

۱-۱- کلیات

در سیستمهای قدرت و شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، تک‌تک تجهیزات نقش اساسی دارند و بروز هرگونه عیبی در آنها، ایجاد اختلال در شبکه، اتصال کوتاه و قطع برق را به همراه دارد. خاموشی و جایگزینی تجهیزات معیوب هزینه‌های هنگفتی را به شبکه تحمیل می‌نماید. لذا بررسی و تحلیل بروز عیب در تجهیزات از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد و در صورت شناخت این عیوب و سعی در جلوگیری از بروز آنها از هدر رفتن سرمایه اقتصادی کشور جلوگیری به عمل می‌آید. برقگیرها از جمله تجهیزاتی هستند که جهت محدود کردن اضافه ولتاژهای گذرا (صاعقه و کلیدزنی) در شبکه‌های انتقال و توزیع به کار می‌روند. برقگیرها ضمن اینکه حفاظت تجهیزات در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا را بر عهده دارند، باید در مقابل اضافه ولتاژهای موقتی از خود واکنشی نشان ندهند و همچنین با توجه به شرایط محیطی منطقه مورد بهره‌برداری، نظیر رطوبت و آلودگی، عملکرد صحیح و قابل قبولی را ارائه دهند.

۱-۲- هدف:

بر طبق گزارشهای رسیده از تخریب برقگیرهای پست ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت شهید کشوری کرمانشاه و به منظور بررسی علل این حوادث این پروژه را به انجام رسید. در این پروژه ابتدا به بررسی انواع اضافه ولتاژهای محتمل در شبکه‌های قدرت پرداخته می‌شود، سپس برقگیرها به عنوان یکی از تجهیزات مهم برای محدود کردن این اضافه ولتاژها معرفی شده و چگونگی طراحی و تعیین پارامترها و مشخصات برقگیر جهت حفاظت مناسب از شبکه مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل چهارم عوامل کلی که سبب اختلال در عملکرد برقگیر می‌شوند مورد

بررسی قرار می‌گیرند. در فصل پنجم با استفاده از نرم‌افزار EMTP که قادر است حالات گذرا را بطور دقیق در شبکه آنالیز نماید شبکه مورد نظر شبیه‌سازی شده و شکل موج اضافه ولتاژهای تولید شده در شبکه در زمان وقوع حادثه محاسبه و ترسیم شده است.

با بررسی نتایج بدست آمده و مقایسه شکل موج اضافه ولتاژهای تولید شده با شکل موج اضافه ولتاژهای فرورزونانسی، وقوع پدیده فرورزونانسی در پست شهید کشوری کرمانشاه کاملاً مشهود است و اضافه ولتاژهای ناشی از این پدیده سبب تخریب برقی‌های این پست گردیده است. در پایان نیز پیشنهاداتی جهت جلوگیری از بروز مجدد چنین حوادثی در پست مذکور ارائه شده است.

خلاصه:

در سیستمهای قدرت و شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، تک‌تک تجهیزات نقش اساسی دارند و بروز هرگونه عیبی در آنها، ایجاد اختلال در شبکه، اتصال کوتاه و قطع برق را به همراه دارد. خاموشی و جایگزینی تجهیزات معیوب هزینه‌های هنگفتی را به شبکه تحمیل می‌نماید. لذا بررسی و تحلیل بروز عیب در تجهیزات از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد و در صورت شناخت این عیوب و سعی در جلوگیری از بروز آنها از هدر رفتن سرمایه اقتصادی کشور جلوگیری به عمل می‌آید. برقگیرها از جمله تجهیزاتی هستند که جهت محدود کردن اضافه ولتاژهای گذرا (صاعقه و کلیدزنی) در شبکه‌های انتقال و توزیع به کار می‌روند. برقگیرها ضمن اینکه حفاظت تجهیزات در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا را بر عهده دارند، باید در مقابل اضافه ولتاژهای موقتی از خود واکنشی نشان ندهند و همچنین با توجه به شرایط محیطی منطقه مورد بهره‌برداری، نظیر رطوبت و آلودگی، عملکرد صحیح و قابل قبولی را ارائه دهند.

بر طبق گزارشهای رسیده از تخریب برقگیرهای پست ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت شهید کشوری کرمانشاه و به منظور بررسی علل این حوادث این پروژه را به انجام رسید.

در این پروژه ابتدا به بررسی انواع اضافه ولتاژهای محتمل در شبکه‌های قدرت پرداخته می‌شود، سپس برقگیرها به عنوان یکی از تجهیزات مهم برای محدود کردن این اضافه ولتاژها معرفی شده و چگونگی طراحی و تعیین پارامترها و مشخصات برقگیر جهت حفاظت مناسب از شبکه مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل چهارم عوامل کلی که سبب اختلال در عملکرد برقگیر می‌شوند مورد بررسی قرار می‌گیرند. در فصل پنجم با استفاده از نرم‌افزار EMTP که قادر است حالات گذرا را بطور دقیق در شبکه آنالیز نماید شبکه مورد نظر شبیه‌سازی شده و شکل موج اضافه ولتاژهای تولید شده در شبکه در زمان وقوع حادثه محاسبه و ترسیم شده است.

با بررسی نتایج بدست آمده و مقایسه شکل موج اضافه ولتاژهای تولید شده با شکل موج اضافه ولتاژهای فرورزونانسی، وقوع پدیده فرورزونانسی در پست شهید کشوری کرمانشاه کاملاً مشهود است و اضافه ولتاژهای ناشی از این پدیده سبب تخریب برقگیرهای این پست گردیده است. در پایان نیز پیشنهاداتی جهت جلوگیری از بروز مجدد چنین حوادثی در پست مذکور ارائه شده است.

فصل دوم

بررسی انواع اضافه و لتاژها 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^۱

۲-۲-۲- اضافه ولتاژهای کلیدزنی^۲

۲-۲-۳- اضافه ولتاژهای موقتی^۱

که با توجه به عامل بوجود آورنده نیز به دو دسته داخلی^۲ و خارجی^۳ تقسیم می‌شوند.

۱- LOV = Lightning Over Voltage

۲- SOV = Switching Over Voltage

۱- TOV = Temporary Over Voltage

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

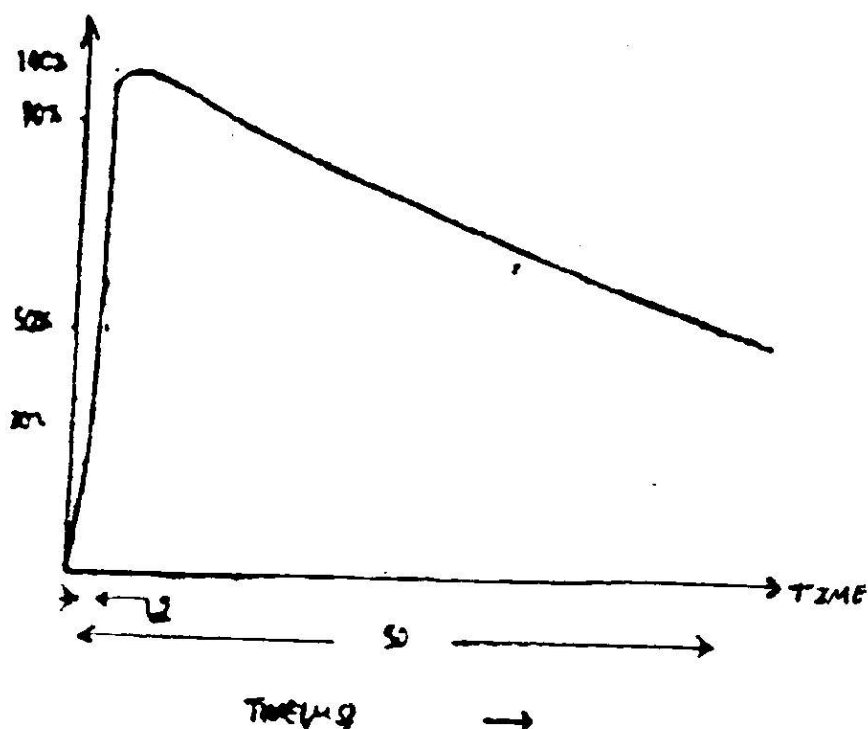
۲-۲-۱- اضافه ولتاژهای صاعقه

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 تخلیه 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.

۲- Internal Over Voltage

۳- External Over Voltage

دلیل زمان کوتاهتر، عموماً تنش قابل برای عایق بندی 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 پیش‌بینی را جهت کاهش آنها ایجاب نمی‌نماید.

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.

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، مثلاً 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^۱

۲-۳-۱- مقدمه:

اضافه ولتاژهای موقت، نوعی اضافه ولتاژ نوسانی فاز به زمین، یا فاز به فاز می‌باشند، که نسبتاً طولانی مدت و یا نامیرا هستند و یا بطور ضعیفی میرا می‌شوند. از آنجا که اضافه ولتاژهای موقت از نظر کار برقیگير 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.

۲-۲-۳-۱-۴- رزونانس خطی.

۲-۲-۳-۱-۵- فرورزونانس.

۲-۲-۳-۱-۶- قطع هادی (یارگی خط).

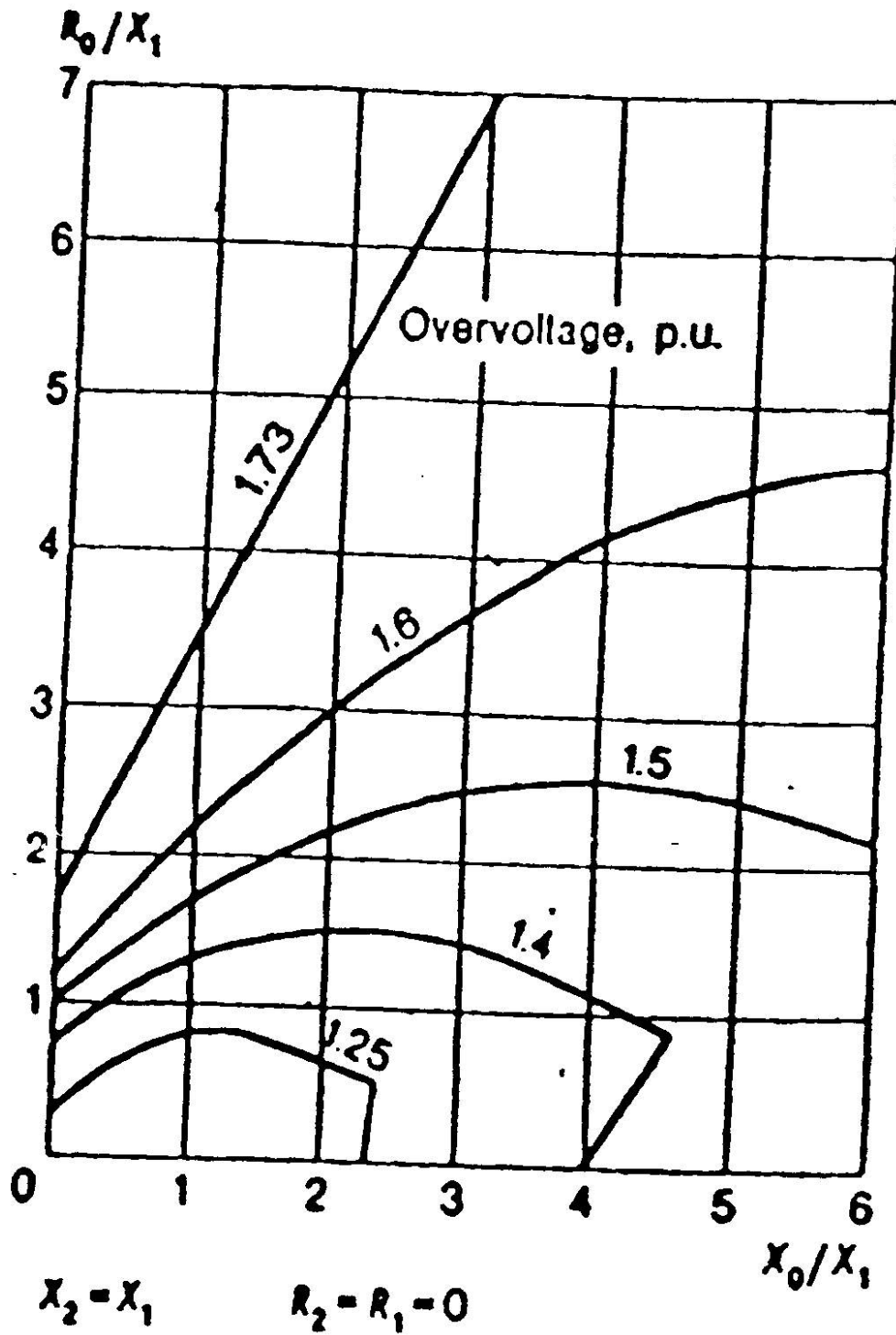
۲-۲-۳-۱-۷- رزونانس ناشی از مدارهای کوپل شده.

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

۲-۲-۳-۱- 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 (حدوداً 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 ۱۴۵kV 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 ۱,۴p.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 ۱۴۵kV نیز در اروپا غالب از طریق سلف پترز 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:

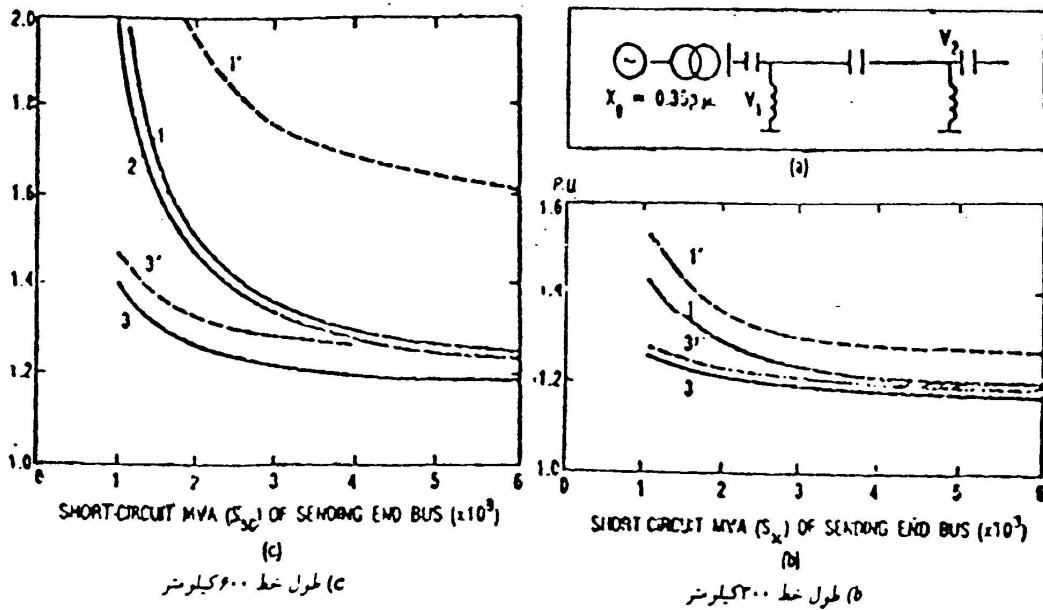
دامنه‌ها:

توربوژنراتورها: ۱/۴.

هیدروژنراتورها: ۱/۵.

طول مدت: ۳s.

در شکل‌های زیر مقدار اضافه ولتاژ موقت ظاهر شده در خط ۴۰۰kV 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)، ۶۰۰ کیلومتر بوده است. ولتاژ در ابتدا وانتهای خط، به ترتیب با خط پر و خط چین نشان داده شده است. منحنی‌های ۱ و 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 (۲-۴): اضافه ولتاژ موقت ظاهر شده در خط ۴۰۰ 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 ابتدای خط است، این پدیده به اثر فرانتی مشهور می‌باشد. افزایش ولتاژ از شرایط خازنی خط و بار راکتیو آن در بی‌باری ناشی می‌گردد.

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

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos(\beta L)} \quad (1-2)$$

که در آن:

V_2 = ولتاژ انتهای خط مدار باز

V_1 = ولتاژ ابتدای خط انتقال

$\beta = 6^\circ / 100 \text{ km} \Leftrightarrow 50 \text{ Hz}$ در فرکانس $\beta = 6^\circ / 100 \text{ km} \Leftrightarrow 50 \text{ Hz}$ و در فرکانس

$L =$ طول خط انتقال

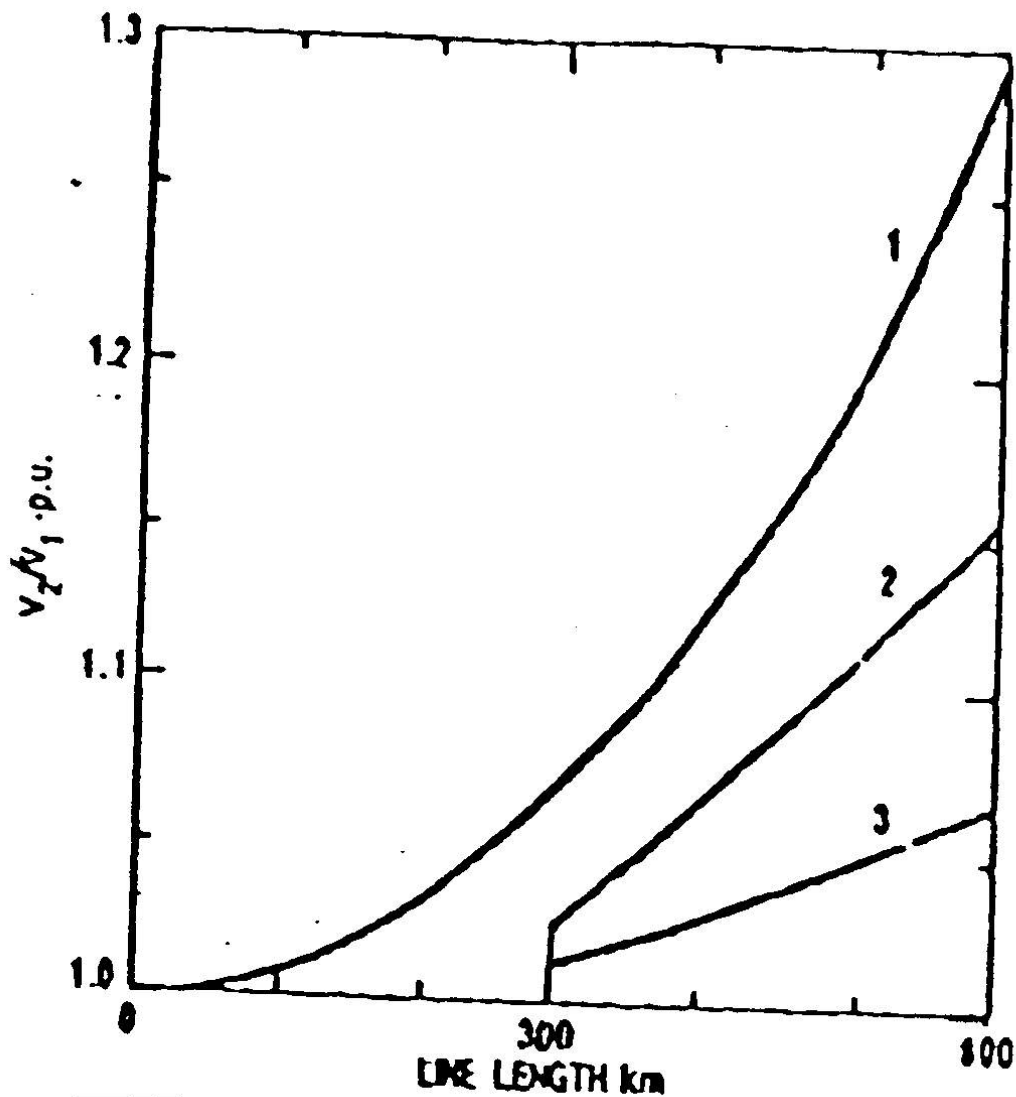
شکل زیر دامنه‌های تقریبی اضافه ولتاژهای ناشی از اثر فرانتی را نشان می‌دهد. عمل جبران

سازی برای اثر فرانتی ممکن است با اندوکتانس شنت متعادل یا خازن سری متعادل بدست آید.

۱- بدون جبران‌سازی

۲- با جبران‌سازی

۳- جبران‌سازی 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 می کنند. با صرف نظر از تلفات :

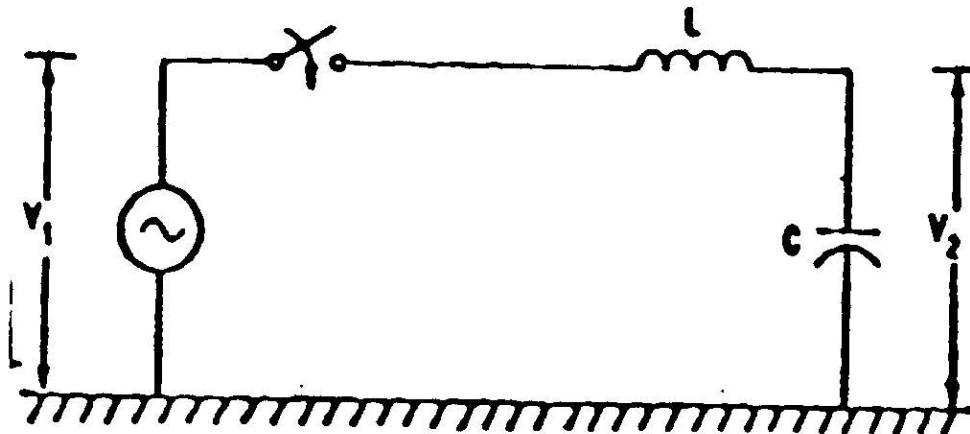
$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{X_c}{(X_l + X_c)} = \frac{-L/\omega C}{(L\omega - \omega C)} \quad (2-2)$$

که در آن:

L = اندوکتانس معادل منبع

C = کاپاسیتانس معادل بار

$$2\pi f = \omega$$

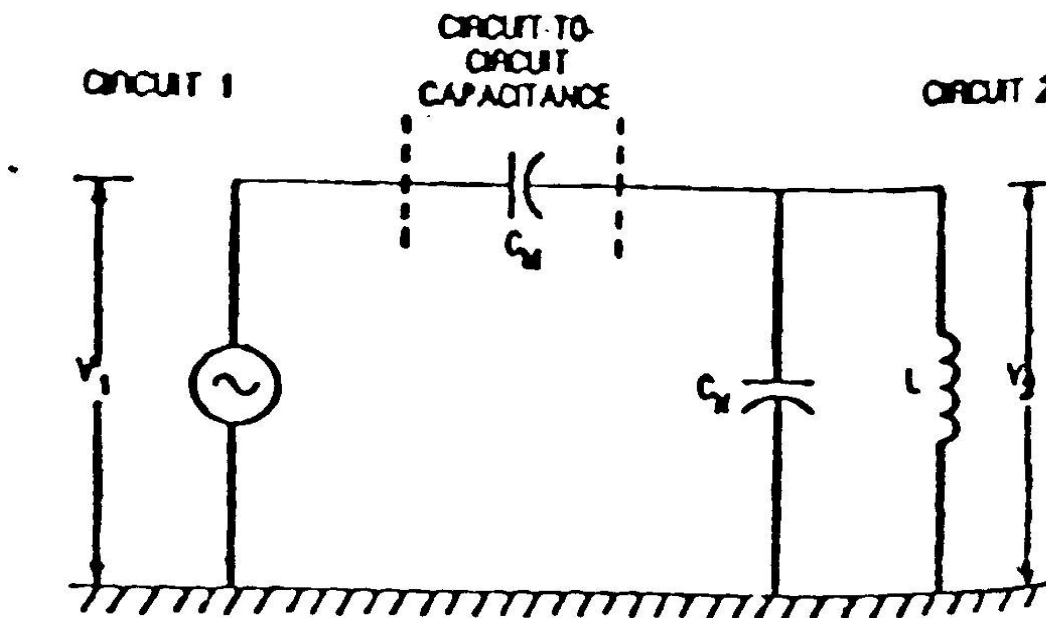


شکل (۶-۲) مدار رزونانس سری

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.

