

انواع اضافه ولتاژها در شبکه‌های قدرت

۱-۲ مقدمه

اضافه ولتاژها و اضافه جریانهای گذرا به علت ایجاد تغییرات ناگهانی کمیت‌های الکترومغناطیسی در سیستم قدرت بوجود می‌آیند. اضافه ولتاژها، اغتشاشات ناخواسته‌ای هستند که روی ولتاژ نامی سیستم قدرت قرار گرفته و می‌توانند به صورت حالت تفاضلی (بین مدارها یا فازهای مختلف) و یا به صورت حالت معمولی (بین فازهای خط و زمین) ظاهر شوند. اضافه ولتاژها اغلب باعث ایجاد نویز یا اغتشاش، تخریب تجهیزات و تولید جرقه و نهایتاً ایجاد وقفه و قطعی در سرویس دهی سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی می‌شوند و در نتیجه از قابلیت اطمینان و کیفیت توان شبکه‌های قدرت (تولید، انتقال، توزیع و مصرف) می‌کاهند و ممکن است هزینه‌های مالی و زمانی زیادی را به سیستم تحمیل نمایند. ماهیت تصادفی و متغیر اضافه ولتاژها باعث شده که مشخصات آنها را فقط بتوان بصورت آماری جمع آوری کرد.

مطابق استاندارد IEC 60071-1، به هر ولتاژ فاز به زمین یا فاز به فاز که دارای مقدار پیک بیشتر از مقدار پیک حداکثر ولتاژ تجهیزات $(\sqrt{2} / \sqrt{3})U_m$ باشد، اضافه ولتاژ گفته می‌شود. بطور کلی، اضافه ولتاژها در سیستم‌های قدرت به انواع مختلف زیر تقسیم بندی می‌شوند.

الف- انواع اضافه ولتاژها از لحاظ مدت زمان استمرار

- ۱- اضافه ولتاژهای موقتی^۱ یا فرکانس قدرت
- اضافه ولتاژهای موقتی اغلب در اثر وقوع خطای فاز به زمین (اتصال کوتاه) در سیستم‌های قدرت با نقطه نول زمین نشده و یا نول زمین شده با امپدانس بالا، قطع ناگهانی بارهای القایی بزرگ، وقوع پدیده رزونانس و فرورزونانس، اثر فرانتی (افزایش ولتاژ انتهای خطوط طویل بی بار یا کم بار در اثر تزریق شارژ خازنی خطوط) و خازن گذاری بیش از حد تولید می‌شوند.
- ۲- اضافه ولتاژ گذرای کند^۲
- این نوع اضافه ولتاژ اغلب در اثر کلیدزنی خط تحت بار و قطع و وصل جریان سلفی تولید می‌شود.
- ۳- اضافه ولتاژها گذرای سریع^۳ یا فرکانس بالا
- اضافه ولتاژ گذرای سریع بیشتر در اثر وقوع پدیده صاعقه (موج اصلی صاعقه) تشکیل می‌شود.
- ۴- اضافه ولتاژها خیلی سریع^۴
- این نوع اضافه ولتاژ اغلب در اثر کلیدزنی در سوئیچگیرهای گازی^۵ و صاعقه‌های فرعی تولید می‌شود.
- ۵- اضافه ولتاژ ترکیبی^۶
- اضافه ولتاژی متشکل از دو مولفه ولتاژی همزمان که بین هر یک از دو ترمینال فاز به فاز (یا دو سر) عایق و زمین اعمال می‌شود. این اضافه ولتاژ با مقدار پیک بزرگترین مولفه‌های ولتاژی (اضافه ولتاژ موقتی، کند، تند و خیلی تند) مشخص می‌شود.
- مقدار استاندارد ولتاژ ترکیبی:

۱- Temporary Overvoltages (TOV)
 ۱- Slow-Front Overvoltage (SFO)
 ۲- Fast-Front Overvoltages (FFO)
 ۳- Very Fast-Front Overvoltages (VFFO)
 ۴- Disconnecter Switch Restrike
 ۵- Combined voltage

برای عایقه‌های طولی، ولتاژ ترکیبی دارای ولتاژ گذرای استاندارد روی یکی از ترمینالها و ولتاژ فرکانس قدرت روی ترمینال دیگر می‌باشد. مولفه گذرا در پیک ولتاژ فرکانس قدرت در پلاریته مخالف آن، اعمال می‌گردد.

ب- انواع اضافه ولتاژها از لحاظ مکان منبع تولید آنها

۱- اضافه ولتاژ داخلی^۱

اضافه ولتاژی که منابع تولید آن در داخل شبکه قدرت می‌باشد. اضافه ولتاژهای کلیدزنی^۲ و موقتی نمونه‌های رایج این نوع اضافه ولتاژها در شبکه‌های قدرت هستند.

۲- اضافه ولتاژ خارجی^۳

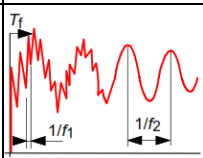
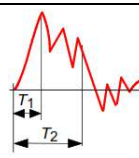
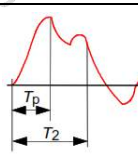
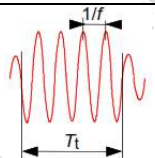
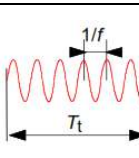
اضافه ولتاژی که منابع ایجاد آن خارج از سیستم قدرت می‌باشد. اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه^۴ و تخلیه بارهای الکترواستاتیکی^۵ از رایجترین نوع اضافه ولتاژهای خارجی می‌باشند.

البته از دید هر مدار، هر نوع اضافه ولتاژی که محل تولید آن در خارج از آن مدار باشد، اضافه ولتاژ خارجی اطلاق می‌گردد. لذا، اضافه ولتاژهای ناشی از قطع و وصل خطوط، برقرار شدن ترانسفورماتورها و کلیدزنی بار شبکه نیز جزء اضافه ولتاژهای خارجی محسوب می‌شوند.

بنابراین عوامل متعدد خارجی (بروز صاعقه) و داخلی (کلیدزنی و بروز خطاها) و یا شرایط داخلی (وقوع فرورزونانس و ضعف عایقی) باعث ایجاد اضافه ولتاژها در سیستمهای قدرت می‌گردند. به طور کلی اضافه ولتاژها به دو گروه اصلی اضافه ولتاژهای موقتی و اضافه ولتاژهای گذرا تقسیم می‌شوند.

بعضی از مهمترین مشخصات انواع اضافه ولتاژها براساس استاندارد IEC 60071-1 مطابق جدول (۱-۲) می‌باشند.

جدول (۱-۲). مشخصات و شکل موج انواع اضافه ولتاژها براساس استاندارد IEC 60071-1

نوع اضافه ولتاژ	گذرا				فرکانس پایین
	شیب خیلی تند	شیب تند	شیب کند	موقتی	
شکل موج					
مشخصات شکل موج	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3\,600 \text{ s}$	$f = 50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3\,600 \text{ s}$

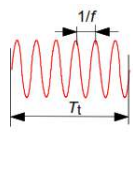
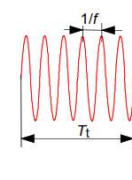
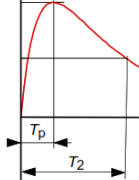
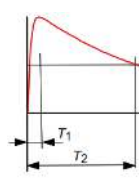
۶- Internal Overvoltage

۷- Switching Overvoltages

۸- External Overvoltages

۹- Lightning Overvoltage

۱۰- Electrostatic Charge Discharge (ECD)

 <p>$f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz T_1^a</p>	 <p>$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$</p>	 <p>$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$</p>	 <p>$T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$</p>	(a)	شکل موج استاندارد
(a)	تست استقامت کوتاه مدت فرکانس قدرت	ولتاژ گذرای کلیدزنی	ولتاژ گذرای صاعقه	(a)	ولتاژ استقامت استاندارد

(a): باید توسط کمیته تخصصی تجهیز مورد نظر مشخص شود.

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

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

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

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

۲-۲ اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه

اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه از دو طریق برخورد مستقیم و برخورد غیر مستقیم صاعقه در سیستمهای الکتریکی ظاهر می‌شوند. در اثر اصابت مستقیم صاعقه به فازهای سیستم، موج گذرای جریان صاعقه با عبور از هادیهای فاز، موج گذرای ولتاژ صاعقه را تولید می‌کند. دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه می‌تواند از چندین مگاولت نیز فراتر رود که در این حالت تقریباً هیچ یک از عایقهای تجهیزات شبکه قدرت قادر به تحمل آن نمی‌باشد. اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه اغلب در اثر القاء ناشی از امواج الکترومغناطیسی صاعقه (LEMP)^۱، از طریق جرقه برگشتی روی زنجیره مقره، کوپلینگ خازنی و غیره در هادیهای فاز تولید می‌شوند.

