فصل دوم

بررسی انواع اضافه ولتاژها در سیستمهای قدرت و علل پیدایش آنها

۲-۱- مقدمه

سطح ایزولاسیون به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی شبکه مطرح می‌باشد و ارتباط مستقیمی با اضافه ولتاژهای موجود در شبکه دارد.

افزایش ولتاژ از مقدار نامی خود، به اضافه ولتاژ در شبکه موسوم می‌باشد. از آنجائیکه ظهور اضافه ولتاژ در شبکه اجتناب‌ناپذیر است، لذا احتمال بروز قوس در ایزولاسیون و ماده ایزوله در شبکه همراه وجود دارد.

کاهش درصد بروز قوس‌ها و اتصالی‌ها مستلزم شناخت کامل اضافه ولتاژها، انواع مختلف آنها، شرایط ایجاد و پدید آمدن آنها و همچنین نحوه تاثیر آنها در ایزولاسیون شبکه می‌باشد و در صورت برخورداری از چنین شناختی، انتخاب مشخصات مناسب شبکه و تجهیزات موجود در آن امکان پذیر می‌گردد.

۲-۲- انواع مختلف اضافه ولتاژها در شبکه:

کلیه اضافه ولتاژهای ظاهر شده در شبکه بر حسب شکل و یا منبع بروز خود، تقسیم‌بندی می‌شوند. که می‌توان آنها را به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود:

۲-۲-۱- اضافه ولتاژهای صاعقه[1]

۲-۲-۲- اضافه ولتاژهای کلیدزنی[2]

1- LOV= Lightning Over Voltage
2- SOV = Switching Over Voltage

۲-۲-۳- اضافه ولتاژهای موقتی[1]

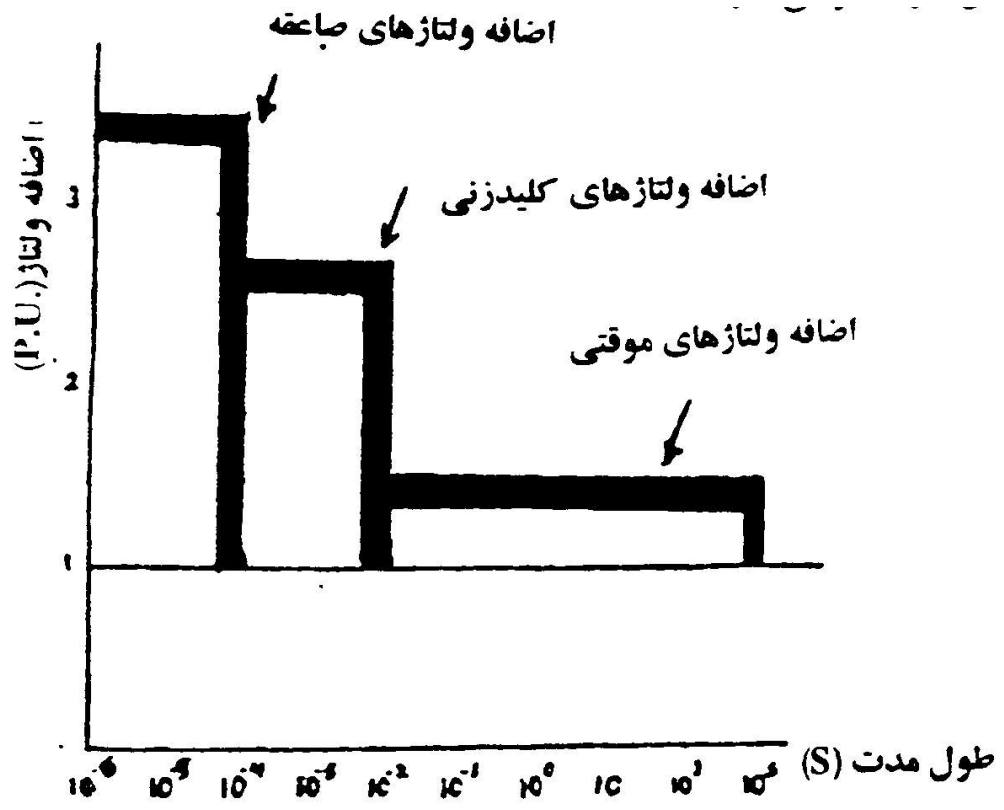
که با توجه به عامل بوجود آورنده نیز به دو دسته داخلی[2] و خارجی[3] تقسیم می‌شوند.

بر اساس این تقسیم‌بندی اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه به اضافه ولتاژ خارجی و دو نوع دیگر به اضافه ولتاژهای داخلی موسوم می‌باشد.

