمل تجهیز در شرایط سرویس واقعی مقدور نخواهد بود.

کاربردهای نمونه عبارتند از:

- هماهنگی عایقی عایق‌های داخلی در مقابل اضافه ولتاژهای با شیب کند هنگامی‌که عایق بوسیله برقگیرها محافظت می‌شود.
- تجهیزات متصل به خطوط هوایی که توسط برقگیر درمقابل اضافه ولتاژهای صاعقه محافظت شده‌اند، در مواردی که تجربیات مربوط به تجهیز مشابه دردسترس باشد.
- **روش آماری**

روش آماری برمبنای فراوانی وقوع یک منشاء مشخص، توزیع احتمال اضافه ولتاژهای متعلق به این منشاء و احتمال خطای عایقی استوار است. به عبارت دیگر، احتمال بروز خطا را می‌توان با ترکیب همزمان محاسبات احتمال اضافه ولتاژ و خطای عایقی در کنار یکدیگر و با درنظرگرفتن طبیعت آماری اضافه ولتاژها و تخلیه و به کمک رویه‌های مناسبی، همچون استفاده از روش مونت کارلو[1]، تعیین نمود.

با تکرار محاسبات برای انواع عایق‌ها و حالت‌های مختلف شبکه می‌توان نرخ خروج کلی سیستم را به جهت خطاهای عایقی بدست آورد.

بنابراین، بکارگیری روش هماهنگی عایقی آماری امکان برآورد فراوانی خطا را به صورت تابعی از عوامل انتخاب شده جهت طراحی سیستم فراهم می‌نماید. بطورکلی، حتی امکان بهینه‌سازی عایقی، درصورتی که هزینه‌های قطعی را بتوان به انواع مختلف خطاها مرتبط نمود، فراهم می‌گردد. درعمل، انجام این کار به جهت مشکلات ارزیابی نتایج حاصل از وقوع خطاهای عایقی در شرایط کاری مختلف شبکه و همچنین عدم قطعیت در برآورد ارزش انرژی تحویل داده نشده بسیار مشکل خواهد بود. لذا عموماً بهتر است که سیستم عایقی را به جای بهینه‌نمودن، قدری محافظه‌کارانه طراحی نمود. نتیجه آنکه طراحی و انتخاب سیستم عایقی برمبنای مقایسه مقادیر ریسک متناظر با انواع طرح‌های جایگزین انجام می‌گیرد.

۲-۳-۳-۱- رویه‌های هماهنگی عایقی برای ولتاژ و اضافه ولتاژ موقت فرکانس قدرت

ولتاژ تحمل هماهنگی برای ولتاژ فرکانس قدرت دائمی معادل حداکثر ولتاژ سیستم برای عایق‌های فاز به فاز و برابر این مقدار تقسیم بر $\sqrt{3}$ برای عایق فاز به زمین و برای کل طول عمر سرویس پیش‌بینی‌شده می‌باشد.

1. Monte carlo

در روش غیرآماری، ولتاژ تحمل کوتاه‌مدت هماهنگی معادل اضافه ولتاژ موقت معرف می‌باشد. در صورت استفاده از روش آماری و درصورتی که اضافه ولتاژ موقت معرف برحسب مشخصه فراوانی توزیع دامنه- مدت زمان مشخص‌شده باشد، عایقی که قادر به برآوردن معیار عملکرد است می‌بایستی انتخاب شده و اندازه ولتاژ تحمل هماهنگی می‌بایستی معادل با مقدار متناظری از ولتاژ باشد که بر روی مشخصه تحمل دامنه- مدت زمان دارای مدت زمان تداوم یک دقیقه‌ای می‌باشد.

۲-۳-۳-۱-۱- آلودگی

درصورت وجود آلودگی، واکنش عایق خارجی به ولتاژهای فرکانس قدرت مهم بوده و ممکن است تعیین‌کننده طراحی عایق خارجی باشد. جرقه زمانی به وقوع می‌پیوندد که سطح عایق حاوی آلودگی بوده و بوسیله باران ملایم، برف، شبنم یا مه (بدون هرگونه اثر شویندگی) مرطوب شده باشد.

در استاندارد IEC، چهار سطح کیفی از آلودگی مشخص شده و برای هریک از این سطوح آلودگی توضیحات مرتبط با مناطق نمونه متناظر با آنها ارائه شده است. مقره‌ها می‌بایستی حداکثر ولتاژ سیستم را در شرایط آلودگی به طور دائم با یک ریسک جرقه قابل قبول تحمل نمایند. ولتاژهای تحمل هماهنگی معادل با اضافه ولتاژهای معرف درنظر گرفته می‌شوند و معیار عملکرد انتخاب معقولی از تحمل میزان شدت آلودگی نسبت به شرایط سایت خواهد بود. بنابراین، ولتاژ تحمل هماهنگی فرکانس قدرت بلندمدت می‌بایستی مطابق با حداکثر ولتاژ سیستم برای مقره‌های فاز به فاز و این مقدار تقسیم بر $\sqrt{3}$ برای مقره‌های فاز به زمین باشد.

برای ارزیابی کمی سطح آلودگی سایت می‌توان از اطلاعات ارائه شده در استاندارد IEC شماره ۶۰۸۱۵ استفاده نمود. انواع مختلفی از مقره و حتی جهات مختلف یک نوع مقره ممکن است تحت شرایط محیطی یکسان با نرخ‌های متفاوتی از آلودگی پوشیده شده باشند. علاوه‌براین، برای یک میزان آلودگی مشابه، مقره ممکن است مشخصه جرقه متفاوتی را به نمایش بگذارند. همچنین، بسته به نوع آلودگی برخی شکل‌های مقره می‌توانند نسبت به سایر مقره‌ها مؤثرتر واقع شوند. بنابراین، برای اهداف هماهنگی عایقی، اندازه‌گیری شدت آلودگی می‌بایستی برای مقره‌ای که قرار است مورد استفاده قرار گیرد تعیین شود.

درمورد سایت‌هایی که درجه بالایی از آلودگی را دارا هستند از گریس‌زدن یا شستشوی سطوح عایقی می‌توان استفاده نمود.

۲-۳-۳-۲- رویه‌های هماهنگی عایقی برای اضافه ولتاژهای با شیب کند

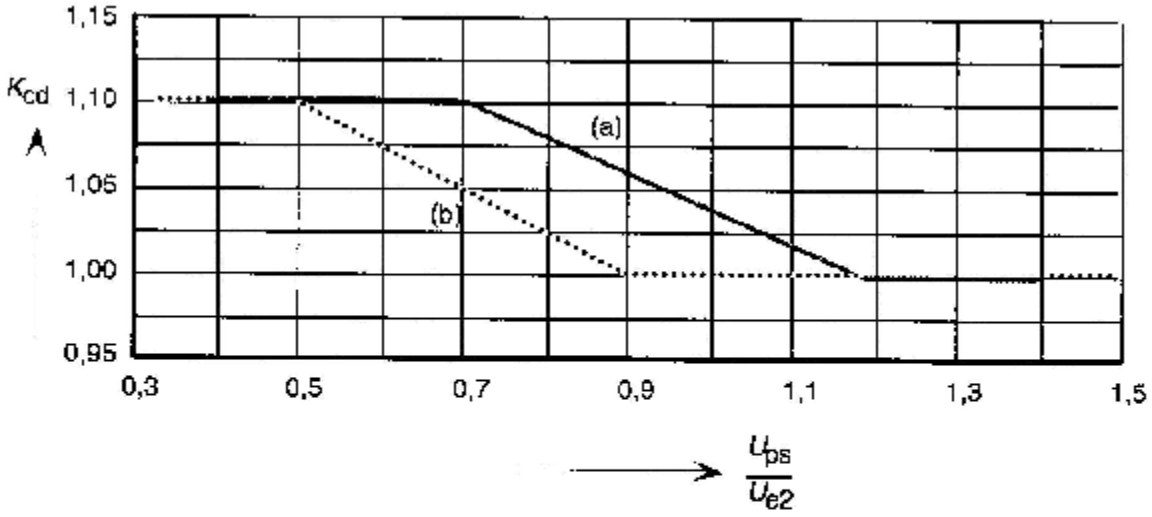
۲-۳-۳-۲-۱- روش غیرآماری

در روش غیرآماری ابتدا حداکثر ولتاژی که تجهیز را تحت تنش قرار می‌دهد تعیین شده و سپس حداقل تحمل دی‌الکتریک این تجهیز با حاشیه‌ای که عدم قطعیت‌های ممکن را در برآورد این مقادیر پوشش دهد، انتخاب می‌شود. ولتاژ تحمل هماهنگی با ضرب حداکثر مقدار فرض‌شده اضافه ولتاژ معرف مربوطه در ضریب هماهنگی غیر آماری (K_{cd}) مشخص می‌گردد.

برای تجهیزاتی که بوسیله برقگیرها حفاظت می‌شوند، حداکثر مقدار فرض‌شده برای اضافه‌ولتاژ، معادل با سطح حفاظتی برقگیر در برابر امواج ضربه کلیدزنی (U_{ps}) می‌باشد. با این حال، تحت چنین شرایطی، انحراف شدیدی ممکن است در توزیع آماری اضافه ولتاژها به وقوع بپیوندد. این انحراف سطح حفاظتی کوچکتر را در مقایسه با دامنه‌های اضافه‌ولتاژهای با شیب کند مورد انتظار بیشتر تحت تأثیر قرار داده به نحوی که تغییرات کوچک تحمل عایقی (یا در مقدار سطح حفاظتی برقگیر) می‌تواند

دارای تأثیر بالایی بر روی احتمال خطا داشته باشد. برای پوشش این پدیده، پیشنهاد می‌شود که برآورد ضریب هماهنگی غیرآماری بر مبنای نسبت سطح حفاظتی برقگیر در مقابل امواج ضربه (U_{ps}) به مقدار ۲ درصدی اضافه ولتاژهای مورد انتظار فاز به زمین (U_{e2}) صورت گیرد. شکل (۲-۶) این وابستگی را نشان می‌دهد.

برای تجهیزاتی که بوسیله برقگیرها حفاظت نشده‌اند، حداکثر مقدار فرض شده اضافه ولتاژ، مطابق بند ۲-۲-۳-۳-۱، معادل با مقدار بریده شده اضافه ولتاژ U_{et} یا U_{pt} می‌باشد و ضریب هماهنگی غیر آماری برابر یک فرض می‌شود.



a) فاکتور هماهنگی اعمالی به سطح حفاظتی برقگیر جهت بدست آوردن ولتاژ تحمل فاز به زمین (همچنین قابل اعمال به عایق طولی).

b) فاکتور هماهنگی اعمالی به دوبرابر سطح حفاظتی برقگیر جهت بدست آوردن ولتاژ تحمل فاز به فاز.

شکل۲-٦: ارزیابی ضریب هماهنگی غیرآماری K_{cd}

۲-۳-۳-۲-۲- روش آماری (و ریسک خطای متناظر)

برای انجام روش آماری ابتدا ضروری است که، مطابق توضیحات بند ۲-۳-۳-۲، یک ریسک قابل قبول از خطا بر اساس تحلیل فنی و اقتصادی و تجارب بهره‌برداری در نظر گرفته شود.

ریسک خطا در واقع احتمال خطای عایقی را مشخص می‌نماید. نرخ خطا بر حسب متوسط فراوانی مورد انتظار از خطاهای عایقی (به عنوان مثال تعداد خطاها در سال) که به جهت تنش‌های اضافه ولتاژ ایجاد شده‌اند بیان می‌شود. برای ارزیابی این نرخ، پدیده‌هایی که منجر به بروز این قبیل اضافه ولتاژها می‌شوند و همچنین تعداد آنها می‌بایستی مورد مطالعه قرار گیرند. خوشبختانه، تعداد انواع پدیده‌هایی که در طراحی عایقی نقش قابل توجهی دارند اندک بوده به نحوی که می‌توان روش آماری را به صورت عملی مورد استفاده قرارداد.

روش آماری که در این گزارش مورد استفاده قرار می‌گیرد بر مبنای مقدار پیک امواج ضربه استوار است. توزیع فراوانی اضافه‌ولتاژهای بین فاز و زمین برای یک پدیده مشخص براساس فرضیات به شرح ذیل تعیین می‌شود:

- از پیک‌های دیگری که در اضافه ولتاژ به وقوع می‌پیوندد و مقدار آنها از حداکثر پیک اضافه ولتاژ کوچکتر است صرفنظر می‌گردد.
- شکل موج حداکثر پیک اضافه ولتاژ مشابه شکل موج ضربه کلیدزنی استاندارد درنظر گرفته می‌شود.
- حداکثر پیک‌های اضافه ولتاژ درنظر گرفته شده دارای پلاریته یکسانی بوده و اغلب برای عایق شرایط حادتری را پدید می‌آورند.

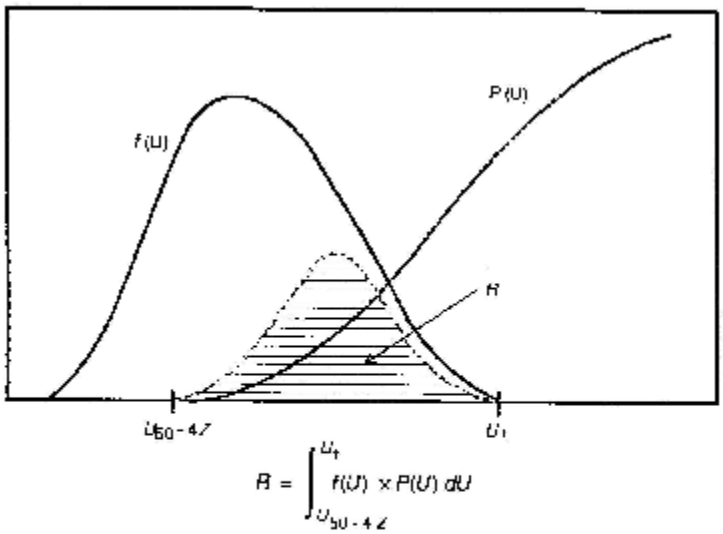
هرگاه توزیع فراوانی اضافه ولتاژها و توزیع احتمال شکست عایقی مربوط به آن مشخص شوند، ریسک خطای عایقی بین فاز و زمین از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود.

$$R = \int_0^{\infty} f(U) \times P(U) dU \qquad (۱۸-۲)$$

که در آن:

f(U): تابع چگالی احتمال اضافه ولتاژها

P(U): احتمال وقوع جرقه در عایق به ازای اعمال موج ضربه‌ای با مقدار U می‌باشد (به شکل ۲-۷ مراجعه نمایید).



شکل ۲-۷: ارزیابی نرخ خطا در روش آماری هماهنگی عایقی امواج ضربه با شیب کند

اگر بیش از یک پیک مستقل به وقوع بپیوندد، ریسک کل برای یک فاز را می‌توان با درنظرگرفتن نرخ‌های خطای کلیه پیک‌ها محاسبه نمود. به عنوان مثال، اگر یک موج ضربه کلیدزنی بر روی یک فاز مشخص شامل سه مقدار پیک باشد که به ریسک‌های خطای R_1، R_2 و R_3 منجر شوند، ریسک خطای فاز به زمین برای عملیات کلیدزنی عبارت است از:

$$R=1-(1-R_1)(1-R_2)(1-R_3) \qquad (۱۹-۲)$$

اگر توزیع اضافه ولتاژ برمبنای روش فاز- پیک باشد و عایق‌ها در سه فاز یکسان باشند، ریسک کل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R_{total}=1-(1-R)^3 \qquad (۲۰-۲)$$

و اگر روش وضعیت- پیک مورد استفاده قرار گیرد، ریسک کل عبارت است از:

$$R_{total}=R$$

توجه:

اگر پلاریته مشخصی از اضافه ولتاژ برای تحمل عایقی وخیم‌تر باشد، می‌توان مقادیر ریسک را بر عدد ۲ تقسیم نمود.

اگر فاصله بین فازها و زمین به اندازه‌ای باشد که جرقه به زمین و بین فازها براساس پدیده فیزیکی مشابهی رخ ندهد، ریسک خطا برای عایق‌های فاز به فاز و فاز به زمین را می‌توان به طور جداگانه با روش ساده فوق محاسبه کرد. این موضوع زمانی معتبر است که عایق‌های فاز به زمین و فاز به فاز دارای الکترود مشترکی نباشند. اگر آنها دارای الکترود مشترکی باشند نرخ خطا معمولاً کوچکتر از حالتی خواهد بود که بصورت جداگانه محاسبه می‌شود.

جهت استفاده از روش آماری برای تعداد زیادی عایق موازی یکسان می‌توان از اطلاعات ارائه شده در پیوست C استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ استفاده نمود.