۱-۲-۲ فرآیند شکل گیری تخلیه جوی

عواملی همچون تغییر شرایط جوی (طوفان) و اصطکاک ابرها با یکدیگر و یا با لایه‌های هوای مجاور، باعث یونیزه شدن مولکولهای بخار آب و ذرات تشکیل دهنده ابرها شده، بارهای الکتریکی مثبت و منفی و همچنین قطبهای مثبت و منفی را در ابرها بوجود می‌آورند. ابرهای دارای بار الکترواستاتیکی، باعث القاء بارهای از نوع مخالف در سطح زمین می‌شوند. تشکیل بارهای الکتریکی در دو قطب غیر همنام، موجب تولید میدان الکتریکی در فاصله بین آنها شده که با افزایش بارها و کاهش فاصله بین آنها، شدت میدان الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. هرگاه شدت میدان الکتریکی بین ابرها و یا ابر و زمین از kV/cm ۵ بیشتر شود (معمولاً بین kV/cm ۵ تا kV/cm ۳۰)، یونیزاسیون هوای بین قطبها شروع می‌شود. با یونیزه شدن هوا، کانال تخلیه بار و جریانهای پیشرو تولید می‌شود. جریانهای پیشرو از دو جهت مختلف ابر به زمین (پیشروی پایین رونده^۲) و زمین به ابر (پیشروی بالا رونده^۳) به صورت مرحله-مرحله با سرعت حدود $1000 km/s$ حرکت کرده تا در یک نقطه (نقطه اصابت^۴) به یکدیگر برسند و مسیر کانال تخلیه بین ابر و زمین را کامل نمایند. بلافاصله پس از تشکیل کانال تخلیه توسط جریانهای پیشرو، جریان اصلی صاعقه که به صاعقه برگشتی^۵ مشهور است از طریق کانال یونی با سرعت حدود km/s ۱۰۰۰۰۰ عبور کرده و موج اصلی صاعقه را تولید می‌کند. البته پس از تخلیه موج اصلی صاعقه، با تاخیر بسیار ناچیزی، تخلیه‌های بعدی با جریان کمتر ولی شیب موج بیشتر و با سرعت تا ۱۰ برابر سریعتر از موج اصلی، بین ابر و زمین اتفاق می‌افتند که به صاعقه‌های فرعی^۶ معروف می‌باشند و کانال تخلیه صاعقه را پرنورتر می‌کنند. تعداد صاعقه‌های فرعی می‌تواند بسته به میزان و چگونگی بار الکترواستاتیک موجود در ابر تا ۳۰ عدد هم برسد بنابراین هر صاعقه (منفی) می‌تواند شامل چندین صاعقه فرعی (حداقل ۳ صاعقه فرعی) باشد.

لازم به ذکر است پیک ولتاژ آستانه یونیزاسیون هوا تحت شرایط استاندارد حدود kV/cm ۳۰ بوده، در حالی که در روزهای ابری و در داخل ابرها به علت وجود رطوبت، این ولتاژ به kV/cm ۵ تا kV/cm ۱۰ کاهش می‌یابد. به همین علت، وقوع تخلیه‌های جوی بین ابرها معمولاً بیشتر از تخلیه بین ابر و زمین می‌باشد. اما تخلیه بین ابر و زمین دارای اثرات مخرب اولیه و ثانویه بیشتری نسبت به تخلیه بین ابرها می‌باشد.

۲-۲-۲ طبقه بندی تخلیه جوی

تخلیه بارهای الکترواستاتیکی ابرها را تخلیه جوی می‌گویند. تخلیه جوی ممکن است به صورت تخلیه داخل ابری^۷، تخلیه

۱- Lightning Electromagnetic Pulses

۲- Downward Leader

۳- Upward Leader

۴- Strike Point

۱- Return Stroke

۲- Subsequent / dart leader

۳- Intra- Cloud Flash

بین ابری^۱، تخلیه بین ابر و زمین^۲ و تخلیه بین ابر و فضا اتفاق بیافتد. تخلیه داخل ابری بین دو یا چند بخش داخل یک ابر که دارای بارهای الکترواستاتیکی مخالف هم هستند رخ می‌دهد. اما تخلیه بین ابری عملاً بین دو ابر مجاور با بارهای الکترواستاتیکی مخالف هم که به یکدیگر نزدیک شده‌اند اتفاق می‌افتد. بیش از ۹۰٪ تخلیه‌های جوی از نوع تخلیه‌های داخل ابری و بین ابری می‌باشند.

به طور کلی، جهت و پلاریته صاعقه^۳ دو معیار اصلی در مطالعه و بررسی آن می‌باشند. پلاریته صاعقه می‌تواند منفی (ابر با بار منفی و زمین با بار مثبت) و یا مثبت (ابر با بار مثبت و زمین با بار منفی) باشد و جهت حرکت صاعقه نیز می‌تواند از سمت ابر به طرف زمین (بیشتر در مناطق هموار و غیر مرتفع) و یا از سمت زمین به طرف ابر (در مناطق کوهستانی و مرتفع) باشد. مطابق شکل (۱-۲)، از لحاظ پلاریته و جهت، چهار نوع صاعقه تعریف می‌شود:

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

همچنین صاعقه‌ها از لحاظ تعداد کانالهای تخلیه جریان، به صاعقه تک کاناله و چند کاناله تقسیم می‌شوند. معمولاً بیش از ۹۰ درصد صاعقه‌ها از نوع صاعقه با پلاریته منفی بوده و کمتر از ۱۰ درصد آنها از نوع صاعقه با پلاریته مثبت می‌باشند. ولی صاعقه‌های مثبت نسبت به صاعقه‌های منفی، دارای دامنه جریان بیشتری می‌باشند. لذا اگر در منطقه‌ای احتمال وقوع صاعقه‌های مثبت بیشتر از ۱۰ درصد باشد، باید در طراحی عایقی سیستم‌های قدرت، صاعقه مثبت در نظر گرفته شود. صاعقه‌های مثبت اغلب به صورت صاعقه تکی اتفاق می‌افتند و دارای تعداد صاعقه‌های فرعی بسیار کمتری نسبت به صاعقه‌های منفی می‌باشند.

۲-۲-۳ بررسی اثرات صاعقه

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

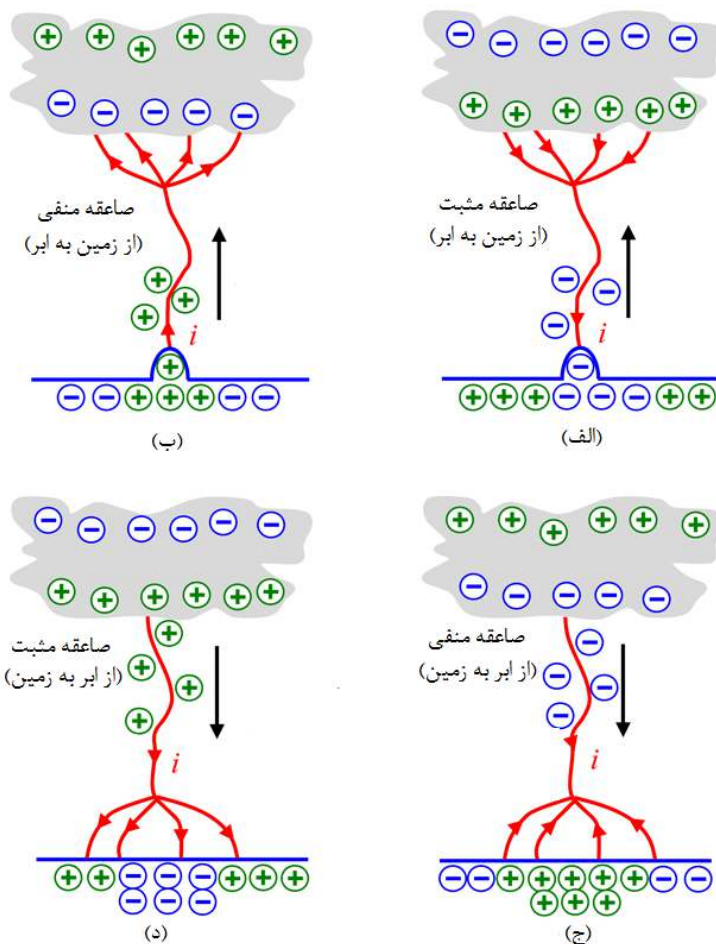
- اثر حرارتی (باعث آتش سوزی، ذوب شدن هادی‌ها).
- اثر افزایش پتانسیل زمین (GPR)^۴ (ناشی از اثر تخلیه موج گذرای جریان در شبکه زمین سیستمهای الکتریکی و الکترونیکی).
- اثر تداخل الکترومغناطیسی فرکانس بالا (تولید امواج الکترومغناطیسی صاعقه (LEMP) باعث ایجاد اغتشاش و اختلال در عملکرد سیستم‌های حساس الکترونیکی و مخابراتی در تمام بازه فرکانسی می‌شود).
- کاهش قابلیت اطمینان سیستم قدرت (بخاطر ایجاد وقفه‌های ناشی از تعمیر و تعویض تجهیزات آسیب دیده در اثر صاعقه و اتصال کوتاه ناشی از وقوع جرقه روی مقره‌ها یا بین فازها).
- اثر مکانیکی (اعمال نیروهای الکتروستاتیکی بر هادی‌ها، تجهیزات شبکه قدرت و اتصالات).
- اثر شکست عایقی و دی الکتریکی (ناشی از تولید اضافه ولتاژهای گذرا، ایجاد جرقه روی مقره‌ها، بوشینگها و سرکابلها و عبور جریان از طریق آنها به زمین).