۲-۲-۳-۱-۴- تشدید در خطوط موازی [۳]

از دیگر حالات رزونانس که گاهی اوقات بوجود می‌آید، اثر تشدید در مدارهای موازی است. این حالت زمانی بوجود می‌آید 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 (۲-۴) : 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:

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

که Cm و Cn 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.

فصل سوم

نحوه تعیین پارامترهای برقگیر
جهت حفاظت از شبکه در
مقابل اضافه ولتاژها

۳-۱- مقدمه

در سیستمهای قدرت فقط ولتاژهای کار عادی مطرح نیست، بلکه اضافه ولتاژهای غیر قابل اجتنابی نیز بوجود می‌آیند که عایقهای سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین باید با تدابیر خاصی اضافه ولتاژهای ایجاد شده در سیستم را در محدوده‌ای که از نظر فنی و اقتصادی توجیه پذیر باشد، محدود نمود.

جهت محدود کردن اضافه ولتاژهای ایجاد شده در سیستم از خازن‌های سری و راکتورهای شنت و برقگیر استفاده می‌شود. از خازن‌های سری و راکتورهای شنت جهت محدود کردن اضافه ولتاژهای موقتی استفاده می‌شود. از برقگیرها جهت حفاظت تجهیزات الکتریکی در مقابل اضافه ولتاژهای گذرا (صاعقه و کلیدزنی) استفاده می‌شود.

برقگیرها در سه نوع میله‌ای، سیلیکون کاباید و اکسید روی وجود دارند. که امروزه در سیستمهای انتقال بیشتر از برقگیرها اکسید روی استفاده می‌شود.

در این فصل نحوه تعیین پارامترها و مشخصات برقگیرهای اکسید روی جهت حفاظت مناسب از شبکه در مقابل اضافه ولتاژها به تفصیل شرح داده شده است.

۳-۲- برقگیرهای اکسید روی [۵]

برقگیرهای غیرخطی اکسید روی عبارت از ستون مقاومتهای غیرخطی می‌باشند که در فاصله هوایی فاز - زمین نصب شده و بر خلاف برقگیرهای با فاصله هوایی هیچگونه فاصله هوایی بصورت فاصله ایزولاسیون بین ستون مقاومتها و هادی تحت ولتاژ موجود نمی‌باشد. با ظهور اضافه ولتاژهای موجی، مقاومتهای غیر خطی در چند میکروثانیه تغییر ماهیت داده، از قابلیت هدایت الکتریکی قابل

ملاحظه‌ای برخوردار شده، جریان از هادیهای فاز به زمین را تا حدود چندین کیلوآمپر برقرار می‌سازند. این برقیگرها می‌توانند اضافه ولتاژهای با فرکانس قدرت را برای مدت مشخصی تحمل کنند. با در نظر گرفتن این ویژگی حتی در سیستمهای زمین نشده می‌توان سطح عایقی کمتری بدست آورد. این برقیگرها می‌توانند سطح حفاظت کمتری را نسبت به برقیگرهای معمولی ایجاد نمایند.

۳-۲-۱- ساختمان مقاومتهای غیر خطی

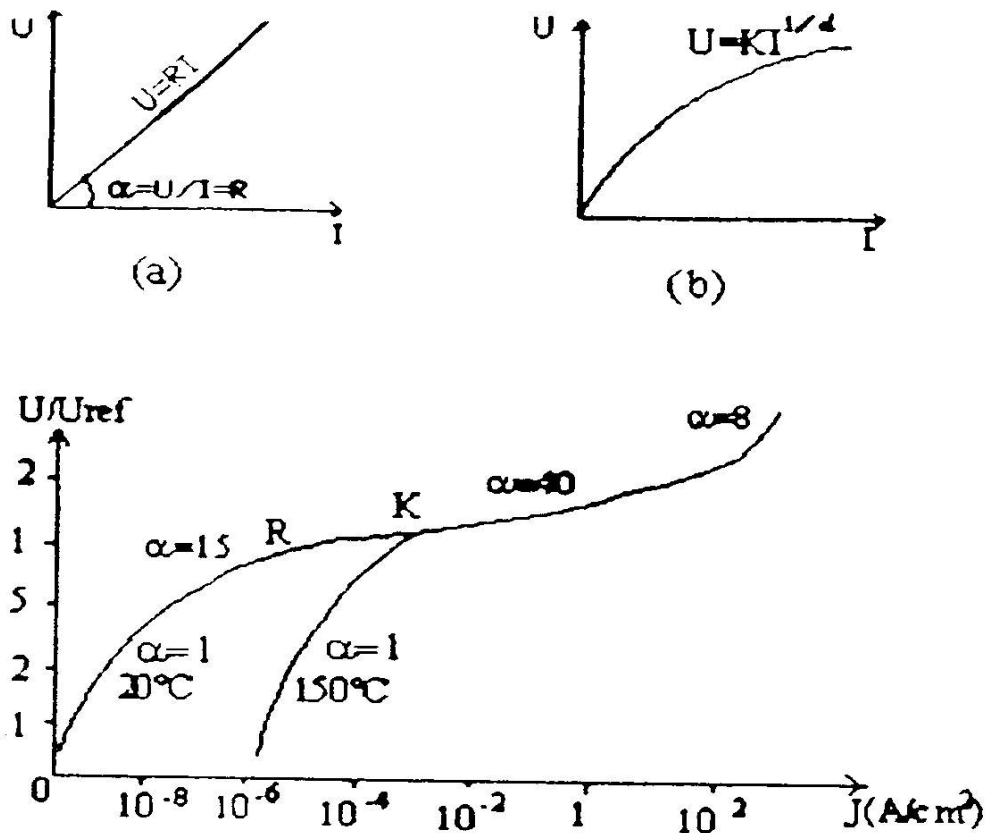
مقاومتهای غیر خطی از مخلوط اکسید فلزات شامل اکسید روی بطور عمده و اکسید سایر فلزات تشکیل شده‌اند. به منظور ساخت مقاومت، اکسید روی به میزان ۷۰-۸۰ درصد و اکسید سایر فلزات شامل اکسید بیسموت (Bi_2O_3)، اکسید کبالت (CoO)، اکسید کروم (Cr_2O_3)، اکسید منگنز (MnO) و اکسید آنتیموان (Sb_2O_3) بصورت پودر آسیاب شده، به خمیر تبدیل شده، به استوانه به قطر ۲-۶ cm و ضخامت ۵ تا ۵۰ میلیمتر تغییر شکل یافته و در کوره پخته می‌شود.

مقاومتها با ابعاد و اندازه به شرح فوق، به عنوان المان مقاومت غیر خطی یا واریستور نامیده می‌شود. کریستالهای ZnO با ابعاد $5-10 \mu\text{m}$ توسط مخلوط مناسب از اکسید فلزات دیگر بصورت لایه با ضخامت $0.1 \mu\text{m}$ احاطه گردیده‌اند. کریستالهای ZnO از هدایت الکتریکی برخوردار بوده، مقاومت طولی آنها به حدود $1-10 \Omega\text{cm}$ بالغ می‌شود، در حالیکه لایه واقع در حد فاصل کریستالها مقاومت اهمی قابل ملاحظه $10^{13} \Omega\text{cm}$ را دارا می‌باشد. لذا به عنوان لایه دی الکتریک یا لایه سد کننده عبور الکترونها محسوب شده، پر مابلیته دی الکتریک لایه معادل $\epsilon_n = (700-1500) \epsilon_0$ می‌باشد.

در قبال شدت میدان ناچیز کریستالهای ZnO و لایه سد کننده در وضعیت نامتقارن قرار داشته و المان واریستور فاقد هدایت الکتریکی می باشد. (فقط جریان نشتی کمی موجود است) با افزایش شدت میدان کریستالهای ZnO و لایه سد کننده در وضعیت متقارن قرار گرفته و جریان تخلیه به حدود چندین کیلو آمپر بالغ می گردد.

۳-۲-۲- منحنی - ولت - آمپر غیر خطی مقاومتها

مقاومت‌های معمولی بعنوان المان خطی دارای منحنی ولت - آمپر بصورت خط مستقیم با رابطه $U = RI$ ، مقاومت‌های غیر خطی دارای منحنی ولت - آمپر نزدیک به اکسپونانسیل با رابطه $U = KI^{1/a}$ و $a=1$ و مقاومت‌های کاملاً غیر خطی با واریستورهای دارای منحنی ولت - آمپر با رابطه $U = KI^{1/a}$ و یا $I = KU^a$ با مقادیر متفاوت a بر حسب ولتاژ می باشند. a بعنوان ضریب غیر یکنواختی مشخصه ولت - آمپر مقاومت‌های غیر خطی نامیده می شود.



شکل (۱-۳): منحنی ولت - آمپر مقاومتها: (a) خطی (b) غیر خطی (c) کاملاً غیر خطی

۳-۲-۳- پایداری حرارتی ، اختلال حرارتی

هنگامی که جریان نشتی برای دراز مدت از مقدار جریان مرجع^۱ (نقطه پایین تر از نقطه زانوی منحنی ولت - آمپر که در قبال برقراری جریانهای نشتی و حداکثر مولفه اهمی، افزایش درجه حرارت المانها را سبب نشود، که ولتاژ و جریان آن توسط کارخانه سازنده تعیین می شود.) تجاوز نماید، درجه حرارت مقاومتها به میزان فوق العاده افزایش یافته ، خطر انهدام مقاومتها، برقراری جریان اتصالی فرکانس ۵۰ و انفجار برقگیر موجود خواهد بود.

۱- Reference

انرژی حرارتی تولید شده در مقاومتها به مقدار جریان نشتی و فاصله زمانی برقراری آن بستگی خواهد داشت. انرژی حرارتی درجه حرارت المانها را به تدریج افزونی بخشیده، درجه حرارت نهایی با توجه به ظرفیت مبادله انرژی حرارتی محفظه با فضای خارج از محفظه تعیین می شود. برای بررسی بیشتر شکل (۲-۳) را در نظر می گیریم.

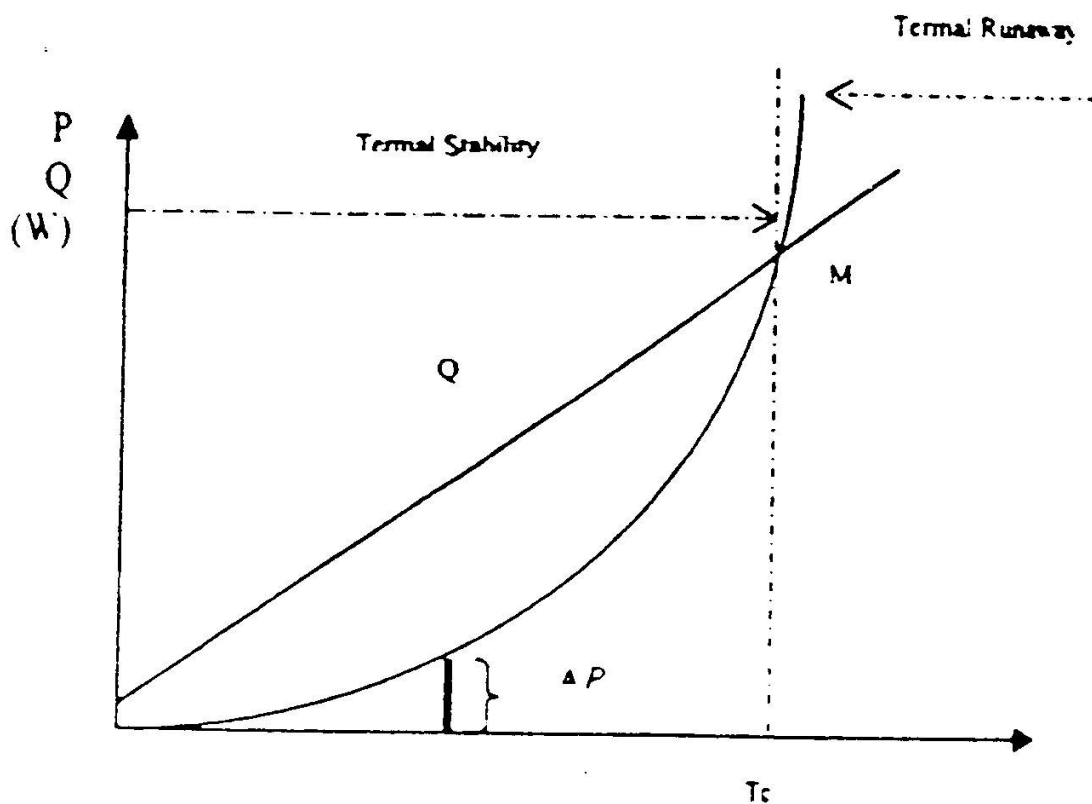
ظرفیت تبادل حرارتی محفظه با فضای خارج بر حسب محفظه با خط مستقیم نشان داده می شود (منحنی Q). تغییرات افت انرژی حرارتی در ستون مقاومتها با درجه حرارت محفظه با منحنی P نشان داده شده است. این دو منحنی یکدیگر را در نقطه M قطع می کنند. در فاصله تغییرات حرارتی بین صفر تا T_c انرژی حرارتی حاصل از جریان نشتی در مقاومتها، کمتر از فاصله تغییرات حرارتی محفظه بوده، فاصله فوق بعنوان ناحیه با پایداری حرارتی^۱ مقاومتها موسوم می باشد.

درجه حرارت مربوط به نقطه M درجه حرارت بحرانی یا T_c نامیده می شود. در نقطه M افت حرارتی حاصل از ستون مقاومتها از ظرفیت تبادل حرارتی محفظه تجاوز نموده، درجه حرارت مقاومتها به سرعت افزایش می یابد. فاصله تغییرات درجه حرارت که در آن $T \geq T_c$ می باشد، بعنوان ناحیه اختلال حرارتی^۲ نامیده می شود. در ناحیه پایداری حرارتی که در آن $T \leq T_c$ می باشد. امکان کاهش درجه حرارت محفظه و المانهای غیر خطی همزمان با تقلیل دامنه اضافه ولتاژ موجود می باشد، در حالیکه در ناحیه اختلال حرارتی، به ازاء درجه حرارت مقاومتها بیش از درجه حرارت بحرانی، امکان کاهش درجه حرارت مقاومتها علیرغم تقلیل دامنه اضافه ولتاژها موجود نمی باشد.

۱- Thermal Stability

۲- Thermal Runaway

افزایش درجه حرارت محیط، تبادل انرژی حرارتی را از فضای داخلی محفظه به فضای خارج تقلیل داده موجب می شود تا امتداد مربوط به ظرفیت تبادل حرارتی محفظه برقیگیر به موازات خود جابجا شود. اختلال حرارتی مقاومتها ممکن است تحت تاثیر عواملی چون اضافه ولتاژ موقت و تخلیه جزئی در داخل برقیگیر ایجاد شود.



شکل (۲-۳) : منحنیهای تغییرات ظرفیت تبادل حرارتی محفظه و افت انرژی حرارتی در ستون مقاومتها

۳-۲-۴- تعاریف و مشخصات برقیگیرهای اکسید روی [۵]

۳-۲-۴-۱- ولتاژ نامی (U_r)

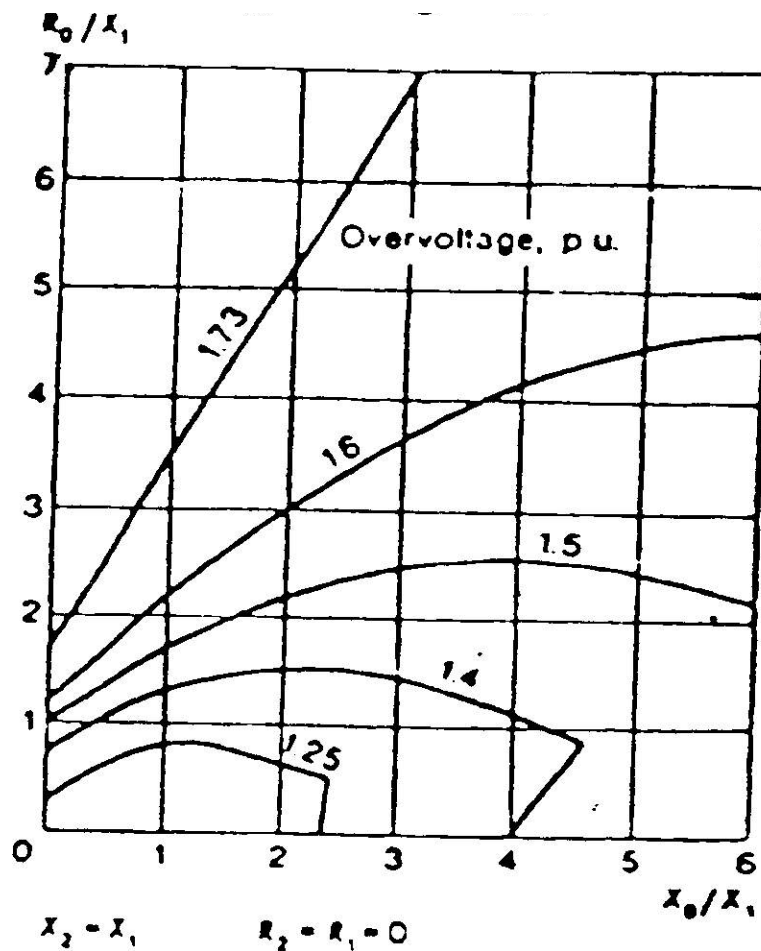
اصولاً ولتاژ نامی برقی عبارت است از ولتاژی که بزرگتر یا مساوی با اضافه ولتاژ موقتی قابل تحمل در ۱۰ ثانیه باشد. بعد از اینکه برقی دارای درجه حرارت 60°C شده و همچنین در معرض عبور و تزریق انرژی با جریان زیاد قرار گیرد. برای شناسایی U_T ابتدا به شناسایی اضافه ولتاژهای موقت (TOV)^۱ باید پرداخت. TOV غالباً ناشی از اتصال کوتاه تک فاز است، به این معنی که در حالت اتصال تک فاز با زمین، ولتاژ فازهای سالم به نوع اتصال زمین شبکه بالا می‌روند. مقدار ولتاژ افزایش یافته برابر است با:

$$U = Ke \frac{Um}{\sqrt{3}}$$

(ولتاژ در فازها قبل از اتصال کوتاه) / (ولتاژ در فازهای سالم در حین اتصال کوتاه) = Ke

Ke به فاکتور اتصال کوتاه معروف است که متناسب با مقاومت و راکتانس مولفه‌های توالی

صفر و مثبت و منفی شبکه بین $1/2$ تا $1/7$ مطابق شکل (۳-۳) می‌باشد.



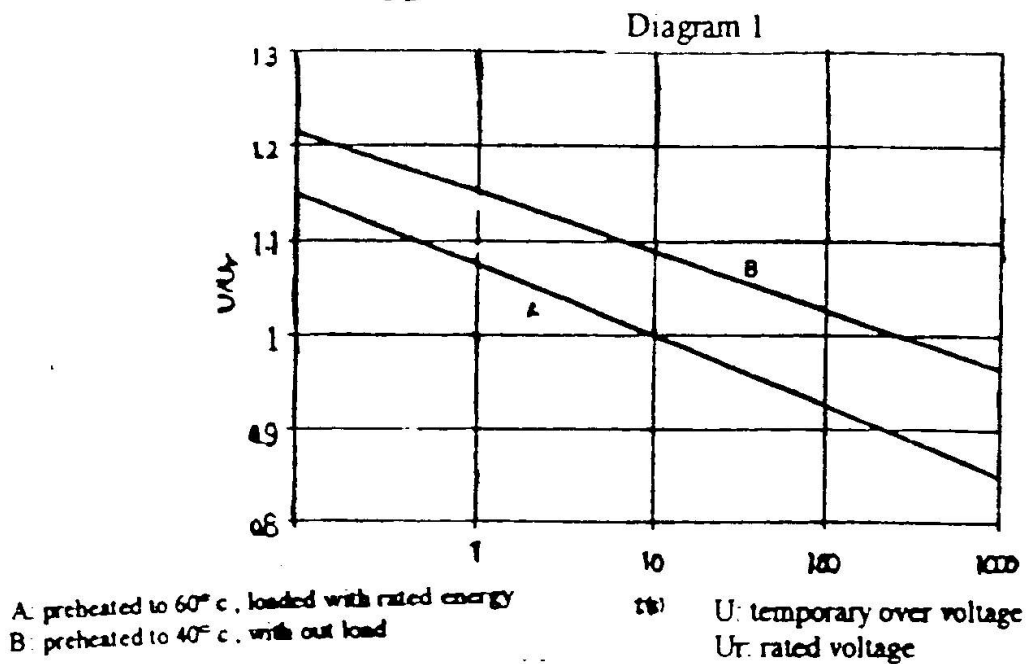
شکل (۳-۳): منحنیهای تعیین K_e

در این شکل R مقاومت توالی صفر، X راکتانس توالی صفر و X_1 راکتانس توالی مثبت می‌باشد. اگر پارامترهای شبکه شناخته شده نباشند، K_e برای شبکه‌هایی که نقطه صفر آنها مستقیماً زمین شده است در حدود $1/4$ و برای شبکه‌هایی که صفر آنها زمین نشده و یا بصورت غیر مستقیم زمین شده است در حدود $1/73$ در نظر گرفته می‌شود. در صورتیکه احتمال قطع بار، همزمان با اتصال کوتاه نیز پیش‌بینی گردد باید در محاسبه TOV لحاظ گردد.

بنابراین:

$$TOV = CL \cdot Ke \cdot \frac{Um}{\sqrt{3}} \quad (1-3)$$

اصولاً برقگیرها به عنوان اجزاء حفاظتی در مقابل TOV نیستند، چرا که در این حالت نیاز به تعداد زیادی از ستون‌های موازی بلوکها می‌باشد. اصولاً برقگیرها TOV های مختلفی را می‌توانند در زمانهای گوناگون تحمل نمایند. معمولاً منحنی مربوط به رابطه TOV در زمان توسط سازندگان باید ارائه گردد که یک نمونه از منحنی‌های ولت - زمان برقگیرها در شکل (۳-۴) ارائه شده است.