- **روش آماری ساده جهت اضافه ولتاژهای با شیب کند**

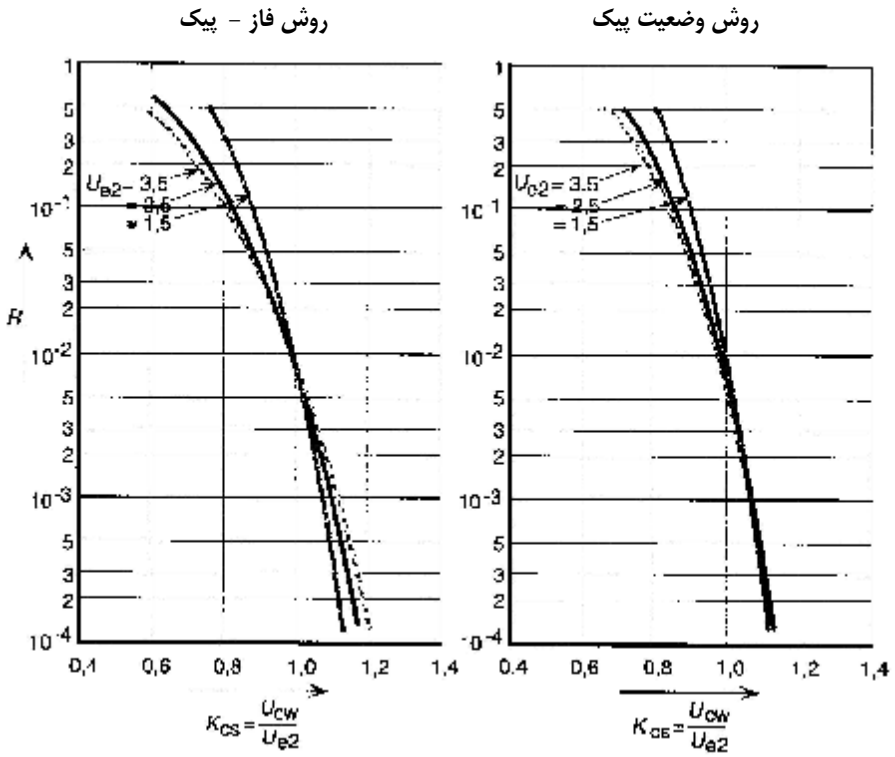
اگر منحنی‌های توزیع مربوط به اضافه‌ولتاژ و تحمل عایقی تنها توسط یک نقطه مشخص گردند می‌توان از روش ساده‌ای جهت حصول به هماهنگی عایقی مربوط به اضافه‌ولتاژهای با شیب کند بهره برد. در این حالت توزیع اضافه ولتاژ با اضافه ولتاژی آماری مشخص می‌شود که احتمال وقوع مقادیر بزرگتر از آن ۲ درصد است. توزیع استقامت عایق نیز با ولتاژ تحمل آماری مشخص می‌شود که معادل با ولتاژی است که عایق به احتمال ۹۰ درصد آن را تحمل می‌نماید. دراین صورت ضریب هماهنگی آماری K_{CS} معادل نسبت ولتاژ تحمل آماری به اضافه ولتاژ آماری خواهد بود.

ارتباط بین ضریب هماهنگی آماری و ریسک خطای بوجود آمده با تغییر پارامترهای توزیع اضافه ولتاژ اندکی تغییر می‌نماید. این مسئله به این دلیل است که مقدار ۲ درصدی انتخاب شده به عنوان مبنای احتمال اضافه ولتاژ، در قسمتی از منحنی توزیع اضافه ولتاژ قرار می‌گیرد که با درصد ریسک خطا (در محدوده ریسک درنظر گرفته شده) دارای حداکثر همپوشانی است.

شکل (۲-۸) نمونه‌ای از ارتباط بین ریسک خطا و ضریب هماهنگی آماری را، تحت شرایطی که توزیع گوسی برای تنش‌های اضافه ولتاژ و توزیع وی بال اصلاح شده برای استقامت عایقی در نظر گرفته شده است، برای هر دو روش فاز – پیک و وضعیت – پیک نشان می‌دهد. این واقعیت که انحراف معیار، تابعی از مقدار اضافه ولتاژ ۲ درصد است در این منحنی ها در نظر گرفته شده است.

تغییرات شدید در مقدار انحراف معیار انتخابی جهت تحمل عایقی (به ویژه هنگامی که برای اضافه‌ولتاژ از تابعی به غیر از تابع گوس استفاده شده باشد) و همچنین شکل موج اضافه‌ولتاژ می‌تواند خطاهای عمده‌ای را در این منحنی‌ها پدید آورد.

از طرف دیگر، منحنی‌ها نشان می‌دهند که اگر ریسک به اندازه یک مرتبه توانی تغییر یابد استقامت الکتریکی تنها به اندازه ۵ درصد تغییر می‌یابد.



شکل ۲-۸ : ریسک خطای عایق خارجی برای اضافه ولتاژهای با شیب کند به صورت تابعی از ضریب هماهنگی آماری K_{cs}

۲-۳-۳-۳- رویه‌های هماهنگی عایقی برای اضافه ولتاژهای با شیب تند

۲-۳-۳-۳-۱- روش غیرآماری

برای اضافه ولتاژهای با شیب تند، فاکتور هماهنگی غیرآماری $K_{cd}=1$ به حداکثر مقدار فرض شده اضافه‌ولتاژها اعمال می‌گردد. این امر بدان خاطر است که درمورد صاعقه، اضافه‌ولتاژ معرف به خودی خود دربرگیرنده آثار احتمال می‌باشد. برای اضافه ولتاژهای با شیب تند ناشی از کلیدزنی، اقداماتی مشابه آنچه که مطابق بند ۲-۳-۳-۲-۱ به اضافه ولتاژهای با شیب کند اعمال شد، انجام می‌گیرد.

۲-۳-۳-۳-۲- روش آماری

روش آماری پیشنهادشده در استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ برمبنای توزیع احتمال اضافه ولتاژهای صاعقه معرف است. چنانچه توزیع فراوانی اضافه ولتاژها بواسطه تقسیم نرخ برگشتی به تعداد کل اضافه ولتاژها بدست آید و چگالی احتمال f(U) از نتایج حاصل شود، نرخ خطا مشابه روش ارائه شده در بند ۲-۳-۳-۲-۲ قابل حصول خواهد بود. نرخ خطای عایقی نیز معادل با ریسک خطای ضرب شده در تعداد کل اضافه ولتاژهای صاعقه است.

برای عایق داخلی، ولتاژ تحمل فرض شده دارای احتمال تحملی معادل با ۱۰۰ درصد است. احتمال تحمل در ولتاژهای بالاتر برابر صفر فرض می‌شود. این بدان معنی است که ولتاژ تحمل هماهنگی معادل با دامنه اضافه ولتاژ صاعقه معرف در یک نرخ بازگشتی معادل با نرخ خطای قابل قبول پذیرفته شده است.

توجه:

اضافه ولتاژهای با شیب تند ناشی از صاعقه بدون درنظرگرفتن ولتاژ فرکانس قدرت لحظه‌ای درنظر گرفته می‌شوند. لذا از تنش‌های ترکیبی ناشی از پلاریته‌های معکوس صرفنظر می‌شود. این مسئله هنگامی قابل پذیرش است که دامنه ولتاژ فرکانس قدرت در مقایسه با دامنه اضافه ولتاژ با شیب تند کوچک باشد. این مسئله ممکن است برای تجهیزات دارای عایق داخلی کاغذ روغنی همچون ترانسفورماتور در رده ولتاژی II و مقادیر U_m بزرگ در رده ولتاژی I چندان محافظه‌کارانه نباشد. علاوه‌براین، ولتاژهای داخلی (همچون ولتاژ حلقه به حلقه) در چنین تجهیزاتی به جهت تنش‌های اعمال شده به پایانه‌های آنها مستقیماً در رویه هماهنگی تشریح شده در این گزارش درنظر گرفته نشده‌اند.

برای عایق خارجی، انحراف معیار احتمال تخلیه معمولاً در مقایسه با پراکندگی اضافه ولتاژها کوچک است. برای سادگی می‌توان از این مسئله صرفنظر نمود و روابط مشابهی با عایق داخلی را برای عایق خارجی نیز استفاده نمود.

۲-٤- ولتاژ تحمل مورد نیاز

۲-٤-۱- کلیات

ولتاژ تحمل موردنیازی که می‌بایستی در آزمون نوعی استاندارد و در شرایط جوی مبنای استاندارد مورد تحقیق قرار گیرد با درنظرگرفتن کلیه عواملی که ممکن است موجب کاهش تحمل عایقی شده تعیین می‌گردد به نحوی که ولتاژ تحمل هماهنگی در محل تجهیز و در طول عمر درنظر گرفته شده برای آن برآورده شود. برای حصول به این نتیجه دو ضریب اصلی می‌بایستی درنظر گرفته شود، یک ضریب برای تصحیح شرایط جوی و دیگری ضرایب اصلاحی (که ضرایب ایمنی نیز نامیده می‌شوند) جهت لحاظنمودن مغایرتهای موجود بین شرایط واقعی بهره‌برداری از عایق و شرایط حاکم بر آزمونهای تحمل استاندارد.

۲-٤-۲- اصلاح شرایط جوی

۲-٤-۲-۱- کلیات

درمورد عایق داخلی می‌توان فرض نمودکه شرایط جوی تأثیری بر روی خواص عایقی ندارند. قواعد اصلاح ولتاژهای تحمل عایق خارجی به جهت شرایط جوی در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۶۰ ارائه شده‌اند. این قواعد بر مبنای اندازه‌گیری‌هایی بوده که تا ارتفاع ۲۰۰۰ متری انجام شده‌اند و استفاده از آنها جهت ارتفاع‌های بالاتر می‌بایستی با دقت بیشتری همراه باشد. برای مقاصد هماهنگی عایقی، توصیه‌های اضافی ذیل نیز پیشنهاد می‌گردد:

الف- برای فواصل هوایی و مقره‌های تمیز، تصحیح لازم می‌بایستی جهت ولتاژهای تحمل هماهنگی امواج ضربه صاعقه و کلیدزنی به عمل آیند. برای مقره‌هایی که به آزمون آلودگی نیاز دارند، تصحیح ولتاژ تحمل فرکانس قدرت بلندمدت نیز می‌بایستی اعمال گردد.

ب- برای بدست آوردن ضریب تصحیح شرایط جوی قابل استفاده، می‌توان فرض نمود که آثار درجه حرارت محیط و رطوبت یکدیگر را خنثی می‌نمایند. بنابراین، برای مقاصد هماهنگی عایقی، تنها فشارهوای متناظر با ارتفاع مکان موردنظر برای هر دوی کاربردهای خشک یا شرایط مرطوب نیازمند اصلاح می‌باشد.

توجه:

این فرض درمورد اشکالی از مقره که باران منجر به کاهش قابل توجه ولتاژ تحمل آنها نمی‌شود می‌تواند صادق باشد. اما برای مقره‌هایی که دارای فواصل چتری کوتاهی هستند و باران می‌تواند منجر به برقراری ارتباط در چترهای مجاور گردد، این فرض کاملاً صحیح نخواهد بود.

۲-٤-۲-۲- تصحیح ارتفاع

ضریب اصلاحی K_a، که برمبنای وابستگی فشار جو به ارتفاع استوار است، در استاندارد IEC شماره ۳-۲-۶۰۷۲۱ ارائه شده است. این ضریب از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$K_a = e^{m(\frac{H}{8150})} \qquad (۲۱-۲)$$

که در آن:

H: ارتفاع از سطح دریا برحسب متر بوده و پارامتر m به صورت ذیل انتخاب می‌شود:

m=1: برای ولتاژ تحمل هماهنگی موج ضربه صاعقه

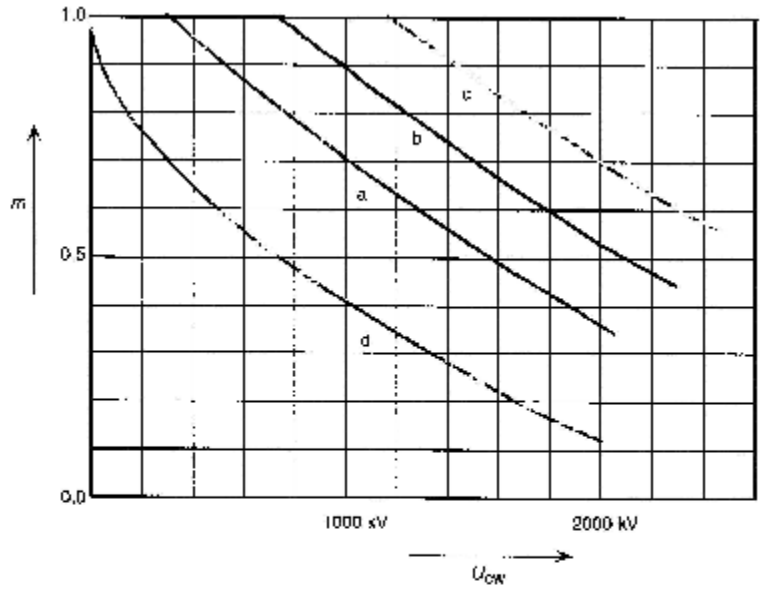
m: مطابق شکل (۲-۹) برای ولتاژهای تحمل هماهنگی موج ضربه کلیدزنی

m=1: برای ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت فواصل هوایی و مقره‌های تمیز.

توجه:

پارامتر m به عوامل مختلفی همچون کوتاهترین مسیر تخلیه، که عموماً در مرحله طراحی نامشخص است، وابسته می‌باشد. با این وجود، برای مقاصد هماهنگی عایقی، برآوردی محافظه‌کارانه از پارامتر m در شکل (۲-۹) نشان داده شده است که می‌تواند جهت تصحیح ولتاژهای تحمل هماهنگی امواج ضربه کلیدزنی مورد استفاده قرار گیرد. تعیین پارامتر m برمبنای استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۶۰ بوده که ارائه‌دهنده روابط بدست آمده برای اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع کمتر از ۲۰۰۰ متر می‌باشد. علاوه‌براین، برای کلیه انواع پاسخ عایقی، مطابق پیوست G استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۷۱ مقادیر ضریب الکترودی محافظه‌کارانه‌ای استفاده شده‌اند.

برای مقره‌های آلوده، مقدار پارامتر m به صورت آزمایشی می‌باشد. برای مقاصد آزمون بلندمدت و اگر نیاز باشد، ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت مقره‌های آلوده، مقدار پارامتر m می‌تواند به کوچکی ۰/۵ برای مقره‌های معمولی و به بزرگی ۰/۸ برای مقره‌های ضد مه باشد.



شکل ۲-۹: وابستگی پارامتر m به ولتاژ تحمل هماهنگی موج ضربه کلیدزنی

۲-٤-۳- ضرایب ایمنی

عوامل اصلی مؤثر و حالتهای کاری مختلف عایق‌های الکتریکی در پیوست B استاندارد IEC شماره ۶۰۵۰۵ مشخص شده‌انـد. این عوامل متناظر با تنش‌های کاری به شرح ذیل می‌باشند:

- تنش‌های حرارتی
- تنش‌های الکتریکی
- تنش‌های محیطی
- تنش‌های مکانیکی

ضرایبی که مورد استفاده قرار می‌گیرند جهت اصلاح موارد ذیل می‌باشند:

- پراکندگی تولید و مونتاژ
- شرایط نصب مختلف
- تغییر در کیفیت تولید
- پیرشدن عایق در حین طول عمر موردانتظار از آن
- سایر آثار ناشناخته دیگر

وزن نسبی این عوامل و حالتهای کاری ممکن است در بین انواع مختلف تجهیزات متغیر باشد.

۲-٤-۳-۱- پیری

عایق الکتریکی کلیه تجهیزات در طول سرویس‌دهی به جهت تنش‌های حرارتی، الکتریکی، شیمیایی یا مکانیکی دچار پیری می‌شوند.

برای مقاصد هماهنگی عایقی، فرض می‌شود که عایق‌های خارجی به جز مواردی که عایق‌ها شامل مواد آلی هستند (که پیرشدن آنها، بویژه هنگام استفاده در فضای آزاد، مستلزم بررسی‌های ویژه‌ای است) درمعرض پدیده پیری نمی‌باشند.

برای عایق‌های داخلی، پیری می‌تواند قابل توجه بوده و می‌بایستی توسط ضرایبی که در ادامه ارائه می‌گردد درنظر گرفته شوند.