۲-۲-۱- اضافه ولتاژهای صاعقه

در پی تخلیه جوی الکتریکی بر قسمتهای مختلف شبکه، بارهای الکتریکی انباشته در ابرها و فصل از طریق کانال یونیزه تشکیل شده در فضا بصورت قوس مرئی رعد و برق در قسمتهای مختلف شبکه تخلیه گشته ، اصطلاحاً به تخلیهٔ جوی الکتریکی موسوم می‌باشد. تخلیه بارهای الکتریکی جوی، موجبات افزایش ولتاژ را به طور لحظه‌ای در محل تخلیه فراهم ساخته، ولتاژ موجی با سرعت نور در طول هادی‌های فاز منتشر می‌شود و اضافه ولتاژهای تخلیه جوی را در شبکه پدید می‌آورد.

1- TOV = Temporary Over Voltage
2- Internal Over Voltage
3- External Over Voltage



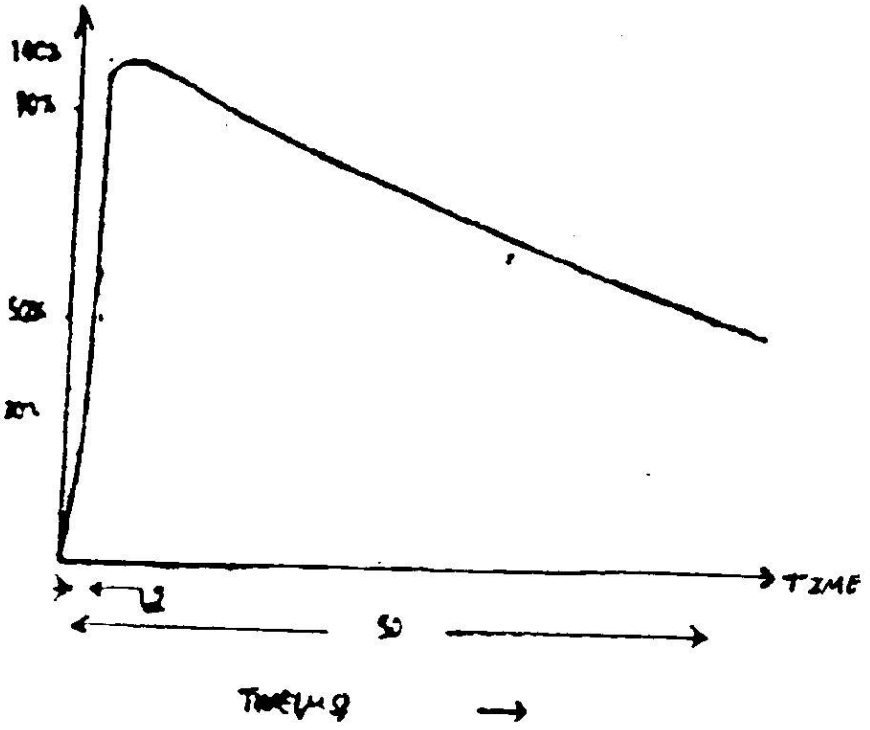
شکل (۲-۱) : انواع مختلف اضافه ولتاژها در شبکه

اضافه ولتاژهای موجی رعد و برق حداکثر سرعت افزایش را در میان انواع مختلف اضافه ولتاژهای موجی دارا می‌باشند. سرعت افزایش آنها در حدود ۵۰۰۰-۵۰۰ کیلوولت بر میکروثانیه متغیر می‌باشد.

۲-۲-۱-۱- مشخصه اضافه ولتاژهای صاعقه

اضافه ولتاژهای صاعقه می‌توانند با یک موج صاعقه استاندارد μsec ۲/۵۰ –۱ مطابق شکل زیر مدل شوند. به عبارت دیگر این دسته امواج غیر پریودیکی دارای زمان پیشانی حدود یک و نیم میکروثانیه و زمان پشت موج در حدود چند ده میکرو ثانیه هستند. با توجه به شیب پیشانی این دسته

اضافه ولتاژها، تنش بیشتری روی عایق بندی طولی پیچکهای اندوکتیو اعمال می‌کنند و به دلیل زمان کوتاهتر، عموماً تنش قابل برای عایق‌بندی در مقایسه با امواج کلیدزنی با دامنه یکسان قدری بیشتر خواهد بود. میزان تنش تحمل شده بستگی به نوع عایق خواهد داشت.



شکل (۲-۲) : موج استاندارد صاعقه

۲-۲-۲- اضافه ولتاژهای کلید زنی (قطع و وصل)

اضافه ولتاژهای قطع و وصل به صورت موج در شبکه ظاهر گردیده و از نظر شکل و تغییرات لحظه‌ای خود،کاملاً مشابه اضافه ولتاژهای موجی تخلیه جوی می‌باشند. تفاوت عمده در زمان پیشانی و زمان استهلاک یا کاهش دامنه موج بوده، سرعت افزایش دامنه ولتاژهای موجی قطع و