شکل (۳-۴): منحنی زمان - TOV یک نمونه برقگیر

جهت تعیین ولتاژ نامی باید ابتدا اضافه ولتاژ موقت شبکه را تعیین نموده و سپس به کمک رابطه زیر معادله ۱۰ ثانیه‌ای اضافه ولتاژ موقت شبکه را محاسبه کرد.

$$U_e = U_t \left(\frac{T}{10} \right)^{0.02} \quad (2-3)$$

U_t : اضافه ولتاژ موقتی شبکه

T : زمان بقای این اضافه ولتاژ بر روی شبکه

U_e : اضافه ولتاژ موقتی معادل ۱۰ ثانیه‌ای

در محاسبه U_r خواهیم داشت:

$$U_r \geq TOV_{(1.s)} \quad (3-3)$$

معمولاً می‌توان از رابطه تقریبی زیر U_r را محاسبه نمود:

$$U_r \cong 1.25 MCOV \quad (4-3)$$

۳-۲-۴-۲- مقدار حقیقی ولتاژ بهره‌برداری

بیشترین مقدار موثر ولتاژ در فرکانس قدرت که بطور مداوم بیشتر از ۲ ساعت بین

ترمینالهای برقگیر بکار گرفته شده است که در یک شبکه سه فاز با برقگیرهای متصل بین فاز و زمین

بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$U_{ca} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (5-3)$$

۳-۲-۴-۳- حداکثر ولتاژ کار دائم (U_c)

اغلب به طور خلاصه MCOV^۱ نیز نمایش داده می‌شود و به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که مقدار مجاز ولتاژ موثر در فرکانس قدرت را که بر روی ترمینالهای برقگیر می‌افتد، نشان دهد بنابراین بایستی $U_c \geq U_{ca}$ باشد. معمولاً در عمل می‌توان U_c را از فرمول (۶-۳) بدست آورد که ضریب ۱/۰۵ به لحاظ ایجاد اطمینان بیشتر در نظر گرفته می‌شود.

$$U_c \geq 1.05 \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (۶-۳)$$

۳-۲-۴-۴- فرکانس نامی

فرکانس نامی که مورد تایید استاندارد می‌باشند ۵۰ هرتز و ۶۰ هرتز می‌باشد و در سیستمهای برق متناوب باید کمتر از ۴۸ هرتز و بیشتر از ۶۲ هرتز نباشد.

۳-۲-۴-۵- ولتاژ تخلیه (U_{res})^۲

ولتاژی است که بین ترمینالهای برقگیر به هنگام عبور جریان تخلیه بوجود می‌آید. برای جریانهایی که دامنه و شکل آنها متفاوت از جریان تخلیه نامی است، U_{res} معمولاً بصورت درصدی از ولتاژ تخلیه در جریان نامی بیان می‌شود.

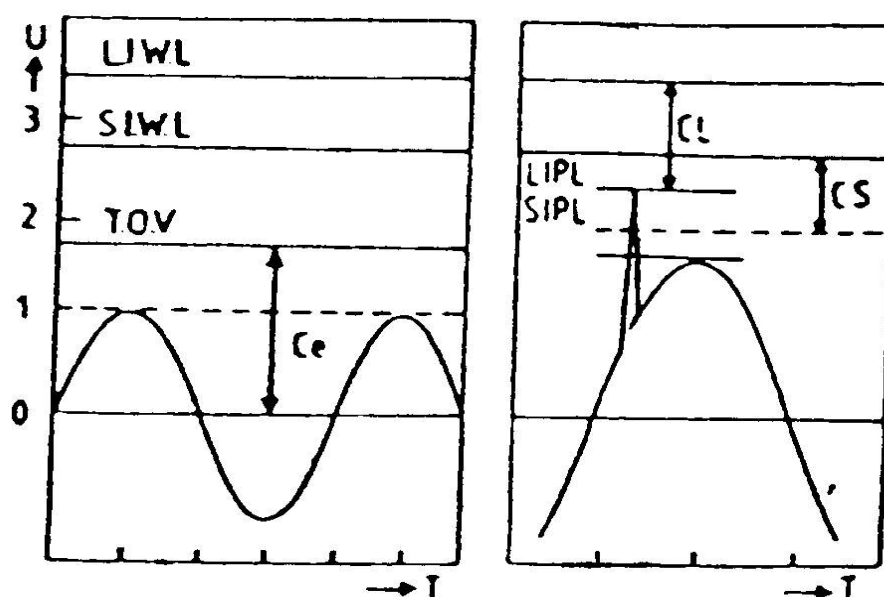
۳-۲-۴-۶- مشخصه حفاظتی برقگیر

مشخصه حفاظتی یک برقگیر ZnO به مجموعه ولتاژهای تخلیه آن به ازاء جریانهای تخلیه استاندارد اطلاق می‌شود. بر اساس این ولتاژهای تخلیه در برقگیرهای ZnO دو سطح حفاظتی L.I.P.L

۱- Maximum continuous operator voltage

۲- Residual Voltage

^۱ (سطح حفاظتی در برابر امواج صاعقه) و S.I.P.L (سطح حفاظتی در برابر کلیدزنی) تعریف می‌شود. برای یک حفاظت موثر مشخصه حفاظتی برقیگیر (S.I.P.L, L.I.P.L) باید به خوبی در زیر مشخصه استقامت عایقی تجهیزات L.I.W.L^۳ و S.I.W.L^۴ در کلیه نقاط مشخصه قرار گیرد. این سطوح حفاظتی در شکل (۵-۳) نشان داده شده است.



شکل (۵-۳): مشخصه حفاظتی برقیگیر و سطح عایق تجهیزات شبکه

۳-۲-۴-۷- نسبت حفاظتی^۱

نسبتی است که سطح عایقی مقاوم تجهیزات را به سطح حفاظتی برقیگیر مربوط می‌سازد.

- ۱- Lightning Impulse Protection Level
- ۲- Switching Impulse Protection Level
- ۳- Lightning Impulse Withstand Level
- ۴- Switching Impulse Withstand Level
- ۱- Protective Ratio

(سطح عایقی تجهیزات) / (سطح حفاظتی برقیگیر) = نسبت حفاظتی

۳-۲-۴-۸- حاشیه حفاظت^۲

عبارت است از نسبتی حفاظتی که کمتر از یک باشد و بصورت درصد بیان می‌شود.

$$100 \times (1 - \text{نسبت حفاظتی}) = \% \text{ حاشیه حفاظت}$$

۳-۲-۴-۹- جریان مبنای برقیگیر (I_{ref}):

عبارت است از مقدار پیک جریان مقاوم در فرکانس قدرت که در ولتاژ مرجع اندازه‌گیری شده است. جریان مبنا باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تاثیرات ظرفیتهای پراکندگی را که جزئی می‌باشند در اندازه‌گیری ولتاژ مبنا به خوبی نمایان سازد. مقدار جریان مبنا در حدود 0.5 mA تا 1 mA در هر سانتیمتر مربع محیط دیسک یک بلوک برقیگیر است.

۳-۲-۴-۱۰- ولتاژ مرجع (U_{ref})

عبارت است از مقدار پیک ولتاژ اندازه‌گیری شده در هنگام عبور جریان مرجع، تقسیم بر $\sqrt{2}$

۳-۲-۴-۱۱- جریان دائم برقیگیر (I_c)

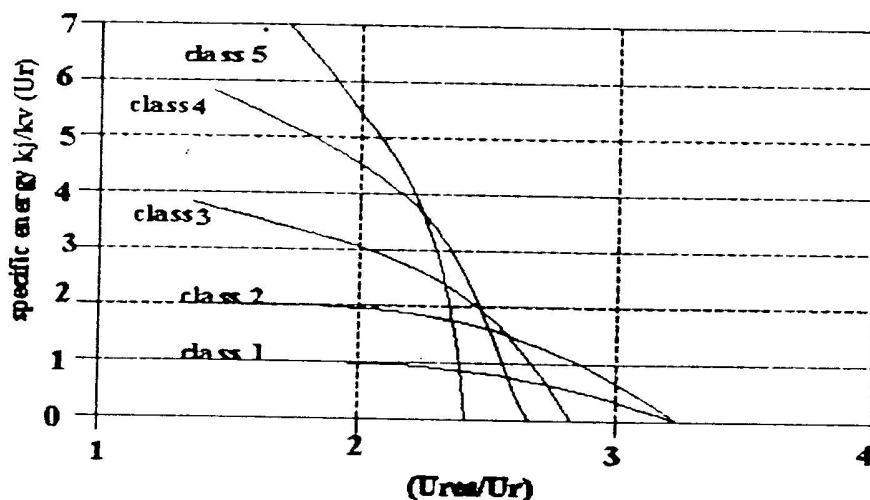
جیرانی است که برقیگیر تحت ولتاژ U_c از میان خود عبور می‌دهد. این جریان بیشتر خازنی است. درجه حرارت، ظرفیت پراکندگی و آلودگی داخلی بر آن موثرند. مقدار آن بر حسب r.m.s یا مقدار پیک بیان می‌گردد.

۳-۲-۴-۱۲- جریان تخلیه نامی برقگیر (I_n)

یک ایمپالس جریانی با مشخصه $1/20 \mu s$ است که بیشترین مقدار ضربه جریانی صاعقه است و در کلاس بندی برقگیرها مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۲-۴-۱۳- قابلیت تحمل انرژی

عبارت است از حداکثر مقدار مجاز انرژی که بوسیله کیلوژول بیان می شود، به نحوی که برقگیر قادر باشد یک تک ضربه با مدت زمانی معین را جذب نماید. مساله جذب انرژی مختص فشارهای ناشی از وصل کلید در انتهای باز خطوط انتقال طویل می باشد. برقگیری که در انتهای باز خط نصب می شود می بایست توانایی ذب بارهای انباشته شده روی خط انتقال را داشته باشد.



۳-۲-۴-۱۴- کلاس تخلیه برقگیر

اصولاً برقگیرها را مطابق شکل (۳-۶) دسته بندی می نمایند. با داشتن W بر حسب (KJ / KV) در ولتاژ U_C و همچنین نسبت U_{ref} / U_r می توان تشخیص داد که چه کلاس تخلیه ای لازم است سپس اولین کلاس تخلیه بالاتر را انتخاب می نمایند. برای برقگیرهای 5 kA و پایین تر کلاس تعیین نمی شود ولی برقگیرهای 10 و 20 کیلو آمپری را بر حسب قابلیت تحمل انرژی دسته بندی می نمایند. برقگیرهای سیستم توزیع حداکثر کلاس ۱ می باشند. کلاس ۲ و بالاتر مخصوص برقگیرهای نوع پست است. در جدول (۳-۱) استاندارد تعیین جریان نامی برقگیر بر حسب ولتاژ نامی آورده شده است.

جدول (۳-۱) تعیین جریان تخلیه نامی برقگیرها بر حسب ولتاژ نامی

$U_r (KV_{r.m.s})$ ولتاژ نامی	$U_r \leq 31$	$U_r \leq 132$	$132 \leq U_r \leq 360$	$360 < U_r < 765$
جریان تخلیه نامی استاندارد	۲۵۰۰	۵۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰

شکل (۳-۶): کلاس بندی برقگیرها طبق استاندارد

۳-۲-۵- انتخاب برقگیرها

با توجه به آشنایی کلی با ساختمان برقگیر و نحوه کاهش سطح اضافه ولتاژهای موجی، که بر طبق منحنی مشخصه غیر خطی مقاومتها امکان پذیر می شود. همچنین احتمال صدمه و تغییر شکل منحنی ولت - آمپر تحت تاثیر انرژی حرارتی حاصل از برقراری جریانهای ناشی و بروز اختلال حرارتی، انتخاب نوع مناسب برقگیرها با توجه به مشخصات شبکه حائز اهمیت فراوان می باشد. بر طبق استانداردها، پیش بینی ها و تعاریف لازم به منظور انتخاب نوع مناسب برقگیرها با توجه به مشخصات شبکه صورت گرفته، توصیه های لازم به عمل آمده اند. بر طبق دستورالعمل ارائه شده از طرف کنفرانس برق CIGRE^۱ و نتایج تجربی، مشخصات برقگیرها به منظور انتخاب به منظور انتخاب آنها به شرح زیر می باشد:

۱- تعیین و ارائه فاصله سطحی، ایزولاسیون خارجی ستون مفره برقگیر (mm)

۲- جریان اسمی تخلیه (KA)

۳- سطح محافظت برقگیر یا P.L (KV)

۴- ولتاژ اسمی یا U_{rated} (KV)

۵- ولتاژ دائمی یا U_{cov} (KV)

۶- کلاس تخلیه

کلیه مشخصات فوق به جز سطح محافظت برقگیر (P.L) در روی پلاک یا Name Plate

برقگیر ذکر می شوند و سطح محافظت برقگیر با توجه به سطوح عایقی L.I.W.L و S.I.W.L تعیین می گردد.

۳-۲-۵-۱- انتخاب ولتاژ نامی و ولتاژ کار دائم برقگیر

۱- Metal Oxide Arrester in AC System April, ۱۹۹۱. No .۶۰

برای اینکه یک برقگیر بتواند تحت کلیه شرایط شبکه پایدار باقی بماند بایستی U_c و U_r این برقگیر بطور مناسب انتخاب شود. (انتخاب U_c و U_r که قابلیت تحمل برقگیرهای ZnO را در برابر ولتاژهای عادی شبکه و TOVها مشخص می کنند دارای اهمیت زیادی می باشد.) دامنه و مدت استمرار TOVها هر دو در تعیین تنش های وارده به برقگیر نقش موثری داشته و در واقع انتخاب برقگیر برای شرایط معین نتیجه سازش میان سطح حفاظتی مطلوب، قابلیت تحمل TOV و ظرفیت جذب انرژی برقگیر می باشد.

به عبارت دیگر هر چه برقگیر تحمل TOV شدیدتری (از لحاظ دامنه و مدت استمرار TOV) را داشته باشد امکان سالم ماندن برقگیر بیشتر خواهد بود ولی در عین حال حاشیه ایمنی آن کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر برقگیر با ظرفیت جذب انرژی بالاتر احتمال بروز خطا را کاهش می دهد. با توجه به این موارد روش کلی انتخاب U_c و U_r بدین صورت است که ابتدا پارامترهای شبکه نظیر حداکثر ولتاژ شبکه و نحوه زمین شدن شبکه و همچنین شرایط بهره برداری که ممکن است عادی یا غیر عادی باشد، مشخص می گردد. سپس اطلاعات مربوط به برقگیرها با در نظر گرفتن شرایط زیر مورد بررسی قرار گرفته و برقگیر با ولتاژ U_c و U_r مناسب انتخاب می گردد.

۱- برقگیر باید از نظر حرارتی بتواند ولتاژ شبکه را بطور دائم تحمل نماید که چنانچه $U_c > U_{ca}$ انتخاب شود این شرط ارضاء خواهد شد.

۲- برقگیر ظرفیت جذب انرژی کافی برای تحمل شوک حرارتی ناشی از تخلیه امواج ضربه ای را داشته باشد که انتخاب ظرفیت انرژی برای برقگیر تابع عوامل زیادی از جمله تجربه عملی، آمار اتصالی ها در شبکه، آمار طوفانهای همراه با برخورد صاعقه به خط و اطلاعات لازم در مورد کلاس تخلیه خط می باشد.

۳- استقامت الکتریکی برقگیر متناسب با اضافه ولتاژهای موقت موجود در شبکه انتخاب شده باشد که برای ارضاء این شرط بایستی ابتدا TOV معادل ده ثانیه‌ای TOV ایجاد شده در شبکه محاسبه گردیده و ولتاژ نامی برقگیر بزرگتر یا مساوی این مقدار انتخاب گردد.

فصل چهارم

بررسی علل ایجاد اختلال در کار برقگیر

۴-۱- مقدمه

استفاده از برقگیرهای اکسید فلزی برای حفاظت از تاسیسات و دستگاههای الکتریکی همچون ترانسفورماتورها در مقابل اضافه ولتاژها که از سالهای دهه ۱۹۷۰ آغاز گردیده است. روز به روز در کشورهای مختلف جهان از جمله در کشور ما ایران گسترش می‌یابد. بخش اصلی این برقگیرها وریستورهای بصورت سرامیک هستند که ماده تشکیل دهنده شان آمیزه‌ای از اکسیدهای فلزات مختلف است. قسمت اصلی این سرامیکها را اکسید روی تشکیل می‌دهد و اکسیدها دیگری از قبیل آنتیموان، بیسموت، منگنز و کبالت به آن اضافه شده‌اند. با توجه به اینکه اکسید روی حدود ۹۵ درصد این وریستورها را تشکیل می‌دهد.

برقگیرهای مذکرو را معمولاً تحت عنوان اکسید روی می‌شناسند. لذا ما نیز در این پروژه آنها را تحت همین عنوان خواهیم نامید. در این برقگیرها تعدادی قرص سرامیک اکسید روی بصورت سری - موازی با یکدیگر در داخل یک پوشش از جنس پرسلین یا صمغ مصنوعی در محیطی از هوا قرار داده شده‌اند. پوشش خارجی مذکور در معرض آلودگی‌های جوی و صنعتی می‌باشد. این آلودگی‌های سطحی می‌توانند در کار آن اختلال بوجود آورند. عدم طراحی صحیح حرارتی و الکتریکی محفظه برقگیر نیز ممکنست به علت عدم کیفیت لازم مواد مصرفی، صحیح طی نشدن مراحل ساخت و یا ایرادات موجود در الکترودهای دو سر قرصها نتوانند وظیفه خود را به نحو احسن انجام دهند و لذا طول عمر مناسب را دارا نباشند. اینک به شرح یکایک موارد فوق خواهیم پرداخت:

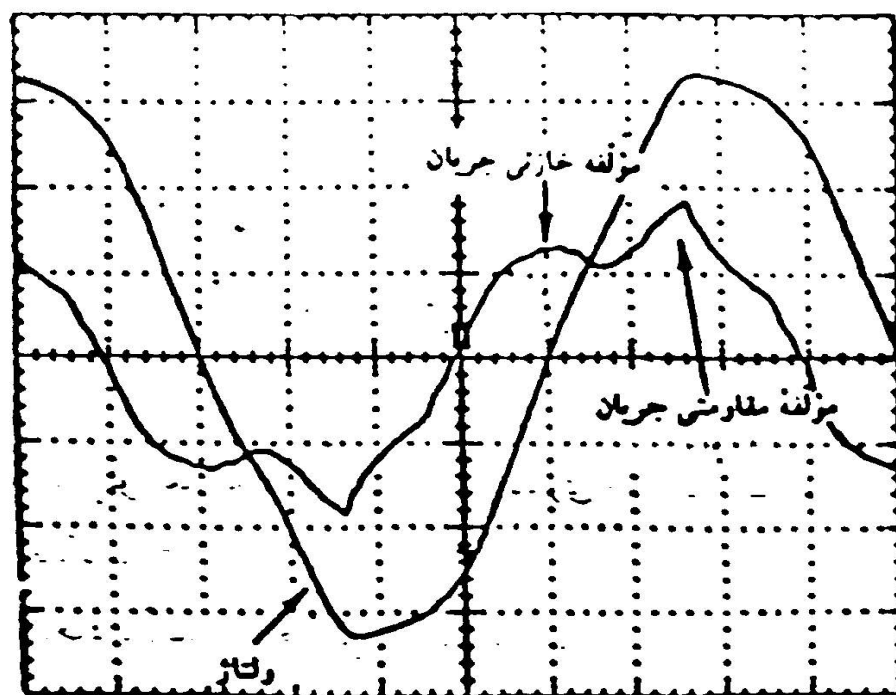
۴-۲- اشکالات مربوط به طراحی و ساخت برقگیر (۴):

چون برقگیر اکسید روی فاقد فاصله هوایی است همیشه تحت ولتاژ شبکه قرار دارد. در نتیجه یک جریان نشتی کوچک از آن می‌گذرد که آنرا اندکی گرم می‌کند. در شکل (۴-۱) شکل ولتاژ

متناوب اعمال شده و جریان نشتی بفرقگیر ZnO که توسط اسپیلوسکوپ ثبت شده دیده می‌شود. مقدار موثر ولتاژ اعمال شده متناوب ۴۶۰۰ ولت بوده که در دمای ۸۵ درجه سلسیوس به یک وریستور به قطر و به ارتفاع ۴۰ میلی متر اعمال گردیده است. هر خانه در جهت عمودی نشان دهنده ۲۵۰ میکروآمپر می‌باشد. جهت اندازه‌گیری جریان از مقاومت سری به مقدار ۱۰ کیلو اهم استفاده بعمل آمده است.

شکل (۴-۱): شکل موج ولتاژ متناوب اعمال شده و جریان نشتی در برقگیر اکسید روی

همانگونه که ملاحظه می‌گردد موج جریان به علت داشتن مولفه خازنی نسبت به ولتاژ پیش فاز است. این موج از دو مولفه تشکیل شده است: مولفه جریان رآکتیو که بستگی به ظرفیت خازنی وریستورها داشته و یا ولتاژ ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد و مولفه جریان آکتیو یا مقاومتی که با ولتاژ



همفاز بوده و مسئولیت گرم شدن وریستورها را بعهده دارد. اگر توان ورودی به برقگیر از طریق شبکه P و گرمای دفع شده از آن به محیط بیرون مساوی Q باشد.

در حالت عادی و پایدار $P=Q$ خواهد بود و این شرط بر قراری تعادل حرارتی و ثابت ماندن دمای برقگیر است. حال اگر به عنوان مثال یک موج صاعقه به برقگیر برسد و از طریق آن تخلیه شود. توان اضافی در برقگیر وارد شده و P بالا می‌رود و لذا باید توان گرمایی دفع شده Q نیز بالا رود تا همچنان تعادل حرارتی برقرار بماند. رابطه ریاضی هر یک از توانهای ورودی P و خروجی Q به شکل زیر است:

$$P = UAT^2 \exp(-q\phi b / kt) \quad (1-4)$$

$$Q = hsT^{(5/4)} \quad (2-4)$$

که در آن:

U = ولتاژ اعمالی به برقگیر.

A = ثابت ریچارد سون.

T = درجه حرارت وریستور بر حسب K

q = بار الکتریکی الکترون $= 1.6 \times 10^{-19}$ کولمب.