۲-٤-۳-۲- پراکندگی تولید و مونتاژ

ولتاژهای تحمل نامی بوسیله آزمون نوعی، اغلب بر روی یک بخش معرف از یک ساختار یا با آزمون مربوطه تنها برای بخشی از سیستم عایقی مورد تحقیق قرار می‌گیرند. از آنجا که تجهیز مورد استفاده در شرایط سرویس واقعی ممکن است با آنچه که در آزمونهای نوعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند از لحاظ شرایط پیکربندی و عایقی متفاوت باشد، ولتاژ تحمل تجهیز تحت شرایط سرویس واقعی می‌تواند از مقدار نامی کوچکتر باشد.

برای تجهیزاتی که در کارخانه کاملاً مونتاژ می‌شوند، این اختلاف برای مقاصد هماهنگی عایقی کوچک خواهد بود. برای تجهیزاتی که در محل سایت مونتاژ می‌شوند، ولتاژ تحمل واقعی ممکن است کوچکتر از ولتاژ تحمل موردنیاز باشد و لذا می‌بایستی این مسئله با استفاده از ضرایب ایمنی مناسب مورد توجه قرار گیرد.

۲-٤-۳-۳- عدم قطعیت درمورد ولتاژ تحمل

برای عایق خارجی، انحراف‌های ممکنه آرایش آزمون از آرایش سرویس واقعی و تأثیر لوازم موجود در آزمایشگاه می‌بایستی به عنوان یک عدم قطعیت دیگر در رویه آزمون نوعی انتخاب شده به حساب آید. چنین عدم قطعیت‌هایی نیز می‌بایست به کمک ضرایب ایمنی پوشانده شوند.

برای عایق داخلی که احتمال تحمل آن برابر ۱۰۰ درصد فرض می‌شود، یک آزمون نوعی موج ضربه‌ای با سه موج ضربه معمولاً به عمل می‌آید و عدم قطعیت مربوط به این آزمون می‌بایستی بوسیله ضرایب ایمنی پوشش داده شود.

۲-٤-۳-٤- ضرایب ایمنی پیشنهادی (K_S)

چنانچه از طرف استانداردهای مربوط به تجهیز اعلام نشده باشد، ضرایب ایمنی به شرح ذیل می‌بایستی مورد استفاده قرار گیرند:

- برای عایق داخلی: $K_S = ۱/۱۵$
- برای عایق خارجی: $K_S = ۱/۰۵$

توجه:

برای پست‌های با عایق گازی در رده ولتاژی II، ضرایب ایمنی بزرگتری ممکن است مورد استفاده قرار گیرد. در این حالت، آزمونهای در محل سایت نیز ممکن است درنظر گرفته شوند.

۲-۵- ولتاژ تحمل استاندارد

۲-۵-۱- کلیات

در جداول (۱-۲) و (۱-۳) فصل اول، ولتاژهای تحمل استاندارد U_w برای رده‌های ولتاژی I و II ارائه شده‌اند. در هر دو جدول، ولتاژهای تحمل استاندارد در گروه‌هایی از سطوح عایقی استاندارد با مقادیر استانداردی از حداکثر ولتاژ برای تجهیز U_m مرتبط شده‌اند.

در رده ولتاژی I، ولتاژهای تحمل استاندارد شامل ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت و ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه و در رده ولتاژی II، ولتاژهای تحمل استاندارد شامل ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی و ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه می‌باشند.

سطوح عایقی استاندارد ارائه شده در جداول (۱-۲) و (۱-۳) حاصل تجارب جهانی بوده و درآنها تأثیر وسایل حفاظتی پیشرفته و روش‌های محدودسازی اضافه ولتاژها مورد توجه قرار گرفته‌اند. انتخاب یک سطح عایقی استاندارد می‌بایستی براساس رویه هماهنگی عایقی باشد که در این گزارش ارائه شده است و در آن مشخصه‌های عایقی هر تجهیز خاص نیز مورد توجه قرار می‌گیرد.

۲-۵-۱-۱- ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد

در جدول (۱-۳) ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد با توجه به موارد ذیل انتخاب شده است:

الف- برای تجهیزی که بوسیله برقگیرها در مقابل اضافه ولتاژهای کلیدزنی محافظت شده است:

- مقادیر موردانتظار از اضافه ولتاژهای موقت
- مشخصه‌های برقگیرهای موجود
- ضرایب هماهنگی و ایمنی بین سطح حفاظتی برقگیر و ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی تجهیز

ب- برای تجهیزی که بوسیله برقگیرها در مقابل اضافه ولتاژهای کلیدزنی محافظت نشده است:

- نرخ قابل قبولی از تخلیه مخرب با درنظرگرفتن محدوده محتملی از اضافه ولتاژهایی که در محل تجهیز به وقوع می‌پیوندند.
- درجه‌ای از کنترل اضافه ولتاژها که عموماً اقتصادی فرض شده و با انتخاب دقیق وسایل کلیدزنی در هنگام طراحی سیستم بدست آمده است.

۲-۵-۱-۲- ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد

در جدول (۱-۳) ولتاژهای تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد با توجه به موارد ذیل انتخاب شده است:

الف- برای تجهیزاتی که بوسیله برقگیرها محافظت شده‌اند، مقادیر کوچک سطح تحمل موج ضربه صاعقه قابل استفاده می‌باشند. این مقادیر با درنظرگرفتن نسبت سطح حفاظتی در برابر امواج ضربه صاعقه به سطح حفاظتی در برابر امواج ضربه کلیدزنی که بوسیله برقگیرها فراهم می‌شوند به همراه حواشی ایمنی مناسب انتخاب شده‌اند.

ب- برای تجهیزاتی که بوسیله برقگیرها محافظت نشده‌اند یا دارای حفاظت مؤثری نمی‌باشند، تنها مقادیر بزرگ ولتاژهای تحمل موج ضربه صاعقه می‌بایستی مورد استفاده قرار گیرند. این مقادیر بزرگتر بر مبنای نسبت نوعی ولتاژهای تحمل موج ضربه صاعقه و کلیدزنی عایق خارجی تجهیزات (همچون کلیدها، سکسیونرها، ترانسفورماتورهای اندازه‌گیری و غیره) می‌باشد. آنها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که طراحی عایقی اساساً بر مبنای توانایی عایق خارجی در تحمل ولتاژهای آزمونی موج ضربه کلیدزنی تعیین شوند.

ج- در برخی موارد بسیار نادر، می‌بایستی برای یک مقدار بزرگتر از ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه تدارک لازم صورت گیرد. این مقدار بزرگتر می‌بایستی از سری مقادیر استاندارد ارائه شده در استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ (بند ۱-۳-۶ فصل اول) انتخاب گردد.

در رده ولتاژی I، ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت یا ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه می‌بایستی ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی فاز به زمین و فاز به فاز و همچنین ولتاژ تحمل طولی مورد نیاز را پوشش دهند.

در رده ولتاژی II، درصورتی که هیچ مقدار مشخصی در استانداردهای مربوط به تجهیز مشخص نشده باشد، ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد می‌بایستی ولتاژ فرکانس قدرت دائم و ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت مورد نیاز را پوشش دهد.

برای حصول به این نیازمندیهای کلی، ولتاژهای تحمل موردنیاز می‌بایستی به کمک ضرایب تبدیل آزمون به سایر شکل موج‌های ولتاژ تحمل استانداردی که این ضرایب برای آنها مشخص شده‌اند تبدیل شوند. ضرایب تبدیل آزمون براساس نتایج موجود و جهت برآورد مقدار محافظه‌کارانه‌ای از ولتاژهای تحمل نامی تعیین شده‌اند. بنابراین آنها را تنها در راستای مشخص شده می‌بایستی مورد استفاده قرار داد.

استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ توصیف چگونگی انجام و پذیرش آزمون ولتاژ فرکانس قدرت بلندمدتی که جهت اثبات پاسخ تجهیز به پیرشدن عایق داخلی یا آلودگی به عمل می‌آید را به استانداردهای مربوط به تجهیز واگذار نموده است.

۲-۵-۲- ضرایب تبدیل آزمون

۲-۵-۲-۱- رده ولتاژی I

در صورت عدم دسترسی به ضرایب مناسب یا عدم ارائه آنها از طرف استانداردهای مربوط به تجهیز، می‌توان از ضرایب تبدیل آزمون مناسبی که در جدول (۲-۲) ارائه شده‌اند و به ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی مورد نیاز اعمال می‌شوند، استفاده نمود. این ضرایب به ولتاژهای تحمل مورد نیاز فاز به زمین و همچنین مجموع المانهای ولتاژهای تحمل فاز به فاز و طولی اعمال می‌شوند.

جدول ۲-۲: ضرایب تبدیل آزمون برای رده ولتاژی I، جهت تبدیل ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی مورد نیاز به ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت و موج ضربه صاعقه

نوع عایق	ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت (برحسب کیلوولت مؤثر*)	ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه (برحسب کیلوولت پیک)
عایق خارجی		
- فواصل هوایی و مقره‌های تمیز خشک:		
¿ فاز به زمین	$0.6+\frac{U_{rw}}{8500}$	$1.05+\frac{U_{rw}}{600}$
¿ فاز به فاز	$0.6+\frac{U_{rw}}{1270}$	$1.05+\frac{U_{rw}}{900}$
- مقره‌های تمیز مرطوب	0.6	1.3
عایق داخلی		
- پست‌های با عایق گازی	۰/۷	۱/۲۵
- عایق غوطه‌ور در مایع	۰/۵	۱/۱۰
- عایق جامد	۰/۵	۱/۰۰
توجه: U_{rw} ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی مورد نیاز برحسب کیلوولت است.		
* ضرایب تبدیل آزمون شامل ضریب $\frac{۱}{\sqrt{۲}}$ جهت تبدیل مقدار پیک به مقدار مؤثر می‌شود.		

۲-۵-۲-۲- رده ولتاژی II

درصورت عدم دسترسی به ضرایب مناسب یا عدم ارائه آنها ازطرف استانداردهای مربوط به تجهیز، می‌توان از ضرایب تبدیل آزمون مناسبی که در جدول (۲-۳) ارائه شده‌اند برای تبدیل ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت موردنیاز به امواج ضربه کلیدزنی استفاده نمود. این ضرایب به عایق طولی نیز قابل اعمال می‌باشند.

جدول ۲-۳: ضرایب تبدیل آزمون برای رده ولتاژی II، جهت تبدیل ولتاژهای تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت موردنیاز به ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی

نوع عایق	ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی (برحسب کیلوولت پیک)
عایق خارجی	
- فواصل هوایی و مقره‌های تمیز خشک	۱/۴
- مقره‌های تمیز مرطوب	۱/۷
عایق داخلی	
- پست‌های با عایق گازی	۱/۶
- عایق غوطه‌ور در مایع	۲/۳
- عایق جامد	۲/۰
توجه: ضرایب جدول شامل ضریب $\sqrt{۲}$ جهت تبدیل مقدار مؤثر به مقدار پیک می‌شود.	

۲-٦- فواصل هوایی[1] در پست‌های فشارقوی

در تأسیسات مجتمعی همچون پست‌های فشارقوی که امکان آزمودن آنها به طور یکجا مقدور نیست، کسب اطمینان از کفایت‌مندی استقامت دی‌الکتریک تأسیسات موردنظر امری ضروری می‌باشد.

ولتاژهای تحمل امواج ضربه کلیدزنی و صاعقه در هوا و تحت شرایط جوی استاندارد می‌بایستی معادل یا بزرگتر از مقادیر ولتاژهای تحمل امواج ضربه کلیدزنی و صاعقه‌ای باشد که در این استاندارد مشخص شده‌اند. بر این اساس، حداقل فواصل هوایی برای آرایش‌های الکترودی مختلف تعیین شده‌اند. حداقل فواصل مشخص‌شده با روشی محافظه‌کارانه و با لحاظ‌نمودن تجارب عملی، مسائل اقتصادی و سایز کاربردی تجهیز در محدوده‌ای کوچکتر از فواصل آزاد یک متری، مشخص شده‌اند.

این فواصل تنها جهت نیازمندیهای هماهنگی عایقی ارائه شده و نیازمندیهای ایمنی ممکن است منجر به فواصل به مراتب بزرگتری گردند.

جداول (۲-۴) تا (۲-۶) حداقل فواصل مورد نیاز جهت اطمینان از سطح عایقی مشخص‌شده را ارائه می‌دهند.

این فواصل می‌توانند در صورت انجام آزمونها بر روی آرایش‌های واقعی یا مشابه و اثبات برآورده شدن ولتاژهای تحمل موج ضربه استاندارد با درنظرگرفتن کلیه شرایط محیطی (همچون باران یا آلودگی) کوچکتر انتخاب شوند. بنابراین این فواصل به تجهیزی که در مشخصه‌های آزمونی آن، آزمون نوعی موج ضربه وجود دارد قابل اعمال نمی‌باشد، زیرا که اجباری‌نمودن این فواصل می‌تواند به جهت افزایش هزینه و ممانعت از پیشرفت کار منجر به عدم طراحی تجهیز گردد.

علاوه‌براین، در مواردی که بوسیله تجارب بهره‌برداری ثابت شده است اضافه ولتاژهای واقعی کوچکتر از آنچه هستند که در هنگام انتخاب ولتاژهای تحمل استاندارد درنظر گرفته شده‌اند و یا اینکه آرایش الکترودی از آنچه که برای فواصل پیشنهادی فرض شده مناسبتر انتخاب شده است، این فواصل می‌توانند مقادیر کوچکتری را اختیار کنند.

در جدول (۲-۴) ارتباط بین حداقل فواصل هوایی با ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه برای آرایش‌های الکترودی میله- استراکچر، علاوه‌برآن برای رده ولتاژی II جهت آرایش الکترودی هادی- استراکچر، ارائه شده است.

در جدول (۲-۵) ارتباط بین حداقل فواصل هوایی برای آرایش‌های الکترودی نوع هادی- استراکچر و نوع میله- استراکچر با ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد فاز به زمین ارائه شده است. آرایش هادی- استراکچر محدوده وسیعی از آرایش‌های نرمال مورد استفاده را تحت پوشش قرار می‌دهد.

در جدول (۲-۶) ارتباط بین فواصل هوایی برای آرایش‌های الکترودی نوع هادی- هادی و نوع میله- هادی با ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد فاز به فاز نشان داده شده است. آرایش نامتقارن میله- هادی وخیم‌ترین آرایش الکترودی است که تحت شرایط سرویس واقعی می‌تواند به وقوع بپیوندد. آرایش هادی- هادی کلیه آرایش‌های متقارن با شکل‌های الکترودی مشابه در دو فاز را پوشش می‌دهد.

فواصل هوایی که در شرایط سرویس واقعی به کار می‌روند براساس قواعد زیر تعیین می‌شوند:

1. Clearances in air

- **رده ولتاژی I**

فواصل هوایی فاز به زمین و فاز به فاز به کمک جدول (۲-۴) برای ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه نامی تعیین می‌شوند. ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت استاندارد، درصورتی که نسبت ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد به ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد بزرگتر از ۱/۷ باشد، می‌تواند نادیده گرفته شود.

- **رده ولتاژی II**

فاصله فاز به زمین برابر مقدار بزرگتر فاصله تعیین‌شده برای آرایش میله- استراکچر از جدول (۲-۴) برای ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد و فاصله تعیین‌شده از جدول (۲-۵) برای ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد می‌باشد. فاصله فاز به فاز برابر مقدار بزرگتر فاصله تعیین شده برای آرایش میله- استراکچر از جدول (۲-۴) برای ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد و فاصله تعیین شده از جدول (۲-۶) برای ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد می‌باشد. مقادیر ارائه شده برای فواصل تا ارتفاع‌هایی که در هنگام تعیین ولتاژهای تحمل موردنیاز لحاظ شده‌اند معتبر می‌باشند. فواصل موردنیاز برای ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد برای عایق طولی در رده ولتاژی II را می‌توان با اضافه‌نمودن ۰/۷ ضربدر پیک ولتاژ فاز به زمین بهره‌برداری به مقدار ولتاژ موج ضربه صاعقه استاندارد و تقسیم حاصل‌جمع بر عدد ۵۰۰ kV/m بدست آورد.

فواصل موردنیاز برای ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد در رده ولتاژی II کوچکتر از مقدار متناظر فاز به فاز می‌باشند. چنین فواصلی معمولاً تنها در آزمون نوعی تجهیزات وجود دارند و حداقل مقادیر مربوطه از این رو در این گزارش ارائه نشده‌اند.