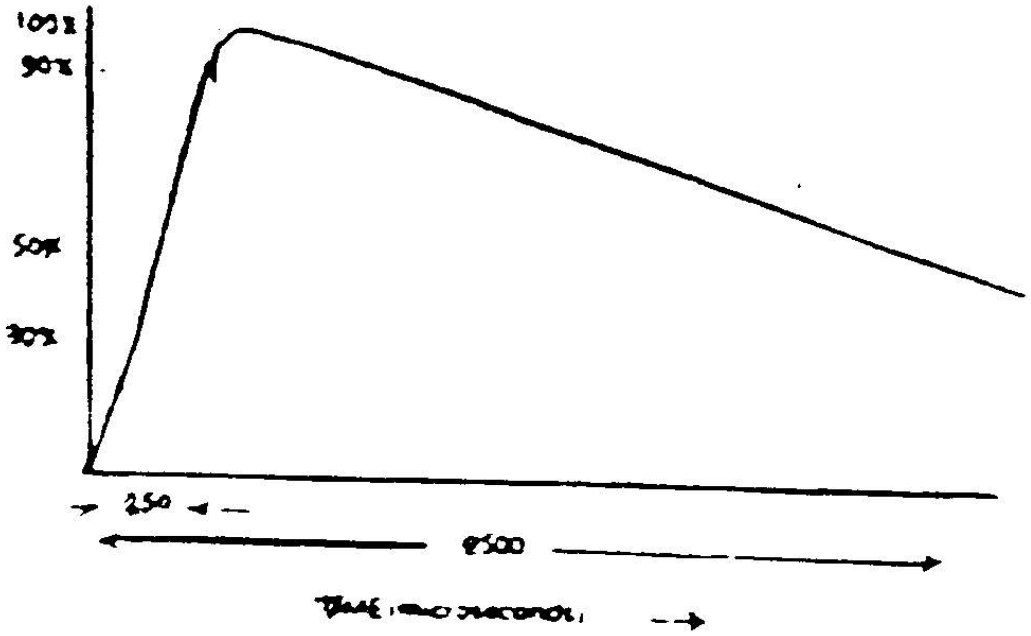
وصل به حدود چند کیلوولت بر میکروثانیه بالغ می‌گردد. چون این اضافه ولتاژها از عوامل و تجهیزات داخلی شبکه ناشی می‌گردند لذا به اضافه ولتاژهای داخلی موسوم می‌باشند. اضافه ولتاژهای موجی قطع و وصل در پی قطع و وصل کلیدها و رژیم گذرای ظاهر شده در آنان نتیجه شده در آنان نتیجه گردیده، لذا اضافه ولتاژهای گذرا نیز نامیده می‌شوند.

بدین ترتیب منبع بروز این اضافه ولتاژها، رژیم گذرای ظاهر شده در شبکه بوده و خصوصیات اضافه ولتاژها بستگی کامل به کمیات، مشخصات الکتریکی شبکه و رژیم‌های گذرای آنان خواهد داشت. دامنه موجهای اضافه ولتاژ قطع و وصل به مشخصات شبکه، مشخصات کلید، نوع دستگاههای مورد قطع و وصل بستگی دارد. مهمترین عامل در افزایش دامنه موجها، ولتاژ اسمی شبکه می‌باشد. در ولتاژهای پایین این موجها محدود بوده و از حدود ایزولاسیون پیش‌بینی شده شبکه تجاوز نمی‌نمایند.

دامنه اضافه ولتاژهای گذرای قطع و وصل و احتمال بروز آنها در ولتاژهای اسمی پایین ($U \leq 230kv$) بسیار محدود بوده، بطوریکه هیچگونه پیش بینی را جهت کاهش آنها ایجاب نمی‌نماید.

۲-۲-۲-۱- موج استاندارد قطع و وصل یا کلید زنی

به منظور تامین توانایی سیستم ایزولاسیون شبکه و سایر تجهیزات فشار قوی در قبال موجهای اضافه ولتاژ گذرای قطع و وصل، موج استاندارد با شکل مشخص به عنوان موج ولتاژ استاندارد قطع و وصل تعیین گردیده است که منحنی آن در شکل زیر آورده شده است.



شکل (۲-۳) : موج استاندارد قطع و وصل یا کلیدزنی

موج توسط زمان پیشانی خود Td و زمان دم موج (پشت موج) T1 مشخص می‌گردد. حدود این پارامترها در استانداردهای مختلف تعیین گردیده‌اند. در استاندارد آمریکا و IEC مقدار معمول آن به ترتیب در حدود ۲۵۰ و ۲۵۰۰ میکروثانیه مشخص گردیده است.

۲-۲-۲-۲- علل بروز اضافه ولتاژهای کلید زنی:

اضافه ولتاژهای کلید زنی عوامل متعددی دارند و اهمیت نسبی آنها در رده‌های مختلف ولتاژی یکسان نیست.

۲-۲-۲-۲-۱- اضافه ولتاژهای ناشی از کلید زنی جریان‌های سلفی و خازنی:

این مسئله ممکن است در هر دو زمینه توزیع و تاسیسات صنعتی و نیروگاهها نیازمند توجه باشند. در حالت اخیر چنانچه کلید قدرت آن چنان دیونیزه شود که جریان را پیش از موقع صفر کند ممکن است اضافه ولتاژهای بزرگی به وجود آیند در همین زمینه باید موارد زیر را در نظر گرفت:

الف) قطع جریان‌های سلفی، مثلا هنگامی که جریان مغناطیس کننده یک ترانسفورماتور یا راکتور قطع می‌شود.