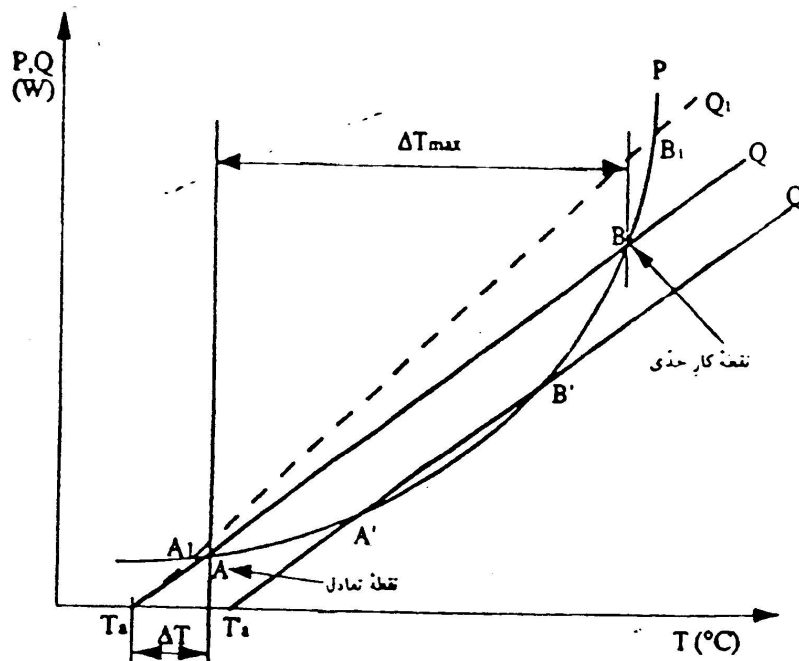
ϕb = ارتفاع سد پتانسیل بر حسب ولت.

k = ثابت بولتزمن

h = ضریب تبادل حرارتی بین برقگیر و محیط اطرافش.

s = مساحت سطح تبادل حرارت.

$T =$ اختلاف دمای ورستور نسبت به محیط خارج می باشد.



شکل (۴-۲): تعادل حرارتی یک برقیگیر اکسید روی

بنابر شکل ۲ در حالت تعادل، نقطه کار حرارتی در A واقع شده است با وارد شدن تنش الکتریکی اضافی، مثلاً در زمان تخلیه یک اضافه ولتاژ توسط برقیگیر، گرما در آن تولید می شود و نقطه کار روی منحنی $P=f(T)$ جابجا می گردد. اگر نقطه کار جدید در سمت چپ نقطه B باشد. توان وارده کوچکتر از توان قابل تخلیه توسط برقیگیر است و لذا برقیگیر خنک می شود و نقطه کار به A باز می گردد. اما اگر گرم شدن ورستورها به نحوی باشد که نقطه کار از B بالاتر رود. توان اخذ شده بزرگتر و توان قابل دفع به وسیله برقیگیر است و در نتیجه ناپایداری حرارتی پیش خواهد آمد واضح است که توانایی دفع حرارت بطور طبیعی از برقیگیر به بیرون محدود است. هر بار که P بالاتر رود به

علت گرمتر شدن وریستورها و حضور دائمی ولتاژ شبکه روی برقیگیر جریان نشستی نیز بالا می‌رود و گرمای بیشتری در داخل وریستورها تولید می‌شود. این امر به نوبه خود بر مقدار جریان می‌افزاید. اگر این جریان ادامه پیدا کند و مقدار گرمای تولید شده بیشتر از گرمای دفع شده باقی بماند دمای داخلی محفظه برقیگیر به مقدار کنترل نشده‌ای بالا رفته و منجر به خرابی برقیگیر خواهد شد. این پدیده را ناپایداری حرارتی می‌نامند. طراحی محفظه برقیگیر و تعداد قرص‌های سری - موازی شده باید به نحوی باشد که بتواند تنش‌های حرارتی - الکتریکی معمول را بدون ایجاد ناپایداری حرارتی تحمل نماید.

۴-۳- پایین بودن کیفیت قرص‌های وریستور (۴):

وریستورهای اکسید روی بر اساس یک روش تهیه سرامیک بدست می‌آیند. اکسیدها و نمکهای فلزی لازم که باید دارای خلوص بسیار زیاد باشند بصورت پودر به مقادیر معین با یکدیگر مخلوط شده همراه با آب مقطر به مدت زیاد ساییده می‌شوند. سپس خشک شده تا دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می‌شوند. سپس از الکتهایی با سوراخهای بسیار ریز عبور داده شده و توزین در داخل قالبهایی استوانه‌ای شکل پرس می‌گردند.

قطعاتی که به این شکل تولید شده‌اند تا دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می‌شوند تا مواد آلی کمکی داخل آنها سوزانده شوند. سپس سرامیک حاصله در دمای ۱۳۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتیگراد پخته می‌شود. این اعمال باعث می‌شود که سرامیک سخت و فشرده شده، ساختمان میکروسکوپی آن شکل پیدا کند و اکسیدهای مختلف در داخل ذرات اکسید نفوذ نماید. وجود اکسیدهای فلزی اضافی نقش بسزایی در خواص وریستور دارد. سطح جانبی قطعات استوانه‌ای که به

این صورت آماده می‌شوند با یک لایه عایق محافظ به ضخامت ۵۰ تا ۲۰۰ میکرون پوشانده و دو قاعده آنها متالیزه می‌گردند تا دارای دو الکتروود شوند.

کیفیت محصول نهایی به شدت تحت تاثیر کیفیت و خلوص مواد تشکیل دهنده و درصد هر یکا ز آنها، طرز دانه‌بندی و ابعاد ذرات، شکل منحنی تغییرات درجه حرارت کوره در هنگام عملیات حرارتی بر روی سرامیک و نیز نوع و کیفیت الکتروودها می‌باشد. در صورتی که موارد فوق دقیقاً رعایت نشود جریان نشتی و ریستور تحت ولتاژ نامی بالا بوده خاصیت غیر خطی آن ضعیف خواهد بود و یا ظرفیت تحمل حرارتی کمی خواهد داشت که هر یک از این موارد باعث اختلال در کار برقی و خرابی آن در طول زمان خواهد گردید.

۴-۴- پیرشدن قرص‌های اکسید روی تحت ولتاژ نامی در طول زمان (۴):

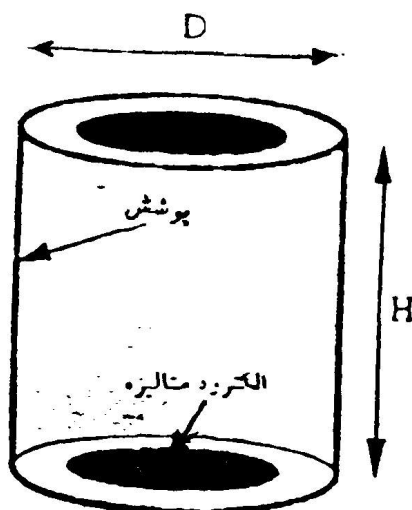
ولتاژ نامی شبکه در دمای محیط که در طول مدت زمانی به طور دائم به برقی اعمال می‌شود. ممکن است در برخی از انواع و ریستور پیری ایجاد نماید. این نوع خراب شدن و ریستور که عبارت از یک تغییر بسیار کند خواص ذرات ماده در طول زمان است. منجر به کاهش ارتفاع سدهای پتانسیل شاتکی^۱ موجود در مرز بین دانه‌های اکسید روی می‌شود. سدهای مزبور عامل خواص غیر خطی و ریستور اکسید روی هستند و با ضعیف شدن آنها کیفیت و ریستور تنزل خواهد کرد. میزان این پیر شدن بستگی به طبیعت و کیفیت سرامیک مورد استفاده و میزان و نوع اکسیدهای اضافه شده دارد و در انواع جدید برقی ممکن است به یک میزان قابل صرف نظر کاهش یافته باشد.

۱- Shutkey

۴-۵- نوع متالیزاسیون مورد استفاده روی قاعده قرص‌های اکسید روی (۴):

همانگونه که ذکر شد دو قاعده وریستورها به منظور ایجاد الکتروود متالیزه می‌شود (شکل ۴-۳). این متالیزاسیون می‌تواند از طرقی مانند قرار دادن یک مرکب نقره و پاشیدن آلومینیوم مذاب بر روی آن ایجاد شود. کیفیت این امر نقش مهمی در مقاومت الکتریکی آن و در نتیجه ولتاژ باقیمانده کل برگیر دارد. در صورتی که این سطح متالیزه در اثر اکسید شدن مقاومت بالایی پیدا نماید، یک اتصال الکتریکی نامرغوب بدست خواهد داد.

متالیزاسیون نقره‌ای کیفیت بالاتری نسبت به آلومینیوم دارد. یکی از راههای حفاظت این



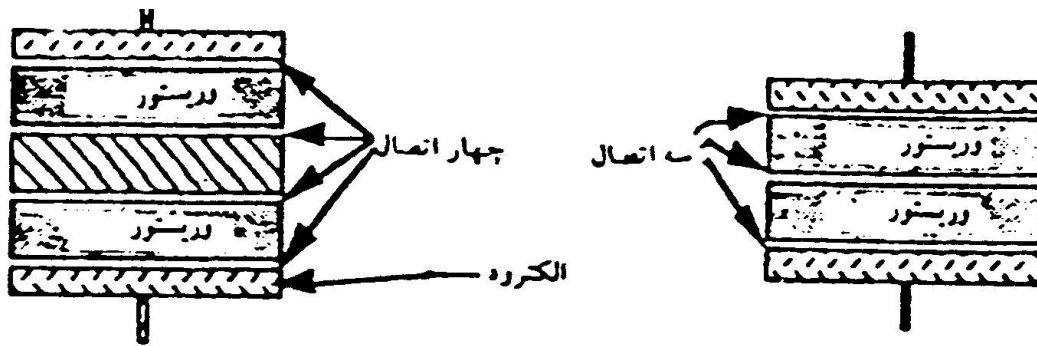
الکتروودها در مقابل اکسیداسیون قرار دادن وریستورها در روغن است.

شکل (۴-۳): وریستور اکسید روی

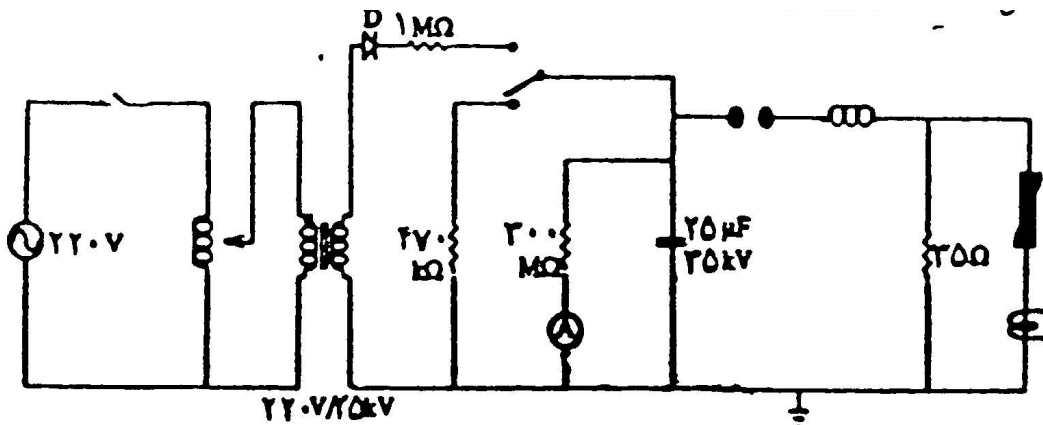
به منظور نشان دادن نقش مقاومت اتصال در الکتروودها بر روی عملکرد برگیر نسبت به انجام آزمایش زیر اقدام می‌کنیم. می‌دانیم که معمولاً یک وریستور با ارتفاع بیشتر از ۴۰ میلیمتر ساخته

نمی‌شود. لذا برای داشتن ارتفاع بالاتر ستون وریستور باید چند قرص اکسید روی را با یکدیگر سری کرد. در اینجاست که نقش مقاومت اتصال بین وریستورها اهمیت پیدا می‌کند.

یک فضا ساز فلزی با مقاومت قابل صرفنظر را بین دو وریستور قرار می‌دهیم تا بدین وسیله تعداد اتصالهای سری را که در حالت عادی برابر با ۳ عدد است، به ۴ عدد برسانیم، (شکل ۴-۴). سپس در دو حالت یا ۳ کنتاکت و یا ۴ کنتاکت، موج جریانی به برقگیر وارد می‌کنیم، در این آزمایش در هر دو حالت فوق‌الذکر مقدار شارژ خازن ژنراتور ضربه یکسان است.



شکل (۴-۴): دو وریستور اکسید روی سری همراه با فضا ساز یا بدون آن



شکل (۴-۵): مولد موج ضربه مورد استفاده

در این آزمایش ها از مولد موج ضربه شکل (۴-۵) استفاده شده است.

مقایسه مقادیر ماکزیمم موج جریان نشان می‌دهد که در حالت با ۴ کنتاکت، جریان از ۳ کیلوآمپر به ۲/۷ کیلوآمپر کاهش یافته که یک تنزل ۳۰۰ آمپری را نشان می‌دهد. این کاهش به علت ازدیاد مقاومت اتصال به سبب افزودن فضا ساز ایجاد گردیده است. یک محاسبه ساده نشان می‌دهد که مقاومت اتصال مقداری برابر ۰/۵۷ اهم داشته است. این مقاومت اضافی در صورت عبور جریان تخلیه ۵ کیلو آمپر از برقگیر باعث افزودن ولتاژ باقیمانده به میزان بیش از ۲/۵ کیلوولت خواهد گردید. ورستورهای استفاده شده در این آزمایش دارای الکترودهای آلومینیومی کم و بیش اکسیده بودند که اتصال بدی را نتیجه می‌دادند. یک آزمایش دیگر با ورستورهای دارای الکترو نقره‌ای، مقاومتی مساوی با ۰/۰۲ اهم را نشان می‌دهد.

۴-۶- عدم کیفیت لازم عایق سطحی روی ورستورها [۴]

وظیفه عایق سطحی روی ورستورها، شکل (۴-۳)، بسیار با اهمیت است. دو وظیفه مهم آن عبارت است از:

الف- حفظ اکسید روی و سایر اکسیدهای همراه آن در مقابل فعل و انفعال شیمیایی با محیط، از قبیل تاثیر محیطهای کاهنده مانند روغن معدنی ترانسفورماتور روی سطح ورستور و یا فعل و انفعال با محصولات ناشی از تخلیه جزئی در فضای داخل برقگیر در طول زمان.

ب- جلوگیری از وقوع فروپاشی روی سطح ورستور در اثنای تخلیه امواج صاعقه از طریق برقگیر. لازم به ذکر است که در صورت وقوع تخلیه از روی سطح ورستورها، علاوه بر آنکه برقگیر وظیفه خود را انجام نمی‌دهد، اضافه ولتاژ منتقل شده به ترمینالهای ترانسفورماتور مورد حفاظت

ممکن است مقادیر بالایی داشته باشد و بعلاوه شب پیشانی موج نیز به نحوی باشد که باعث وقوع شکست در عایق سیم‌پیچ گردد. توزیع غیر یکنواخت ولتاژ ضربه روی سیم‌پیچ این امر را تشدید خواهد کرد. بنابراین روکش عایقی سطح قرص‌های اکسید روی اهمیت بسزایی در عملکرد صحیح برقگیر دارد و در صورتی که در اثر عواملی از قبیل تخلیه جزئی، وقوع شکست سطحی، پدید آمدن تنش‌های حرارتی بزرگ و مانند آن این روکش ترک بخورد یا کنده شود، نقطه ضعف بزرگی برای برقگیر پدید می‌آید که آنرا در طول زمان از بین خواهد برد. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که پوشش‌های شیشه‌ای دارای مقاومت بهتری نسبت به پوشش‌های رزینی هستند.

۴-۷- اشکالات مربوط به انتخاب نوع برقگیر و محل آن در شبکه

۴-۷-۱- پایین بودن ظرفیت برقگیر مورد انتخاب نسبت به قدرت صاعقه‌های موجود در

محل

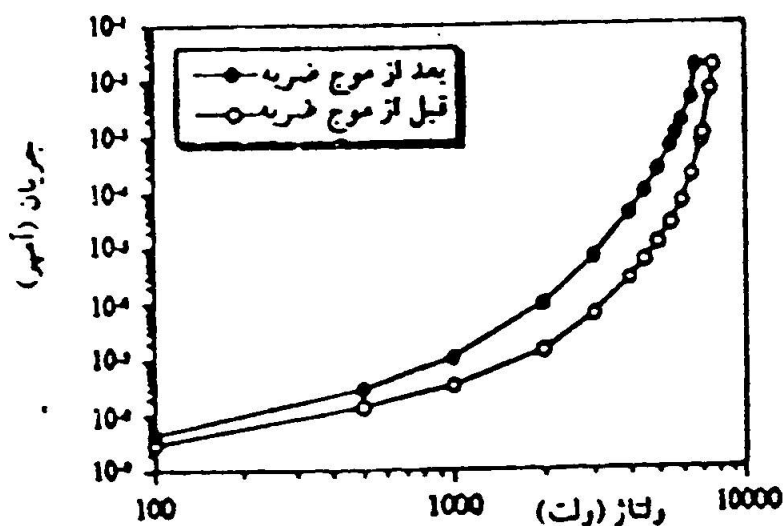
با توجه به سطح ایزوکرنیک و میزان احتمال وقوع صاعقه با پیشانی موج و دامنه مشخص ظرفیت خاصی برای برقگیر انتخاب می‌شود که از جمله این موارد $2/5$ کیلو آمپر، 5 کیلو آمپر، 10 کیلو آمپر و یا بیشتر است.

این عدد دامنه موج جریان تست برقگیر را نشان می‌دهد. اگر ظرفیت برقگیر مورد انتخاب با توجه به مطالب فوق کافی نباشد، احتمال خرابی آن بالا می‌رود. توسی آنکه ورستورهای اکسید روی در اثر تخلیه جریان صاعقه دچار تنزل کیفیت می‌شوند که میزان آن بستگی به میزان بزرگی موج وارده دارد. برای نشان دادن این امر طی آزمایشی امواج ضربه جریانی با دامنه بزرگ به یک ورستور به قطر و ارتفاع 40 میلیمتر وارد می‌شود. پوشش عایقی این ورستور از جنس شیشه می‌باشد. به

منظور جلوگیری از شکست سطحی و ریستور آن را در داخل روغن قرار داده و آزمایش را انجام می‌دهیم.

در شکل (۴-۷) مشخصه جریان - ولتاژ و ریستور مزبور قبل و بعد از اعمال سه موج ضربه ۲۰ کیلو آمپر و ۲ موج ضربه ۶۵ کیلو آمپر با مدت زمان ۵/۱۵ میکروثانیه دیده می‌شود. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، جریان ناشی و ریستور افزایش و ولتاژ آستانه هدایت آن کاهش یافته است که این امر پایین آمدن کیفیت و ریستور را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تخلیه یک موج جریان ۶۵ کیلو آمپر در چنین و ریستوری ولتاژ باقیمانده ماکزیمم در حدود بیش از ۲۰ کیلو ولت را در دو سر آن نتیجه خواهد داد. لذا انرژی تخلیه شده موجی در و ریستور در حدود ۱۵ هزار ژول خواهد بود که چگالی حجمی آن در حدود ۳۰۰ ژول بر سانتی متر مکعب خواهد گردید.

شکل (۴-۷): مشخصه جریان - ولتاژ یک و ریستور قبل و بعد از تحمل موج‌های جریانی با دامنه بزرگ



اگر سطح مقطع و نسبت تحمل انرژی ورستور را با توجه به سطح صفحه در صفحه‌ها متناسب انتخاب شده باشد برقگیر دچار خرابی زودرس خواهد گردید. با توجه به تنزل کیفیت آن پس از تخلیه صاعقه جریان نشتی بالاتری پیدا کرده و در دمای بالاتر کار خواهد کرد. چنین برقگیری هرچند ظاهراً مشکلی ندارد ولی ممکن است به تدریج به حد ناپایداری حرارتی رسیده و بعد از اصابت یک صاعقه سنگین دچار خرابی نهایی و انفجار گردد.

۴-۷-۲- پایین بودن ولتاژ آستانه برقگیر انتخاب شده نسبت به سطح TOV

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

۴-۸- اشکالات ناشی از نحوه نگهداری و بهره‌برداری از برقگیر

۴-۸-۱- وجود تخلیه جزئی در داخل محفظه برقگیر

اگر بعلمتی مثلاً نفوذ رطوبت، در داخل محفظه برقگیر تخلیه جزئی پیش بیاید، این امر باعث خرابی تدریجی ورستورها می‌گردد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که تاثیرات شیمیایی ناشی از این پدیده، علاوه بر مستعد نمودن قرص‌ها جهت ایجاد شکست در اثر امواج صاعقه روی سطح آنها، لایه

سطحی قرص‌های اکسید روی را خراب می‌کند و از خاصیت غیر خطی آنها می‌کاهد. لذا وجود تخلیه جزئی باعث کاهش طول عمر برقگیر می‌گردد.

۴-۸-۲- آلودگی سطح خارجی محفظه برقگیر

عمل کثافت سطحی روی برقگیرهای اکسید روی پدیده‌ای پیچیده است. این آلودگی‌ها اگر از نوع نمکی باشند در هنگام رطوبت و اگر از نوع فلزی یا دوده باشند در حالت خشک یا تر دارای تاثیر منفی روی عملکرد برقگیر هستند. آلودگی‌های سطحی بطور یکنواخت روی سطح خارجی محفظه برقگیر توزیع نمی‌شوند و لذا علاوه بر نزدیک نمودن الکترودها و کوتاه کردن فاصله عایقی، نحوه توزیع پتانسیل روی سطح برقگیر را نیز تغییر می‌دهند. بنابراین دو توزیع پتانسیل متفاوت وجود خواهد داشت که یکی بوسیله ورستورهای اکسید روی در داخل برقگیر اعمال می‌شود و دیگری توسط لایه آلودگی سطحی در خارج برقگیر تحمل می‌گردد.

گرادیان‌هایی که بین این دو توزیع پتانسیل ظاهر می‌شود، پدیده‌ای مزاحم است. این پدیده می‌تواند باعث گرم شدن موضعی قرص‌ها شود و یا ایجاد تخلیه جزئی بین ستون ورستورها و محفظه برقگیر بنماید. این امر باعث کاهش طول عمر برقگیر خواهد بود.

البته عملکرد برقگیرهای اکسید روی فعلی در برابر آلودگی سطحی از رفتار برقگیرهای سیلیکون کارباید در این مورد بسیار بهتر است. در برقگیرهای سیلیکون کارباید، تغییرات نحوه توزیع ولتاژ می‌تواند به ایجاد تخلیه در فاصله‌های هوایی سری با قرص‌های برقگیر، حتی تحت ولتاژ نامی، منجر شود که خرابی برقگیر را نتیجه خواهد داد، زیرا برقگیر نمی‌تواند در این شرایط خود را از قوس ایجاد شده برهاند. به منظور جلوگیری از تاثیرات فوق باید سطح خارجی برقگیرها را با برنامه زمانی معین شستشو داد. راه دیگر رهایی از مشکل آلودگی اکسید روی، قرار دادن ورستورها در داخل تانک

ترانسفورماتورهای غوطه‌ور در روغن است که آنها را در برابر آلودگی‌های خارجی محافظت خواهد نمود.

