

بررسی اثر متقابل برقگیرهای اکسید روی و اضافه ولتاژهای فرورزونانس به کمک نرم افزار EMTP

احمد غلامی

دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد مرادی

موسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران

واژه های کلیدی: فرورزونانس، برقگیرهای اکسید روی، قابلیت جذب انرژی

خلاصه

خود جلب نموده است. علت اصلی این تغییر دیدگاه را می توان در تغییرات ایجاد شده در صنعت برق جستجو نمود. به وجود آمدن سیستمهای کابلی زیر زمینی طولانی، افزایش قطع و وصل تک فاز و از همه مهمتر کاهش چشمگیر تلفات در ترانسفورماتورهای قدرت و ظهور برقگیرهای اکسید روی که به اضافه ولتاژهای موقت بسیار حساس می باشند، همگی از علل اهمیت یافتن اضافه ولتاژهای فرورزونانس می باشند.

اضافه ولتاژهای فرورزونانس می توانند دارای قله موج بالا در حدود ۴ الی ۵ پریونیت ولتاژ نامی بر حسب پارامترهای مدار به وجود آورنده و شرایط اولیه شوند [۶]. شکل موج این اضافه ولتاژها ممکن است بکلی با شکل موج منبع متفاوت باشد و حتی دارای فرکانسی متفاوت با فرکانس شبکه باشد. در این مقاله ابتدا مروری بر این اضافه ولتاژها نموده و سپس تاثیرات آنرا بر برقگیرهای اکسید روی مورد بررسی قرار می دهیم.

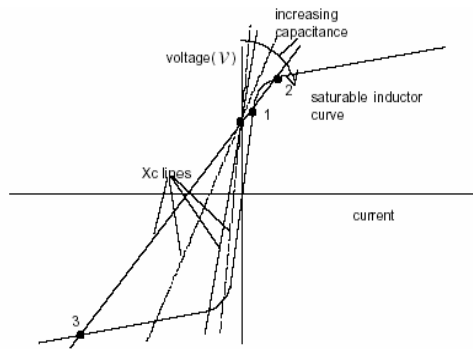
در سالهای اخیر به دلایل متعدد اضافه ولتاژهای فرورزونانس مورد توجه واقع شده اند. این اضافه ولتاژها در بعضی مواقع دارای دامنه بسیار بزرگی بوده و به راحتی می توانند به تجهیزات فشار قوی آسیب برسانند. برقگیرهای اکسید روی از جمله تجهیزات بسیار حساس به اضافه ولتاژهای فرورزونانس می باشند که با توجه به وسعت کاربرد آنها در سیستم قدرت، دارای اهمیت بسیار زیادی می باشند. در این مقاله سعی شده است تا با مروری بر اضافه ولتاژهای فرورزونانس و معرفی آنها، تاثیر متقابل این پدیده و برقگیرهای اکسید روی مورد بحث و بررسی قرار گیرد.

۱- مقدمه

پدیده فرورزونانس در دهه های قبل مورد توجه زیادی واقع نمی شد ولی در سالهای اخیر این پدیده و خسارتهای ناشی از آن توجه بسیاری از بهره برداران صنعت برق را به

۲- مبانی پدیده فرورزونانس

به زبان ساده می توان فرورزونانس را رزونانس غیر خطی نامید. فرورزونانس با رزونانس دارای تفاوت های عمده می باشد. پدیده فرورزونانس عموماً در مدارهایی که شامل یک منبع (مستقیم یا القایی)، سلف با مشخصه غیر خطی و یک ظرفیت خازنی می باشند اتفاق می افتد (شکل (۱)). اصول وقوع این پدیده را می توان به روش گرافیکی که توسط رودنبرگ در سال ۱۹۷۲ ارائه شد تشریح نمود. باید توجه نمود که روش رودنبرگ در توجیه وقوع پدیده فرورزونانس بر اساس هارمونی اول بوده و طبعاً با تغییر فرکانس تمام جوابها متفاوت خواهد بود. معیناً این روش دید خوبی نسبت به چگونگی وقوع آن ارائه می دهد.