جدول ۲-٤: ارتباط بین ولتاژهای تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد و حداقل فواصل هوایی

ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد (برحسب کیلوولت پیک)	حداقل فاصله هوایی (برحسب میلیمتر)	
	میله _ استراکچر	هادی _ استراکچر
۲۰	۶۰	ـــ
۴۰	۶۰	ـــ
۶۰	۹۰	ـــ
۷۵	۱۲۰	ـــ
۹۵	۱۶۰	ـــ
۱۲۵	۲۲۰	ـــ
۱۴۵	۲۷۰	ـــ
۱۷۰	۳۲۰	ـــ
۲۵۰	۴۸۰	ـــ
۳۲۵	۶۳۰	ـــ
۴۵۰	۹۰۰	ـــ
۵۵۰	۱۱۰۰	ـــ
۶۵۰	۱۳۰۰	ـــ
۷۵۰	۱۵۰۰	ـــ
۸۵۰	۱۷۰۰	۱۶۰۰
۹۵۰	۱۹۰۰	۱۷۰۰
۱۰۵۰	۲۱۰۰	۱۹۰۰
۱۱۷۵	۲۳۵۰	۲۲۰۰
۱۳۰۰	۲۶۰۰	۲۴۰۰
۱۴۲۵	۲۸۵۰	۲۶۰۰
۱۵۵۰	۳۱۰۰	۲۹۰۰
۱۶۷۵	۳۳۵۰	۳۱۰۰
۱۸۰۰	۳۶۰۰	۳۳۰۰
۱۹۵۰	۳۹۰۰	۳۶۰۰
۲۱۰۰	۴۲۰۰	۳۹۰۰

توجه: موج ضربه صاعقه استاندارد برای فاز به فاز و فاز به زمین قابل استفاده می‌باشد.

- برای فاز به زمین، حداقل فاصله برای آرایش هادی _ استراکچر و آرایش میله – استراکچر قابل استفاده می‌باشد.
- برای فاز به فاز، حداقل فاصله برای آرایش میله _ استراکچر قابل استفاده می‌باشد.

جدول ۲-۵: ارتباط بین ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد و حداقل فواصل هوایی فاز به زمین

ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد (برحسب کیلوولت پیک)	حداقل فاصله هوایی فاز به زمین (برحسب میلیمتر)	
	هادی _ استراکچر	میله _ استراکچر
۷۵۰	۱۶۰۰	۱۹۰۰
۸۵۰	۱۸۰۰	۲۴۰۰
۹۵۰	۲۲۰۰	۲۹۰۰
۱۰۵۰	۲۶۰۰	۳۴۰۰
۱۱۷۵	۳۱۰۰	۴۱۰۰
۱۳۰۰	۳۶۰۰	۴۸۰۰
۱۴۲۵	۴۲۰۰	۵۶۰۰
۱۵۵۰	۴۹۰۰	۶۴۰۰

جدول ۲-٦: ارتباط بین ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد و حداقل فواصل هوایی فاز به فاز

ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی استاندارد			حداقل فاصله هوایی فاز به فاز (برحسب میلیمتر)	
فاز به زمین (برحسب کیلوولت پیک)	نسبت مقدار فاز به فاز به مقدار فاز به زمین	فاز به فاز (برحسب کیلوولت پیک)	هادی _ هادی موازی	میله _ هادی
۷۵۰	۱/۵	۱۱۲۵	۲۳۰۰	۲۶۰۰
۸۵۰	۱/۵	۱۲۷۵	۲۶۰۰	۳۱۰۰
۸۵۰	۱/۶	۱۳۶۰	۲۹۰۰	۳۴۰۰
۹۵۰	۱/۵	۱۴۲۵	۳۱۰۰	۳۶۰۰
۹۵۰	۱/۷	۱۶۱۵	۳۷۰۰	۴۳۰۰
۱۰۵۰	۱/۵	۱۵۷۵	۳۶۰۰	۴۲۰۰
۱۰۵۰	۱/۶	۱۶۸۰	۳۹۰۰	۴۶۰۰
۱۱۷۵	۱/۵	۱۷۶۳	۴۲۰۰	۵۰۰۰
۱۳۰۰	۱/۷	۲۲۱۰	۶۱۰۰	۷۴۰۰
۱۴۲۵	۱/۷	۲۴۲۳	۷۲۰۰	۹۰۰۰
۱۵۵۰	۱/۶	۲۴۸۰	۷۶۰۰	۹۴۰۰

۲-۷- نمونه‌ای از رویه هماهنگی عایقی در یک پست فشارقوی

رویه هماهنگی عایقی شامل تعیین تنش‌های ولتاژی ناشی از کلیه منشاءها بر روی تجهیز و انتخاب تحمل الکتریکی مربوطه آن براساس حواشی حفاظتی یا سطوح قابل قبولی از عملکرد می‌باشد. این حواشی یا سطوح ایمنی عمدتاً تجربی می‌باشند.

مطابق توضیحات ارائه شده در فصل اول، رویه هماهنگی عایقی شامل چهار مرحله به شرح ذیل می‌باشد:

- مرحله اول: تعیین اضافه ولتاژهای معرف (U_{rp}).
- مرحله دوم: تعیین ولتاژهای تحمل هماهنگی (U_{cw}).
- مرحله سوم: تعیین ولتاژهای تحمل موردنیاز (U_{rw}).
- مرحله چهارم: تعیین ولتاژهای تحمل استاندارد (U_w).

نمونه طراحی ارائه شده در این بخش شامل مراحل فوق‌الذکر و ارتباطات مابین آنها می‌باشد. در این طراحی علاوه بر تعیین ولتاژهای تحمل استاندارد محاسبات مربوط به فواصل آزاد هوایی فاز به زمین و فاز به فاز نیز ارائه خواهند شد.

اضافه ولتاژهای معرف لزوماً همان اضافه ولتاژهایی نیستند که در سیستم به وقوع می‌پیوندند، بلکه اضافه‌ولتاژهایی می‌باشند که تنش‌های الکتریکی مشابه با اضافه ولتاژهای واقعی را بر روی تجهیز به نمایش می‌گذارند. بنابراین اگر اضافه ولتاژ واقعی موردنظر دارای شکل موجی متفاوت با شکل موج استاندارد آزمون باشد، اضافه ولتاژ معرف می‌بایستی به‌گونه‌ای اصلاح شود که بتوان تحمل عایق را در قبال اضافه ولتاژهای واقعی بوسیله آزمونهایی به درستی تحقیق نمود. در هنگام تطبیق تنش‌های ولتاژی با تحمل الکتریکی، انواع مختلف تنش‌های ولتاژی و پاسخ متناظر عایق به آنها می‌بایستی مورد توجه قرار گیرد. در این رابطه می‌بایستی بین عایق بازگشت‌پذیر (خارجی) و عایق بازگشت‌ناپذیر (داخلی) تمایز قائل شد. برای عایق بازگشت‌ناپذیر، هماهنگی تنش _ استقامت به کمک روش‌های غیرآماری صورت می‌پذیرد درحالیکه درمورد عایق بازگشت‌پذیر استفاده از روش‌های آماری می‌تواند مناسب‌تر باشد. در این بخش سعی شده است که کلیه این ملاحظات مورد توجه قرار گیرد.

سیستم مورد مطالعه در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است. سطح ولتاژ نامی سیستم برابر ۲۳۰ کیلوولت بوده و با فرض جدیدبودن پست شماره یک فرآیند هماهنگی عایقی به این پست اعمال خواهد شد.

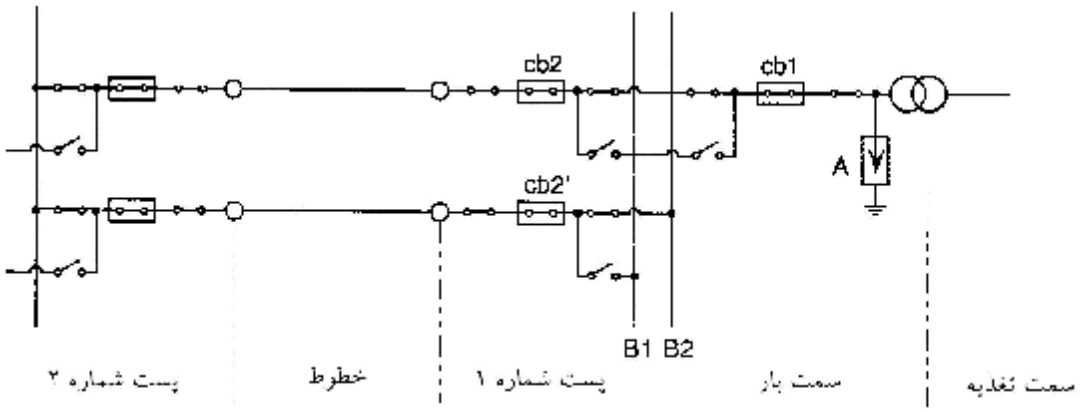
باتوجه به اینکه سطح ولتاژ پست در رده ولتاژی I قرار دارد، مطابق استاندارد IEC شماره ۱-۶۰۰۷۱ ولتاژهای تحمل مشخص شده برای تجهیزات مورد استفاده در این رده ولتاژی عبارتند از: ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت و ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه.

بررسی ولتاژهای تحمل موج ضربه کلیدزنی با تبدیل آنها به ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت و ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه صورت می‌گیرد. در این بخش نحوه انجام این تبدیل نیز ارائه خواهد شد.

برای سیستم‌های معمولی مورد استفاده در رده ولتاژی I، رویه هماهنگی عایقی به فلسفه کلی تعیین یک سطح عایقی استاندارد (یک مجموعه از ولتاژهای تحمل استاندارد) قابل استفاده برای عایق فاز به فاز و فاز به زمین می‌شود. در سیستم‌هایی که وقوع شرایط کاری غیرمعمول در آنها محتمل می‌باشد ممکن است فلسفه کلی ذکرشده برآورده نشود. لذا ضروری است که انتخاب نهایی ولتاژهای تحمل عایقی براساس کلیه تنش‌های ولتاژی موجود در سیستم صورت پذیرد.

سایر اطلاعات کلی سیستم به شرح ذیل فرض می‌شود:

- حداکثر ولتاژ سیستم: U_S=۲۴۵kV
- سطح آلودگی: سنگین
- ارتفاع از سطح دریا: متر H = ۱۰۰۰



شکل ۲-۱۰: آرایش سیستم مورد استفاده در مثال طراحی

۲-۷-۱- مرحله اول: تعیین مقادیر اضافه ولتاژهای معرف (U_{rp})

۲-۷-۱-۱- ولتاژ فرکانس قدرت

برای مقاصد هماهنگی عایقی، مهمترین ولتاژ مبنا برابر با حداکثر ولتاژ کار دائم سیستم (U_S) می‌باشد. برای سیستم مورد مطالعه که دارای ولتاژ نامی برابر با ۲۳۰ کیلوولت است مقدار U_S برابر با ۲۴۵ کیلوولت مؤثر فاز به فاز خواهد بود. به عبارت دیگر سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده است که در مقادیر برابر یا کمتر از این حد ولتاژی مورد بهره‌برداری قرار گیرد. بدیهی است که تجهیزات نصب شده در این سیستم نیز می‌بایستی U_m معادل یا بزرگتر از این U_S را دارا باشند.

از آنجا که محل قرارگیری پست جدید شماره یک دارای سطح آلودگی سنگین است، الزامات عملکرد عایق‌های خارجی تحت ولتاژهای فرکانس قدرت می‌بایستی با انجام آزمون آلودگی مصنوعی که متناظر با این سطح آلودگی می‌باشد مورد تحقیق قرار گیرد. مطابق IEC شماره ۶۰۸۱۵، حداقل فاصله خزشی پیشنهادی برای مقره‌های پست شماره یک برابر با ۲۵ mm/kV است.

۲-۷-۱-۲- اضافه ولتاژهای موقت

یکی از منابع تولید اضافه ولتاژهای موقت، خطاهای فاز به زمین بوده که منجر به ایجاد اضافه ولتاژهای فاز به زمین می‌شوند. مطالعات انجام شده بر روی سیستم نشان داده شده در شکل (۲-۱۰) منجر به ضریب خطای زمین k = ۱/۵ شده است (این عدد صرفاً جهت مثال مذکور درنظر گرفته شده است، چراکه در عمل این مقدار از ضریب خطای زمین در سطح ولتاژ ۲۳۰ کیلوولت نسبتاً نامتعارف بوده به نحوی که عموماً مقدار این ضریب در حدود ۱/۳ پیش‌بینی می‌گردد). لذا اضافه ولتاژ موقت معرف خطای زمین برابر با U_{rp} = ۲۱۲ kV_{rms} خواهد بود.

یکی دیگر از منابع تولید اضافه ولتاژهای موقت جداسازی بار بوده که منجر به ایجاد اضافه ولتاژهای فاز به زمین و فاز به فاز می‌شود. مطالعات انجام شده بر روی سیستم نشان داده شده در شکل (۲-۱۰) نشان می‌دهد که آثار ترکیبی واکنش تنظیم‌کننده‌های سرعت و ولتاژ ژنراتور مرتبط باپست شماره یک می‌تواند منجر به اضافه ولتاژهایی به اندازه ۱/۴ پریونیت در این

پست گردد. لذا اضافه ولتاژهای معرف جداسازی بار فاز به زمین برابر $U_{rp} = ۱۹۸\ kV_{rms}$ و فاز به فاز برابر $U_{rp} = ۳۴۳\ kV_{rms}$ می‌باشند.

همانطور که در بند ۲-۲-۳-۲-۵ نیز اشاره گردید، خطای زمین می‌تواند با جداسازی بار ترکیب‌شده و دامنه‌های دیگری از اضافه ولتاژ را بوجود آورد. در این مثال، چنین ترکیبی اتفاق نمی‌افتد زیرا پس از جداسازی بار، آرایش سیستم تغییر می‌نماید، یعنی اینکه کلیدهای موجود در پست شماره یک باز شده، تغذیه‌های خارجی جدا شده و ضریب خطای زمین در محل پست شماره یک به کمتر از یک (به واسطه ترانسفورماتور افزاینده ژنراتور که دارای اتصال مثلث / ستاره زمین‌شده می‌باشد) کاهش می‌یابد.

اضافه ولتاژهای موقت معرف برابر با حداکثر مقادیر بدست آمده از کلیه موارد محتمل درنظر گرفته می‌شود. لذا در مورد این مثال خواهیم داشت:

$U_{rp} = ۲۱۲\ kV_{rms}$: اضافه ولتاژ موقت معرف (فاز به زمین)

$U_{rp} = ۳۴۳\ kV_{rms}$: اضافه ولتاژ موقت معرف (فاز به فاز)

۲-۷-۱-۳- اضافه ولتاژهای با شیب کند

مطالعات انجام گرفته بر روی سیستم مورد مطالعه نشان داده است که اضافه ولتاژهای با شیب کندی که بواسطه برخورد ضربات صاعقه دوردست به پست شماره یک اعمال می‌شوند قابل چشم‌پوشی هستند. از طرف دیگر، اضافه ولتاژهای با شیب کند ناشی از خطاهای زمین هم تنها می‌بایستی در سیستم‌های با نوترال زمین شده به صورت تشدیدی درنظر گرفته شوند، که درمورد سیستم مورد مطالعه موضوعیت ندارد.

برای تعیین اضافه ولتاژهای معرف، در برخی موارد ضروری است که بین تجهیزات قرار گرفته در سمت ورود خط به پست و سایر تجهیزات موجود، به جهت تفاوت تنش‌های اعمالی به آنها (با توجه به وضعیت باز و بسته بودن کلیدهای پست در حین اعمال اضافه ولتاژهای گذرا)، تفاوت قائل شد.

- **امواج ضربه اعمالی به تجهیزات سمت خط پست شماره یک**

مطالعات صورت گرفته به روش فاز- پیک نشان داده است که برقدارکردن مجدد ازطریق پست شماره ۲ منجر به اعمال اضافه ولتاژهای۲ درصدی برابر با $U_{e2} = ۳/۰pu$ و $U_{p2} = ۴/۵pu$ به تجهیزات موجود در سمت خط پست شماره یک می‌شود. چنانچه در سمت خط پست شماره یک برقگیرهایی نصب نشده باشند، اضافه ولتاژهای معرف برای تجهیزات نصب شده در این قسمت برابر با مقادیر بریده شده این توزیع‌های اضافه ولتاژ خواهد بود. مطابق روابط (۲-۱) و (۲-۳) خواهیم داشت:

$$U_{et} = 1.25\,U_{e2} - 0.25 = 1.25 \times 3 - 0.25 = 3.5pu = 700\ kV_{peak}$$
$$U_{pt} = 1.25\,U_{p2} - 0.43 = 1.25 \times 4.5 - 0.43 = 5.195pu = 1039\ kV_{peak}$$

- **موج ضربه اعمالی به سایر تجهیزات پست شماره یک**

کلیه تجهیزات موجود در پست شماره یک درمعرض اضافه ولتاژهای با شیب کند ناشی از برقدارکردن و برقدارنمودن مجدد محلی خط قرار می‌گیرند. با این حال، امواج گذرای حاصله در محل برقدارکردن (پست شماره یک) کوچکتر از امواج گذاریی هستند که در انتهای خط (پست شماره ۲) ظاهر می‌شوند. برای پست شماره یک نتایج مطالعات منجر به مقادیر $U_{e2} = ۱/۹pu$ و $U_{p2} = ۲/۹pu$ متناظر با مقادیر $U_{et} = ۴۲۵\ kV_{peak}$ و $U_{pt} = ۶۳۹\ kV_{peak}$ شده‌اند.