۴-۸-۳- اکسید شدن و خرابی اتصالات خارجی برقگیر (۴):

در صورت خرابی یا شل شدن کنتاکتهای مدار خارجی برقگیر یا اتصالات زمین، افت ولتاژ روی آنها در هنگام تخلیه جریان صاعقه بالا می‌رود. این افت ولتاژها با ولتاژ باقیمانده دو سر برقگیر جمع شده و نتیجه آنها به عایق دستگاہ مورد حفاظت (ترانسفورماتور) اعمال می‌گردد که ممکن است به آن صدمه برساند.

فصل پنجم

شناسایی پدیده فرورزونانس و

بررسی حادثه پست ۴۰۰/۲۳۰

کیلوولت شهید کشوری

کرمانشاه

۵-۱- مقدمه:

فرورزناس یکی از پدیده‌های نادر و مخرب در شبکه‌های قدرت می‌باشد. که به دلیل وقوع تصادفی و کم تعداد بودن آن در سیستم‌های قدرت اطلاعات دقیق، کامل و تدوین شده بسیار کمی در دسترس مهندسين و متخصصين برق قرار دارد. وقوع تعدادی از حوادث که سالانه در شبکه‌های قدرت اتفاق می‌افتد و اغلب آنها قابل تفسیر نمی‌باشند می‌تواند به دلیل وقوع این پدیده مخرب و پیچیده باشد.

شناخت پدیده فرورزناس می‌تواند در تفسیر برخی حوادث مبهم ناشی از وقوع این پدیده در شبکه‌های قدرت و نیز جلوگیری از تکرار آن کمک نماید. در فصل حاضر ابتدا بطور مختصر به شرایط وقوع پدیده فرورزناس در سیستم‌های قدرت پرداخته و پس از آن با استفاده از نرم افزار EMTP حادثه مورخ ۱۳۸۱/۲/۲۸ پست ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت پست شهید کشوری کرمانشاه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲- شناسایی پدیده فرورزناس:

فرورزناس یک پدیده رزناس غیر خطی است که می‌تواند روی شبکه‌های قدرت تاثیر گذارد. مقایده غیر عددی هارمونیک‌ها و یا اضافه ولتاژ یا اضافه جریانهای گذرا یا پایدار که توسط آن ایجاد می‌گردد معمولا برای تجهیزات برقی خطرناک است. بعضی از شکست‌های الکتریکی توجیه نشده را می‌توان به این پدیده غیر خطی نادر نسبت داد.

واژه فرورزناس که تقریباً از اواخر دهه دوم قرن بیستم وارد مقالات و کتابها گردید، به کلیه پدیده‌های نوسانی رخ داده در مدارهای الکتریکی اطلاق می‌گردد که این مدارها حداقل شامل آیتم‌های زیر باشند:

الف) سلف غیر خطی (فرومغناطیس قابل اشباع).

ب) خازن.

ج) منبع ولتاژ (عموما سینوسی).

د) تلفات بسیار کم.

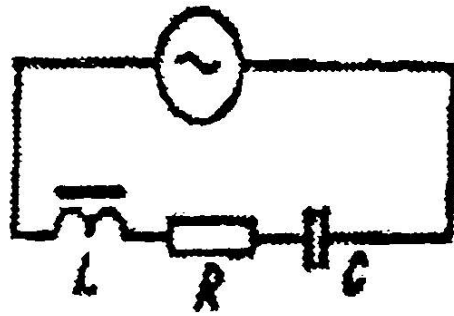
شبکه‌های قدرت شامل تعداد بسیار زیادی از این سلف‌های قابل اشباع مانند ترانسفورماتورهای قدرت، ترانسفورماتورهای ولتاژ، راکتورهای شنت می‌باشد همچنین به عنوان خازن می‌توان از کابلها، خطوط هوایی بلند، ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی، بانکهای خازنی موازی با پل بریکرها نام برد. اینها تجهیزاتی هستند که می‌توانند شرایط وقوع فرورزناس را ایجاد نمایند. بزرگترین مشخصه این پدیده این است که احتمال وجود بیش از یک پاسخ حالت پایدار برای یک نوع آرایش از پارامترهای شبکه وجود دارد. حالت‌های گذرا، اضافه ولتاژهای رعد برق، برقدار یا بی برق کردن ترانسفورماتورها و وقوع خطاها می‌تواند موجب شروع فرورزناس گردد که در این صورت پاسخ شبکه در یک حالت پایدار سیوسی - فرکانس منبع به پاسخ حالت پایدار فرورزناسی دیگر با اضافه ولتاژهای بالا و سطوح مختلف هارمونیک می‌تواند برای تجهیزات بسیار مضر باشد جهش نماید.

اطلاعات مختصری درباره این پدیده پیچیده بدست آمده است زیرا که این پدیده بسیار نادر بوده و با روشهای محاسباتی معمول که مهندسين برق استفاده می‌کنند قابل تجزیه و تحلیل و حدس زدن نمی‌باشد. و این ضعف اطلاعات باعث می‌شود که علت تعدادی از حوادث و انهدام و تخریب تجهیزات که توجیه نشده‌اند، پدیده فرورزناس به نظر آید.

۵-۳- فرورزونانس

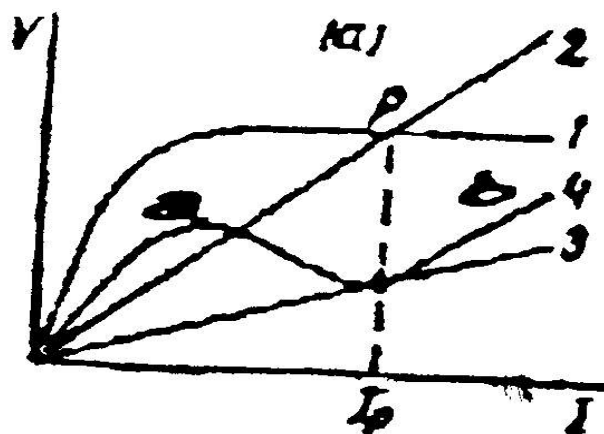
۵-۳-۱- فرورزونانس سری یا ولتاژی:

مدار RLC زیر را در نظر بگیرید که در آن کاپاسیتانس و مقاومت خطی بوده و اندوکتانس غیر خطی (سلف با هسته آهن قابل اشباع) می باشد.



شکل (۵-۱) مدار RLC سری

مشخصه ولت آمپر سلف مذکور با توجه به اینکه می دانیم مقدار ولتاژ سلف تابعی از جریان آن می باشد یعنی $V_L = F(I)$ بصورت منحنی یک در شکل (۵-۲) خواهد بود. مشخصه ولت - آمپر خازن با توجه به رابطه $V_C = I / C\omega$ بصورت یک خط راست یعنی منحنی ۲ و همچنین مشخصه ولت - آمپر مقاومت با توجه به رابطه $V = RI$ نیز بصورت خط راست یعنی منحنی ۳ خواهد بود.

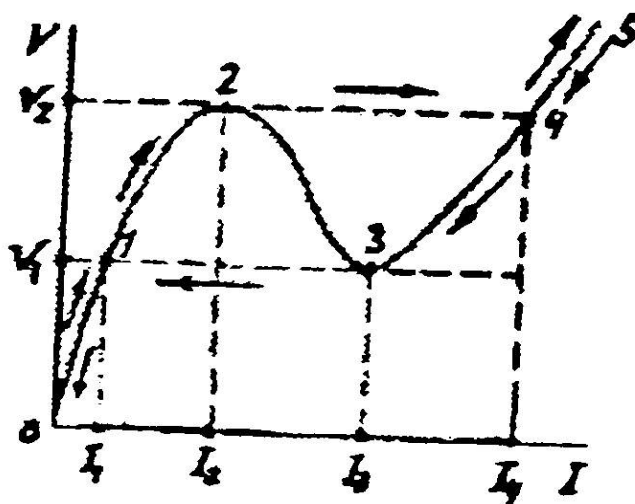


شکل (۵-۲): مشخصه ولت - آمپر المانهای مدار فرورزونانس سری

حال اگر مقادیر مختلف ولتاژ را به مدار فوق اعمال کنیم با در نظر داشتن اینکه مقدار ولتاژ روی سلف و خازن همواره 180° درجه با هم اختلاف فاز دارند منحنی شماره ۴ بدست می‌آید. لازم به ذکر است هر چه قدر مقدار مقاومت کوچکتر باشد در ازای جریان I_p که V_L و V_C از نظر قدر مطلق برابر هستند مقدار ولتاژ بین دو نقطه a و b کوچکتر بوه و به صفر نزدیکتر می‌شود در حوالی این نقطه که جریان هارمونیک اول با ولتاژ همفاز است، پدیده فرورزونانس روی می‌دهد.

پدیده فرورزونانس سری یا فرورزونانس ولتاژی را می‌توان با تغییر دادن مقدار ولتاژ منبع یا فرکانس آن و یا تغییر در ظرفیت خازن یا مشخصات سلف با هسته آهنی مدار، ایجاد نمود.

همانطور که گفته شد منحنی ۴ مشخصه ولت - آمپر مدار، فوق می‌باشد بار دیگر آنرا بصورت مجزا در شکل (۵-۳) نمایش داده و با افزایش تدریجی ولتاژ منبع، تغییرات جریان مدار را با توجه به منحنی مذکور بررسی می‌کنیم.



شکل (۵-۳): مشخصه ولت-آمپر مدار RLC سری

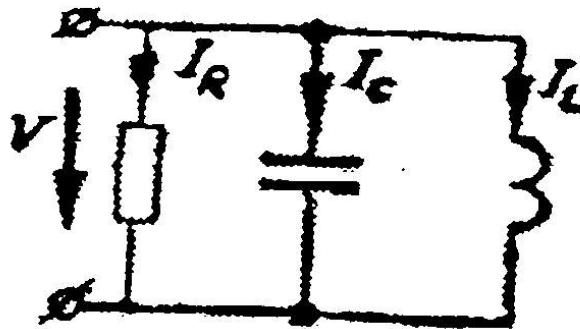
با افزایش ولتاژ منبع در صفر تا V_1 و از V_1 تا V_2 مقادیر I_1 و I_2 از روی منحنی بدست می‌آید حال اگر مقدار ولتاژ منبع را بار اضافه کنیم جریان از نقطه ۲ به نقطه ۴ جهش کرده دوباره مقدار افزایش آن از نقطه ۴ به نقطه ۵ از روی منحنی ادامه می‌یابد.

حال اگر ولتاژ را کاهش دهیم جریان از نقطه ۵ به ۴ و از آنجا به نقطه ۳ حرکت کرده و با کاهش بیشتر جریان از نقطه ۳ جهش کرده و روی نقطه ۱ قرار گرفته به طرف صفر حرکت می‌کند. همانطور که دیده می‌شود با افزایش تدریجی ولتاژ منبع به V_2 جریان از I_2 به I_4 جهش کرده و همزمان با آن اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ تغییر می‌کند بطوری که در نقطه ۲ جریان نسبت به ولتاژ عقب‌تر است یعنی $V_L > V_C$ ولی در نقطه ۴ جریان از ولتاژ جلوتر است یعنی $V_C > V_L$ می‌باشد. هنگام کاهش ولتاژ تا V_1 نیز این جهش از I_1 به I_3 روی داده و تغییر فاز را خواهیم داشت.

این تغییرات ناگهانی جریان نسبت به تغییرات جزئی ولتاژ ورودی را عمل سوئیچینگ^۱ در مدار فرورزونانس سری می‌گویند.

۵-۳-۲- فرورزونانس موازی یا فرورزونانس جریانی:

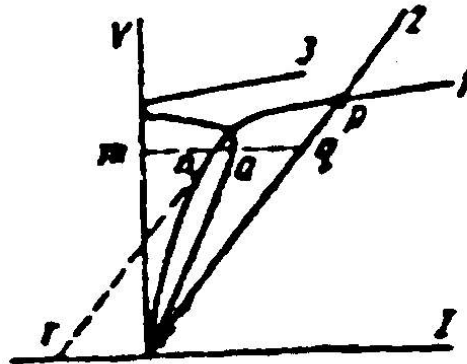
مدار RLC موازی زیر را در نظر می‌گیریم:



^۱-Switching action

شکل (۴-۵): مدار RLC موازی

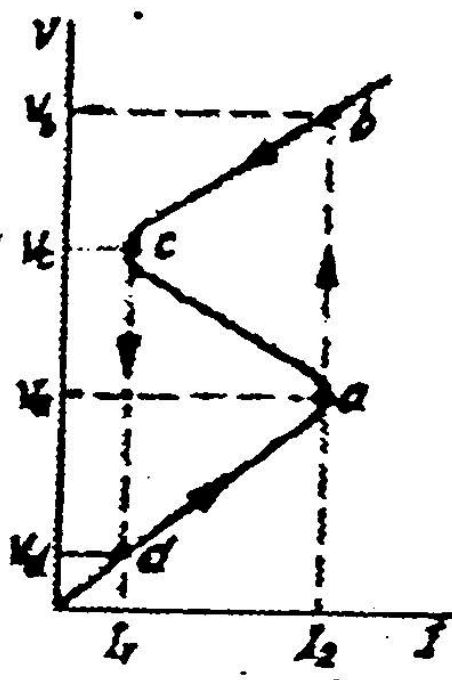
مطابق آنچه در بخش قبلی گفته شد مشخصه ولت - آمپر سلف و خازن به ترتیب با منحنی ۱ و خط ۲ نشان داده شده است. شکل (۵-۵).



شکل (۵-۵): مشخصه ولت - آمپر المانهای مدار فرورزونانس موازی

منحنی شماره ۳ مقدار I یعنی حال جمع جبری I_c و I_L می‌باشد. پایین‌تر از نقطه P جریان I_c بزرگ‌تر I_L و بالاتر از نقطه P جریان I_L بزرگ‌تر از I_c می‌باشد. در نقطه P که هارمونیک اول جریان راکتیو I_L برابر I_c است فرورزونانس موازی یا (جریانی) روی می‌دهد. در این حالت یعنی نقطه C در شکل (۶-۵) مجموع جریان صفر نمی‌باشد بلکه برابر هارمونیک اول مؤلفه اهمی جریان I_L می‌باشد.

اگر مدار RLC فوق را به یک منبع جریان وصل کرده و مقدار جریان را به تدریج از صفر افزایش دهیم در I_2 مقدار ولتاژ ورودی مدار از V_a به V_b جهش می‌کند. همچنین اگر مقدار جریان را به تدریج کاهش دهیم در I_1 ولتاژ از مقدار V_c به V_d افت می‌کند. این تغییرات ناگهانی ولتاژ را عمل سوئیچینگ در مدار فرورزونانس موازی گویند.



شکل (۵-۶): مشخصه ولت - آمپر مدار فرورزونانس موازی

۵-۴- طبقه‌بندی مدل‌های فرورزونانس:

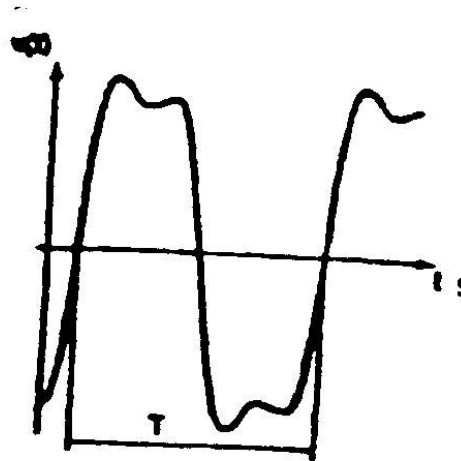
با تجربه‌ای که از ظاهر شدن شکل موجهای مختلف در سیستم قدرت و همچنین از آزمایش‌های مختلف روی مدل‌های ساده شده سیستم بدست آمده و شبیه سازی عددی، قادریم حالت‌های فرورزونانس را به چهار حالت مختلف تقسیم کنیم این چهار حالت مربوط به حالت پایدار است یعنی وقتی که یک حالت گذرا تمام شده است زیرا برای مدار فرورزونانسی تفاوتی بین حالت‌های

گذرای عادی و حالت گذرای فرورزونانس وجود ندارد به هر حال باید پذیرفت که حالت فرورزونانس گذرا برای سیستم خطری ایجاد نمی‌کند.

این چهار حالت عبارتند از:

۵-۴-۱- مدل پایه^۱

در این حالت ولتاژ و جریان پریودیک می‌باشد و پریود آنها یعنی T با پریود سیستم برابر است.



شکل (۵-۷): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد پایه

۵-۴-۲- مدل زیر هارمونیک^۲

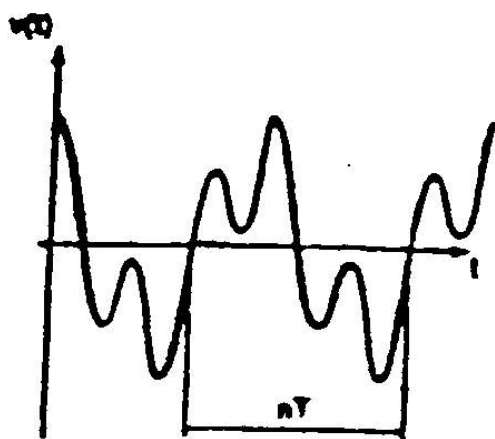
در این حالت جریان و ولتاژ با پریودی نوسان می‌کنند که ضربی از پریود منبع است. این حالت به

زیر هارمونیک n ام یا هارمونیک $\frac{1}{n}$ ام معروف است. حالت فرورزونانس زیر هارمونیک از مرتبه فرد

است.

^۱- Fundamental Mode

^۲-Subharmonic Mode



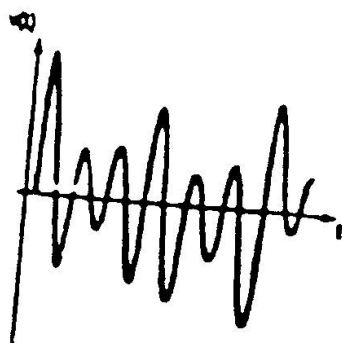
شکل (۵-۸): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد زیر هارمونیک

۵-۴-۳- مدل شبه پریودیک^۱:

این حالت پریودیک محض نبوده ولی آشفتگی‌ها و نوسانات خود دارای پریود خاصی می‌باشند

شکل (۵-۹) این حالت را نشان می‌دهد.

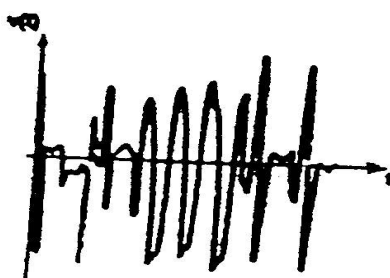
^۱Quasi-Periodic Mode



شکل (۹-۵): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد شبه پریودیک

۵-۴-۴-مدل آشوب گونه:

در این نوع فرورزونانس نوسانات کاملا اتفاقی و غیر پریودیک می باشند. شکل (۱۰-۵) این حالت را نشان می دهد.



شکل (۱۰-۵): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد آشوب گونه

۵-۵- شناسایی فرورزنانس:

بروز فرورزنانس معمولاً با اثرات و علائمی به شرح زیر همراه است:

- اضافه ولتاژهای با دامنه زیاد و دائمی بصورت فاز به فاز یا فاز به زمین.
- اضافه جریانهای با دامنه زیاد و دائمی.
- اعوجاج‌های با دامنه زیاد و دائمی در شکل موج ولتاژ و جریان.
- جابجایی ولتاژ نقطه صفر.
- افزایش دمای ترانسفورماتور (در حالت بی باری).
- افزایش پیوسته بلندی نویز ترانسفورماتورها و راکتورها.
- وارد شدن صدمات به تجهیزات الکتریکی از قبیل بانکهای خازنی و ترانس‌های ولتاژ خازنی (CVT) به دلیل افزایش اثر حرارتی و یا شکست عایقی.
- تریپ بی موقع تجهیزات حفاظتی.

البته بعضی از این علائم مختص پدیده فرورزنانس نیست بطور مثال جابجایی نقطه صفر در شبکه‌هایی که نقطه صفر آنها زمین نشده است می‌تواند به دلیل وقوع اتصال فاز به زمین روی دهد. تشخیص اولیه فرورزنانس توسط مقایسه هر نوع منحنی ثبت شده از حادثه با شکل موجهای نوعی^۱ فرورزنانس که در بالا معرفی شده‌اند، بسیار ساده گردیده است اما وقتی با مشکل مواجه می‌گردیم که هیچ گونه ثباتی وجود نداشته باشد یا اینکه تفسیرهای مختلفی از اثرات و علائم موجود وجود داشته باشد.

در این صورت ابتدا باید اقدام به تجزیه و تحلیل ترکیب شبکه با در نظر گرفتن اثرات موجود و همچنین بررسی حوادث قبل از آن، از قبیل برقدار کردن ترانسفورماتور یا برگشت بار که می‌تواند

^۱-Typical

موجب بروز پدیده فرورزناس گردند، نمود. قدم بعدی این است که تعیین کنیم آیا سه شرط لازم (نه کافی) برای بروز پدیده فرورزناس وجود داشته است یا خیر.

این سه شرط عبارتند از:

۵-۵-۱- حضور همزمان خازن با راکتور غیر خطی در سیستم.

۵-۵-۲- وجود حداقل یک نقطه از سیستم که دارای ولتاژ ثابت نباشد.

۵-۵-۳- وجود اجزاء سیستم با بار کم مانند ترانسفورماتور یا ترانسفورماتور ولتاژ بدون بار.

در صورتی که هر کدام از این سه شرط برقرار نباشد احتمال بروز پدیده فرورزناس بسیار ضعیف است در غیر این صورت باید تحقیقات گسترده‌ای بعمل آورد.

همچنین می‌توان بوسیله مقایسه وضعیت موجود با مثالهای نوعی از حالت‌های سیستم که شرایط آنها جهت وقوع فرورزناس مطلوب می‌باشد، ترکیب‌هایی از شبکه را که در آنها احتمال وقوع پدیده فرورزناس وجود دارد شناسایی کرد.

۵-۶- جمع‌آوری اطلاعات شبکه و پست جهت شبیه‌سازی و بررسی حادثه پست شهید

کشوری کرمانشاه

در این قسمت اطلاعات خطوط ورودی پست شهید کشوری کرمانشاه مشخصات ترانس T_4 ترانس زمین و مشخصات برقگیرهای این پست آورده شده است.

در جدول ۵-۱ مشخصات کامل خطوط ورودی پست شهید کشوری کرمانشاه که شامل طول خط، تعداد مدار، تعداد هادی‌های و سایر مشخصات خط است ذکر شده است.

جدول (۵-۱): مشخصات خطوط ورودی شهید کشوری

نام سیم محافظ	نام هادی	تعداد برجها		تعداد		طول (کیلومتر) (تر)		کد خط	نام خط	ردیف
		مدار	مسیر	مدار	مسیر	مدار	مسیر			
۷N۰.۸	CURLEW	۱۵	۱۱۸	۳	۱	۴۶	۴۶	BH۹۲۰	بیستون - کرمانشاه ۱	۱
۷N۰.۸	CURLEW	۱۵	۱۱۶	۳	۱	۴۶	۴۶	BH۹۲۱	بیستون - کرمانشاه ۲	۲

در جدول (۵-۲) مقادیر امیدانسه‌های توالی صفر و مثبت خط بیستون - کرمانشاه آمده است.