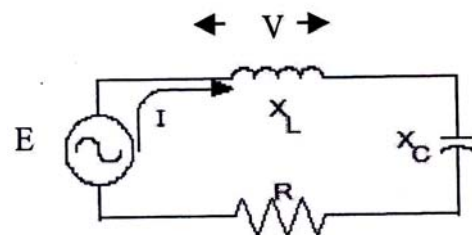
شکل ۲ حل گرافیکی مدار فرورزونانس

۳- مروری بر مقالات

تعدادی از مراجع مختلف در دهه گذشته موضوع اضافه ولتاژهای فرورزونانس و برقگیرها را مورد بررسی قرار داده اند که از جمله آنها می توان به [۳ و ۲] اشاره نمود. بسیاری از مراجع با دید تحلیلی و بعضی با شبیه سازی و بعضی دیگر با تست و آزمایش به نتایج مختلف رسیده اند.

از دید ظاهری و با توجه به منحنیهای قابلیت تحمل برقگیرهای اکسید روی در مقابل اضافه ولتاژهای موقت (منحنی های TOV)، این تجهیزات تحمل بسیار کمی در برابر اضافه ولتاژهای فرورزونانس دارند. این استنتاج با توجه به ضعیف بودن منبع تولید کننده اضافه ولتاژهای فرورزونانس، همچنانکه با شبیه سازی نشان خواهیم داد استنتاج درستی نیست. در هنگام شبیه سازی برای بدست آوردن نتایج منطقی و درست باید مدل صحیحی از ترانسفورماتور به کار برد. همچنانکه می دانیم هسته ترانسفورماتور تاثیر بسیار زیادی در رفتار پدیده فرورزونانس دارد لذا برای مطالعه این پدیده بهتر است که از مدل دوگانی ترانسفورماتور که در مرجع [۴] تشریح شده است، استفاده شود.

در مراجع [۵ و ۶] استفاده از برقگیرهای اکسید روی به عنوان یکی از راهکارهای محدود نمودن اضافه ولتاژهای فرورزونانس پیشنهاد شده است. در [۶] والینگ با بررسی اضافه ولتاژهای ایجاد شده بر روی ترانسفورماتورهای با اتصال Y/Δ زمین نشده، تاثیر برقگیرها و اضافه ولتاژهای فرورزونانس را مورد بررسی قرار داده و اضافه می کند که این اضافه ولتاژها به علت ضعیف بودن منبع تولید کننده باعث به وجود آمدن جریانهای قوی در برقگیر نمی شوند.



شکل ۱ مدار فرورزونانس

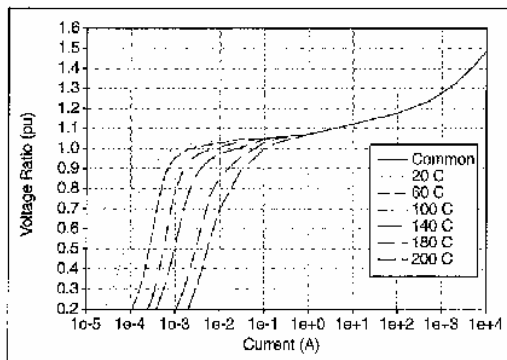
با توجه به حل ترسیمی مدار شکل (۱) که در شکل (۲) نشان داده شده است، با افزایش ظرفیت خازنی حداکثر سه نقطه کاری به وجود می آید که نقطه کاری (۲) ناپایدار می باشد و فقط در حالت های گذرا به وجود خواهد آمد. نقاط کاری ۱ و ۳ هر کدام ممکن است باعث به وجود آوردن ولتاژهای بزرگتری از ولتاژ نامی شبکه شوند. در صورت افزایش ولتاژ در نقطه ۱ این نقطه کاری حذف شده و تنها نقطه کاری سوم خواهد ماند و طبیعتاً ولتاژ بزرگی در دو سر اندوکتانس به وجود خواهد آمد. به علت افزایش ولتاژ جریان بزرگی از سیستم می گذرد که باعث افت ولتاژ شده و در نتیجه نقطه کاری سوم حذف و نقطه کاری سیستم به نقطه اول بر می گردد. این پروسه معمولاً تکرار شده و با توجه به پارامترهای سیستم ممکن است باعث شکل موجهای منظم یا نامنظم شود.

مقدار قابلیت جذب قرصهای اکسید روی در مقابل اضافه ولتاژهای ماندگار که بر حسب $\frac{kJ}{cm^3}$ در حجم قرص بیان می شود، بسیار کمتر است.