- **استفاده از برقگیر در محل ورود خطوط به پست شماره یک**

برای کنترل اضافه ولتاژهای شدیدی که ممکن است به جهت برقدارکردن مجدد خط از دوردست حاصل شوند، برقگیرهای اکسید فلزی، مشابه آنچه که برای حفاظت ترانسفورماتور طراحی شده‌اند، در محل ورودی خطوط به پست شماره یک نصب شده‌اند. مقادیر نامی این برقگیرها به‌گونه‌ای است که بتوانند اضافه ولتاژهای موقت ایجاد شده در سیستم را تحمل نمایند (از لحاظ دامنه و مدت زمان). مشخصه‌های حفاظتی آنها به شرح ذیل می‌باشد:

- سطح حفاظتی برقگیر در برابر امواج ضربه کلیدزنی : U_{ps} = ۴۱۰ kV_{peak}
- سطح حفاظتی برقگیر در برابر امواج ضربه صاعقه: U_{PL} = ۵۰۰ kV_{peak}

همانطور که در بخش ۲-۲-۳-۳-۷ توضیح داده شده، درصورت استفاده از برقگیرها می‌توان اضافه‌ولتاژهای معرف با شیب کند را مستقیماً برابر با U_{ps} (برای فاز به زمین) یا $U_{ps} \times ۲$ (برای فاز به فاز) درنظر گرفت (اگر این مقادیر حفاظتی از حداکثر مقادیر تنشهای اضافه ولتاژ با شیب کند متناظرشان یعنی مقادیر U_{et} و U_{pt} کوچکتر باشند). بررسی این موضوع برای سیستم مورد مطالعه با توجه به نتایج حاصل از مراحل فوق به نتایج ذیل منجر می‌شود:

- اضافه ولتاژ با شیب کند معرف (فاز به زمین) برای کلیه تجهیزات: U_{rp} =۴۱۰ kV_{peak}
- اضافه ولتاژ با شیب کند معرف (فاز به فاز)بر کلیه تجهیزات بجز تجهیزات سمت خط: U_{rp} =۶۳۹ kV_{peak}
- اضافه ولتاژ با شیب کند معرف (فاز به فاز) برای تجهیزات سمت خط: U_{rp} = ۸۲۰ kV_{peak}

۲-۷-۱-٤- اضافه ولتاژهای با شیب تند

در این مثال، تنها اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه می‌بایستی درنظر گرفته شوند. در مرحله دوم رویه هماهنگی عایقی از یک روش ساده جهت حصول مستقیم به ولتاژ تحمل هماهنگی، بدون نیاز به برآورد اضافه ولتاژ معرف، استفاده به عمل می‌آید.

۲-۷-۲- مرحله دوم: تعیین مقادیر ولتاژهای تحمل هماهنگی (U_{cw})

مطابق بند ۲-۳ این گزارش، ضرایب مختلفی می‌بایستی به مقادیری از ولتاژهای معرف که قبلاً تعیین شده‌اند، اعمال گردد. این ضرایب، که ممکن است بسته به شکل موج اضافه ولتاژ موردنظر تغییر نمایند، معیار عملکرد موردنظر (تعداد خطاهای قابل قبول به جهات اقتصادی و فنی) و عدم قطعیت موجود در اطلاعات ورودی (همچون اطلاعات برقگیر) را پوشش می‌دهند.

۲-۷-۲-۱- اضافه ولتاژهای موقت

برای این گروه از اضافه ولتاژها، ولتاژ تحمل هماهنگی برابر با اضافه ولتاژ معرف موقت خواهد بود. به عبارت دیگر ضریب هماهنگی K_C معادل با یک درنظر گرفته می‌شود. بنابراین:

- ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت هماهنگی (فاز به زمین): U_{cw}= ۲۱۲ kV_{rms}
- ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت هماهنگی (فاز به فاز): U_{cw}= ۳۴۳ kV_{rms}

۲-۷-۲-۲- اضافه ولتاژهای با شیب کند

در این مثال از روش غیر آماری استفاده می‌شود. در هنگام استفاده از این روش می‌بایستی توجه نمود که استفاده از برقگیرها موجب تغییر توزیع احتمال اضافه ولتاژهای با شیب کند شده و موجب ایجاد برآمدگی قابل توجهی در تابع توزیع احتمال امواج ضربه حول و حوش سطح حفاظتی برقگیر می‌گردد. بنابراین، عدم قطعیت‌های کوچک مربوط به مشخصه حفاظتی برقگیر یا استقامت تجهیز می‌تواند به طور غیرمعمولی منجر به افزایش نرخ خطا گردد. در شکل (۲-۶) این مسئله با اعمال ضریب هماهنگی غیرآماری یعنی K_{cd} به سطح حفاظتی برقگیر جهت بدست آوردن مقادیر U_{cw} لحاظ شده است. بنابراین با توجه به این شکل و نتایج مراحل قبلی خواهیم داشت:

- **برای تجهیزات سمت خط:**

الف- فاز به زمین

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{410}{600} = 0.68 \Rightarrow \ K_{cd} = 1.1$$

ب- فاز به فاز

$$\frac{2U_{ps}}{U_{p2}} = \frac{820}{900} = 0.91 \Rightarrow \ K_{cd} = 1.0$$

- **برای سایر تجهیزات:**

الف- فاز به زمین

$$\frac{U_{ps}}{U_{e2}} = \frac{410}{380} = 1.08 \Rightarrow \ K_{cd} = 1.03$$

ب- فاز به فاز

$$\frac{2U_{ps}}{U_{p2}} = \frac{820}{580} = 1.41 \Rightarrow \ K_{cd} = 1.0$$

ولتاژهای تحمل هماهنگی برابر حاصلضرب $K_{cd} \times U_{rp}$ بوده و لذا نتایج ذیل قابل حصول خواهد بود:

- **برای تجهیزات سمت خط:**

الف- فاز به زمین

$$U_{cw} = 1.1 \times 410 \Rightarrow \ U_{cw} = 451 \ \ kV_{peak}$$

ب- فاز به فاز

$$U_{cw} = 1.0 \times 820 \Rightarrow \ U_{cw} = 820 \ kV_{peak}$$

- **برای سایر تجهیزات:**

الف- فاز به زمین

$$U_{cw} = 1.03 \times 410 \Rightarrow \ U_{cw} = 422 \ \ kV_{peak}$$

ب- فاز به فاز

$$U_{cw} = 1.0 \times 369 \Rightarrow \ U_{cw} = 639 \ \ kV_{peak}$$

۲-۷-۲-۳- اضافه ولتاژهای با شیب تند

دراینجا از روش آماری ساده‌ای که در پیوست F استاندارد IEC شماره ۲-۶۰۰۷۱ تشریح شده است جهت تعیین ولتاژهای تحمل هماهنگی با شیب تند استفاده خواهد شد. در این حالت، ضریبی که می‌بایستی به اضافه ولتاژ معرف U_{rp} اعمال شود برمبنای تجربیات حاصل از ساختار خطوط هوایی موجود و محاسبه اثر فاصله بین برقگیر و تجهیز تحت حفاظت بدست می‌آید.

ابتدا طولی از خط هوایی، L_a، با نرخ خروج معادل با نرخ خطای قابل قبول R_a تعیین می‌شود. سپس با درنظرگرفتن فاصله L، تعداد خطوط ورودی به پست n و طول اسپن منتهی به پست L_{sp}، سطح حفاظتی مؤثر برقگیر که مقدار مطلوب U_{cw} می‌باشد، تعیین می‌گردد.

درمورد مثال مورد بحث، اطلاعات در دسترس عبارتند از: تعدادی برقگیر با سطح حفاظتی درمقابل امواج صاعقه ۵۰۰ kV_{peak} در نقاط مختلف پست (در ورودی خطوط و مجاورت ترانسفورماتور) نصب شده‌اند، حداکثر فاصله بین برقگیرها و عایق داخلی برابر ۳۰ متر و بین برقگیرها و عایق خارجی ۶۰ متر می‌باشد. دو خط ورودی به پست دارای پارامتر مشخصه A برابر با ۴۵۰۰ متر بوده و طول اسپن منتهی به پست آنها ۳۰۰ متر می‌باشد. عملکرد صاعقه این خط برابر یک خروج در هر ۱۰۰ کیلومتر در سال می‌باشد. برای تجهیزات نصب شده در داخل پست نیز نرخ خطای قابل قبول برابر یک خطا در هر ۴۰۰ سال است.

مطابق توضیحات فوق و به کمک روابط (۲-۱۱) و (۲-۱۲) خواهیم داشت:

$$U_{cw} = U_{PL} + \left(\frac{A}{n} \times \frac{L}{L_{sp} + L_a}\right) \qquad (۲-۲۲)$$

$$L_a = \frac{R_a}{R_{km}} \qquad (۲-۲۳)$$

از رابطه (۲-۲۳) مقدار L_a به ازای $R_a = \frac{1\,fail}{400\,year}$ و $R_{km} = \frac{1\,fail}{100\,km.year}$ برابر ۲۵۰ متر حاصل می‌گردد و با استفاده از رابطه (۲-۲۲) خواهیم داشت:

- **برای عایق داخلی:**

$$U_{cw} = 500 + \left(\frac{4500}{2} \times \frac{30}{300 + 250}\right) = 622 \quad kV_{peak}$$

- **برای عایق خارجی:**

$$U_{cw} = 500 + \left(\frac{4500}{2} \times \frac{60}{300 + 250}\right) = 745 \quad kV_{peak}$$

اضافه ولتاژهای با شیب تند عایق‌های فاز به زمین و فاز به فاز را به یک میزان تحت تنش قرار می‌دهند.

۲-۷-۳- مرحله سوم: تعیین مقادیر ولتاژهای تحمل مورد نیاز (U_{rw})

ولتاژهای تحمل مورد نیاز با اعمال دو ضریب تصحیح به ولتاژهای تحمل هماهنگی بدست می‌آیند. این ضرایب عبارتند از: ضریب K_a جهت لحاظنمودن ارتفاع نصب تجهیزات (اصلاح شرایط جوی) و ضریب ایمنی K_s.

۲-۷-۳-۱- ضریب ایمنی (K_s)

مقادیر پیشنهادی برای ضریب K_s در بند ۲-۴-۳-۴ ارائه شده‌اند. ضریب ایمنی K_s برای هر نوع از شکل موجهای اضافه ولتاژ (موقت، با شیب کند و با شیب تند) فاز به زمین و فاز به فاز قابل استفاده می‌باشد:

- برای عایق داخلی: K_s = ۱/۱۵
- برای عایق خارجی: K_s = ۱/۰۵

۲-۷-۳-۲- ضریب تصحیح شرایط جوی(K_a)

ضریب تصحیح شرایط جوی در بند ۲-۴-۲-۲ تعریف شده است. این ضریب تنها به عایق خارجی اعمال می‌شود و مقدار آن به شکل موج اضافه ولتاژ وابسته است.

برای تحمل ولتاژ فرکانس قدرت، آزمونهای کوتاه‌مدتی بر روی مقره‌های آلوده مورد نیاز هستند و مقدار پارامتر m مورد استفاده در رابطه (۲-۲۱) برابر ۰/۵ انتخاب می‌شود.

برای تحمل موج ضربه کلیدزنی، مقدار پارامتر m مطابق شکل (۲-۹) تابع ولتاژ تحمل هماهنگی می‌باشد و لذا:

(برای فاز به زمین) $U_{cw} = 451 kV_{Peak} \Rightarrow m = 0.94$

(برای فاز به فاز) $U_{cw} = 826 kV_{Peak} \Rightarrow m = 1.0$

برای تحمل موج ضربه صاعقه مقدار m =۱/۰ می‌باشد.

از آنجا که تجهیزات پست شماره یک در ارتفاع ۱۰۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته‌اند، باتوجه به مقادیر استخراج شده برای پارامتر m و رابطه (۲-۲۱) مقادیر ضریب K_a برابر خواهند بود با:

- برای ولتاژ تحمل فرکانس قدرت (فاز به فاز و فاز به زمین): K_a=1.0632
- برای ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی (فاز به زمین): K_a=1.1222
- برای ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی (فاز به فاز): K_a=1.130
- برای ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه (فاز به فاز و فاز به زمین): K_a=1.130

۲-۷-۳-۳- ولتاژهای تحمل موردنیاز

مقادیر ولتاژهای موردنیاز از حاصلضرب $U_{rw} = K_a \times K_s \times U_{cw}$ بدست می‌آیند:

- **برای اضافه ولتاژهای موقتی**

عایق خارجی (فاز به زمین) : $U_{rw} = 212 \times 1.05 \times 1.063 \Rightarrow U_{rw} = 237 \ kV_{rms}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $U_{rw} = 343 \times 1.05 \times 1.063 \Rightarrow U_{rw} = 383 \ kV_{rms}$

عایق داخلی (فاز به زمین) : $U_{rw} = 2.12 \times 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 243 \ kV_{rms}$

عایق داخلی (فاز به فاز) : $U_{rw} = 343 \times 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 395 \ kV_{rms}$

- **برای اضافه ولتاژهای با شیب کند**
- تجهیزات سمت خط:

عایق خارجی (فاز به زمین) : $U_{rw} = 451 \times 1.05 \times 1.122 \Rightarrow U_{rw} = 531 \ kV_{peak}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $U_{rw} = 820 \times 1.05 \times 1.130 \Rightarrow U_{rw} = 973 \ kV_{peak}$

- سایر تجهیزات:

عایق خارجی (فاز به زمین) : $U_{rw} = 422 \times 1.05 \times 1.122 \Rightarrow U_{rw} = 497 \ kV_{peak}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $U_{rw} = 639 \times 1.05 \times 1.130 \Rightarrow U_{rw} = 758 \ kV_{peak}$

عایق داخلی (فاز به زمین) : $U_{rw} = 422 \times 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 485 \ kV_{peak}$

عایق داخلی (فاز به فاز) : $U_{rw} = 639 \times 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 735 \ kV_{peak}$

- **برای اضافه ولتاژهای با شیب تند**

عایق خارجی (فاز به زمین) : $U_{rw} = 745 \times 1.05 \times 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 884 \ kV_{peak}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $U_{rw} = 745 \times 1.05 \times 1.13 \Rightarrow U_{rw} = 884 \ kV_{peak}$

عایق داخلی (فاز به زمین) : $U_{rw} = 622 \times 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 715 \ kV_{peak}$

عایق داخلی (فاز به فاز) : $U_{rw} = 622 \times 1.15 \Rightarrow U_{rw} = 715 \ kV_{peak}$

۲-۷-٤- مرحله چهارم: تبدیل به ولتاژهای تحمل نرمالیزه شده برای رده ولتاژی I

در رده ولتاژی I، سطح عایقی بوسیله دو مقدار ولتاژ تحمل مشخص می‌شود. همانطور که در جدول (۱-۲) ارائه شده است، این مقادیر عبارتند از ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه مدت و ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه. در جدول (۲-۲) ضرایب تبدیل آزمونی که می‌بایستی به ولتاژ تحمل اضافه ولتاژهای کلیدزنی اعمال شوند تا یک مجموعه از مقادیر معادل بدست آیند مشخص شده‌اند.