جدول (۵-۲): مقادیر امیدانسه‌های خط بیستون - کرمانشاه

امیدانس توالی مثبت (Ω)	امیدانس توالی صفر (Ω)
$Z_{+} = .944 + 13/648$	$Z_{0} = 7/68 + 42/208$

در جدول (۵-۳) مشخصات ترانسفورماتور T_f پست مذکور که شامل سطح ولتاژ ترانسفورماتور، ظرفیت، نوع اتصال سیم پیچها، نوع سیستم خنک کنندگی ترانسفورماتور و درصد امیدانس ولتاژ برای سیم پیچهای مختلف می‌باشد، ذکر شده است.

جدول (۵-۳): مشخصات ترانسفورماتور T_f پست شهید کشوری کرمانشاه

درصد امیدانس ولتاژ (در تپ نامی)			نوع سیستم خنک کنندگی	نوع اتصال سیم پیچها			ظرفیت (MVA)	سطح ولتاژ (KV)
LV-TV	HV-TV	HV-LV	ONAN/ONAF γ /ONAF γ	LV-TV	HV-TV	HV-LV	۱۶۶.۶۶۷	۴۰۰/۲۳۰/۱۳.۸

۶۶,۲	۸۴,۲	۱۲,۰۴		YndI۱	YndI۱	Yan۰		
۴	۱							

در جدول ۴-۵ مشخصات ترانسفورماتور زمین پست شهید کشوری و در جدول ۵-۵ مشخصات دکل‌های مورد استفاده در خط بیستون - کرمانشاه ذکر شده است.

جدول (۴-۵): مشخصات ترانسفورماتور زمین پست شهید کشوری

ظرفیت ترانس کمکی (KVA)	امپدانس توالی صفر (Ω)	امپدانس ولتاژ (%)	نوع اتصال	سطح ولتاژ (V)	ظرفیت (KVA)
۳۳	۹/۷۷	۴	ZNYN۱۱	۱۳۸۰۰/۳۸۰/۲۲۰	۵۰۰

جدول (۵-۵): مشخصات دکل‌های مورد استفاده در خط بیستون - کرمانشاه

$D_{horizontal}(m)$	$H_{mid}(m)$	$H_{tower}(m)$
۱۰/۴۵	۴۰	۴۴/۵

مشخصات فنی برقی‌های سمت اولیه (۴۰۰kV) ترانسفورماتور:

برقگیر اکسید روی با محفظه پرسلین نوع EXLIM Q (۱۰KA) ساخت شرکت ABB:

ماکزیمم ولتاژ سیستم (U)_m ۴۲۰Kv

ولتاژ نامی (U)_r ۳۶۰Kv

ماکزیمم ولتاژ کار دائم:

بر حسب استاندارد IEC (U)_c ۲۶۷KV_{rms}

بر حسب استاندارد ANSI/IEEE (MCOV) ۲۹۱KV_{rms}

ظرفیت TOV:

۴۱۷KVrms	۱ ثانیه
۳۹۶KVrms	۱۰ ثانیه
۱۰KA	جریان تخلیه نامی (IEC)
	جریان تخلیه با طول مدت آن:
۱۰۰KA	جریان بالا μs (۴/۱۰)
۷۰۰A	جریان پایین μs ۲۴۰۰
۹۰۰A	جریان پایین μs ۲۰۰۰
۷,۵KJ kv(Ur)	ظرفیت انرژی
Class ۳	کلاس تخلیه خط (IEC)
۵۰KA	جریان اتصال کوتاه
۶۳KA	ظرفیت شیر اطمینان
استقامت عایقی خارجی:	
۱۸۰۰KV	μs (۱,۲/۵۰) خشک
۸۱۸KV	۵۰ هرتز مرطوب (۶۰s)
۸۰۲KV	۶۰ هرتز مرطوب (۱۰s)
۱۳۷۴KV	μs (۲۵۰/۲۵۰۰) مرطوب
۱۰۷۰۰Mm	فاصله خزشی
۳۷۷۵Mm	ارتفاع

۱۸۰۰۰Nm

مقاومت مکانیکی (DIN۴۸۱۱۳)

۱۳۷۴Kg

جرم

تعداد ستون

شرایط سرویس:

+۴۵°C تا -۵۰°C

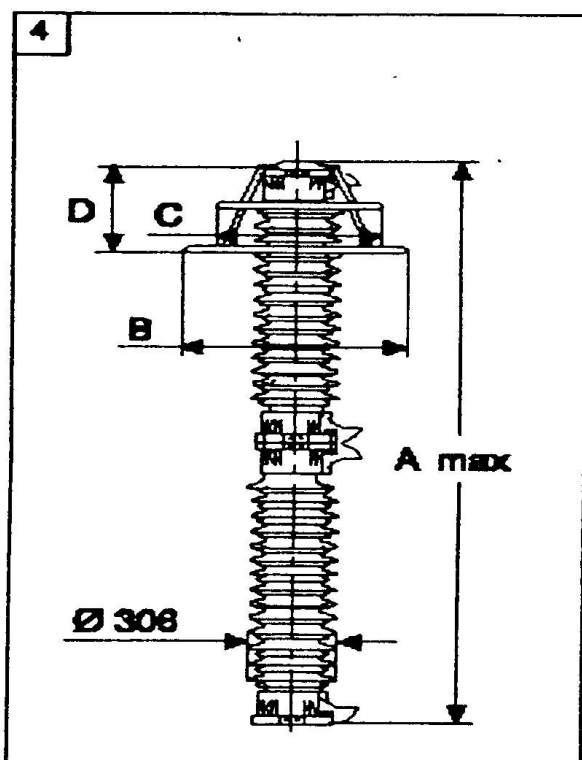
درجه حرارت محیط

۱۰۰m

ماکزیمم ارتفاع طراحی

۱۵-۶۲HZ

فرکانس



$A_{max}=3775$ mm
 $B=1600$ mm
 $C=1000$ mm
 $D=650$ mm

مشخصات فنی برقی‌های سمت اولیه (۲۳۰kV) ترانسفورماتور:

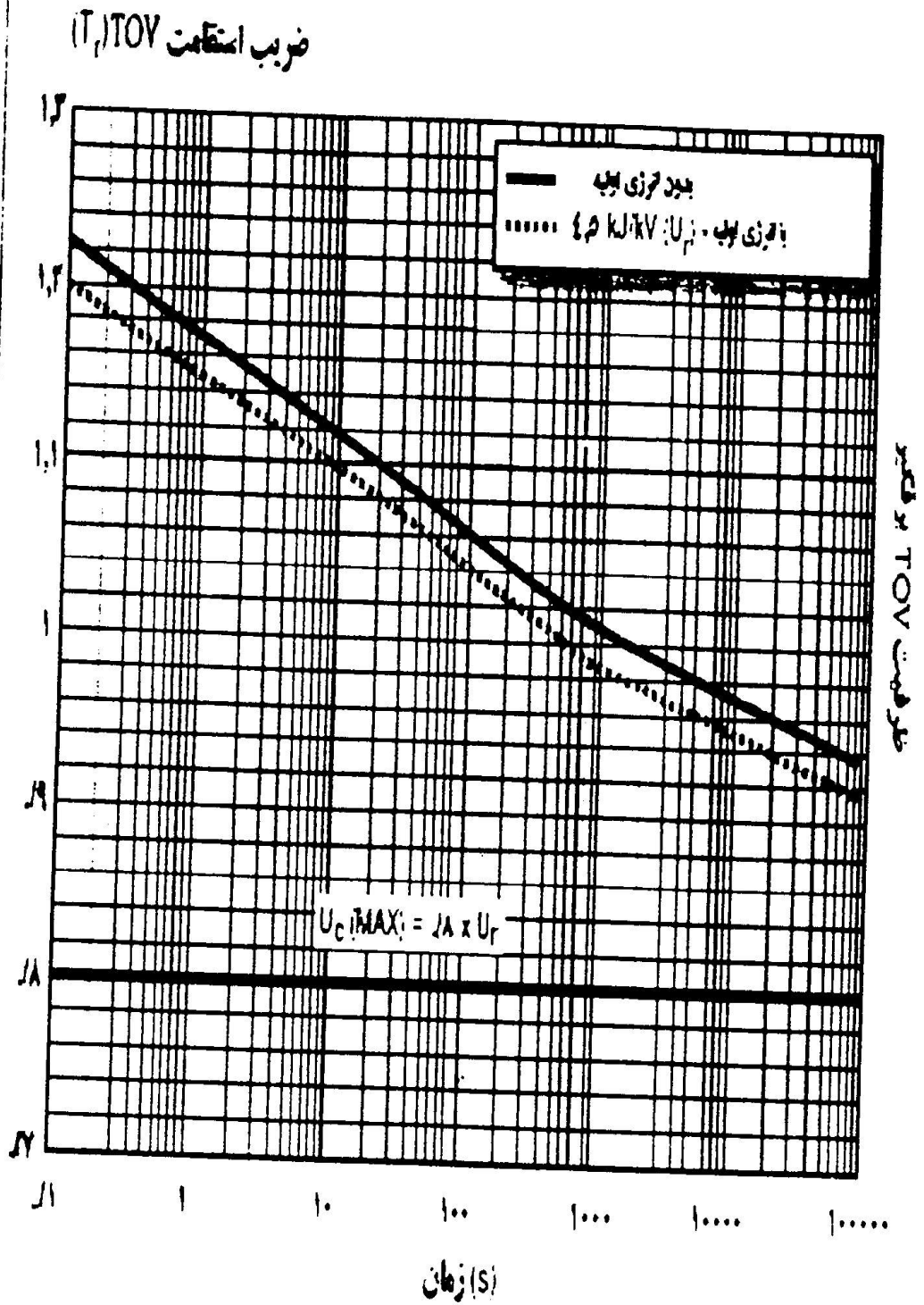
برقگیر اکسید روی با محفظه پرسلین نوع EXLIM Q (۱۰KA) ساخت شرکت ABB:

۲۴۵Kv	ماکزیمم ولتاژ سیستم (Um)
۱۹۲Kv	ولتاژ نامی (Ur)
	ماکزیمم ولتاژ کار دائم:
۱۵۴KVrms	بر حسب استاندارد IEC (Uc)
۱۵۴KVrms	بر حسب استاندارد ANSI/IEEE (MCOV)
	ظرفیت TOV:
۲۲۲KVrms	۱ ثانیه
۲۱۱KVrms	۱۰ ثانیه
۱۰KA	جریان تخلیه نامی (IEC)
	جریان تخلیه با طول مدت آن:
۱۰۰KA	جریان بالا $(4/10) \mu s$
۷۰۰A	جریان پایین $2400 \mu s$
۹۰۰A	جریان پایین $2000 \mu s$
۷,۵KJ kv(Ur)	ظرفیت انرژی
Class ۳	کلاس تخلیه خط (IEC)
۵۰KA	جریان اتصال کوتاه
۶۳KA	ظرفیت شیر اطمینان

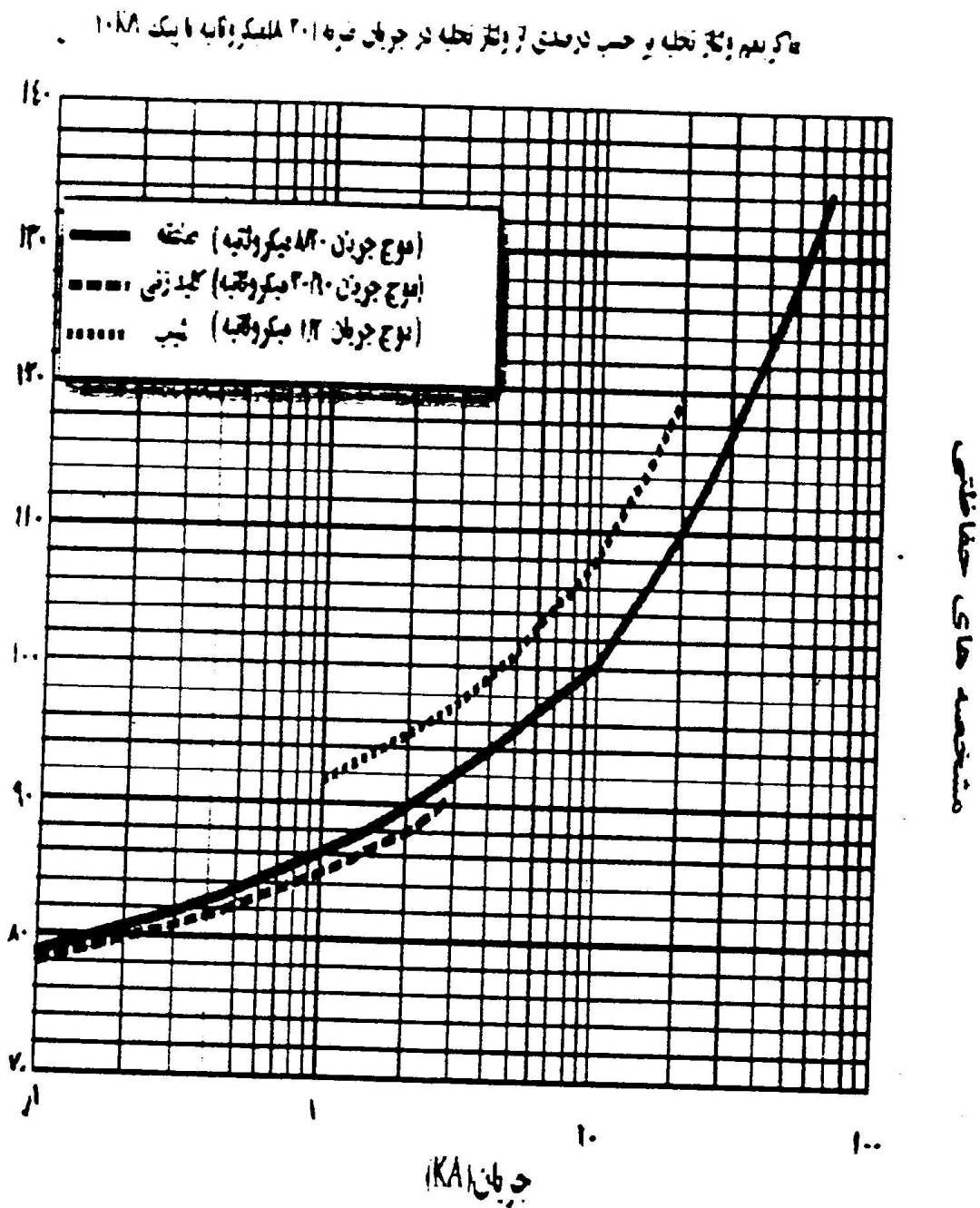
استقامت عایقی خارجی:

۱۱۷۲KV	μs (۱,۲/۵۰) خشک
۵۵۶KV	۵۰ هرتز مرطوب (۶۰s)
۵۴۶KV	۶۰ هرتز مرطوب (۱۰s)
۹۲۴KV	μs (۲۵۰/۲۵۰۰) مرطوب
۶۵۷۰Mm	فاصله خزشی
۲۵۸۵Mm	ارتفاع
۱۸۰۰۰Nm	مقاومت مکانیکی (DIN۴۸۱۱۳)
۲۳۵Kg	جرم

همچنین مشخصه‌های زمان TOV و مشخصه‌های حفاظتی برقگیر در اشکال ۵-۱۱ و ۵-۱۲ آورده شده‌اند.



شکل (۵-۱۱): مشخصه (زمان - TOV) برقگیر آسیب دیده پست شهید کشوری



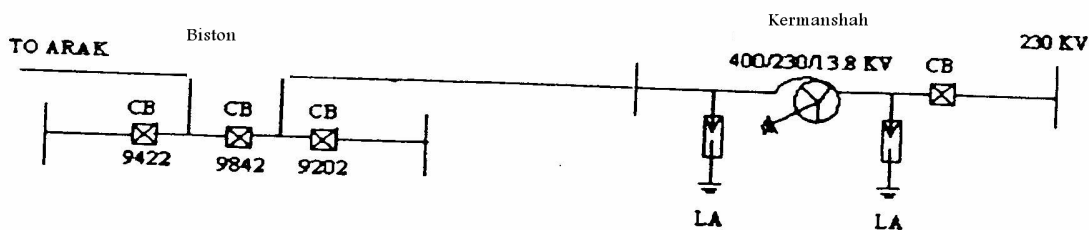
شکل (۵-۱۳): مشخصه های حفاظتی (V-I) برآگیر آسیب دیده پست شهید کشوری

۵-۷- بررسی حادثه مورخ ۸۱/۲/۲۸ پست شهید کشوری کرمانشاه

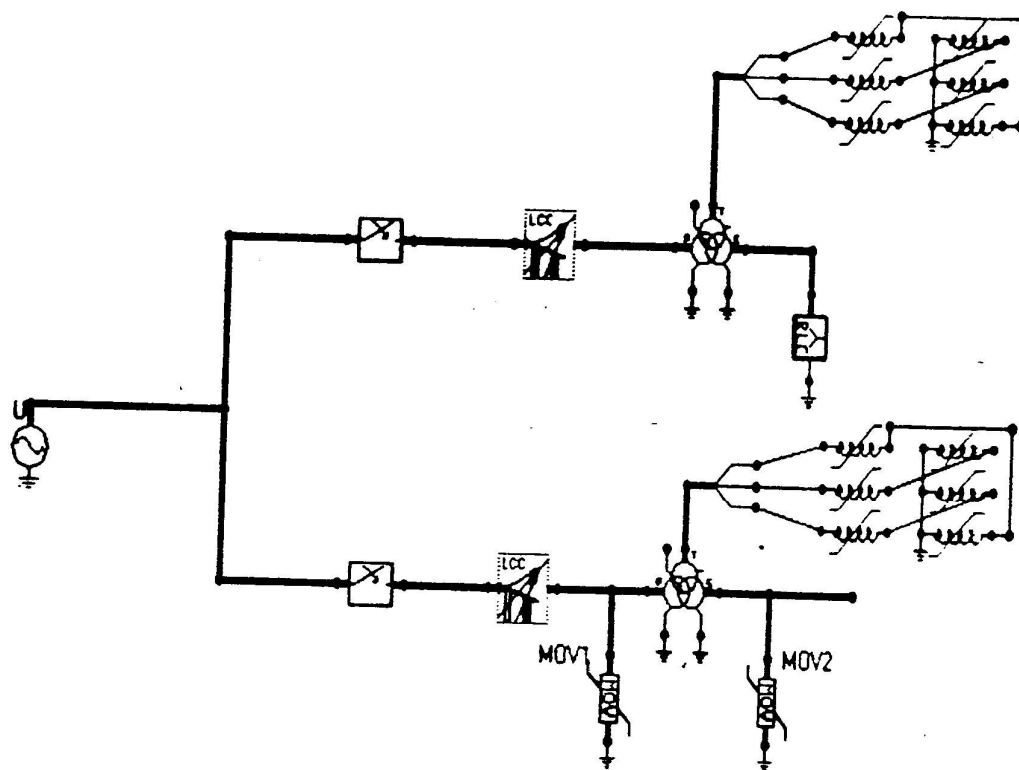
طبق برنامه قبلی برای انجام تعمیرات، خط ۴۰۰ کیلوولت بیستون - کرمانشاه به شماره BH۹۲۰ و ترانسفورماتور ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت T_۴ در پست شهید کشوری که از خط فوق تغذیه می‌شود از مدار خارج و پس از انجام سرویسهای لازم آماده برقرار شدن می‌گردد. با هماهنگی مرکز کنترل ابتدا به بریکر ۹۲۰۲ در پست بیستون فرمان وصل داده شده که بلافاصله با عملکرد حفاظت نامتعادلی پلها قطع می‌گردد. مجدداً فرمان وصل به بریکر میانی ۹۸۴۲ در پست بیستون داده می‌شود که همزمان با آن برقگیر فاز C سمت ۲۳۰ کیلوولت ترانس T_۴ در پست شهید کشوری منفجر و موجب عملکرد حفاظتهای باسبار و ترانس T_۴ می‌گردد.

۵-۷-۱- مدلسازی و مطالعه حادثه با استفاده از نرم‌افزار ATP:

چنانچه شماتیک مدار و خطوط ارتباطی پست را رسم کنیم خواهیم داشت:



شکل (۵-۱۴): شماتیک پست شهید کشوری و خطوط ارتباطی ۴۰۰ KV تغذیه کننده



شکل (۵-۱۴): مدار معادل شبکه مورد نظر جهت شبیه سازی در محیط ATPDraw

در این شبیه سازی از مدل گسترده خط غیر ترانسپوز و ترانسفورماتور سه فاز سه سیم پیچ قابل اشباع که با توجه به پارامترهای دقیق مدل گردیده اند، استفاده شده است.

برای مدل دقیق برقگیر از برقگیرهای ۱۰KA نوع ABB، استفاده شده است. همچنین برای

مدل دقیق هسته ترانس از برنامه کمکی SATURA استفاده شده است. حال با توجه به مدلینگ

انجام شده به بررسی حادثه مورخ ۸۱/۲/۲۸ می پردازیم و در ابتدا فرض می کنیم که کلید ۲۳۰KV

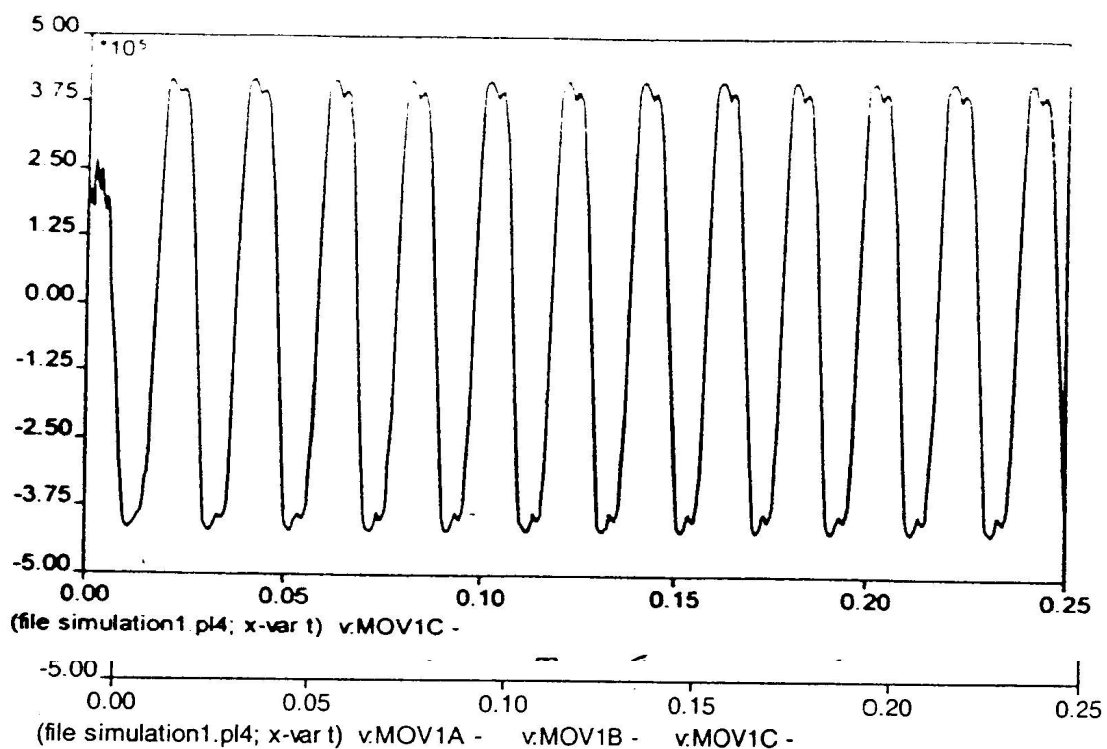
بیستون - کرمانشاه در بست بیستون هر دو باز و ترانس بی برق باشد. حال در این حالت فرمان وصل

به سه پل کلید ۹۲۰۲ در پست رودشور داده می شود که دو پل فاز R و S بسته، ولی پل فاز T موفق

به وصل نمی‌شود. شکل (۵-۱۵) ولتاژ سه فاز سمت اولیه سیم پیچهای ترانس را در این حالت نشان می‌دهد. در این حالت خازن بین دو فاز برقدار و فاز بی برق و سلف ترانس تشکیل یک مدار فرورزونانس را می‌دهند. چنانچه مشاهده می‌گردد به دلیل وقوع پدیده فرورزونانس و به اشباع رفتن هسته فاز T ترانس، ولتاژ فاز به زمین T افزایش یافته و ولتاژ این فاز تا حدود ۳۹۰ کیلوولت افزایش یافته است.