ب) کلید زنی و عملکرد یک کوره قوس الکتریکی و ترانسفورماتور آن ممکن است باعث برش جریان شود.

ج) کلید زنی کابلهای بی بار و بانکهای خازنی.

د) قطع جریان با فیوزهای ولتاژ بالا.

۲-۲-۲-۲-۲- اضافه ولتاژهای کلید زنی ناشی از تغییرات ناگهانی بار

در اثر تغییرات ناگهانی بار ممکن است اضافه ولتاژهای کلید زنی که توسط اضافه ولتاژهای موقتی دنبال می‌شوند بوجود آیند.

۲-۲-۳- اضافه ولتاژهای موقت[1]

۲-۲-۳-۱- مقدمه:

اضافه ولتاژهای موقت، نوعی اضافه ولتاژ نوسانی فاز به زمین، یا فاز به فاز می‌باشند، که نسبتا طولانی مدت و یا نامیرا هستند و یا بطور ضعیفی میرا می‌شوند. از آنجا که اضافه ولتاژهای موقت از نظر کار برقگیر حائز اهمیت فراوان هستند (برقگیرها باید بتوانند اضافه ولتاژهای موقت را تحمل کنند)، لازم است درصد اضافه ولتاژهای موقت شبکه محاسبه گردد. اضافه ولتاژهای موقت از علل زیر نشات می‌گیرند:

۲-۲-۳-۱-۱- خطاها.

۲-۲-۳-۱-۲- تغییرات ناگهانی بار.

۲-۲-۳-۱-۳-اثر فرانتی.

۲-۲-۳-۱-٤-رزونانس خطی.

۲-۲-۳-۱-٥-فرورزونانس.

۲-۲-۳-۱-٦-قطع هادی (یارگی خط).

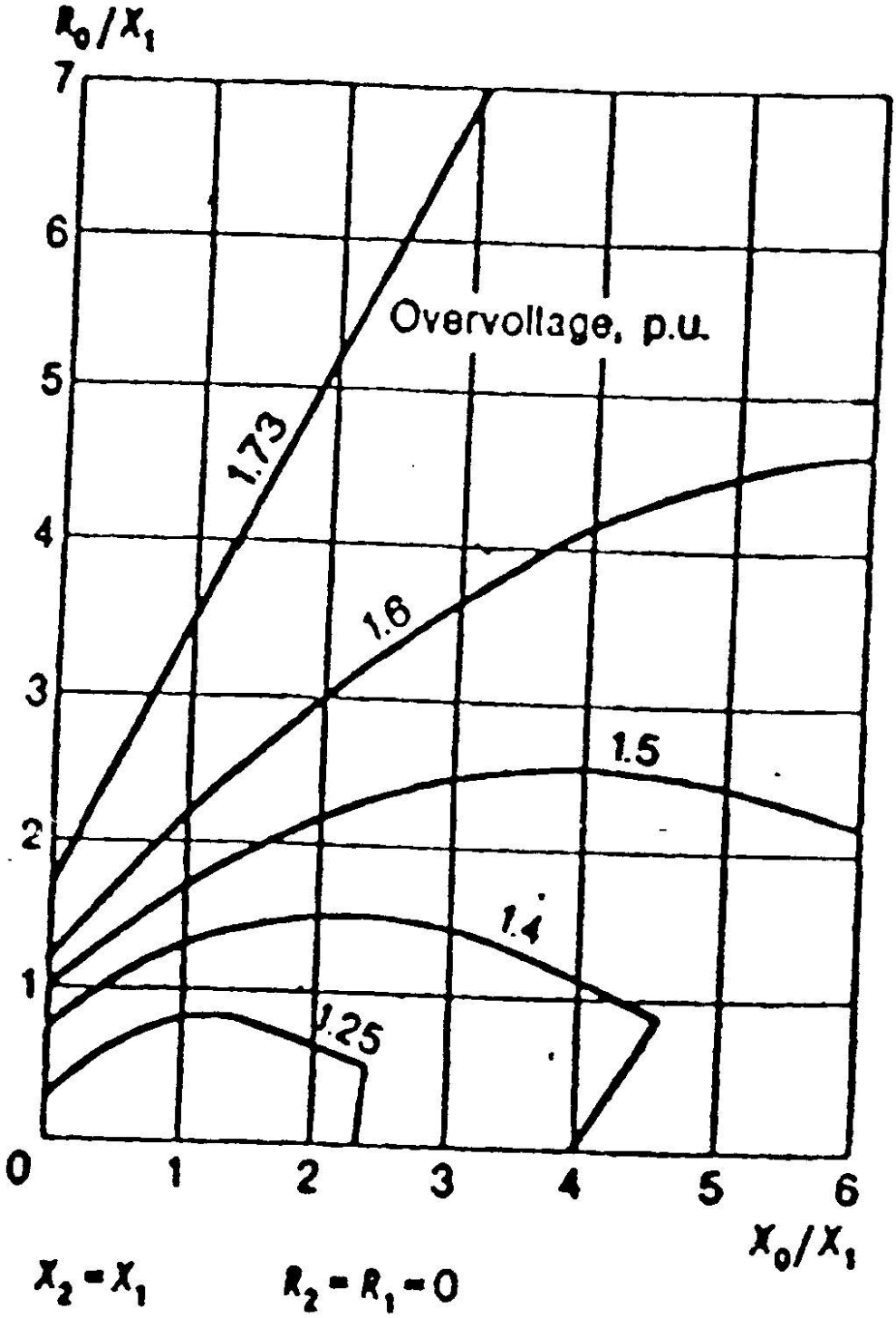
۲-۲-۳-۱-۷-رزونانس ناشی از مدارهای کوپل شده.