۲-۷-٤-۱- تبدیل به ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت (SDW)

- برای تجهیزات سمت خط:

عایق خارجی (فاز به زمین) : $SDW = 531 \times (0.6 + \frac{531}{8500}) = 352 \ kV_{rms}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $SDW = 973 \times (0.6 + \frac{973}{12700}) = 658 \ kV_{rms}$

- **برای سایر تجهیزات:**

عایق خارجی (فاز به زمین) : $SDW = 497 \times (0.6 + \frac{497}{8500}) = 327 \ \ kV_{rms}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $SDW = 758 \times (0.6 + \frac{758}{12700}) = 500 \ \ kV_{rms}$

عایق داخلی (فاز به زمین) : $SDW = 485 \times 0.5 = 243 \ \ kV_{rms}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $SDW = 735 \times 0.5 = 367 \ \ kV_{rms}$

عایق داخلی (فاز به زمین) : $SDW = 485 \times 0.5 = 243 \ \ kV_{rms}$

عایق داخلی (فاز به فاز) : $SDW = 735 \times 0.5 = 367 \ \ kV_{rms}$

۲-۷-٤-۲- تبدیل به ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه (LIW)

- **برای تجهیزات سمت خط:**

عایق خارجی (فاز به زمین) : $LIW = 531 \times 1.30 = 646 \ \ kV_{peak}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $LIW = 973 \times (1.05 + \frac{973}{9000}) = 1127 \ \ kV_{peak}$

- **برای سایر تجهیزات:**

عایق خارجی (فاز به زمین) : $LIW = 497 \times 1.30 = 646 \ \ kV_{peak}$

عایق خارجی (فاز به فاز) : $LIW = 758 \times (1.05 + \frac{758}{9000}) = 860 \ \ kV_{peak}$

عایق داخلی (فاز به زمین) : $LIW = 485 \times 1.10 = 534 \ \ kV_{peak}$

عایق داخلی (فاز به فاز) : $LIW = 735 \times 1.10 = 808 \ \ kV_{peak}$

۲-۷-۵- انتخاب مقادیر ولتاژ تحمل استاندارد

در جدول (۲-۷) حداقل مقادیر ولتاژهای تحمل مورد نیازی که از مطالعات سیستمی بدست آمده‌اند ($U_{rw(s)}$ نتایج مرحله سوم) نشان داده شده‌اند. این اعداد حداقل مقادیر آزمونی هستند که می‌بایستی جهت تحقیق به صورت آزمونهای فرکانس قدرت کوتاه‌مدت، موج ضربه کلیدزنی و موج ضربه صاعقه اعمال شوند، در رده ولتاژی I، ولتاژ تحمل موج ضربه کلیدزنی مورد نیاز معمولاً بوسیله آزمون فرکانس قدرت کوتاه‌مدت استاندارد یا آزمون موج ضربه صاعقه استاندارد پوشانده می‌شود. در جدول (۲-۷)، مقادیر بدست آمده پس از چنین تبدیلاتی با علامت $U_{rw(C)}$ مشخص شده‌اند (نتایج مرحله چهارم). در این مثال، مقادیر تبدیل

شده برای آزمون موج ضربه صاعقه ارضاء شده‌اند به نحوی که مقادیر تبدیل شده برای آزمون فرکانس قدرت به ملاحظات بیشتری احتیاج ندارند.

ولتاژهای استانداردی که جهت انجام آزمونهای فرکانس قدرت کوتاه‌مدت و موج ضربه صاعقه مشخص می‌شوند بایستی با توجه به مقادیری از جدول (۲-۷) که با فونت سیاه مشخص شده‌اند (بزرگترین مقدار در بین حداقل ولتاژ تحمل مورد نیاز$U_{rw(S)}$ یا مقدار تبدیل شده $U_{rw(C)}$ و مقادیر استاندارد ارائه شده در بندهای ۱-۳-۶ و ۱-۳-۷ فصل اول انتخاب شوند. عموماً ولتاژهای مشخص شده به‌گونه‌ای مشخص می‌شوند که متناظر با یکی از سطوح عایقی استاندارد جدول (۱-۲) باشند.

مقادیر استانداردشده ۳۹۵ کیلوولت (برای فرکانس قدرت کوتاه‌مدت) و ۹۵۰ کیلوولت (برای موج ضربه صاعقه) متناظر با یک چنین سطح عایقی استانداردی برای یک سیستم با U_m = ۲۴۵ kV می‌باشند. این مقادیر هر عایق فاز به زمین و فاز به فازی را پوشش می‌دهد، بجز عایق خارجی فاز به فاز در سمت خط که مستلزم حداقل تحمل ۱۱۲۷ کیلوولت می‌باشد. با این حال، در این مثال، تجهیز سه فازی درسمت خط نصب نمی‌شود به‌گونه‌ای که یک حداقل فاصله فاز به فاز را می‌توان به جای انجام آزمون مشخص نمود. مطابق جدول (۲-۴)، یک فاصله آزاد ۲/۳۵ متری بین فازها برای تجهیز ورودی خط موردنیاز می‌باشد که متناظر با ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه استاندارد ۱۱۷۵ کیلوولت می‌باشد. حداقل فاصله فاز به زمین و فاز به فاز برابر با ۱/۹ متر بر هر عایق بیرونی دیگری که در سمت خط نصب نشده است موردنیاز می‌باشد. این فواصل هوایی فقط بر مبنای نیازمندیهای هماهنگی عایقی می‌باشند.

جدول ۲-۷: خلاصه حداقل ولتاژهای تحمل مورد نیاز بدست‌آمده برای مثال طراحی (قسمت اول)

مقادیر U_{rw}: - برحسب کیلوولت مؤثر برای ولتاژ تحمل فرکانس قدرت کوتاه‌مدت - برحسب کیلوولت پیک برای ولتاژ تحمل امواج ضربه صاعقه و کلیدزنی		**عایق خارجی**				**عایق داخلی**	
		تجهیزات سمت خط		**سایر تجهیزات**			
		$U_{rw(S)}$	$U_{rw(C)}$	$U_{rw(S)}$	$U_{rw(C)}$	$U_{rw(S)}$	$U_{rw(C)}$
فرکانس قدرت کوتاه‌مدت	فاز به زمین	۲۳۷	۳۵۲	۲۳۷	۳۲۷	۲۴۳	۲۴۳
	فاز به فاز	۳۸۳	۶۵۸	۳۸۳	۵۰۰	۳۹۵	۳۶۷
موج ضربه کلیدزنی	فاز به زمین	۵۳۱	___	۴۹۷	___	۴۸۵	___
	فاز به فاز	۹۷۳	___	۷۵۸	___	۷۳۵	___
موج ضربه صاعقه	فاز به زمین	۸۸۴	۶۹۰	۸۸۴	۶۴۶	۷۱۵	۵۳۴
	فاز به فاز	۸۸۴	۱۱۲۷	۸۸۴	۸۶۰	۷۱۵	۸۰۸

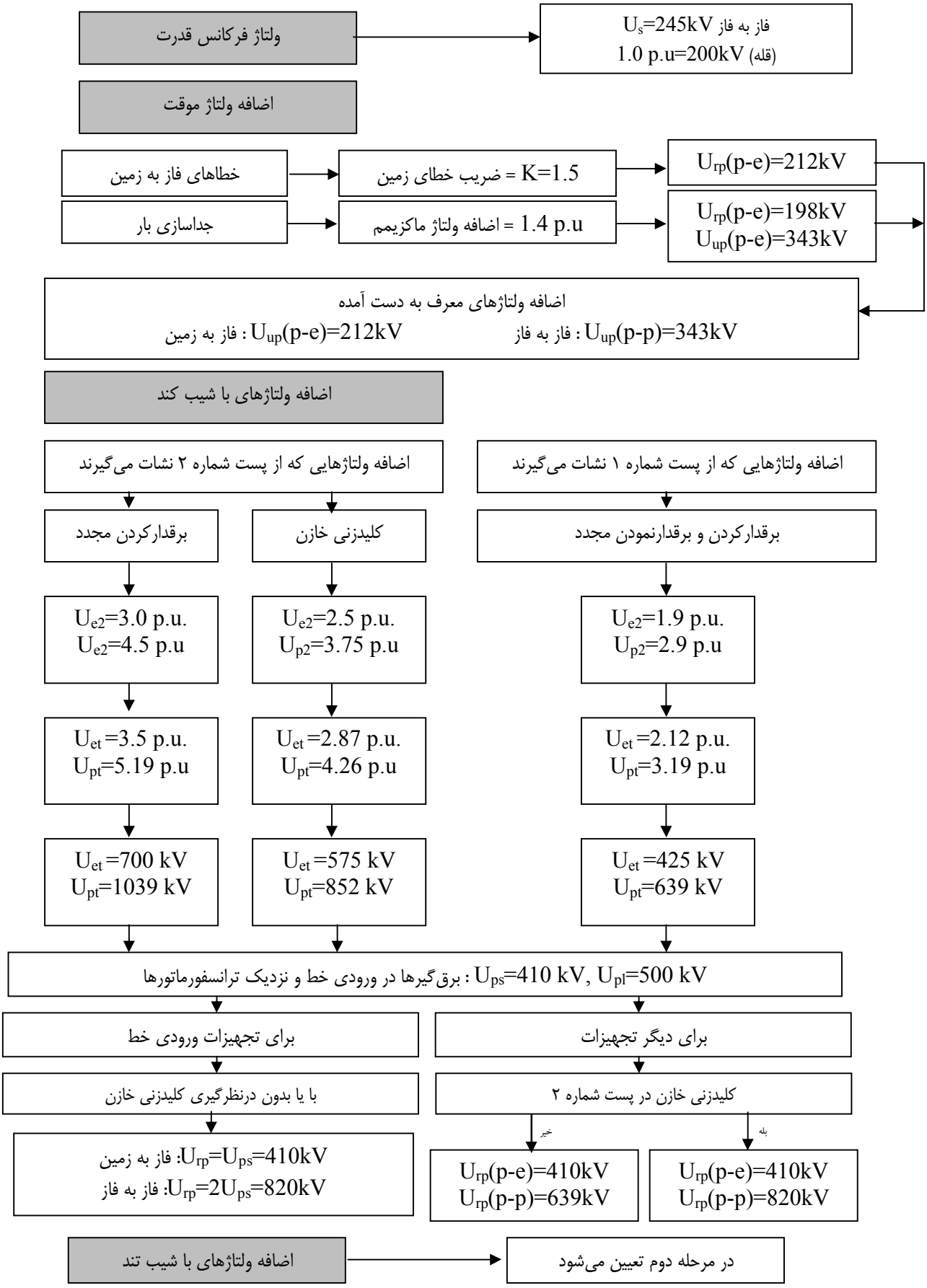
می‌بایستی توجه نمود که برای عایق خارجی فاز به زمین، مقدار مشخص‌شده برای آزمون فرکانس قدرت کوتاه‌مدت (۳۹۵ کیلوولت) خیلی بزرگتر از مقدار مربوط با اضافه ولتاژهای موقت (۲۳۷ کیلوولت) می‌باشد. با این حال، می‌بایستی توجه نمود که مقدار ولتاژ ۳۹۵ کیلوولت متناظر با سطح عایقی استانداردی است که دارای سطح تحمل موج صاعقه موردنیاز ۹۵۰ کیلوولت است.

انجام مطالعات دقیق‌تر ممکن است به یک سطح عایقی منجر شود که یک پله پایین‌تر از مقدار انتخاب‌شده فعلی برای عایق خارجی فاز به زمین باشد (۳۶۰kV/۸۵۰kV).

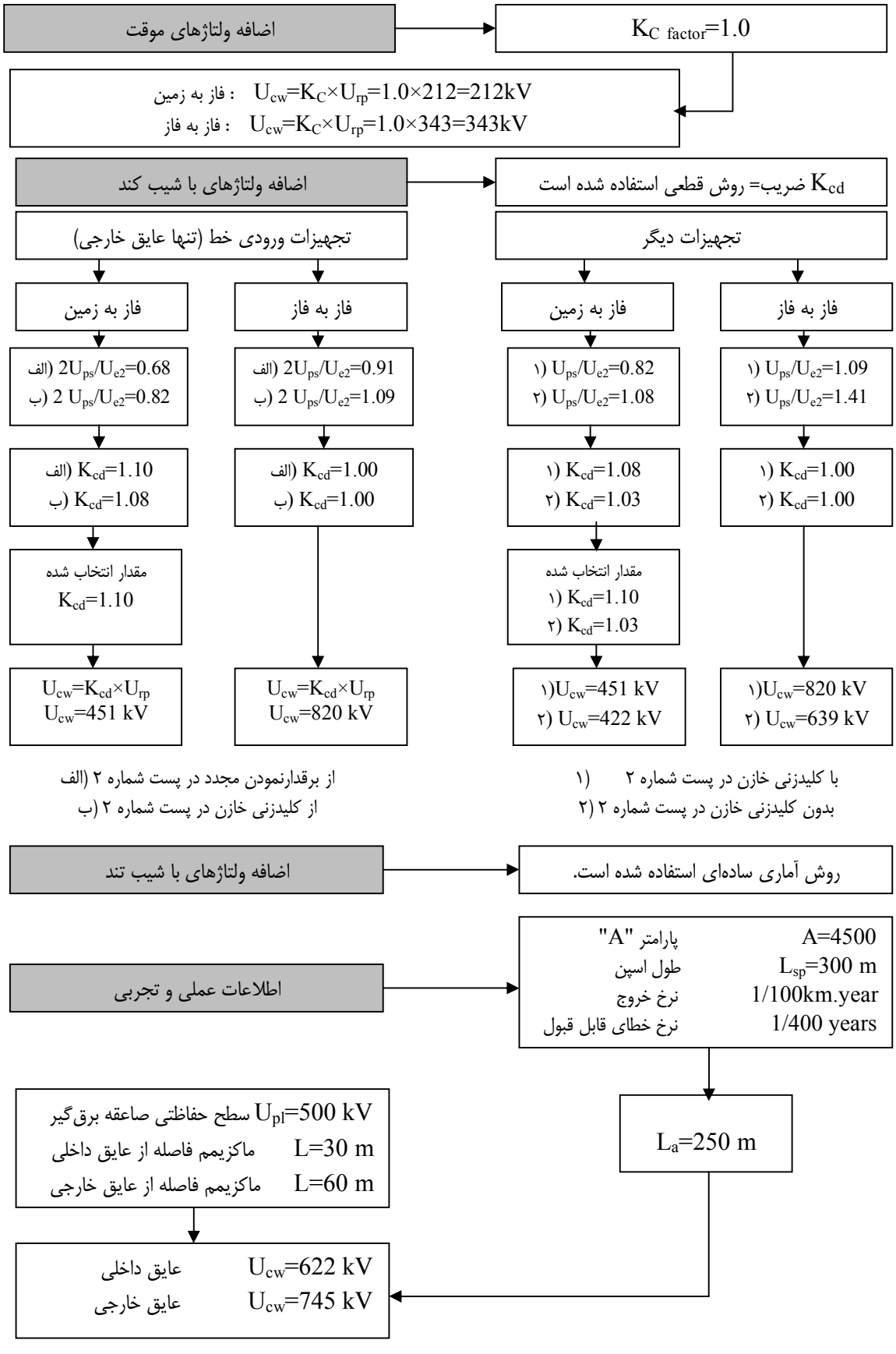
برای عایق داخلی، انتخاب سطح عایقی استانداردی مشابه عایق خارجی می‌تواند به حاشیه ایمنی خیلی بزرگی با توجه به ولتاژهای تحمل صاعقه موردنیاز گردد (۷۱۵ کیلوولت برای فاز به زمین و ۸۰۸ کیلوولت برای فاز به فاز). سایر انتخاب‌هایی که مسائل اقتصادی را درنظر می‌گیرند نیز قابل بررسی می‌باشند: مشخص‌نمودن ولتاژ تحمل موج ضربه صاعقه ۸۵۰ کیلوولت برای فاز به فاز و فاز به زمین یا ۷۵۰ کیلوولت برای فاز به زمین و آزمون فاز به فاز ویژه‌ای در ۸۵۰ کیلوولت. با این حال، آزمون فرکانس قدرت کوتاه‌مدت در حداقل مقدار ۳۹۵ کیلوولت می‌بایستی باقی بماند. حتی اگر قابل قبول باشد، مسائل نهایی مربوط به این انتخاب‌های دیگر به سطح عایقی نامی منجر می‌شود که متناظر با یک سطح عایقی مشخص‌شده در استاندارد IEC شماره ۶۰۰۷۱-۱ نمی‌باشد.

در ادامه رویه هماهنگی عایقی مثال مذکور، به صورت فلوچارت آورده شده است.