شکل (۵-۱۶): ولتاژ فاز به زمین برقگیرهای سمت اولیه (۴۰۰KV) ترانسفورماتور

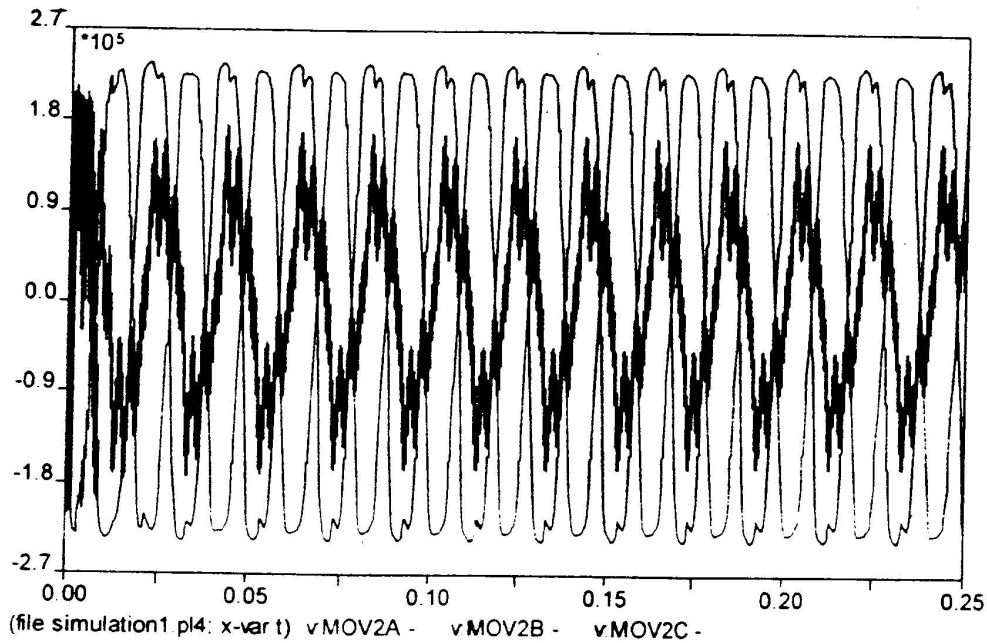
شکل (۵-۱۶) شکل موج ولتاژ برقگیر فاز T را نشان می‌دهد این شکل موج ولتاژ دقیقاً حالت



فرورزونانس زیر هارمونیک را نشان می‌دهد.

شکل (۵-۱۶): شکل موج ولتاژ برقگیر فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور

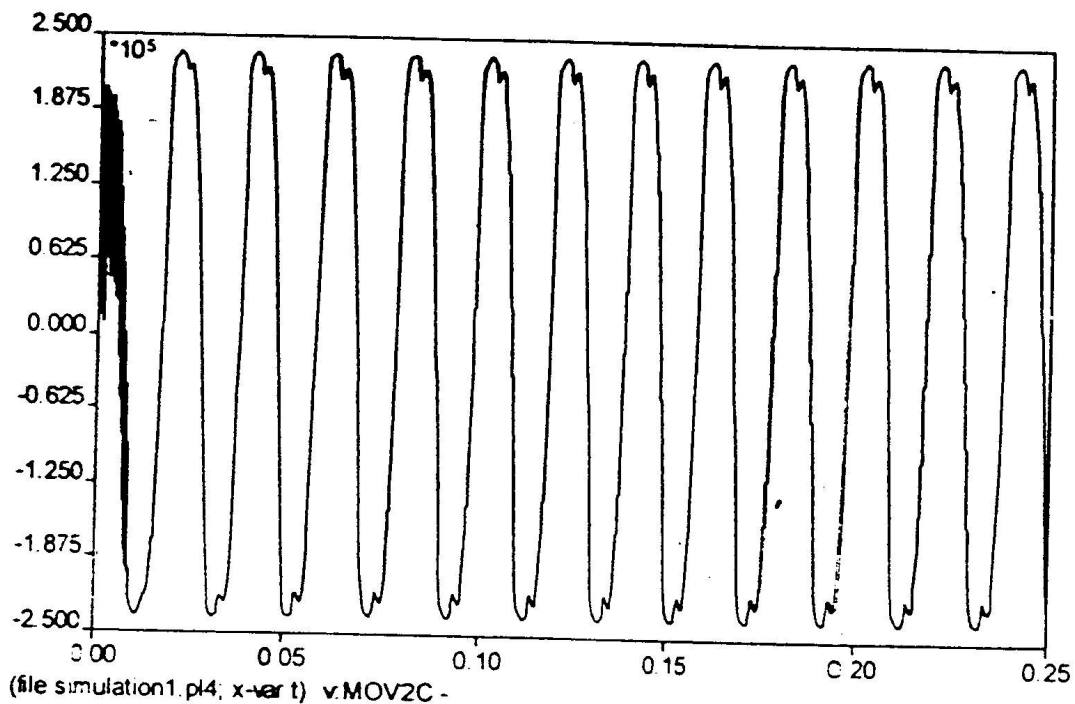
شکل (۵-۱۷) ولتاژ فاز به زمین سه فاز برقگیرهای سمت ثانویه (۲۳۰KV) ترانس را نشان می‌دهد.



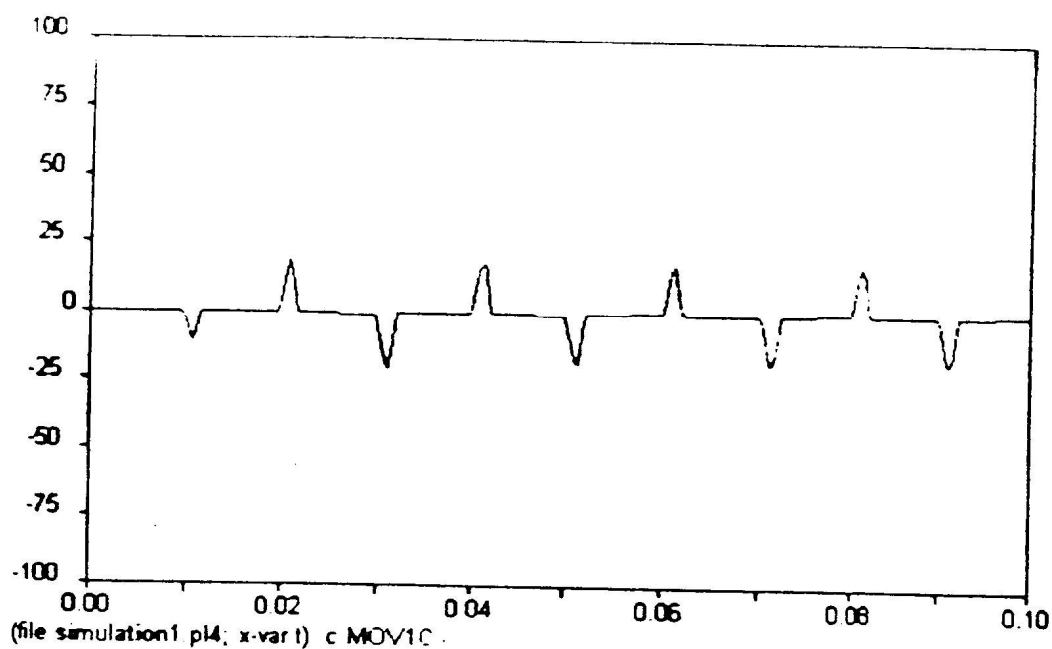
شکل (۵-۱۷): ولتاژ فاز به زمین برقی‌های سمت ثانویه (۲۳۰KV) ترانسفورماتور

همانطور که مشاهده می‌گردد ولتاژ فاز T در حدود ۲۳۷KV می‌باشد که بالاتر از مقدار نامی برقی‌ها می‌باشد.

شکل (۵-۱۸) نیز ولتاژ فاز T ثانویه ترانس را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۸): ولتاژ فاز T ثانویه ترانسفورماتور



۵-۷-۱-۱- رفتار برقگیرهای سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در هنگام وقوع حادثه:

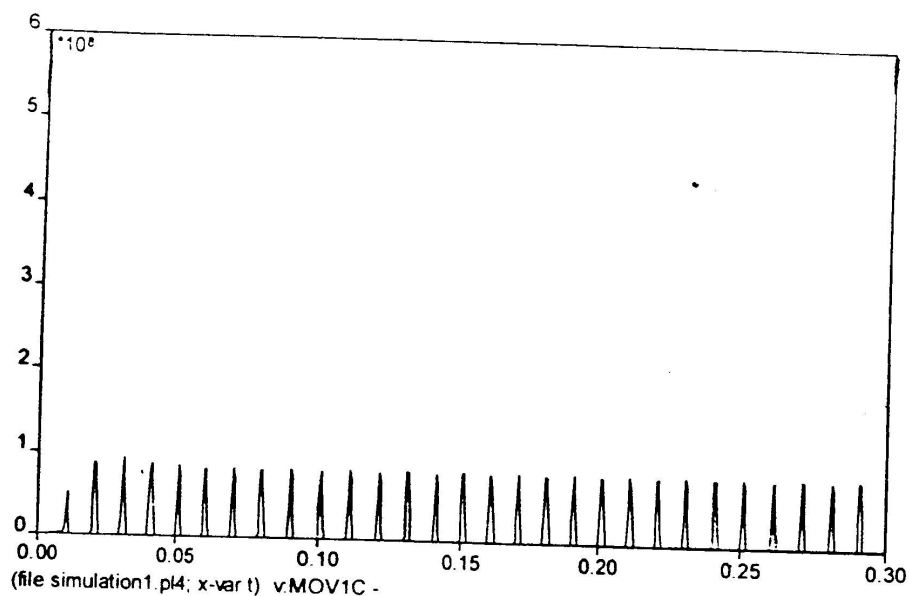
مطلب جالب و قابل توجه در هنگام وقوع حادثه رفتار برقگیرهای سمت اولیه و ثانویه ترانس

می باشد که در برابر این اضافه ولتاژ بوجود آمده از خود نشان می دهند.

شکل (۵-۱۹) جریان عبوری از برقگیر فاز T سمت اولیه ترانس را با توجه به اضافه ولتاژ

ایجاد شده نشان می دهد.

شکل (۵-۱۹): جریان عبوری از برقگیر فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور



مطابق نمودار در هنگام حادثه از این برقگیر جریانی در حدود ۱۵ آمپر می‌گذرد و طبق گزارشات موجود در هنگام وقوع حادثه مذکور برقگیر سمت اولیه ترانس تنها یک بار عملکرد داشته است و چون انرژی تخلیه شده توسط این برقگیر زیاد نبوده لذا دچار آسیب دیدگی نشده است. در شکل (۲۰-۵) و (۲۱-۵) نمودار توان و انرژی جذب شده توسط برقگیر نشان داده شده است.

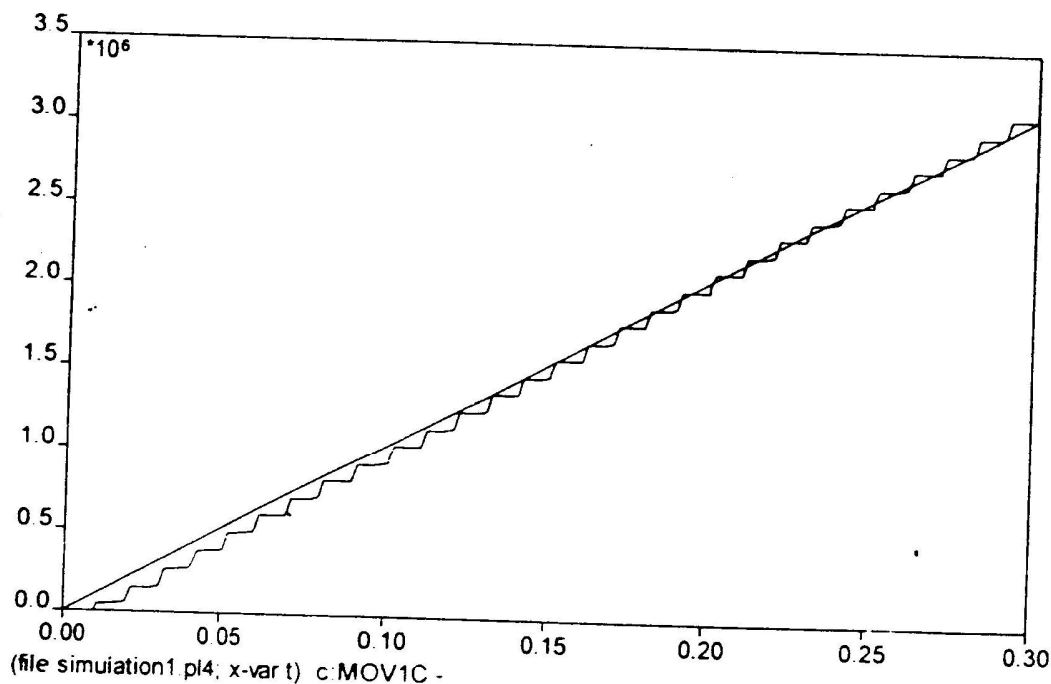
شکل (۲۰-۵): توان عبوری از برقگیر فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور

شکل (۵-۲۱): میزان انرژی جذب شده توسط برقیگیر فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور

ملاحظه می‌شود که انرژی جذب شده توسط برقیگیر در مدت ۳۰۰ میلی ثانیه شبیه سازی رو به افزایش می‌باشد، ولی توان عبوری از برقیگیر تقریباً ثابت است.

۵-۷-۱-۲- رفتار برقیگیر فاز T سمت ۲۳۰ KV ترانسفورماتور در هنگام وقوع حادثه:

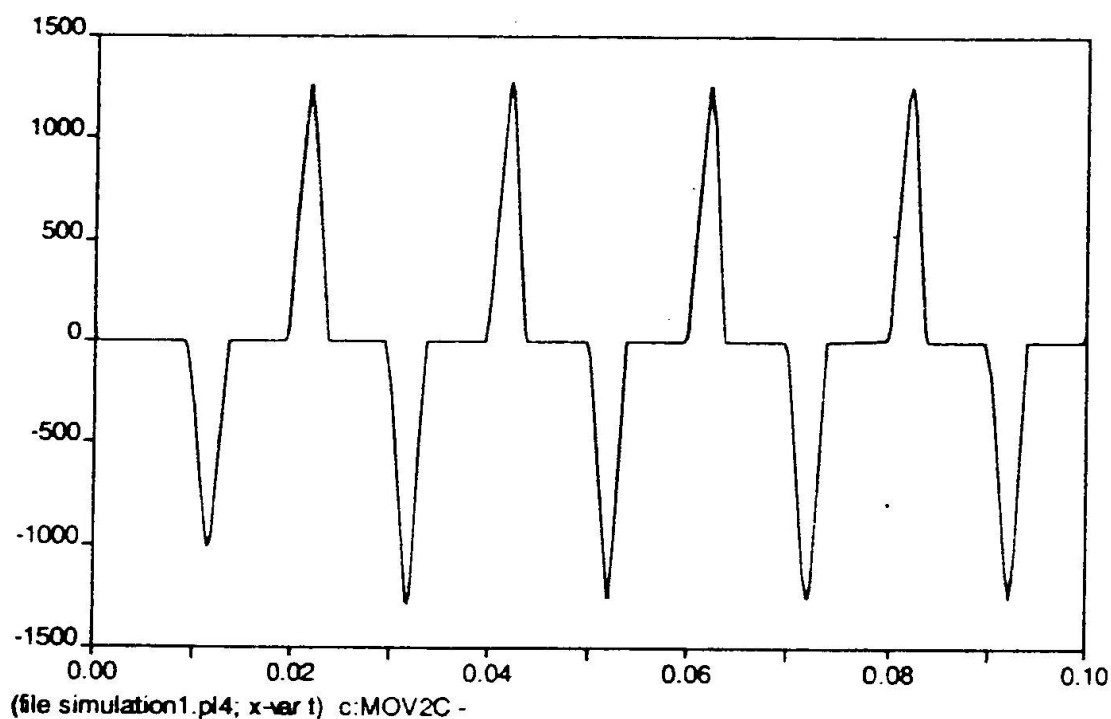
در موقع برقدار شدن ترانسفورماتور در حالت نامتعادلی پلهای کلید ۹۲۰۲، پست بیستون به عنوان یک منبع سینوسی عمل نموده و ترانسفورماتور پست شهید کشوری کرمانشاه را از طریق خازن بین دو فاز برقدار و فاز بی برق تغذیه می‌نماید و چون ترانس نیز به عنوان یک سلف غیر خطی عمل



می‌کند لذا در این حالت شبکه ساختار یک مدار فرورزونانسی را پیدا می‌کند و در اثر اضافه ولتاژهای هارمونیک ناشی از به اشباع رفتن ترانسفورماتور بر اثر پدیده فرورزونانس مطابق شکل (۵-۱۸) ولتاژ

سمت ثانویه ترانس تا مقدار $237KV$ بالا می‌رود و چون این ولتاژ بسیار بالاتر از ولتاژ نامی برقگیر می‌باشد لذا باعث تخلیه انرژی زیاد در برقگیر شده و نتیجا سبب انفجار این برقگیر می‌شود.

شکل (۵-۲۲) جریان عبوری فاز T سمت ثانویه ترانس را نشان می‌دهد. و چنانچه مشاهده

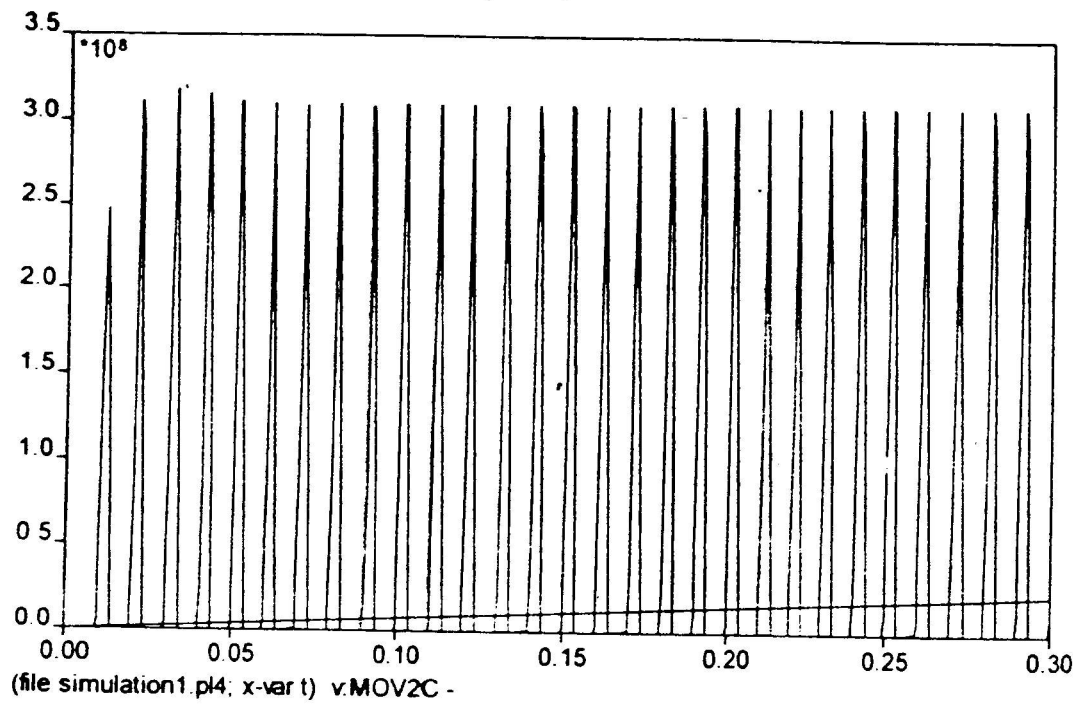


می‌گردد برقگیر مذکور تعداد ۹ بار عملکرد را در مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه مورد مطالعه نشان می‌دهد، و

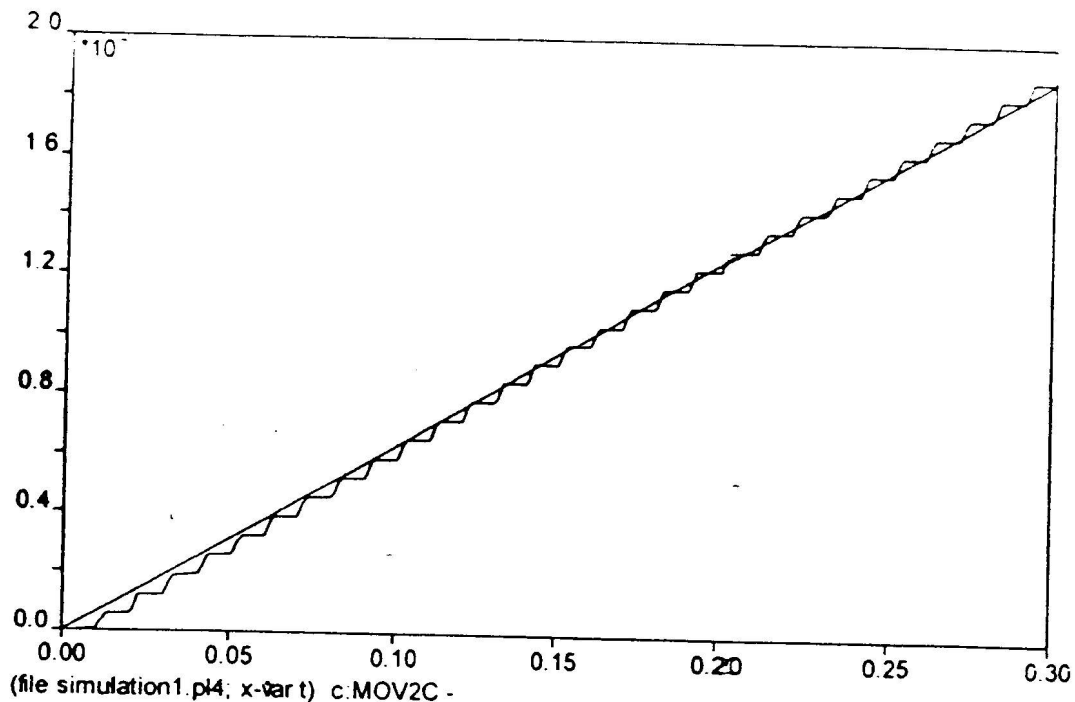
طبق گزارشات حاصله در هنگام حادثه ۸ بار عملکرد برقگیر مذکور ثبت گردیده است.