۵- جریان نشتی عبوری از قرصهای اکسید روی

در هنگام کارکرد متداول برقگیرهای اکسید روی، جریان عبوری از آنها بسیار ناچیز بوده و بیشتر خازنی می باشد. مولفه مقاومتی این جریان باعث گرم شدن قرصها می شود. مولفه مقاومتی جریان نشتی بر خلاف جریان تخلیه آن بشدت تابع دمای قرص بوده و با افزایش دما، مقدار این جریان افزایش می یابد. شکل (۳) منحنی ولتاژ-جریان برقگیر در دماهای مختلف را نشان می دهد. یکی از عوامل تخریب برقگیرهای اکسید روی به واسطه فیدبک ناشی از این پدیده می باشد. در هنگام اصابت صاعقه، ممکن است در ابتدای امر برقگیر بتواند انرژی صاعقه را جذب کرده و در هنگام صاعقه پایدار بماند، اما به علت دمای زیاد در لحظات پس از اصابت صاعقه، در صورتی که دفع گرمای آن سریع نباشد، جریان نشتی آن مرتباً بالا رفته و در نهایت باعث ناپایداری حرارتی می شود.

تاثیر پذیری جریان نشتی برقگیرهای اکسید روی از دما برخلاف اضافه ولتاژهای صاعقه در هنگام اضافه ولتاژهای فرورزونانس نه تنها باعث تخریب برقگیرها نمی شود بلکه با افزایش میرایی موجود در سیستم شدت اضافه ولتاژهای فرورزونانس را کاهش داده و در نتیجه نقش مثبتی در محدود نمودن اضافه ولتاژها ایفا می کند [۷].



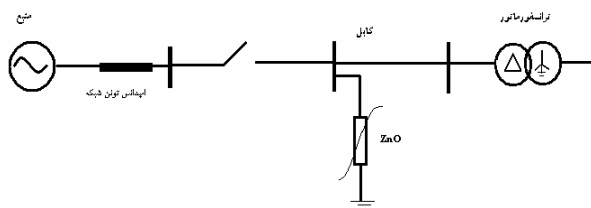
شکل ۳ تاثیر پذیری جریان نشتی از دما

در مرجع [۱] والینگ با صد و ده تست و آزمایش مختلف روی ترانسفورماتورهای توزیع با هسته پنج ستونی در سطوح ولتاژی ۱۳/۸ kV تا ۳۴/۵kV با کابلهای با طولهای مختلف عملکرد برقگیرهای اکسید روی را مورد مطالعه قرار داده است. در مرجع [۸] نیز قرار دادن برقگیرهای اکسید روی در ثانویه ترانسفورماتور علاوه بر برقگیرهای اولیه به عنوان راه حلی برای میرایی اضافه ولتاژهای فرورزونانس در ترانسفورماتورهای پنج ستونه پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که قله اضافه ولتاژهای فرورزونانس در ترانسفورماتورهای پنج ستونی از مقداری حدود ۲/۶ پرینیت ولتاژنامی تجاوز نمی نماید [۹]. با توجه به اینکه اکثر مراجع ظهور پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورهای پنج ستونی را مورد بررسی قرار داده اند، این مقاله در نظر دارد که وقوع پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورهای توزیع ایران و تاثیر آن را بر برقگیرهای اکسید روی شبیه سازی و مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد.

۴- قابلیت جذب برقگیرهای اکسید روی

هنگامی که از برقگیرهای اکسید روی جریان می گذرد، به علت افت ولتاژ دو سر برقگیر در آن انرژی تلف میشود. قابلیت هدایت گرمایی قرصهای اکسید روی کم است و در حالتی مانند وقوع صاعقه توزیع دما در داخل قرصهای اکسید روی را بی درو^۱ فرض می نمایند. بنابراین در هنگام وقوع حالتی گذرا مانند صاعقه، قرصهای اکسید روی باید توانایی تحمل و جذب این انرژی را داشته باشند. پس از وقوع صاعقه، گرمای به وجود آمده در برقگیر به آرامی به محیط اطراف تحویل داده شده و برقگیر به آرامی سرد می شود. قابلیت تحمل برقگیرهای اکسید روی در حالتی وقوع صاعقه با حالتی اضافه ولتاژهای موقت متفاوت می باشد [۱۰]. آنچه که توسط سازندگان مختلف به عنوان قابلیت جذب انرژی در واحد $\frac{kJ}{kV}$ ارائه می شود مربوط به تحمل برقگیرها در مقابل اضافه ولتاژهای صاعقه است که از