۴- Inter-Cloud Flash

۵- Cloud to Ground Flash

۶- Lightning

۱- Ground Potential Rise



شکل (۱-۲). انواع صاعقه از لحاظ جهت و پلاریته

وقوع صاعقه از نشانه‌های قدرت خداوند حکیم می‌باشد^۱. بسیاری از محققان بر این باورند که صاعقه نقش مهمی در وجود حیات و ادامه آن در سطح کره زمین دارد. لذا صاعقه در کنار معیایی که اشاره شد دارای مزایای متعددی نیز می‌باشد. صاعقه باعث افزایش دمای هوا در مسیر کانال تخلیه و در محل اصابت تا بیش از ۳۰۰۰۰ درجه سلسیوس می‌گردد. این افزایش دما دارای فوائد زیر می‌باشد:

- تولید ترکیبات نیتروژن در اثر شکسته شدن مولکول نیتروژن هوا و ترکیب آن با آب (به عنوان کود برای رشد و نمو گیاهان و موجودات زنده، کمک به تولید پروتئین در بدن موجودات زنده).
- تولید گاز ازن و تقویت لایه ازن جو زمین (لایه ازن به عنوان لایه محافظ در برابر تشعشعات کیهانی و جذب کننده پرتوهای فرا بنفش^۲ جو).
- تولید آب اکسیژنه (میکروب زدایی محیط).

۲-۲-۴ مشخصات امواج صاعقه

از اوایل قرن بیستم میلادی تلاش‌های زیادی جهت اندازه‌گیری پارامترهای صاعقه در نقاط مختلف دنیا انجام شده است. مهمترین آزمایشات برای اندازه‌گیری و ثبت مشخصات صاعقه توسط Berger در کشور سوئد بین سالهای ۱۹۴۳ تا ۱۹۷۱ صورت گرفته است. از نتایج بدست آمده از این آزمایشات به عنوان مبنا در تدوین استانداردهای مهم از جمله IEC ۶۲۳۰۵ استفاده شده است. از بین مشخصات صاعقه، دامنه جریان و مقدار بار الکتریکی ذخیره شده در آن (به دلیل ایجاد خرابی‌های حرارتی و مکانیکی) و همچنین فرکانس و شیب جریان صاعقه (بدلیل القای ولتاژ و خرابی در تجهیزات الکترونیکی) دارای

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

اهمیت بیشتری می‌باشند.

الف - دامنه موج صاعقه

دامنه جریان صاعقه می‌تواند از چند صد آمپر تا چند صد کیلو آمپر (بیش از ۵۰۰ کیلوآمپر) متغیر باشد. هر چه دامنه صاعقه بیشتر باشد احتمال وقوع آن کمتر خواهد بود. براساس استاندارد IEC۶۲۳۰۵، دامنه جریان صاعقه و احتمال وقوع آن برای موج اصلی صاعقه منفی مطابق جدول (۲-۲) می‌باشد.

جدول ۲-۲. احتمال وقوع صاعقه برحسب دامنه جریان (استاندارد IEC۶۲۳۰۵)

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

ب - شیب پیشانی موج صاعقه

شیب پیشانی موج جریان صاعقه (di/dt) برحسب نوع صاعقه بسیار متغیر می‌باشد. براساس استاندارد IEC۶۲۳۰۵، حداکثر شیب موج جریان صاعقه، ۲۰۰ کیلوآمپر بر میکروثانیه می‌باشد. شیب پیشانی موج صاعقه، سبب القای ولتاژ در هادی‌های حلقه‌ای بسته یا باز در اطراف مکان تخلیه صاعقه می‌گردد. میزان ولتاژ القایی ناشی از شیب جریان صاعقه می‌تواند از چندین مگاولت نیز بیشتر باشد.

ج - بار الکتریکی موج صاعقه

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

د - فرکانس موج صاعقه

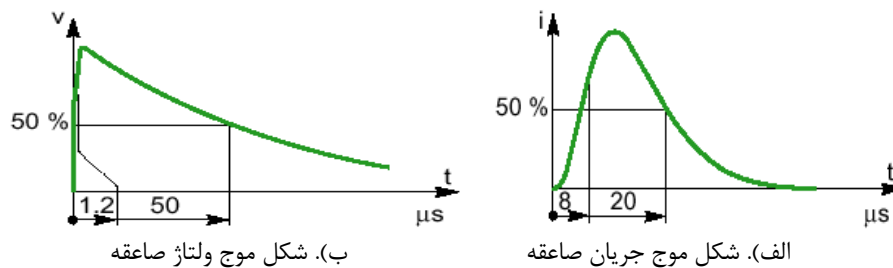
طیف فرکانسی موج صاعقه شامل باند فرکانس بین ۱۰ kHz تا چند صد مگاهرتز می‌باشد. بخاطر شکل ضربه‌ای موج صاعقه، طیف فرکانسی آن گسترده و پهن می‌باشد. در نتیجه اثر صاعقه به عنوان نویز و ولتاژ القایی، در اکثر فرکانس‌ها به وضوح مشاهده می‌شود.

ه - سرعت انتشار موج صاعقه

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

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

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



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

به طور کلی، زمان پیشانی موج صاعقه بین ۱ تا ۱۰ میکروثانیه و زمان پشت موج بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ میکروثانیه می باشد. غالباً صاعقه‌های با دامنه بزرگتر دارای زمان پیشانی طولانی‌تر می باشند.

و- انرژی موج صاعقه

انرژی هر صاعقه متناسب با میزان بار الکترواستاتیکی ابر، ولتاژ بین ابر و زمین (یا ابر با ابر) و مقاومت الکتریکی محل اصابت یا تخلیه صاعقه می باشد. به طور مثال، مقدار انرژی یک صاعقه معمولی با ولتاژ بین ابر و زمین برابر ۱۰ MV و ابر با بار الکتریکی ۲۰ کولن، حدود ۵۵ kWh می باشد. در عمل مقدار انرژی صاعقه بسیار متغیر است و مقدار متوسط آن حدود ۲۵۰ kWh تخمین زده شده است.

ز- طول کانال تخلیه

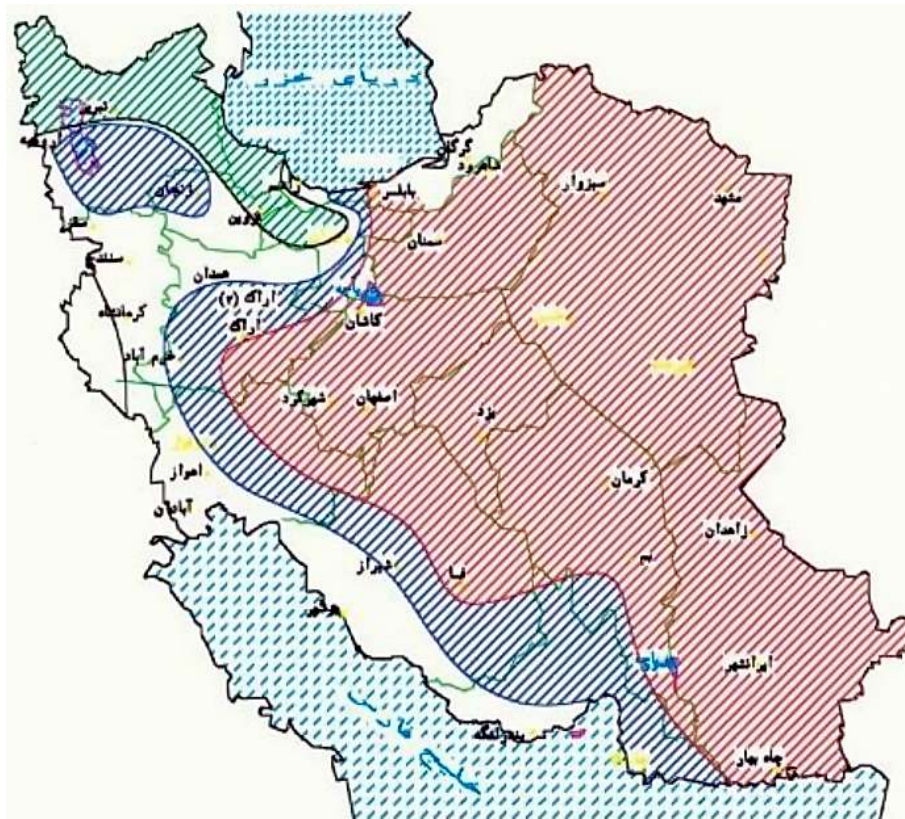
فاصله بین ابر و زمین در مسیر تخلیه (طول کانال تخلیه) متناسب با مقدار شدت میدان الکتریکی هوا می تواند بین ۵۰۰ متر تا ۱۰ کیلومتر باشد.