شکل (۵-۲۲): جریان عبوری از برقگیر فاز T سمت ثانویه ترانسفورماتور

در شکل (۲۳-۵) و (۲۴-۵) نمودار توان و انرژی جذب شده توسط برقگیر فاز TtT سمت ثانویه ترانس نشان داده شده است.



شکل (۲۳-۵): توان عبوری از برقگیر فاز T سمت ثانویه ترانسفورماتور



شکل (۵-۲۴): انرژی جذب شده توسط برقگیر فاز T سمت ثانویه ترانسفورماتور

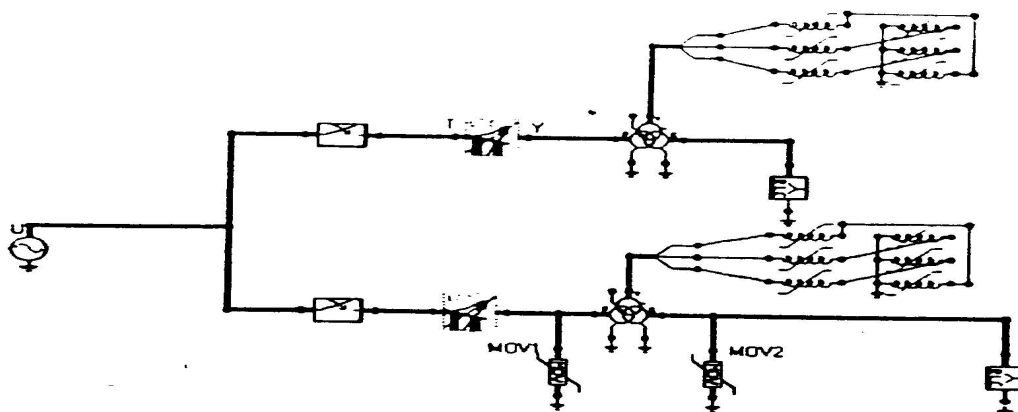
همانطور که مشاهده می شود توان عبوری از برقگیر تقریباً ۳۱۲ مگاوات و انرژی جذب شده توسط آن، ۳۰۰ میلی ثانیه حادثه تقریباً به ۱۹ مگاژول می رسد که همین امر باعث ناپایداری حرارتی در برقگیر شده، یعنی توان جذب شده توسط برقگیر به مراتب بیشتر از توان دفع شده توسط آن می شود ($P > Q$) و باعث سوختن قرصهای اکسید روی موجود در برقگیر شده و پس از وصل بریکر میانی ۹۸۴۲ در پست بیستون برقگیر سوخته توانایی استقامت در برابر ولتاژ کار عادی شبکه را نیز نداشته و نهایتاً منجر به انفجار این برقگیر می شود.

۵-۷-۱-۳- بررسی روشهایی جهت جلوگیری از وقوع پدیده فرورزونانس در پست شهید

کشوری کرمانشاه

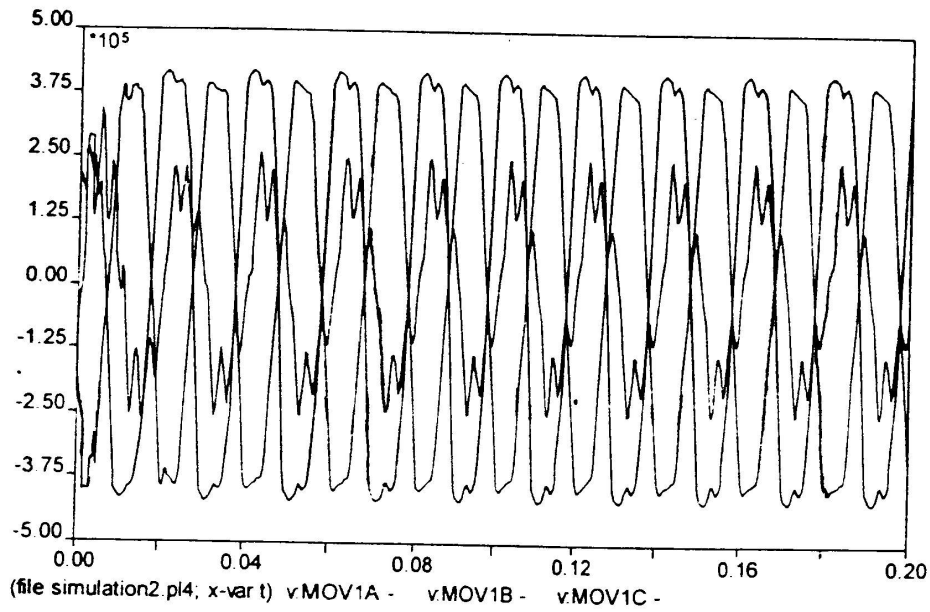
الف- وجود بار در سمت ثانویه ترانسفورماتور

شکل شبکه مورد نظر در این حالت در محیط ATP Draw بصورت زیر می باشد.

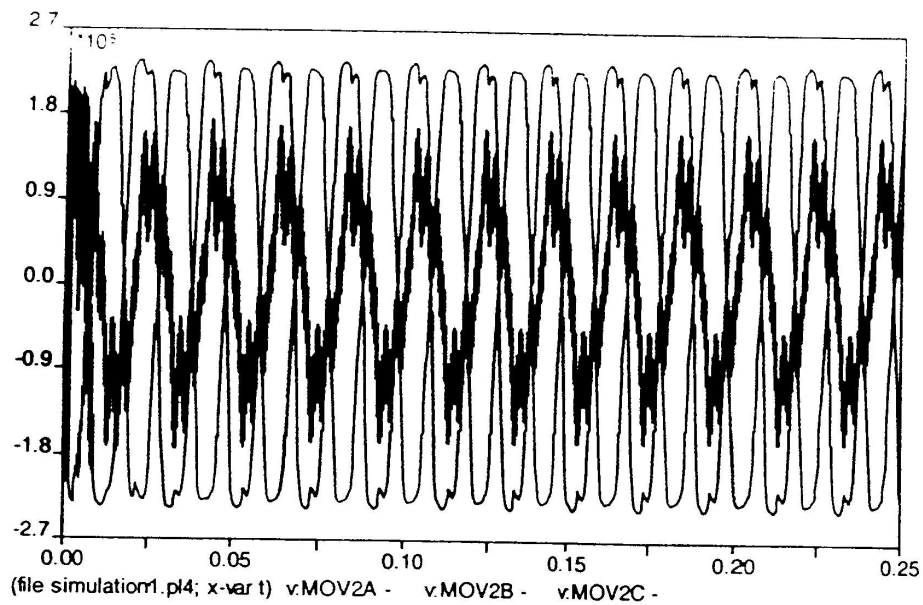


ملاحظه می شود که در این حالت ثانویه ترانس باز نبوده و به یکبار متصل است. اگر حادثه

مورد نظر را در این حالت بررسی کنیم. شکل موج ولتاژ برقیهای اولیه و ثانویه ترانس به صورت زیر خواهد بود.



شکل (۵-۲۵): شکل موج ولتاژ دو سر برقگیرهای 400 KV در حالت بارداری ترانسفورماتور



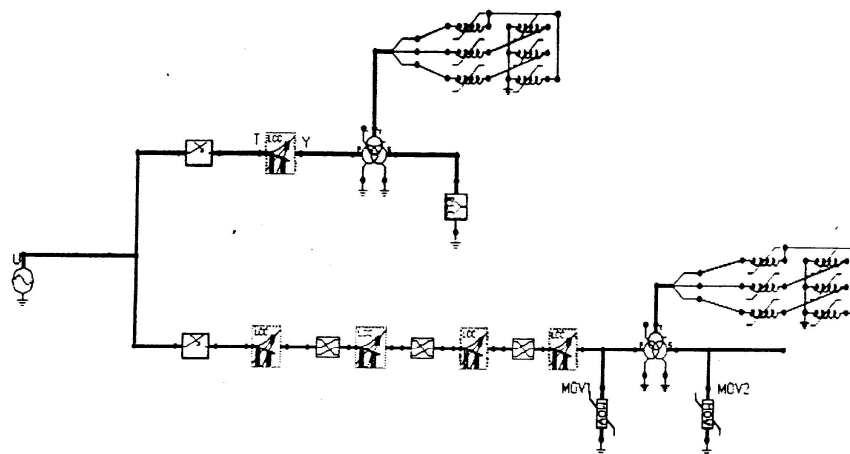
شکل (۵-۲۶): شکل موج ولتاژ دو سر برقگیرهای 230 KV در حالت بارداری ترانسفورماتور

ملاحظه می‌شود که شکل موج و دامنه آن در حالت بارداری ترانسفورماتور هیچ تفاوتی با حالت بی‌باری ترانس ندارد، البته ممکن است در مدارات دیگر این روش جهت جلوگیری از وقوع فرورزونانس موثر باشد ولی در این شبکه خاص پاسخگو نیست.

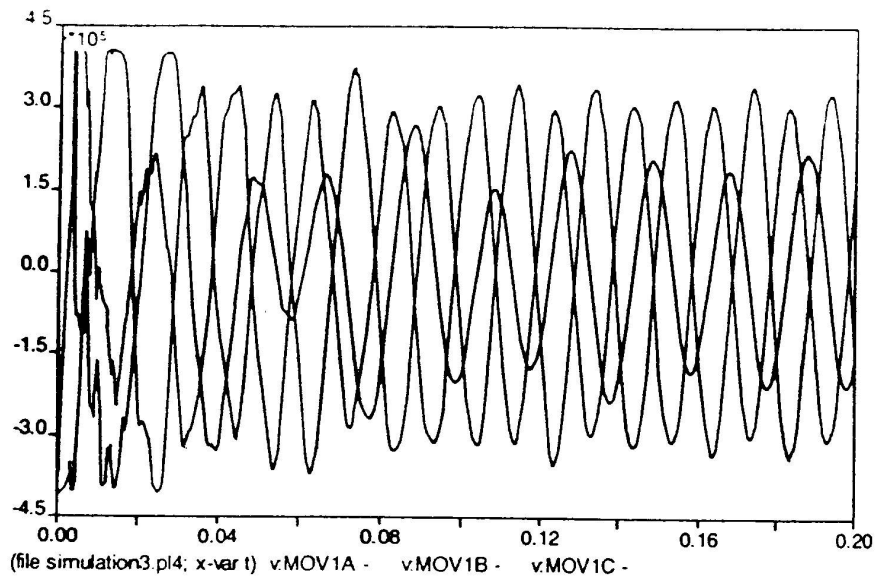
ب- ترانسپوز کردن خط بیستون - کرمانشاه

شبکه مورد بحث و نتایج حاصله در این حالت در محیط ATP Draw به صورت زیر می‌باشد.

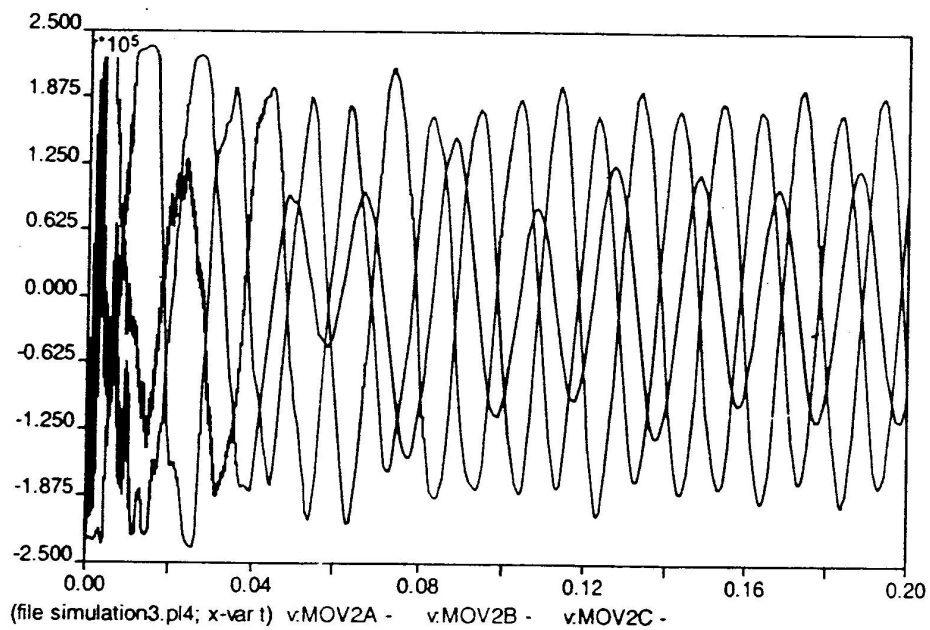
شکل (۲۷-۵): مدار مورد استفاده جهت شبیه‌سازی شبکه مورد نظر در حالت ترانسپوز کردن



خط بیستون - کرمانشاه

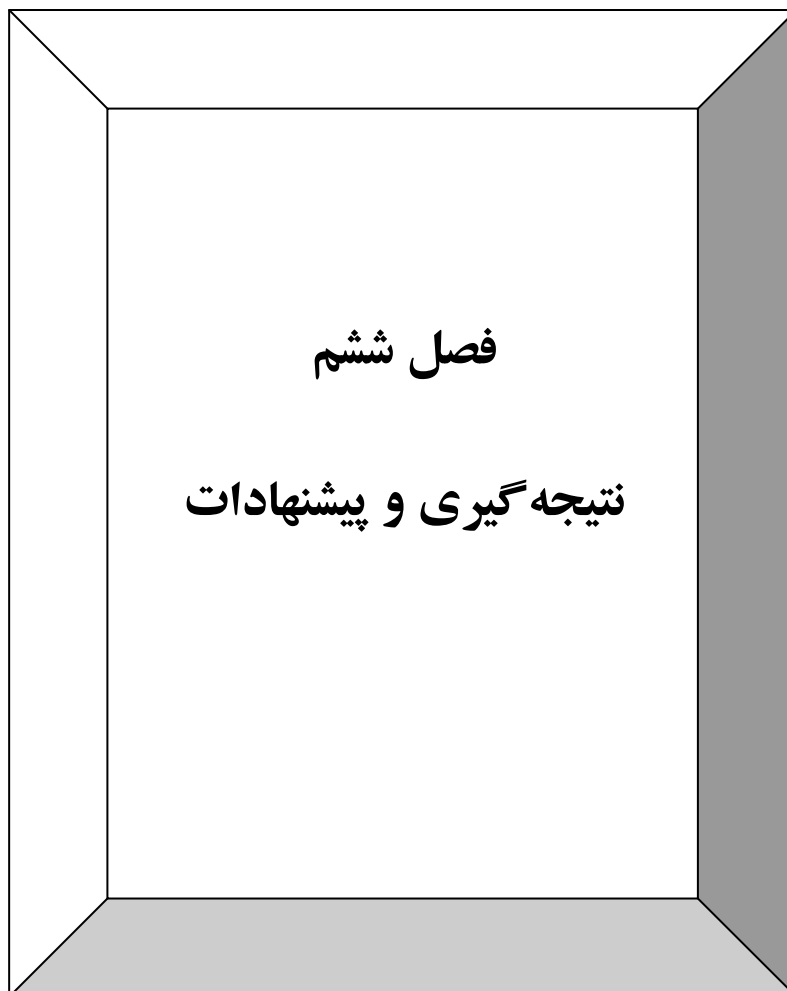


شکل (۲۸-۵): شکل موج ولتاژ اولیه ترانس در حالت ترانسپوز کردن خط بیستون - کرمانشاه



شکل (۲۹-۵): شکل موج ولتاژ ثانویه ترانس در حالت ترانسپوز کردن خط بیستون - کرمانشاه

مطابق نتایج بدست آمده در حالت ترانسپوز کردن خط نیز شبکه در حالت فرورزونانس خارج نشده و شکل موج ولتاژ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور هارمونیک می باشد. البته دامنه ولتاژ فاز T کمتر شده است ولی دامنه ولتاژ فازهای S , R بیشتر شده و احتمال عملکرد برقگیرهای فاز S , R و تخلیه انرژی بالا در آنها تحت اضافه ولتاژهای موقت فرورزونانسی می رود، در نتیجه استفاده از این روش نیز در این شبکه منطقی به نظر نمی رسد.



فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به مطالبی که در فصل ۵ مورد بررسی قرار گرفت، احتمال وقوع پدیده فرورزونانس در حوادث پست شهید کشوری کرمانشاه کاملاً مشخص می‌باشد. اما به منظور جلوگیری از بروز این پدیده مخرب می‌بایستی توپولوژی مدار فرورزونانسی تغییر نماید. به عبارتی با تغییر ساختار مدار می‌توان شرایط لازم جهت وقوع فرورزونانس را کاهش و یا بطور کامل از بین برد. لذا راههایی که بدین منظور به نظر می‌رسد را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

۱- ترانسپوز کردن مدار تغذیه ترانس به منظور تغییر توپولوژی مدار فرورزونانسی

۲- تعویض کلید خط بیستون - کرمانشاه در پست بیستون

۳- نصب راکتورها و مقاومت‌های دمپینگ بر روی خط و در پست شهید کشوری

۴- استفاده از مقاومت نوترال و یا تغییر مقدار مقاومت

۵- نصب کلید بر روی خط بیستون - کرمانشاه در پست شهید کشوری

در مورد ترانسپوز کردن خط، این روش با استفاده از نرم‌افزار مورد آزمایش قرار گرفت که نوسانات فرورزونانسی بطور کامل حذف نگردید که بدین ترتیب این روش برای مقابله با این پدیده در مدار مورد بحث کاملاً حذف نگردید که بدین ترتیب این روش برای مقابله با این پدیده در مدار مورد بحث کاملاً موثر نمی‌باشد. اما احتمال دارد این روش برای مدارات با ساختار دیگر پاسخگو باشد. در مورد تعویض کلید نیز به دلیل آنکه مدار مستعد فرورزونانس می‌باشد کار اساسی نبوده و با خارج شدن بریکرها از کورس امکان وقوع این پدیده وجود دارد. البته استفاده از کلیدهای با مقاومت وصل تا حد زیادی می‌تواند موثر واقع گردد.

نصب راکتورها و مقاومت‌های دمپینگ و نیز مقاومت نوترال هم دارای مشکلات خاص بوده و این روش در اولویت قرار نمی‌گیرد.

اما شاید بهترین روش جهت جلوگیری از بروز مجدد فرورزونانس در پست شهید کشوری نصب کلید در پست مذکور می باشد. زیرا مطابق مانور معمول، برقدار کردن ترانس از طریق بستن کلید در پست بیستون انجام می گیرد که در شرایط فعلی خط و ترانس با هم برقدار می گردند. حال با اضافه کردن کلید ۴۰۰ کیلو ولت قبل از ترانس در پست شهید کشوری مانور برقدار کردن کردن بدین صورت خواهد بود که ابتدا کلید ۹۲۰۲ وصل می گردد و سپس کلید ۴۰۰ کیلو ولت پست شهید کشوری بدین ترتیب در صورت بروز نامتعادلی بر روی کلید ۹۲۰۲ شرایط بروز فرورزونانس ایجاد نخواهد شد زیرا ترانس به همراه خط برقدار نمی گردد. بنابراین با نصب این کلید می توان کاملاً مطمئن بود که از تکرار این پدیده در پست مذکور جلوگیری به عمل می آید.

- ۱- شاهرخشاهی ، ط . “اضافه ولتاژهای قطع و وصل در شبکه‌های انتقال انرژی با ولتاژ ۲۲۰ تا ۷۵۰ کیلو ولت” ، چاپ اول، انتشارات سپهر تهران ، ۱۳۶۸.
- ۲- شاهرخشاهی، ط . “برقگیرهای فشار قوی بدون فاصله هوایی” ، چاپ اول، انتشارات دفینه، بهار ۱۳۷۸.
- ۳- سالمی ، س. “بررسی علل ترکیدگی برقگیرهای خطوط ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت خراسان با استفاده از نرم‌افزار ATP” ، پایان‌نامه کارشناسی برق گرایش قدرت، دانشکده صنعت آب و برق تهران، آبان ۱۳۷۶ .
- ۴- مشکوه‌الدینی ، م. “علل ایجاد اختلال در برقگیرهای اکسید روی” ، دوازدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۷۶.
- ۵- گاراژیان، م. سرلک ، ا. “بررسی علل آسیب دیدن برقگیرها ۲۰ کیلوولت شرکت تجهیزات انتقال پارس” پایان‌نامه کارشناسی برق گرایش قدرت، دانشکده صنعت آب و برق تهران، زمستان ۱۳۸۱.
- ۶- علیپور، قره پتیان ، گ. “بررسی حالات گذرا توسط EMTP” ، چاپ اول، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، برق منطقه‌ای فارس، تهران ، زمستان ۱۳۷۸.
- ۷- موسوی بهبهانی، س . “مدلسازی سیستمهای قدرت، بررسی و کنترل اضافه ولتاژها با استفاده از نرم‌افزار EMTP” پایان‌نامه کارشناسی برق گرایش قدرت، دانشکده صنعت آب و برق تهران، زمستان ۱۳۷۲.
- ۸- حیدری ، ق. “طراحی الکتریکی خطوط انتقال نیرو” ، چاپ اول، انتشارات تابش برق تهران، زمستان ۱۳۷۹ .

۹- اسد زاده ، ب . داداش زاده ، ا . “ بررسی اشکالات موجود در برقگیرهای شبکه توزیع برق قزوین و ارائه پیشنهادات جهت بهبود وضعیت آنها” ، پایان نامه کارشناسی برق گرایش قدرت، دانشکده صنعت آب و برق تهران، اسفند ۱۳۷۷.

۱۰- Metal Oxide surge arrester without gaps for A . C system . IEC ۶۰۰۹۹ – ۴,۱۹۹۸.

۱۱- Cahier technique Schneider n’ ۱۹۰.

۱۲- Zinc oxide arrester design and characteristics , the ohlo brass co. wads worth . OH USA.

۱۳- Brown , D fisher , f . “ A transmission line refrence book ۳۴۵ kv and above”.