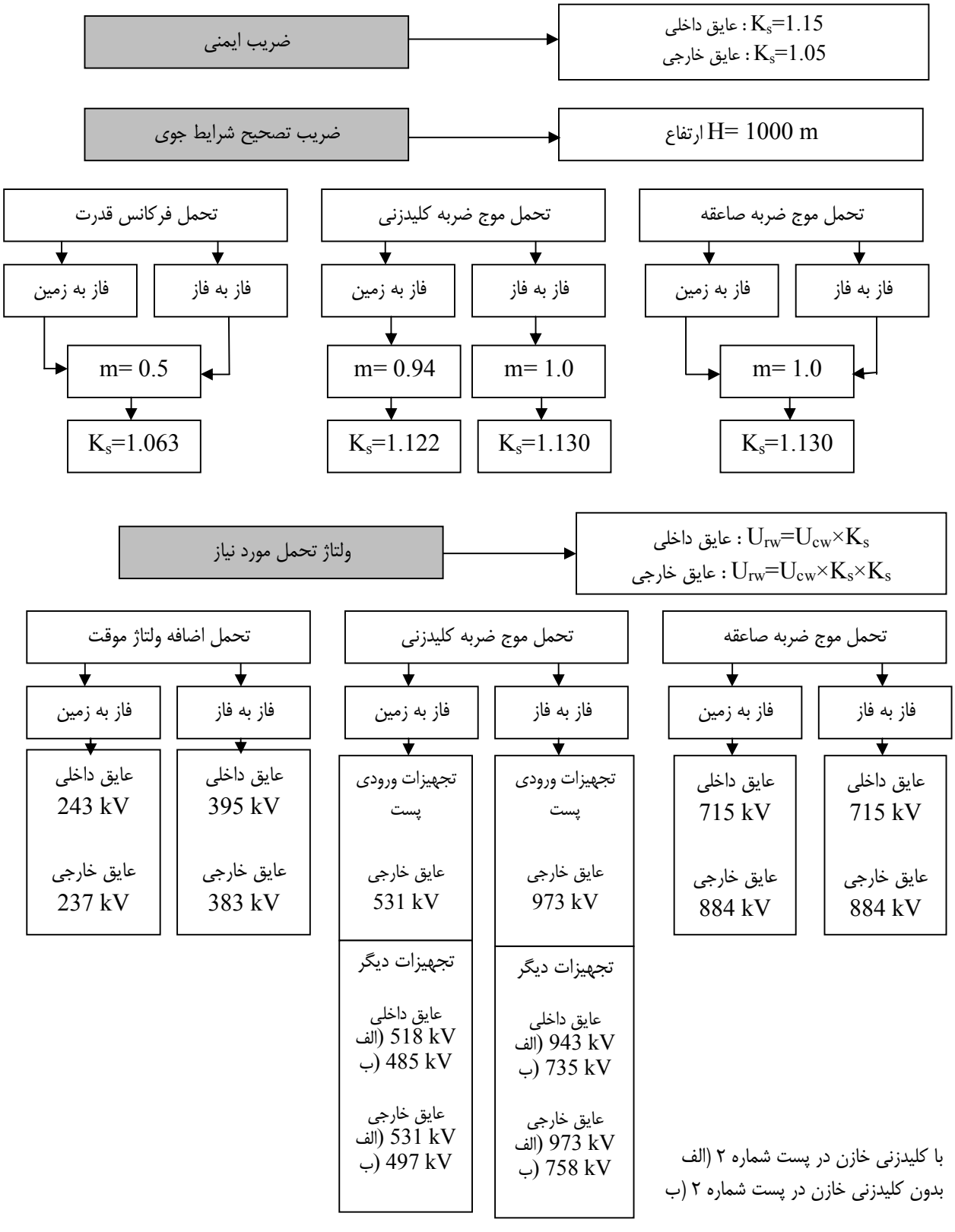
مرحله اول: تعیین مقادیر اضافه ولتاژهای معرف (U_{rp})



مرحله دوم: تعیین مقادیر ولتاژهای تحمل هماهنگی (U_{cw})

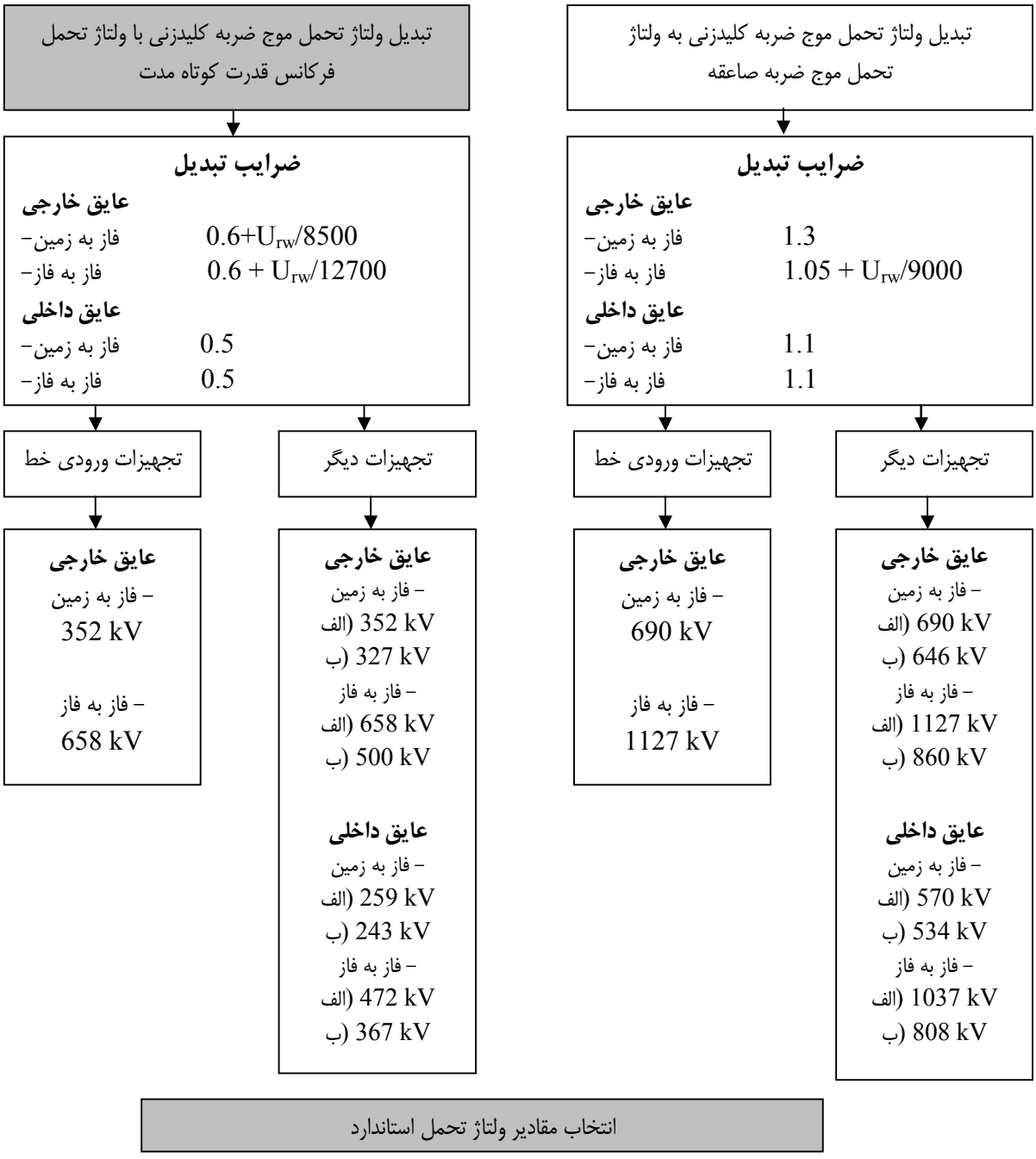


مرحله سوم: تعیین مقادیر ولتاژهای تحمل مورد نیاز (U_{rw})



با کلیدزنی خازن در پست شماره ۲ (الف
بدون کلیدزنی خازن در پست شماره ۲ (ب

مرحله چهارم: تبدیل به ولتاژهای تحمل نرمالیزه شده برای رده ولتاژی I



با کلیدزنی خازنی	بدون کلیدزنی خازنی	
395 kV/ 950 kV عایق خارجی	395 kV/ 950 kV قابل استفاده برای هر عایق	**سطوح عایقی استاندارد**
460 kV/ 1050 kV عایق داخلی		

پیوست (۲-۱): اضافه ولتاژهای انتقالی در ترانسفورماتورها

- **ملاحظات کلی**

در برخی موارد، هنگام طراحی حفاظت اضافه ولتاژ برای ترانسفورماتور می‌بایستی ولتاژ و موج ضربه انتقالی از طریق ترانسفورماتور در نظر گرفته شود. ترانسفورماتور متصل به ژنراتور یا موتور با توان نامی بالا که کلید و حفاظت آنها مشترک است مثالی از این مورد می‌باشد. موارد خاص شامل ترانسفورماتورهایی هستند که یک سیم‌پیچی آن به طور دائم یا گاهی اوقات (به عنوان مثال به علت عملکرد کلید) از شبکه جدا می‌شود. موج‌های ضربه می‌تواند از طریق ترانسفورماتور از یک سیم‌پیچی به سیم‌پیچی دیگر منتقل شود. در موارد معین، موج ضربه می‌تواند همچنین بین فازها نیز منتقل شود و فاز مجاور فازی را که قبلاً مستقیماً مورد برخورد صاعقه قرار گرفته است تحت تنش قرار دهد.

اضافه ولتاژهای انتقالی از طریق ترانسفورماتورها اساساً اضافه ولتاژهای با شیب تند یا با شیب کند هستند. روش انتقال بستگی به نرخ تغییرات مربوطه دارد. در اصل روش‌های انتقال زیر وجود دارد:

- انتقال الکترواستاتیک یا خازنی.
- انتقال نوسانی از طریق نوسانات طبیعی مدارهای اولیه و یا ثانویه ترانسفورماتور (خازن‌های زمین و اندوکتانس خودی سیم‌پیچ‌ها مدارهای نوسانی را تشکیل می‌دهند).
- انتقال طبیعی الکترومغناطیسی که به صورت عمده به نسبت دورها، اندوکتانس نشتی و امپدانس بارگذاری ترانسفورماتور وابسته است.

مؤلفه نوسانی میرا شده به مؤلفه انتقالی الکترومغناطیسی افزوده می‌شود. مؤلفه نوسانی اگر توسط رزونانس تقویت نشود، اغلب کوچک بوده و از اهمیت کمتری برخوردار است. لذا از این طریق انتقال صرف‌نظر می‌شود.

موج ولتاژ انتقالی دارای دو مؤلفه انتقالی خازنی و سلفی است که به ولتاژ فرکانس قدرت افزوده می‌شود. ولتاژ احتمالی ایجاد شده به دلیل اتصال کوتاه زمین نیز می‌بایستی در ولتاژ فرکانس قدرت شامل گردد. مؤلفه انتقالی خازنی که در محدوده مگاهرتز قرار دارد سریعتر منتقل شده در حالیکه مؤلفه انتقالی سلفی با سرعت کمتری انتقال یافته و بعد از مؤلفه خازنی مشاهده می‌شود.

مورد خاص در انتقال موج ضربه، افزایش در پتانسیل نوترال به علت موج انتقال یافته خازنی در طول اتصال کوتاه زمین و همچنین بروز برخی عدم تعادل‌ها در ترانسفورماتورهایی است که نسبت دور ترانس بسیار بالا بوده (مانند ترانسهای متصل به ژنراتور یا ترانسفورماتورهای با سیم‌پیچی سوم) و یا خازن سمت فشارضعیف مقدار کوچکی را دارا می‌باشد.

دامنه ولتاژ انتقالی به ساختار ترانسفورماتور (مخصوصاً به نحوه و ساختار سیم‌پیچی و اندوکتانس‌های نشتی)، میزان میراکنندگی سیم‌پیچی، خازن ترانسفورماتور، گروه برداری، نحوه اتصال به شبکه و ... بستگی دارد. به علاوه شکل موج ضربه ورودی نقش مهمی را ایفا می‌کند.

محاسبه نحوه تاثیرگذاری برخی از این عوامل روی دامنه موج ضربه انتقالی مشکل است. بنابراین عملی‌ترین روش برای تخمین کمیت دامنه این امواج ضربه، اندازه‌گیری آنها (به عنوان مثال با روش اندازه‌گیری موج ضربه جریان بازگشتی) می‌باشد.

در ادامه توضیحاتی درخصوص مهمترین مشخصه‌های انتقال اضافه ولتاژ از طریق ترانسفورماتورها آورده می‌شود. معادلات ارائه شده تنها تخمینی از دامنه موج ضربه انتقالی را ارائه می‌دهد.

- اضافه ولتاژهای موقت انتقالی

عدم تقارن در ولتاژهای فاز به زمین در سمت اولیه می‌تواند باعث اضافه ولتاژهای فاز به زمین در سمت ثانویه گردد. این پدیده در حالتی اتفاق می‌افتد که سیم‌پیچی ثانویه دارای نوترال ایزوله بوده و ولتاژ نامی آن نسبت به سیم‌پیچ اولیه به طور قابل ملاحظه‌ای پایین باشد. متداول‌ترین علت عدم تقارن ولتاژ، اتصال کوتاه زمین است. دامنه اضافه ولتاژ موقت انتقالی، به مقدار ولتاژ اولیه در طول اتصال کوتاه زمین، نسبت خازنی ترانسفورماتور و خازن‌های اضافی متصل شده به سمت ثانویه وابسته است.

ماکزیمم اضافه ولتاژ فاز به زمین با رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$U_{2e} = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_2} U_{1e} + \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}} \qquad (۲-۴)$$

که در آن:

U_{2e}: اضافه ولتاژ سمت ثانویه به علت بروز اتصال کوتاه زمین در سمت اولیه

U_{1e}: ولتاژ در نقطه نوترال سیم‌پیچی اولیه در طی اتصال کوتاه زمین

$U_{2N} / \sqrt{3}$: ولتاژ فاز به زمین نامی در سمت ثانویه

C_{12}: خازن بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه

C_2: خازن فاز به زمین سیم‌پیچ ثانویه و تجهیزات متصل شده به آن می‌باشد.

مقادیر خازن‌های موردنیاز از آزمون‌های جاری ترانسفورماتور به دست می‌آید.

ولتاژها باید به صورت برداری با هم جمع شوند. با این وجود، جمع جبری نتایج محافظه‌کارانه‌ای را نتیجه می‌دهد.

اگر خازن فاز به زمین سیم‌پیچ ثانویه بسیار کوچک باشد اضافه ولتاژهای با دامنه بالایی می‌تواند رخ دهد. به عنوان مثال در مورد ترانسفورماتورهای ۱۱۰kV اگر ولتاژ نامی سمت ثانویه ۱۰kV یا کمتر باشد، ولتاژ انتقالی می‌تواند از ولتاژ تحمل فرکانس قدرت استاندارد نیز فراتر رود.

مورد دیگری که منجر به اضافه ولتاژ انتقالی خازنی بیش از اندازه می‌شود زمانی است که سیم‌پیچ ثانویه دارای نوترال ایزوله بوده و در طی اتصال کوتاه زمین در سمت اولیه، به طور کامل از شبکه جدا می‌شود.

دامنه این اضافه ولتاژها می‌تواند به کمک خازن‌های اضافی‌ای که بین فاز و زمین و در کلیه فازها در سمت ثانویه نصب می‌گردد، کاهش یابد. اغلب خازن $0/1\ \mu F$ کافی می‌باشد.

- موج ضربه انتقالی خازنی

موج‌های ضربه انتقالی خازنی تنها زمانی بحرانی هستند که از سمت ولتاژ فشارقوی به سمت ولتاژ فشارضعیف منتقل شوند.

موج ضربه انتقالی می‌تواند از افزایش پتانسیل سیم‌پیچ اولیه به علت ورود اضافه ولتاژهای با شیب تند یا با شیب کند ناشی شود. این موج‌ها مانند حالت ولتاژهای اولیه نامتعادل و از طریق خازن سیم‌پیچی‌ها به ثانویه منتقل می‌شوند. اما یک تفاوت مهم در این حالت وجود دارد و آن از این حقیقت ناشی می‌شود که در تغییرات سریع ولتاژ اولیه تنها قسمت‌هایی از سیم‌پیچی‌ها که نزدیک

ترمینال‌ها هستند در انتقال موج ضربه دخالت دارند. بنابراین در موارد کلی و با توجه به ماهیت توزیع شده خازن‌ها، خازن ضربه سیم‌پیچی ترانسفورماتور، با توجه به خازن‌های سری و زمین توزیع شده (به ترتیب C_S و C_e) و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{1in} = \sqrt{C_S C_e} \qquad (۲-۴۵)$$

مقدار C_e را می‌توان با اندازه‌گیری بدست آورد اما مقدار C_S باتوجه به نوع و ساختار سیم‌پیچ‌ها تخمین زده می‌شود. بنابراین مقدار خازن C_S می‌بایستی از سازنده استعلام گردد.