۲-۲-۵ پیش بینی وقوع صاعقه

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

الف- سطح کرونیك (Ta)

سطح کرونیك یا عدد کرونیك، تعداد روزهایی از سال که در آن رعد و برق مشاهده یا شنیده می شود را مشخص می کند. البته عدد کرونیك برحسب تعداد ساعتهای صاعقه دار در طول سال نیز بیان می شود. عموماً مناطقی که دارای عدد کرونیك نسبتاً برابر هستند را با منحنیهای بسته که به منحنیها یا نقشه‌های ایزوکرونیك^۱ معروف می باشند، مشخص می کنند. نقشه ایزوکرونیك ایران با توجه به اطلاعات ثبت شده از سال ۱۳۶۵ تا سال ۱۳۷۵ شمسی در شکل (۲-۳) نشان داده شده است.



عنوان گروه	گروه ۱	گروه ۲	گروه ۳	گروه ۴
میانگین تعداد روزهای رعد و برقی در سال	کمتر از ۵ روز	۵ تا ۱۰ روز	۱۰ تا ۱۵ روز	بیش از ۱۵ روز

شکل (۲-۳). نقشه ایزوکرونیک سالانه ایران (نمونه)

ب- شدت یا چگالی سطحی صاعقه (Ng)

تعداد صاعقه‌هایی که در یک سال به واحد سطح زمین (یک کیلومتر مربع) برخورد می‌کند را چگالی صاعقه زمین (GFD)^۱ می‌نامند. چگالی صاعقه زمین در هر منطقه برحسب عدد کرونیک آن منطقه و از رابطه تقریبی (۲-۲) محاسبه می‌شود.

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

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

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

۲-۲-۲ انواع اضافه ولتاژهای صاعقه

تخلیه جوی یا صاعقه به دو شکل کلی اصابت مستقیم صاعقه^۲ و اصابت غیر مستقیم، باعث تولید اضافه ولتاژهای گذرا در سیستمهای قدرت می‌شود.

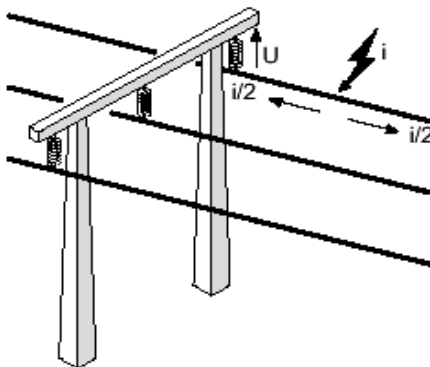
۱- Ground Flash Density

۲- Direct Lightning

۲-۲-۶-۱ اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت مستقیم صاعقه

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

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



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

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

۲-۲-۶-۲ اضافه ولتاژهای ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه

اصابت غیر مستقیم صاعقه^۱ به روشهای زیر می‌تواند اثرات مخرب خود را بر تجهیزات سیستمهای الکتریکی تحمیل نماید.

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

صاعقه می‌تواند به طور مستقیم به سیم محافظ هوایی یا بدنه دکل اصابت کرده و باعث ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای شدید بین بدنه فلزی دکلها و هادی فازها (در دو سر مقره) شود. اگر دامنه اضافه ولتاژهای ایجاد شده از سطح عایقی تجهیزات و یا مقدار ولتاژ جرعه بحرانی (CFO)^۲ بیشتر شود، نهایتاً منجر به تولید جرعه برگشتی (BFO)^۳ بین بدنه فلزی دکل و هادیهای فاز (از طریق مقره‌ها) می‌گردد. با وقوع جرعه برگشتی، امواج مخرب صاعقه به فازهای خطوط منتقل شده و از طریق این خطوط باعث تخریب تجهیزات الکتریکی متصل به آنها می‌گردند. در این حالت شدت تخریب تجهیزات، بستگی به فاصله تجهیز تا محل اصابت صاعقه دارد.

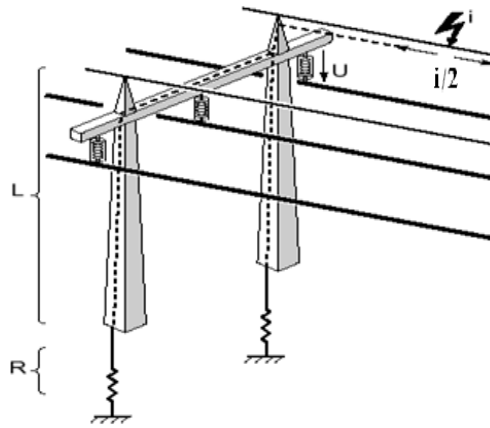
مطابق شکل (۵-۲)، اختلاف پتانسیلی که روی مقره‌ها ناشی از اصابت غیر مستقیم صاعقه ایجاد می‌شود به اندوکتانس دکل (L)، مقاومت زمین پای دکل (R) و مقدار جریان صاعقه که از طریق بدنه دکل به زمین جاری شده، بستگی دارد:

$$U(t) = RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (3-2)$$

۱- Indirect Lightning

۲- Critical Flashover Voltage

۳- Back Flashover



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

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

ب- افزایش پتانسیل زمین (GPR)

تخلیه جریان صاعقه در زمین مجاور خط باعث افزایش شدید پتانسیل زمین می‌شود. افزایش پتانسیل زمین مجاور تجهیزات می‌تواند از طریق سیستم زمین تجهیزات باعث افزایش ولتاژ بدنه و یا نقطه نول تجهیزات الکتریکی شده و نهایتاً منجر به تخریب آنها گردد. همچنین افزایش پتانسیل زمین از طریق افزایش پتانسیل سازه‌های فلزی دکل و با ایجاد جرقه برگشتی در سر مقره‌ها، به فازهای خطوط منتقل می‌شود.

دامنه ولتاژ القایی صاعقه و شکل موج آن به پارامترهای موج برگشتی صاعقه (جریان پایه کانال صاعقه و سرعت موج برگشتی)، فاصله و موقعیت محل اصابت صاعقه نسبت به خطوط هوایی، پارامترهای الکتریکی (امپدانس) زمین، ساختار (طول و ارتفاع) خطوط انتقال و سطح عایقی سیستم بستگی دارد. حداکثر فاصله‌ای که یک تخلیه صاعقه ابر به زمین می‌تواند باعث ایجاد ولتاژ القایی قابل ملاحظه روی خطوط هوایی شود، معمولاً در حدود ۲۰۰m می‌باشد و اصابت صاعقه در فاصله کمتر از ۱۰۰m از خط، می‌تواند باعث ایجاد جرقه روی مقره‌های خطوط با سطح عایقی ضعیف بشود. دامنه ولتاژ القایی (ناشی از برخورد صاعقه به زمین مجاور خطوط) در یک نقطه معین در طول خط، بستگی به شدت جریان صاعقه، فاصله افقی محل اصابت صاعقه به زمین از خط و ارتفاع هادیهای خط از سطح زمین دارد. هر چه ارتفاع دکل و سیم‌ها از سطح زمین کمتر باشد، دامنه اضافه ولتاژهای القایی کمتر می‌شود. بر اساس فرمول تعمیم یافته راسک^۱، ولتاژ القایی روی هادیهای خط هوایی در اثر برخورد صاعقه در مجاورت خط از رابطه تقریبی زیر بدست می‌آید:

$$V_{\max} = 38.8 \frac{I_s (h + 0.15\sqrt{\rho})}{y} [kV] \quad (۴-۲)$$

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

h (m): ارتفاع هادیهای خط از زمین،

ρ ($\Omega.m$): مقاومت مخصوص خاک،

y (m): فاصله محل برخورد صاعقه از خط،

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

ج- القاء ولتاژ روی هادیهای فاز از طریق انتشار امواج الکترومغناطیسی صاعقه

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

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

۲-۲-۷ اضافه ولتاژهای الکترواستاتیکی

هرچند عموماً امواج القائی از نوع الکترومغناطیسی می‌باشند، ولی امواج القائی از نوع الکترواستاتیکی نیز وجود دارند. در شبکه‌های هوایی بدون سیم محافظ، این نوع امواج القائی بیشتر مشاهده می‌شود. وقتی یک ابر با بار الکتریکی و پتانسیل معین در بالای خط هوایی قرار می‌گیرد، باعث القای بار الکتریکی از نوع مخالف روی خط می‌شود. بنابراین قبل از تخلیه ابرها، یک میدان الکتریکی بین خط و زمین بوجود می‌آید که می‌تواند به مقدار 30 kV/m برسد. این میدان الکتریکی می‌تواند خازن کوپلاژ موجود بین خط و زمین را با پتانسیل حدود 150 kV تا 500 kV شارژ کند. این اختلاف پتانسیل بوجود آمده بین خط و زمین می‌تواند باعث شکست ناقص (غیر فعال) عایق تجهیزات شبکه بشود. وقتی بار ابرها بوسیله وقوع صاعقه تخلیه شود، میدان الکتریکی مذکور تضعیف می‌شود و یا از بین می‌رود و خازن بین خط و زمین تخلیه می‌گردد و در نتیجه، دامنه ولتاژ الکترواستاتیک نیز کاهش می‌یابد.

بکارگیری سیم‌های محافظ بالاسری، میانی و پایین دست در خطوط هوایی و یا پستهای برق، می‌تواند دامنه ولتاژهای الکترواستاتیکی ناشی از ابر روی هادیهای فازها را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد.

۲-۲-۸ تأثیر اضافه ولتاژهای صاعقه بر شبکه‌های توزیع

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

همچنین، به دلیل بتونی و یا چوبی بودن پایه‌ها یا تیرهای برق در شبکه‌های توزیع، امپدانس موجی آنها به مراتب کمتر از پایه‌های فلزی می‌باشد و این امر می‌تواند احتمال وقوع جرقه الکتریکی روی مقره‌ها را افزایش دهد.

۱- Up-stream shield wire

۲- Down-stream shield wire

عدم استفاده از سیم محافظ بالاسری در شبکه‌های توزیع، باعث افزایش دامنه ولتاژ القایی روی هادی فازها ناشی از امواج الکترومغناطیسی صاعقه می‌شود. همچنین، پایین بودن سطوح عایقی تجهیزات و کم بودن فواصل فازی خطوط توزیع، احتمال تخریب عایقی تجهیزات و وقوع جرقه روی مقره‌ها را افزایش می‌دهد.

از طرف دیگر، طول شبکه‌های توزیع در مقایسه با خطوط انتقال بسیار کوتاه‌تر بوده و همچنین شدت پدیده کرونا در شبکه‌های توزیع بسیار ناچیز است. لذا استهلاک موج صاعقه در طول خطوط شبکه توزیع بسیار کم است و موج صاعقه به سرعت به تجهیزات اصلی شبکه توزیع می‌رسد. بنابراین اضافه ولتاژهای صاعقه ایجاد شده در هادی‌های فاز، تهدید عمده برای عایق تجهیزات شبکه‌های توزیع مثل ترانسفورماتورهای قدرت، کابلها، سرکابل‌ها، ترانسفورماتورهای ولتاژ و خازن‌های اصلاح ضریب توان محسوب می‌گردند.

بنابراین، حفاظت شبکه‌های توزیع در برابر امواج الکترومغناطیسی صاعقه باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. بکارگیری مناسب وسایل حفاظتی مثل برقگیرها می‌تواند نقش موثری در حفاظت از تجهیزات شبکه‌های توزیع در برابر امواج گذرای مخرب داشته باشد.

۲-۳ اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی

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

خطر اضافه ولتاژهای کلیدزنی برای تجهیزات سیستم قدرت با سطح ولتاژ بالاتر (فشارقوی) و برای سیستم‌هایی مثل کابلها و مدارهای بانک خازنی که دارای امپدانس موجی کوچک می‌باشند، بیشتر است.

برای کاهش دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی از ترانسفورماتورهای ولتاژ (در خطوط)، راکتورهای شنت، برقگیرها، مقاومت‌های موازی با کلید و غیره استفاده می‌گردد. دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی در سیستم‌هایی که دارای وسایل محدود کننده نمی‌باشند، بیش از ۴ پریونیت و در صورت استفاده از روشهای محدود کننده (مثل مقاومت قطع و وصل در کلیدها) بین ۲ الی ۲/۵ پریونیت و در صورت استفاده از روشهای پیشرفته‌تر (مانند استفاده از مقاومت‌های چند مرحله‌ای در کلیدهای قدرت)، بین ۱/۵ تا ۲ پریونیت می‌باشد.

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

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

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

۱- فاصله زمانی برقراری قوس و سرعت خاموش شدن آن در محفظه کلید.

۲- وجود و یا عدم وجود مقاومت موازی در کلید.

۳- کنترل و یا عدم کنترل لحظه وصل کلید.

۴- وجود و یا عدم وجود ترتیب معین جهت وصل جریانها در سه فاز کلید.

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

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

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

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

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

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

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

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

۱- قطع جریان راه اندازی موتور.

۲- قطع جریان سلفی مانند جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتورها و راکتورها.

۳- قطع و وصل کوره‌های القایی همراه با ترانسفورماتور آنها در حالت برش (قطع) جریان.

۴- قطع و وصل کابل‌ها و خطوط بدون بار و مدارات خازنی.

۵- قطع جریان توسط فیوزهای فشارقوی.

مشخصات اضافه ولتاژهای فوق به عواملی مثل مشخصات کلید قدرت (خصوصیات دی الکتریکی، توانایی قطع جریان‌های فرکانس بالا)، امپدانس مشخصه خط یا کابل، فرکانس‌های طبیعی بار و شبکه بستگی دارند. در ولتاژهای $72/5$ تا 245 کیلوولت قطع جریان خازنی (جریان شارژ خط) ناشی از کلیدزنی خطوط هوایی و کابل‌های بدون بار عملاً خطرناکتر از سایر حالتها می‌باشد، لذا در این شرایط نمی‌توان از کلیدهای با عملکرد معمولی جهت این کار استفاده نمود.

۲-۳-۵ شکل موج اضافه ولتاژ کلیدزنی

شکل کلی امواج کلیدزنی، شبیه امواج صاعقه بوده ولی زمان پیشانی و زمان پشت موج آنها حدود چند میلی ثانیه می‌باشد. خصوصیات موجها شامل شکل، دامنه و فرکانس با توجه به مشخصات شبکه و نوع و نحوه عملکرد کلید و شرایط انتشار موج از محل نصب کلید، متفاوت می‌باشد. دامنه اضافه ولتاژ کلیدزنی به مشخصات شبکه، مشخصات کلید و نوع تجهیزات تحت کلیدزنی بستگی دارد. مهمترین عامل در افزایش دامنه اضافه ولتاژهای کلیدزنی، ولتاژ نامی شبکه می‌باشد بطوریکه در ولتاژهای پایین، دامنه این اضافه ولتاژها کم بوده و از سطح استقامت عایقی پیش بینی شده در شبکه تجاوز نمی‌کند. در ولتاژهای کمتر از 230 kV دامنه اضافه ولتاژهای قطع و وصل و احتمال بروز آنها بسیار محدود بوده بطوریکه تمهیدات خاصی جهت کاهش آن مورد نیاز نمی‌باشد. در ولتاژهای بالاتر از 300 kV دامنه و احتمال بروز گذراهای کلیدزنی بطور قابل توجه افزایش یافته، بطوریکه در این سطوح ولتاژ، خطر اضافه ولتاژهای کلیدزنی بیشتر از اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه، عایق تجهیزات شبکه را تهدید می‌کند.

به منظور تعیین استقامت عایقی تجهیزات سیستم قدرت در برابر گذراهای قطع و وصل، از شکل موج‌های استاندارد برای گذراهای ولتاژ و جریان استفاده می‌شود. شکل موج کلیدزنی با سه مشخصه اصلی حداکثر دامنه، زمان پیشانی (T_1) و زمان پشت موج (T_2) مشخص می‌گردد. حدود مقادیر T_1 و T_2 در استانداردهای مختلف مشخص شده است. مطابق استاندارد IEC و شکل (۲-۶)، مقدار زمان پیشانی و زمان پشت موج ولتاژ کلیدزنی به ترتیب 250 و 2500 میکروثانیه می‌باشد.