در این مجال سعی می‌شود به بیان تئوری برخی از این علل پرداخته شود.

1- Temporary overvoltage

۲-۲-۳-۱-۱- خطاهای زمین:

اضافه ولتاژهای موقت ممکن است یا میرا شده باشند و یا میرا نشده یک خطای زمین وضعیتی است که اضافه ولتاژ نامیرا را بوجود می‌آورد. که تا زمانی که ولتاژ توسط برخی از طرق کلید زنی برداشته نشود، بر روی عایق فشار وارد می‌آورد . نوع غالب خطا، خطای تکفاز به زمین می‌باشد (حدودا ۹۵) خطاهای دو فاز به زمین و سه فاز به زمین و خطاهای غیر زمین، اغلب خیلی کمتر اتفاق می‌افتند. شکل زیر حداکثر اضافه ولتاژهای موقتی در فازهای سالم در طی یک اتصال کوتاه تکفاز را بر اساس امپدانسهای توالی صفر و مثبت سیستم نشان می‌دهد.



شکل (۲-۳) اضافه ولتاژهای موقت در اثر اتصال کوتاه تکفاز

حداکثر اضافه ولتاژهای موقتی بر حسب .p.u به عنوان ضریب خطای زمین نامیده می‌شود. این ضریب تعیین کننده شرایط سیستم مورد نظر می‌باشد. سیستمهای قدرت ۱٤٥kv و بالاتر معمولا دارای نقطه صفر مستقیم زمین شده می‌باشند. و این باعث کوچکی ضریب خطای زمین در این سیستمها و در نتیجه کاهش اضافه ولتاژهای موقتی می‌شود (معمولا کمتر از .۱,٤p.u و غالبا بین ۱,۲ تا ۱,۳) و به همین دلیل به سطوح عایقی پایین تری احتیاج دارند.

سیستمهای با ولتاژ کمتر از ۱٤٥kv نیز در اروپا غالب از طریق سلف پترزن زمین می‌شوند. در این گونه سیستمها اضافه ولتاژهای موقتی برابر ولتاژ فاز به فاز می‌باشد و بعبارت دیگر دامنه اضافه ولتاژهای موقتی .۱,۷۳p.u می‌شود.

۲-۲-۳-۲- تغییرات ناگهانی بار:

بدترین حالت تغییر بار، از دست دادن بار یا قطع بار می‌باشد. این موضوع زمانی اتفاق می‌افتد که کلید قطع مدار روی یک خط در پاسخ به برخی از شرایط سیستم یا عیوب کاذب عکس‌العمل نشان داده و عمل کند که این عمل منجر به کاهش جریان جاری و افزایش ولتاژ می‌شود.

دامنه اضافه ولتاژ موقت بستگی به محل قطع بار و قدرت اتصال کوتاه سیستم دارد. اضافه ولتاژهای موقت ناشی از قطع کامل بار در ترانسفورماتورهای ژنراتور، بعلت بوجود آوردن شرایط افزایش سرعت، اهمیت زیادی دارند. دامنه اضافه ولتاژهای ناشی از قطع بار، معمولا در طول مدتشان ثابت نیست. در زیر ماکزیمم مقادیر چنین اضافه ولتاژهایی آورده شده است:

قطع بار در ترانسفورماتورهای سیستم:

دامنه‌ها:

پستهای با قدرت اتصال کوتاه زیاد: ۱/۰۵

پست‌های با قدرت اتصال کوتاه کم:۱/۰۲.

طول مدت وابسته به ترانسفورماتور (عمل تب چنجر) : (s-minutes)۱۰.