خازن‌های ضربه، یک مقسم خازنی را تشکیل می‌دهند (شکل ۲-۱۱) که می‌تواند در تخمین سرراست دامنه موج‌های ضربه انتقالی خازنی استفاده شود. زمانی که اثر ولتاژ فرکانس قدرت در نظر گرفته شود، ولتاژ اولیه منتجه در سمت ثانویه باز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$U_{T2} = ghU_{T1} \qquad (۲-۴۶)$$

که در آن:

$g = C_{1in} / (C_{1in} + C_{3in})$: نسبت تقسیم مقسم و

h: ضریب ولتاژ فرکانس قدرت است.

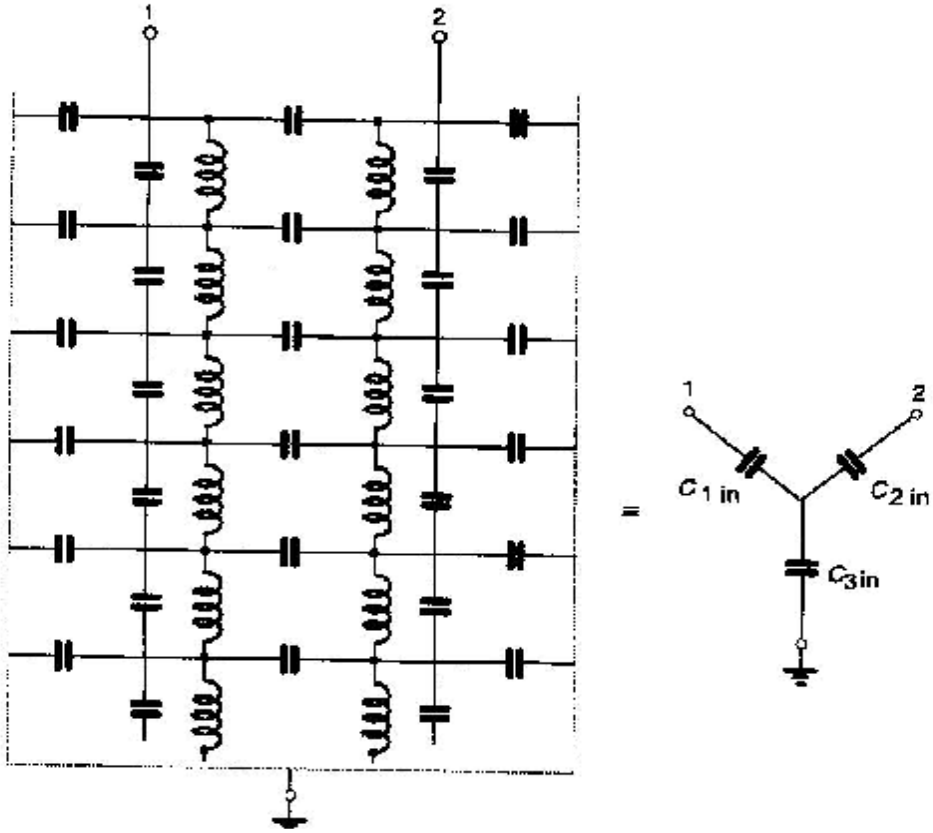
g می‌تواند در محدوده صفر تا حداقل ۰/۴ قرار گیرد و می‌توان آن را از اطلاعاتی که سازنده ترانسفورماتور در اختیار قرار می‌دهد، تخمین زد یا از آزمون موج ضربه ولتاژ پایین اندازه‌گیری نمود. اتصال سیم‌پیچ ولتاژ پایین به صورت مثلث و اتصال سیم‌پیچ ولتاژ بالا به صورت ستاره باعث کاهش بیشتر g می‌شود.

ضریب h بستگی به کلاس تنش ولتاژی و نوع اتصالات سیم‌پیچهای ترانسفورماتور دارد:

- برای اضافه ولتاژهای با شیب کند h=1 (به نوع اتصال سیم‌پیچی‌ها وابسته نیست)
- برای اضافه ولتاژهای با شیب تند، h>1:
  - برای اتصالات ستاره / مثلث یا مثلث / ستاره، h = ۱/۱۵
  - برای اتصالات ستاره / ستاره یا مثلث / مثلث، h = ۱/۰۷

در مورد اضافه ولتاژهای با شیب تند، مقدار U_{T1} می‌تواند سطح حفاظتی برق‌گیر متصل به سمت اولیه باشد. در مورد اضافه ولتاژهای با شیب کند مقدار U_{T1} را می‌توان معادل مقدار پیک تنش ولتاژ فاز به زمین فرض نمود (با فرض این که برق‌گیرها عکس‌العمل نشان ندهند).

دامنه‌های موج ضربه انتقالی خازنی به دلیل تلفات در سیم‌پیچ‌ها میرا می‌شود. این اثر، علاوه بر اتصال بار به ترانسفورماتور، به طور مؤثری دامنه موج ضربه را کاهش می‌دهد. شرایط بحرانی در این حالت هنگامی رخ می‌دهد که موج ورودی دارای شیب بسیار بالا بوده یا بریده شده باشد. برقگیرهای متصل به ثانویه به طور مؤثری دامنه این اضافه ولتاژها را کاهش می‌دهند.



شکل ۲-۱۱: خازن‌های توزیع شده سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور و مدار معادل سیم‌پیچی‌ها

- **موج ضربه انتقالی سلفی**

موج ضربه انتقالی سلفی معمولاً مهمترین روش انتقال امواج از درون ترانسفورماتور است. این پدیده به رفتار گذرای ولتاژها و جریان‌های موج ضربه در سیم‌پیچی اولیه و زمانی که این کمیات به صورت نوسانی به توزیع نهایی خود می‌رسند، وابسته است. این بدان معنی است که موج ضربه انتقالی از تعداد مؤلفه‌های زیادی که با فرکانس‌های متفاوتی نوسان می‌کنند، تشکیل یافته است.

در این روش انتقال، ترانسفورماتور اساساً در حالت عادی خود عمل می‌کند و می‌توان از روش‌های متداول مورد استفاده در فرکانس قدرت برای تحلیل دامنه و شکل موج ضربه استفاده نمود. در نتیجه، گرچه استخراج مدارهای معادل و معادلات برای مؤلفه‌های ولتاژ ساده است، اما تعیین مقادیر پارامترهای موردنیاز ترانسفورماتور بسیار پیچیده خواهد بود. اغلب از معادلات تقریبی ساده برای تعیین دامنه موج ضربه استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌ها نیز می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری از دامنه موج ضربه انتقالی سلفی ارائه دهند.

دامنه موج ضربه انتقالی سلفی بستگی دارد به:

- دامنه ولتاژ اولیه (شامل عملکرد برق‌گیر)
- طول دوره موج ضربه ورودی

- مشخصه ترانسفورماتور (تعداد سیم‌پیچی‌ها و نسبت دورها، امپدانس اتصال کوتاه، گروه برداری)
- امپدانس موجی خط متصل به سمت ثانویه
- مشخصه بار

موج ضربه القائی در سمت ثانویه ترانسفورماتور را می‌توان به کمک رابطه زیر تخمین زد:

$$U_{T2} = h.q.J.w.U_{T1} \qquad (۲-۲۷)$$

که در آن:

h: ضریبی که در معادله (۲-۲۶) تعریف شده است.

q: ضریب پاسخ[1] مدار ثانویه به موج ضربه انتقالی.

J: ضریبی است که به نوع اتصال سیم‌پیچی بستگی دارد.

w: نسبت ولتاژ فاز به فاز ثانویه به اولیه ترانسفورماتور می‌باشد.

ضریب پاسخ q اساساً دامنه نوسانات را تعیین می‌کند. دامنه q به اندوکتانس نشتی سیم‌پیچ ثانویه و به بار متصل شده به آن بستگی دارد. همچنین نحوه سیم‌بندی دور ستون هسته نیز اثرگذار است و از پیش تعیین کردن مقدار q را مشکل می‌سازد.

در ادامه اعدادی برای نشان‌دادن حدود q در مورد ترانسفورماتورهای با سیم‌پیچی دیسکی آورده شده است. در مورد ترانسفورماتورها با نوع دیگر سیم‌پیچی این مقدار می‌بایستی از سازندگان استعلام گردد.

مقادیر نمونه برای q می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

- اگر ترانسفورماتور به خط هوایی کم بار متصل باشد، مقدار q برای موج‌های ضربه با شیب تند از ۰/۳ تا ۱/۳ تغییر می‌یابد (زمانیکه ولتاژ نامی سیم‌پیچی ثانویه از ۲۴۵kV تا ۳۶kV تغییر کند).
- برای موج ضربه کلیدزنی در سیستم مشابه حالت فوق، مقدار متداول برای q کوچکتر از ۱/۸ است.
- اگر ترانسفورماتور به کابل متصل شده باشد، مقدار متداول q هم برای موج ضربه با شیب تند و هم برای موج ضربه با شیب کند کوچکتر از ۱ است. در ترانسفورماتورهای سه سیم‌پیچه مقدار q بزرگتر خواهد بود. حتی مقادیری بیشتر از ۱/۷ تا ۲ نیز برای چنین ترانسفورماتورهایی ثبت گردیده است.

مقادیر J برای موج ضربه اعمالی به یک فاز و برای موج‌های ضربه با پلاریته مخالف در دو فاز در شکل (۲-۱۲) برای هشت حالت مختلف اتصال سه فاز نشان داده شده است. در این شکل نسبت ولتاژ سیستم در مبنای واحد در نظر گرفته شده است.

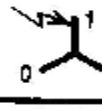
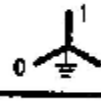
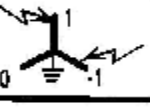
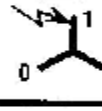
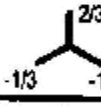
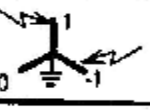
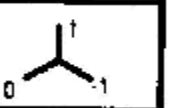
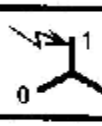
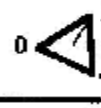
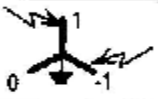
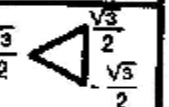
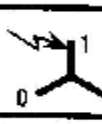
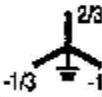
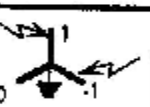
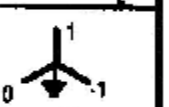
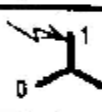
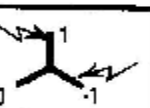
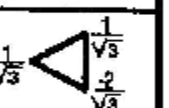
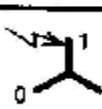
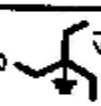
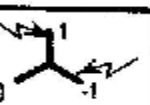
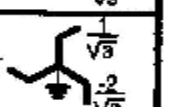
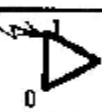
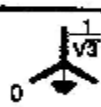
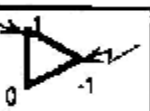
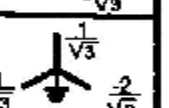
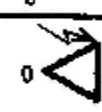
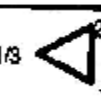
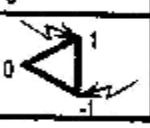
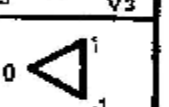
شرایط ناشی از موج ضربه انتقالی سلفی از سیم‌پیچی فشارقوی به فشارضعیف می‌تواند بحرانی گردد اگر:

- سیم‌پیچی ولتاژ ثانویه به شبکه متصل نباشد.
- سیم‌پیچی ثانویه، ولتاژ نامی پایینی داشته باشد اما قدرت نامی بالایی داشته باشد (مانند ترانسفورماتورهای ژنراتور)
- سیم‌پیچی، سیم‌پیچی ثالثیه ترانسفورماتور سه فاز باشد.

1. Response factor

موج ضربه انتقالی سلفی می‌تواند برای عایق فاز به فاز سیم‌پیچ‌های ثانویه با اتصال مثلث خطرناک باشد، اگرچه تمامی ترمینال‌های ترانسفورماتور مجهز به برق‌گیرهای متصل شده بین فاز و زمین باشند. بنابراین، برق‌گیرهایی که بین فازها متصل می‌شوند، بهتر است نصب گردند.

حفاظت بین فازها و زمین باید مانند حفاظت بین فازها مورد به مورد مطالعه گردد. اطلاعات لازم باید از سازنده ترانسفورماتور گرفته شود. برق‌گیرهایی که بین کلیه فازها و زمین و همچنین بین فازها (زمانی که لازم است، به عنوان مثال ترانسفورماتورهای با اتصال ستاره- مثلث) متصل می‌شوند اغلب حفاظت مناسبی را ارائه می‌نمایند. اضافه کردن خازن‌های اضافی اغلب اضافه ولتاژهای انتقالی سلفی را کاهش نمی‌دهد.

مورد	اتصال ترانسفورماتور			موج ضربه اعمالی به یک فاز $U_A=1, U_B=U_C=0$		موج ضربه با پلاریته مخالف اعمالی به دو فاز $U_A=1, U_B=-1, U_C=0$	
شماره	سیم‌پیچ فشارقوی	سیم‌پیچ فشارضعیف	ثالثیه	سیم‌پیچ فشارقوی	سیم‌پیچ فشارضعیف	سیم‌پیچ فشارقوی	سیم‌پیچ فشارضعیف
1	Y(e)	y(e)	(-, y)				
2	Y(e)	y(i)	(-, y)				
3	Y(e)	d	(-, y, d)				
4	Y(i)	y(e, i)	(-, y, d)				
5	Y(i)	d	(-, y, d)				
6	Y(i)	z(e, i)	(-, y, d)				
7	D	y(e, i)	(-, y, d)				
8	D	d	(-, y, d)				

Y, y: سیم‌پیچی با اتصال ستاره

D, d: سیم‌پیچی با اتصال مثلث

Z: سیم‌پیچی با اتصال زیگزاگ

U_A، U_B، U_C: دامنه اضافه ولتاژ در ترمینال‌های فشارقوی A، B و C

شکل ۲-۱۲: مقادیر ضریب J که تاثیر اتصالات سیم‌پیچی را روی انتقال ولتاژ ضربه سلفی شرح می‌دهد.

منابع و مراجع

[1] IEC 60071-1, "Insulation co-ordination- Part 1; definitions, principles and rules".
[2] IEC 60071-2, "Insulation co-ordination- Part 2; application guide".
[3] IEC 60060-1," High- voltage test techniques- Part 1; general definitions and test requirements".
[4] IEC 60099-4, "Surge arresters- Part 4; metal- oxide surge arresters without gaps for AC systems".
[5] IEC 60099-5, " Surge arresters- Part 5: selection and application recommendations".
[6] IEC 60505, "Evaluation and qualification of electrical insulation systems".
[7] IEC 60507, " Artificial pollution tests on high- voltage insulators to be used on AC systems".
[8] IEC 60721-2-3, " Classification of environmental conditions- Part 2: environmental conditions appearing in nature air pressure".
[9] IEC 60815," Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions".
[10] IEEE Std. 1313.1," IEEE standard for insulation coordination definitions, principles and rules".
[11] IEEE Std. 1313.2, " IEEE standard for the application of insulation coordination".
[12] Andrew R. Hileman," Insulation coordination for power systems", marcel decker Inc, ISBN:0-8247-9957-7,1999.
[۱۳] استاندارد پستهای (۳۳)۱۳۲/۲۰ کیلوولت معمولی،جلد ۱۲۰۱: هماهنگی عایقی و برقگیرها، مهندسین مشاور قدس نیرو،۱۳۷۴.
[۱۴] استاندارد طراحی بهینه پستهای ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت، جلد ۲۳۳: معیارهای طراحی و مهندسی هماهنگی عایقی، مهندسین مشاور نیرو،۱۳۷۷.

خواننده گرامی

دفتر نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور با گذشت بیش از سی سال فعالیت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر چهارصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیین‌نامه، ضابطه، معیار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کشور و بهبود فعالیت‌های عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در سال‌های اخیر در سایت اینترنتی **http://tec.mporg.ir** قابل دستیابی می‌باشد.

دفتر نظام فنی اجرایی

این نشریه

با عنوان «مشخصات فنی عمومی و اجرایی پست ها، خطوط فوق توزیع و انتقال – هماهنگی عایقی در پست های فشار قوی» در برگیرنده مباحث مربوط به هماهنگی عایقی شامل کلیات و تعاریف، معیارهای طراحی و مهندسی برای حصول به هماهنگی عایقی، الزامات استاندارد و محاسبات عایقی کلیه تجهیزات پست های فشار قوی می باشد.