شکل (۲-۶). شکل موج ولتاژ کلیدزنی

۲-۳-۶ ولتاژ بازیابی گذرا در کلیدهای قدرت

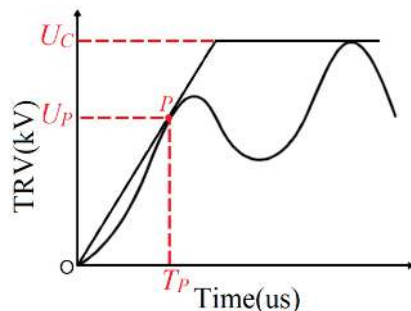
هنگامی که جرقه بین تیغه‌های کلید در موقع باز شدن از بین می‌رود و جریان مدار قطع می‌شود سیستم به دو بخش بالادست کلید و پایین دست کلید تقسیم می‌شود. در این هنگام هر بخش به علت داشتن مقاومت داخلی، سلف و خازن پراکندگی ناشی از خطوط انتقال و دیگر تجهیزات، تشکیل مدار RLC سری می‌دهد. فرکانس طبیعی و ضریب میرایی مدار دو طرف کلید متفاوت می‌باشد. این تفاوت باعث ایجاد ولتاژ دو سر کلید با فرکانس‌های بالا می‌گردد که اصطلاحاً به آن ولتاژ بازیابی گذرا (TRV) گفته می‌شود. مقدار پیک این ولتاژ و نرخ افزایش آن دو مشخصه اصلی در کلیدهای قدرت به حساب می‌آیند که در کنار جریان اتصال کوتاه، توانایی قطع کلید را مشخص می‌کنند.

نوع خطا و ضریب اثر سیستم زمین از عوامل تاثیرگذار بر شکل موج ولتاژ بازیابی گذرا و مقادیر مشخصه‌های آن می‌باشند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بدترین حالت ولتاژ بازیابی گذرا مربوط به خطای سه‌فاز زمین نشده یا سیستم‌های با نول زمین نشده می‌باشد. با توجه به اینکه احتمال رخ دادن خطای سه‌فاز زمین نشده بسیار کم است، استاندارد IEEE خطای سه‌فاز زمین شده را برای مطالعات ولتاژ بازیابی گذرای کلیدزنی پیشنهاد می‌کند. همچنین خطاهایی که در فواصل نزدیک به ترمینال رخ می‌دهند، به دلیل ایجاد امواج سیار با شکل موج دنداناره اره‌ای و فرکانس بالا، معمولاً در لحظات اولیه بعد از خاموش شدن جرقه، نرخ افزایش ولتاژ بازیابی گذرا (RRRV)^۲ را تحت تاثیر قرار می‌دهند. شکل (۲-۷)، شکل موج

۱- Transient Recovery Voltage

۱- Rate of Rise of Recovery Voltage

کلی ولتاژ بازیابی گذرا در دو سر کلید در لحظه باز شدن تیغه‌ها را نشان می‌دهد که در آن UC معرف مقدار حداکثر TRV و شیب خط OP معرف مقدار نرخ افزایش ولتاژ بازیابی می‌باشد. شکل موج ولتاژ بازیابی با توجه به موقعیت خطا می‌تواند به صورت سینوسی، نمایی، دندان‌اره‌ای و یا ترکیبی از آنها باشد.



شکل (۷-۲). شکل موج TRV و مشخصات آن

مطابق استاندارد IEC ۶۰۲۷۱، دامنه موج دوم ولتاژ^۱ و مقدار نرخ افزایش ولتاژ بازیابی آن برای ولتاژ برگشتی گذرای کلیدهای قدرت از رابطه‌های (۵-۲) و (۶-۲) بدست می‌آیند.

$$V_{TRV} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times k_{af} \times k_{pp} \times V_r \quad (۵-۲)$$

$$RRRV = \frac{V_{TRV}}{t_{TRV}} \quad (۶-۲)$$

k_{af} : ضریب دامنه (برای خطای ترمینال و اتصال کوتاه: ۱/۴، برای قطع بار: ۱/۲۵)،

k_{pp} : ضریب FPC کلید (برای کلید فشار ضعیف: ۱/۳، کلید فشار متوسط: ۱/۵)،

V_r : ولتاژ نامی سیستم،

t_{TRV} : زمان رسیدن به پیک ولتاژ V_{TRV} ،

همچنین، دامنه موج اول ولتاژ^۲ و مقدار نرخ افزایش ولتاژ بازیابی آن از رابطه‌های (۷-۲) و (۸-۲) بدست می‌آید:

$$V_1 = 0.75 \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times k_{pp} \times V_r \quad (۷-۲)$$

$$RRRV = \frac{V_1}{t_1} \quad (۸-۲)$$

t_1 (μs): زمان رسیدن به پیک ولتاژ V_1

مقدار مجاز TRV و RRRV برای شبکه‌های مختلف در استانداردهای مربوطه مشخص شده است. به طور مثال مقدار مجاز

TRV و RRRV برای شبکه ۲۰ kV طبق استاندارد IEC ۶۰۲۷۱ به ترتیب ۴۵/۳ kV و ۱/۰۵ kV/ μs می‌باشد.

از روشهای کاهش مقادیر TRV و RRRV می‌توان به موازی کردن برقگیر با کلید و نصب خازن موازی بین دو سر کلید اشاره نمود.

۲-۴ اضافه ولتاژهای موقتی یا فرکانس قدرت

اضافه ولتاژهای موقتی شامل نوساناتی با میرائی کم و اغلب همراه با هارمونیک می‌باشند و معمولاً با پریودی در حدود چند صد میلی‌ثانیه (بیش از ۵ سیکل) تداوم می‌یابند. اضافه ولتاژهای موقتی اغلب در پی تغییر ساختار شبکه بوجود می‌آیند و

۲- Second reference voltage

۱- First reference voltage

فاقد کیفیت موجی بوده و تا برگشت شبکه به وضعیت عادی خود، ادامه خواهند داشت. این اضافه ولتاژها اغلب دارای فرکانسهای پایین یا فرکانس شبکه قدرت می‌باشند. از مهمترین شرایط و علل ایجاد اضافه ولتاژهای موقتی در سیستم‌های قدرت می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- وقوع پدیده رزونانس و فرورزونانس،
 - وقوع خطای تکفاز به زمین (خطای عایقی)،
 - قطع هادی‌های فاز (در سیستم زمین نشده و یا زمین شده با امپدانس بالا) و یا قطع سیم نول در سیستم با بار نامتعادل (شبکه‌های فشارضعیف)،
 - خطوط انتقال طویل بی‌بار یا کم بار جبران نشده (اثر فرانتی)،
 - قطع و پس زدن بارهای بزرگ،
 - برقدار کردن ترانسفورماتورهای بی بار یا کم بار (جریان هجومی)،
 - کلیدزنی خطوط بلند بی بار،
 - برقدار کردن غیر همزمان فازهای خطوط انتقال سه فاز،
- اضافه ولتاژهای با زمان کوتاه که برای چند ثانیه دوام دارند رایجترین نوع اضافه ولتاژهای موقتی در شبکه‌های فشار ضعیف و فشار متوسط می‌باشند. عموماً تجهیزات محدود کننده و حفاظت کننده (برقگیرها) که برای حذف و کاهش دامنه اضافه ولتاژهای صاعقه و کلیدزنی مورد استفاده قرار می‌گیرند قادر به حذف اضافه ولتاژهای موقتی نمی‌باشند.

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

پدیده فرورزونانس^۱ یا رزونانس غیر خطی (جهشی) یک پدیده مخرب شناخته شده در شبکه‌های قدرت دارای راکتانس غیر خطی (هسته اشباع پذیر)، تجهیزات با خاصیت خازنی و دارای تلفات پایین، می‌باشد. فرورزونانس یک پدیده نسبتاً رایج در شبکه‌های توزیع می‌باشد زیرا در این شبکه‌ها ترانسفورماتورهای با هسته اشباع پذیر و خطوط توزیع با ماهیت خازنی وجود دارد. خاصیت خازنی سیستم به خاطر وجود فیدهای کابلی، خطوط هوایی، بانک خازنی، ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ با مقسم خازنی، کلیدهای قدرت مجهز به خازن، تجهیزات ایزوله کننده (خازن پوشینگ) و غیره می‌باشد. همچنین وجود سیستم‌های مقاومت پایین (ترانسفورماتورهای با تلفات کم، ترانسفورماتورهای بی بار، شبکه با تلفات کم) باعث افزایش احتمال وقوع پدیده فرورزونانس می‌شود. به عنوان مثال، ترانسفورماتورهای اندازه گیری ولتاژ که دارای بار کم بوده و فقط تجهیزات حفاظتی و یا اندازه گیری را تغذیه می‌کنند اغلب در معرض تهدید فرورزونانس قرار دارند.