قطع بار در ترانسفورماتورهای ژنراتور:

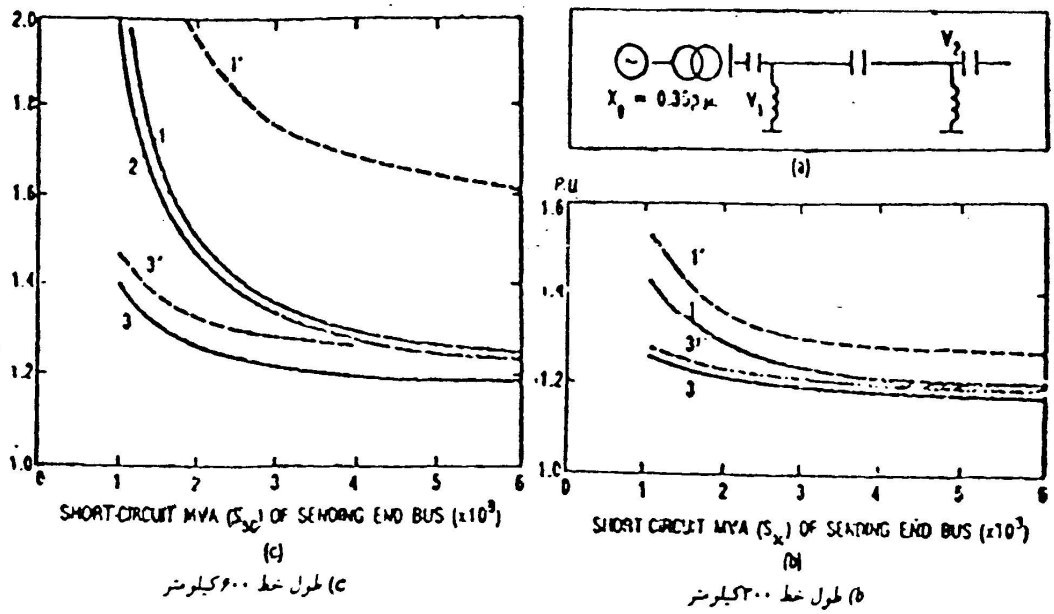
دامنه‌ها:

توربوژنراتورها: ۱/٤.

هیدروژنراتورها: ۱/۵.

طول مدت:s۳.

در شکل‌های زیر مقدار اضافه ولتاژ موقت ظاهر شده در خط ٤۰۰kv مجهز به راکتور شنت و خازن سری، بر حسب قدرت اتصال کوتاه شبکه تغذیه نشان داده شده است در شکل (b) طول خط ۳۰۰ کیلومتر و در شکل (c)، ٦۰۰ کیلومتر بوده است. ولتاژ در ابتدا وانتهای خط، به ترتیب با خط پر و خط چین نشان داده شده است. منحنی‌های ۱و ۱' اضافه ولتاژهای موقت را بدون انجام جبران سازی خط، منحنی ۲ به ازای ۵۰٪ جبران سری و منحنی‌های ۳ و ۳' با ۵۰٪ تعادل سری و ۷۰٪ تعادل شنت نمایش می‌دهند.



شکل (۲-٤) : اضافه ولتاژ موقت ظاهر شده در خط ٤۰۰ کیلوولت بر حسب قدرت اتصال کوتاه شبکه

۲-۲-۳-۱-۲- اثر فرانتی:

ولتاژ دائمی در انتهای باز یک خط انتقال جبران نشده، همیشه بالاتر از ولتاژ در ابتـدای خـط است، این پدیده به اثر فرانتی مشهور می‌باشد. افزایش ولتاژ از شرایط خازنی خط و بار راکتیـو آن در بی‌باری ناشی می‌گردد.

برای یک خط جبران نشده ولتاژ در انتهای باز خط برابر است با:

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{1}{\cos(\beta L)} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

V_2 = ولتاژ انتهای خط مدار باز

V_1 = ولتاژ ابتدای خط انتقال

β = ثابت فاز (در فرکانس $50\,Hz \Leftarrow 100\,km / 6^{\circ}$ و در فرکانس $50\,Hz \Leftarrow 100\,km / 6^{\circ}$)