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

به طور کلی، وقوع پدیده فرورزونانس به پارامترها و شرایط متعددی مثل شرایط اولیه سیستم، مشخصه اشباع هسته ترانسفورماتورها، شار پسماند هسته ترانسفورماتورها، نحوه اتصال سیم پیچ ترانسفورماتورها، موقعیت و زمان کلیدزنی، کل تلفات سیستم، ظرفیت خازنی شبکه و مدار، نوع و چگونگی وقوع پدیده‌های گذرا و عوامل دیگر بستگی دارد. سطوح ولتاژ بالا، خطوط طولانی و کابل‌های دفنی این پدیده را تشدید می‌کنند.

ممکن است فرورزونانس با توجه به تغییرات راکتانس مدار، در باند فرکانسی وسیع رخ دهد. دامنه این نوع اضافه ولتاژها به ۱/۵ تا ۲ پیونیت می‌رسد ولی ممکن است در سیستم‌های توزیع حتی به ۴ پیونیت نیز برسد. در سیستم‌های ستاره - مثلث زمین نشده، پدیده فرورزونانس بیشتر دیده می‌شود و برای ترانسفورماتورهای توزیع با بار زیاد عملاً وقتی که فقط یک فاز شبکه برقرار می‌شود (به سبب عمل کردن فیوز و یا هر علتی که باعث برقرار شدن یک فاز شود) اتفاق می‌افتد. همچنین در ترانسفورماتورهای ولتاژ متصل به شینه‌ای که بوسیله یک کلید قدرت از سیستم جدا شده باشد، اتفاق می‌افتد. موارد دیگر مانند قطع و وصل یک بار مقاومتی در ثانویه ترانسفورماتور، یا تغییر در عمل کلیدزنی می‌تواند سبب ایجاد پدیده فرورزونانس شود. در سیستم‌های توزیع، متداولترین حالتی که باعث ایجاد فرورزونانس می‌شود، قطع و وصل یک فاز از ترانسفورماتور سه فاز تغذیه شده بوسیله کابل زیر زمینی است. اگر اولیه ترانسفورماتور سه فاز نباشد، در هنگام قطع و وصل یک فاز، یک مدار رزونانس سری بوسیله کاپاسیتانس کابل در فاز باز و راکتانس مغناطیس‌کنندگی غیرخطی ترانسفورماتور تشکیل می‌شود. در ولتاژهای بالا، به لحاظ کاپاسیتانس داخلی ترانسفورماتور وقتی عمل قطع و وصلی در ترمینال‌های آن صورت می‌گیرد احتمال وقوع فرورزونانس وجود دارد. رایجترین نوع فرورزونانس در ترانسفورماتورهای با هسته پنج ستونه و با سیم پیچ اولیه ستاره زمین شده می‌باشد. به طور کلی، اضافه ولتاژهای ناشی از وقوع فرورزونانس می‌تواند خطراتی مثل شکست دی الکتریکی تجهیزات، ایجاد هارمونیک، کاهش عمر مفید تجهیزات، تولید نویز صوتی و عملکرد ناخواسته رله‌ها را به همراه داشته باشد.

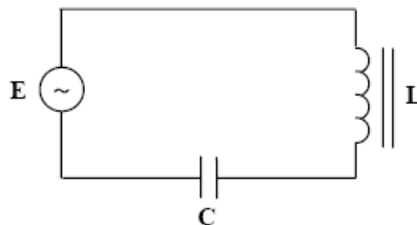
هرگاه در یک مدار خطی مقدار راکتانس خازنی با مقدار راکتانس سلفی برابر باشد آنگاه در یک فرکانس مشخص مطابق رابطه (۹-۲)، پدیده رزونانس یا تشدید اتفاق می‌افتد.

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

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

راکتانس غیر خطی علاوه بر فرکانس به چگالی شار مغناطیسی هسته ترانسفورماتورها یا راکتور نیز بستگی دارد. خاصیت غیر خطی راکتانس سلفی را می‌توان بصورت منحنی اشباع یک هسته مغناطیسی با دو ناحیه خطی ($X_{L-linear} = \omega L_{Linear}$) و ناحیه اشباع ($X_{L-Sat} = \omega L_{Sat}$) بیان نمود.

همانند رزونانس، فرورزونانس نیز به دو صورت سری و موازی بوجود می‌آید. مطابق شکل (۸-۲)، در فرورزونانس سری رابطه (۱۰-۲) برقرار است.

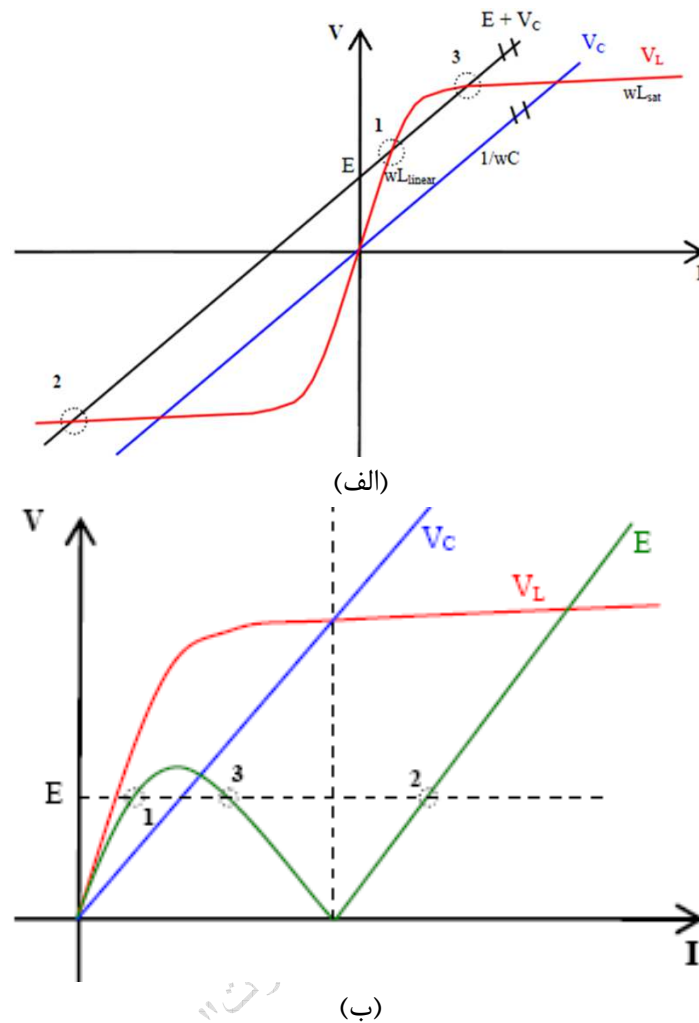


شکل (۸-۲). مدار فرورزونانس سری

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

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

بیان این راه حل نموداری مطابق قسمت ب شکل (۹-۲) می‌باشد.



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

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

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

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

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

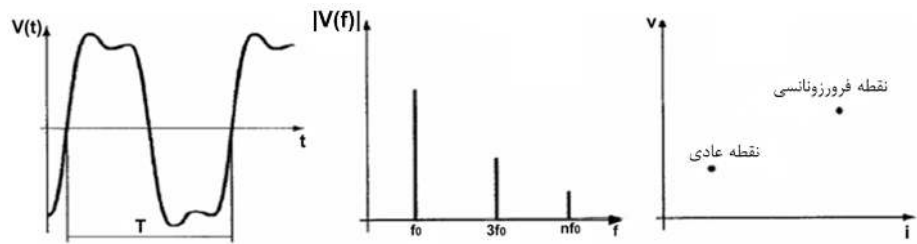
$$X_{L-Sat} < X_C \Rightarrow E = V_C - V_L$$

- نقطه کار ۳، یک نقطه کار ناپایدار می‌باشد.

بنابراین، مشخصه اصلی مدار فرورزونانس، شامل حداقل دو نقطه کار پایدار و جهش‌های ناگهانی بین این دو موقعیت می‌باشد. برای پیش‌بینی و تشخیص اولیه مشخصه نوسانات جریان در اندوکتانس غیرخطی و یا نوسانات ولتاژ دو سر آن در هنگام وقوع پدیده فرورزونانس، آن را به چهار نوع نوسانات پایدار به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌کنند.