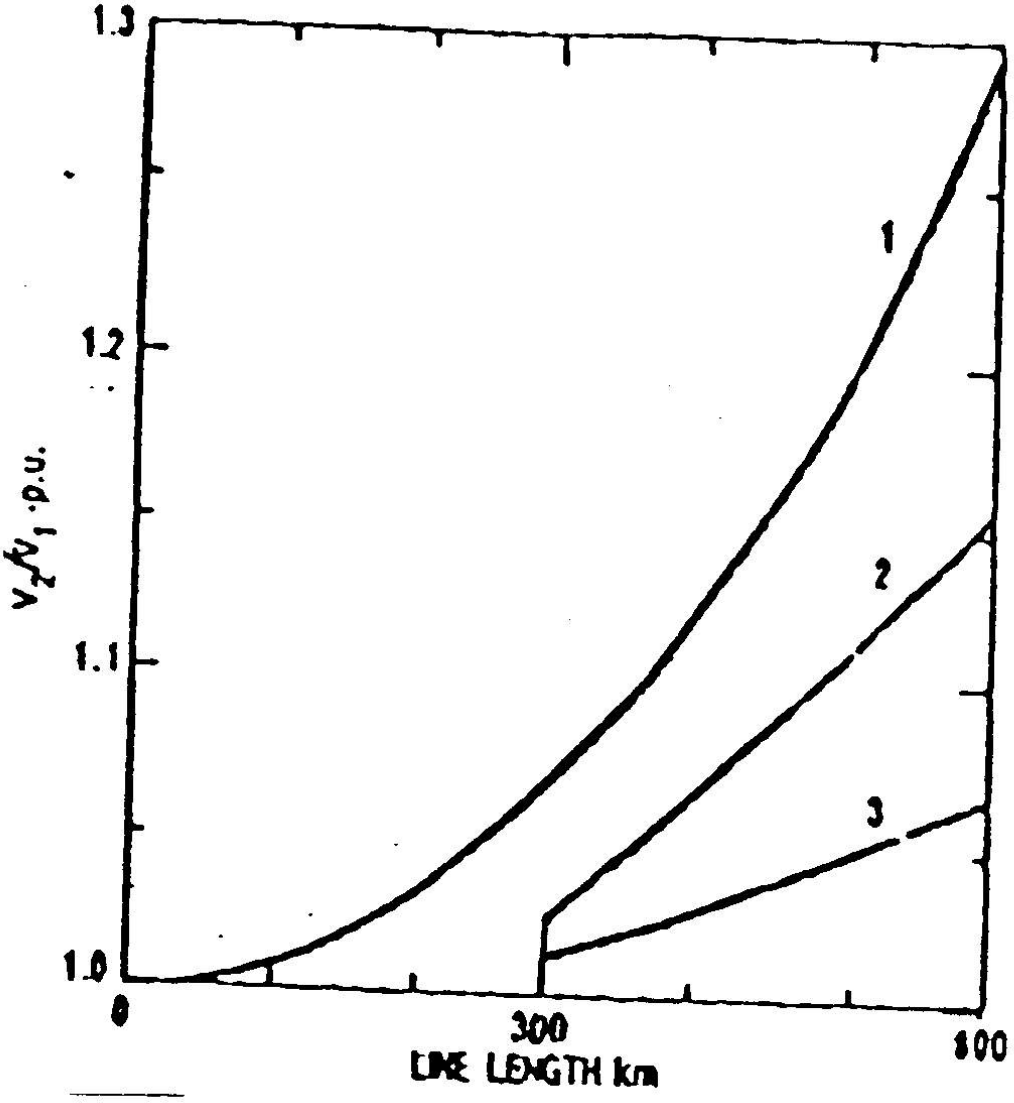
L = طول خط انتقال

شکل زیر دامنه‌های تقریبی اضافه ولتاژهای ناشی از اثر فرانتی را نشان می‌دهد. عمل جبـران سازی برای اثر فرانتی ممکن است با اندوکتانس شنت متعادل یا خازن سری متعادل بدست آید.

۱- بدون جبران‌سازی

۲- با جبران سازی

۳- جبران سازی توسط ۵۰٪ خازن سری و ۷۰٪ راکتور شنت



شکل (۲-۵) : اضافه ولتاژ ناشی از اثر فرانتی

در یک خط باز، اضافه ولتاژهای ناشی از اثر فرانتی بصورت طبیعی سینوسی می‌باشند.

۲-۲-۳-۱-۳- تشدید در شبکه

یکی از انواع اضافه ولتاژهای موقت که ممکن است بر روی یک سیستم انتقال بوقوع بپیوندد، از تشدید ناشی می‌شود. در شکل ساده شده سیستم، مدار مشتعل است بر یک منبع، یک کلید

و یک مدار تشدید، همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است. به وضوح ملاحظه می‌گردد که اگر مدار LC سری دارای تلفات کمی بوده و المانهای آن با فرکانس قدرت تنظیم شده باشند پس از بستن کلید ولتاژ به طور نامعینی از طریق سلف یا خازن افزایش خواهد یافت. در عمل اثرات تلفات و اشباع هسته ترانسفورماتورها و راکتورها این نوع اضافه ولتاژها را محدود می‌کنند . با صرفنظر از تلفات :

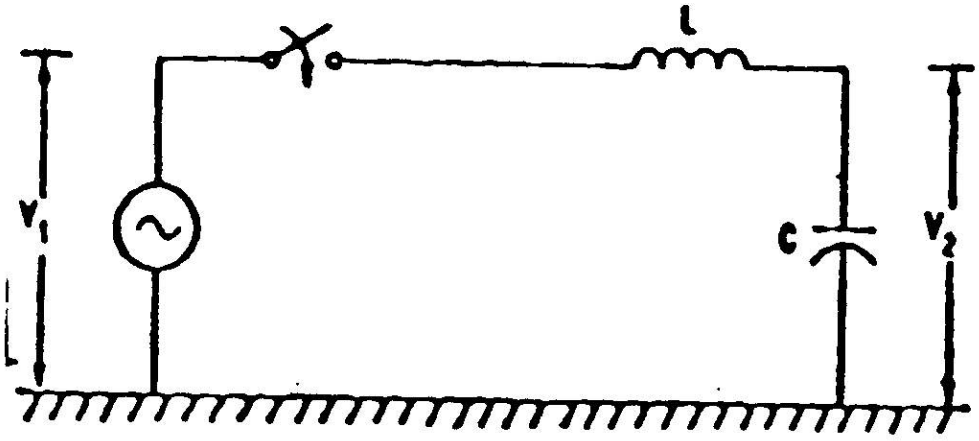
$$\frac{V2}{V1}=\frac{Xc}{(Xl+Xc)}=\frac{-L/\omega C}{(L\omega-\omega C)} \qquad (۲-۲)$$