الف - فرورزونانس پایه

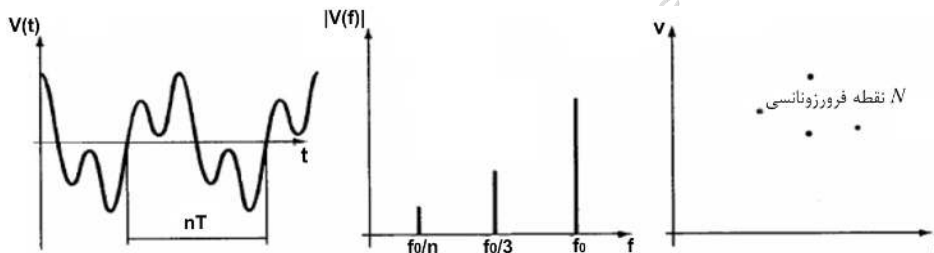
در حالت فرورزونانس پایه^۱ یا فرورزونانس با فرکانس اصلی، نوسانات با فرکانس شبکه (فرکانس قدرت) و با دامنه متفاوت اتفاق می‌افتد. در این حالت تنها یک نقطه کار عادی و یک نقطه کار فرورزونانسی برای مدار وجود دارد. در شکل (۱۰-۲) شکل موج فرورزونانس پایه، پاسخ فرکانسی آن و نقاط کار سیستم نشان داده شده است.



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

ب- فرورزونانس زیرهارمونیک

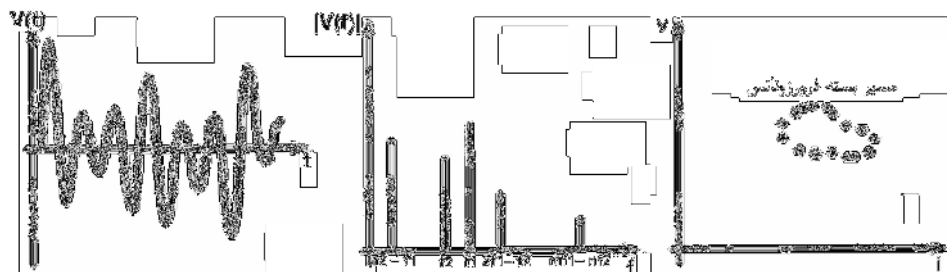
در حالت فرعی یا فرورزونانس با فرکانس زیر هارمونیک^۲، نوسانات با فرکانس فرد پائین‌تر یا بالاتر از فرکانس قدرت ایجاد می‌شوند. در شکل (۱۱-۲) شکل موج فرورزونانس زیرهارمونیک، پاسخ فرکانسی آن و نقاط کار سیستم ارائه شده است.



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

ج- فرورزونانس شبه متناوب^۳

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



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

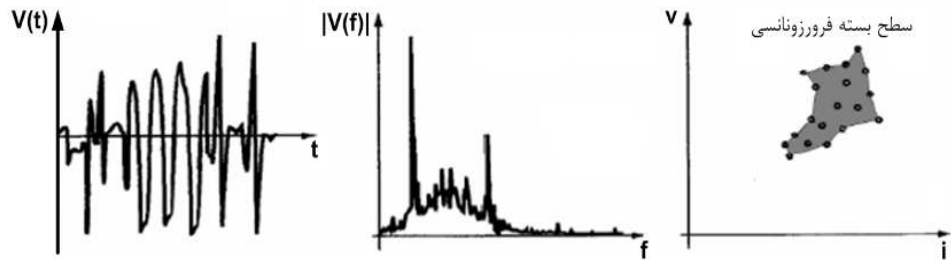
۱- Fundamental Frequency Ferroresonance

۲-Subharmonic Ferroresonance

۳- Quasi-periodic Ferroresonance

د- فرورزونانس حالت آشفته^۱

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



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

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

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

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

X_d : راکتانس مستقیم شبکه از دید نقطه خطا،

X_0 : راکتانس توالی صفر،

به عنوان مثال، برای شرایط مختلف زمین شدن نقطه نول، مقدار اضافه ولتاژ فازهای سالم تحت شرایط وقوع خطای تکفاز، مطابق جدول (۲-۶) می‌باشد.

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

C_e	K	$X_d (\Omega)$	$X_0 (\Omega)$	نحوه زمین شدن نقطه نول سیستم
۱/۷۳	∞	-	∞	زمین نشده
۱	۱	-	X_d	زمین شده موثر
۱/۱۸	۲/۳	۵۲	۱۲۰	زمین شده غیر موثر (پست)

				۴۰۰ کیلوولت)
۱/۲	۲/۵	۸۵	۲۱۰	زمین شده غیر موثر (وسط خط ۴۰۰ کیلوولت)

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

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

۲-۴-۳ اضافه ولتاژهای ناشی از قطع خطوط

قطع کلیدهای خطوط نیرو با برنامه قبلی (برای تعمیرات، تغییر فیدر، ...) و یا در اثر وقوع خطا اتفاق می افتد. در قطع کلیدها با برنامه قبلی، اغلب پیش بینی های لازم جهت محدود سازی اضافه ولتاژهای موقتی صورت می گیرد. برای این کار ابتدا بار خط را به تدریج کاهش می دهند و سپس کلید آن قطع می گردد. همچنین در این حالت، اضافه ولتاژ موقتی ناشی از کاهش بار را با تنظیم تپ ترانسفورماتور می توان کنترل نمود.

اما اغلب مشکل اصلی در هنگام قطع ناگهانی خطوط می باشد. در حالت قطع ناگهانی خطوط پربار یا حذف ناگهانی بخشی از بارهای اکتیو و راکتیو خط، اضافه ولتاژ موقتی در طول خط تولید می شود. مقدار اضافه ولتاژ موقتی ایجاد شده در خط، به عواملی مثل طول خط، بار خط در لحظه قطع کلید، قدرت اتصال کوتاه شبکه های تغذیه کننده خط و غیره بستگی دارد.

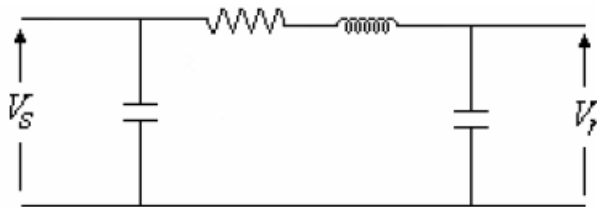
۲-۴-۴ اضافه ولتاژ ناشی از خطوط طویل بی بار (اثر فرانتی)

در خطوط هوایی طویل و خطوط کابلی بدون بار (یا با بار کم)، خاصیت خازنی نسبت به خاصیت سلفی خط بیشتر می باشد. این امر باعث افزایش توان راکتیو تزریق شده به خط از طریق خازنهای پراکنده می شود و منجر به افزایش ولتاژ انتهای خط نسبت به ولتاژ ابتدای خط می گردد. به افزایش ولتاژ در انتهای خطوط انتقال نیروی بی بار یا کم بار، اضافه ولتاژ ناشی از اثر فرانتی^۱ می گویند. این امر در واقع ناشی از بی بار بودن خطوط طویل برقرار در اثر قطع بودن کلید انتهای خط و وصل بودن کلید ابتدای خط یا کاهش شدید بار خط می باشد. در این شرایط ظرفیت خازنی بین هادیهای فاز و زمین و همچنین ظرفیت خازنی بین فازها افزایش می یابد. از طرف دیگر خطوط طویل بدون بار و یا با بار کم، دارای جریان سلفی کم می باشند. بنابراین با افزایش ظرفیت خازنی خطوط، توان راکتیو تزریقی به خط افزایش می یابد و نهایتاً باعث افزایش ولتاژ در انتهای خط (نسبت به ابتدای آن) می شود. توان راکتیو خط در شرایط بی باری با توجه به ظرفیت خازنی (C)، طول خط (L) و ولتاژ اسمی آن (U)، از رابطه (۲-۱۲) تعیین می گردد:

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

با افزایش طول و ولتاژ خطوط انتقال نیرو، جریان خازنی خط (شارژ خازنی) افزایش می یابد به طوریکه اثر فرانتی در خطوط متوسط و طویل بیشتر اتفاق می افتد.

برای خط با طول متوسط، رابطه ولتاژ انتهای خط برای مدار معادل خط مطابق شکل (۲-۱۴) از رابطه (۲-۱۳) بدست می آید.



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

V_r : ولتاژ انتهای خط.

V_s : ولتاژ ابتدای خط.

I_r : جریان بار خط.

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

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

$$V_s = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_r \quad (14-2)$$

یا:

$$V_s - V_r = \frac{YZ}{2} V_r = \frac{(j\omega C l)(r + j\omega L) l}{2} V_r \quad (15-2)$$

با صرف نظر کردن از مقاومت خط:

$$V_s - V_r = \frac{-\omega^2 l^2 C L}{2} V_r \quad (16-2)$$

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

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 3 \times 10^5 \text{ (km/s)}$$

بنابراین با جایگذاری مقدار LC در رابطه (۱۶-۲) و ساده سازی، نهایتاً مقدار ولتاژ انتهای خط از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_s = \left[1 - \frac{\omega^2 l^2 \times 10^{-10}}{18}\right] V_r = k V_r \quad (17-2)$$

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

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