که در آن:

L= اندوکتانس معادل منبع

C = کاپاسیتانس معادل بار

$2\pi f=\omega$

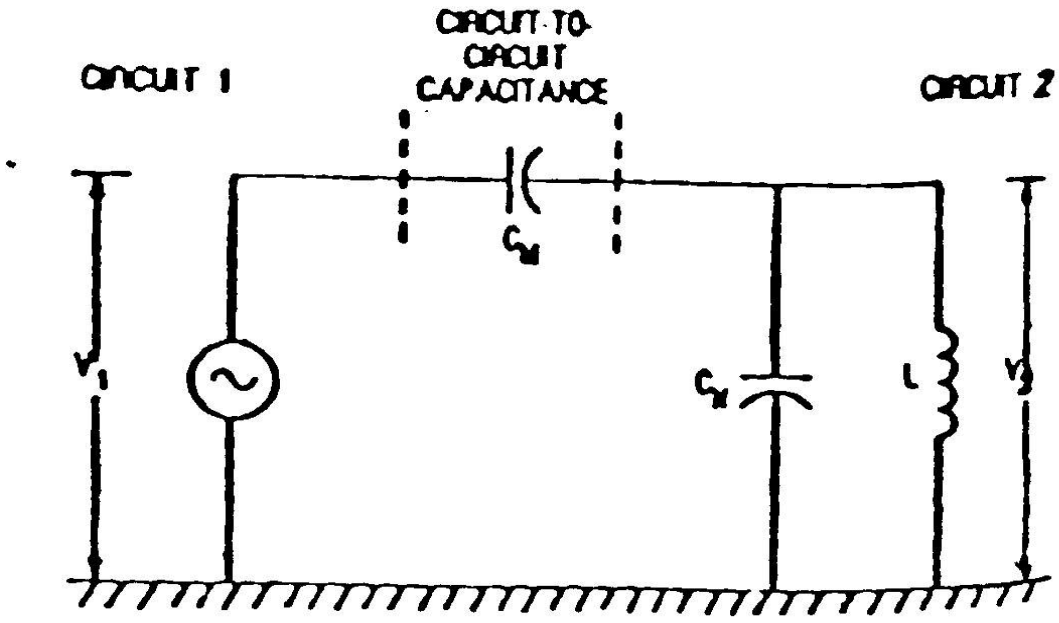


شکل (۲-٦) مدار رزونانس سری

اگر چه سیستمهای انتقال عمدتاً برای تشدید طراحی نشده‌اند، شرایط نزدیک به تشدید اتفاق می‌افتد. یک مثال از چنین شرایطی، حالتی است که قدرت انتقال داده شده از یک منبع فشار قوی، از طریق کابل و یک ترانسفورماتور به شبکه فشار ضعیف انجام گیرد، در این حالت راکتانس القایی ترانسفورماتور ممکن است تقریباً با راکتانس خازنی موازی کابل برابر شود.

۲-۲-۳-۱-٤- تشدید در خطوط موازی [۳]

از دیگر حالات رزونانس که گاهی اوقات بوجود می‌آید، اثر تشدید در مدارهای موازی است. این حالت زمانی بوجود می آید که چند مدار انتقال سه فاز بر روی یک مسیر همراه با ، یا تعادل راکتور شنت، یا ترانسفورماتورهای به طور موثر زمین شده، توأمان گشته، در حالی که یکی از مدارها دارای انرژی است، دیگری باز باشد. یک مدار معادل ساده در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل (۲-٤) : تشدید در خطوط موازی

در حالتهای سالم، سه حالت از تشدید که ممکن است منجر به اضافه ولتاژ شوند، وجود دارد. برای مدل توالی صفر، دامنه برابر است با:

$$\frac{V2}{V1}=\frac{1}{\left(\frac{Cu}{Cm}\times\frac{1}{\omega L}\right)\left(\omega L-\frac{1}{\omega Cn}\right)+1} \qquad (۲-۳)$$

که Cn و Cm توابعی از ظرفیت خازنی متقابل بین مدارها می‌باشند. اضافه ولتاژهای ناشی از این اثر سینوسی شکل هستند، مگر اینکه ولتاژ آنقدر زیاد شود که منجر به اشباع یا شرایط فرورزونانس شود. چنین اضافه ولتاژهایی غالباً به صورت احتمالی زمانی رخ می‌دهند که یک خط جهت تعمیرات خارج از سرویس است و می‌توان این پدیده را بطور ساده با زمین کردن خط بدون انرژی کنترل نمود.