^۱ -adiabatic



شکل ۵ شبکه مورد مطالعه

۷-۱- مدل کابل

در این مطالعه از مدل T برای شبیه سازی کابل استفاده شده است. به علت اینکه فرورزونانس جزو حالت های گذرای آهسته می باشد مدل مورد نظر کفایت می نماید. پارامترهای کابل در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ پارامترهای کابل استفاده شده در شبیه سازیها

| | |
|--------------------|-----------------------|
| ۹۵*mm ² | مقطع کابل |
| ۰/۲ Ω / km | مقاومت |
| ۰/۴۱ mH/km | اندوکتانس |
| ۰/۲۱ μF / km | ظرفیت خازنی چرخه مثبت |
| ۰/۱۹ μF / km | ظرفیت خازنی چرخه صفر |

۷-۲- مدل ترانسفورماتور

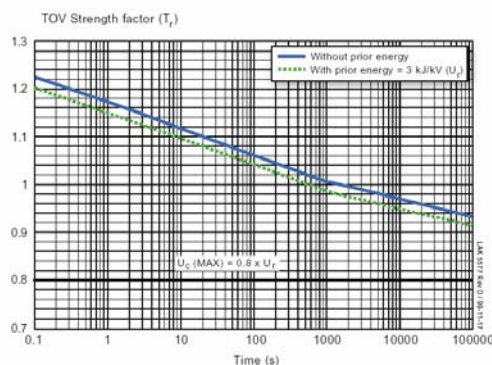
همچنانکه متذکر شدیم برای مدلسازی ترانسفورماتور از مدل دوگانی ترانسفورماتورهای قدرت (شکل ۶) استفاده نموده ایم که در آن می توان به راحتی ساختار هسته را مدل نمود. جزئیات بیشتر در مورد این مدلسازی را می توان در مرجع [۴] یافت. مشخصات ترانسفورماتور مورد نظر در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات ترانسفورماتور شبیه سازی شده

| | | | |
|---------------|-------------------------------|--------|------------------|
| ۱۲۰۰ | تلفات (Wat) | Δ/Yng | اتصال |
| ۱/۶ | جریان مغناطیس کنندگی (%) | ۶۳۰ | قدرت ظاهری (KVA) |
| ۶ | امپدانس اتصال کوتاه (%) | ۲۰/۰/۴ | ولتاژ ظاهری (KV) |
| ۱/۱۶۴ ۲۰۴۱ | ظرفیت خازنی نسبت به زمین (PF) | ۱۸/۹۰۹ | جریان نامی (A) |

۶- منحنی های قابلیت تحمل اضافه ولتاژهای موقت

سازنده های برقگیرهای اکسید روی منحنی هایی را به عنوان قابلیت تحمل اضافه ولتاژهای موقت به بهره بردارن ارائه می دهند که با توجه به آنها می توان مدت زمان تحمل برقگیر را در مقابل اضافه ولتاژهای موقت سیستم بدست آورد. نمونه ای از منحنی های مورد نظر در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ منحنی های قابلیت تحمل اضافه ولتاژهای موقت

استفاده از این منحنی ها برای بررسی میزان تحمل برقگیرهای اکسیدروی در مقابل اضافه ولتاژهای فرورزونانس به دو دلیل زیر جای بحث فراوان دارد.

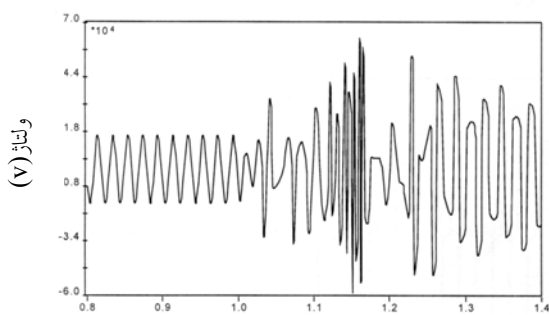
- ۱- منحنی های ارائه شده توسط سازندگان با فرض منبع قوی و ثابت تولید اضافه ولتاژ می باشد که به علت ضعیف بودن منبع تولید اضافه ولتاژهای فرورزونانس این مسئله صادق نمی باشد.
- ۲- منحنی های TOV برای اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت ارائه شده اند، در حالی که اضافه ولتاژهای فرورزونانس در بسیاری از حالات دارای فرکانسی متفاوت با فرکانس شبکه می باشند. نمونه ای از این اضافه ولتاژها که دارای فرکانس دو برابر فرکانس نامی می باشد در شکل (۸) نشان داده شده است.

۷- شبیه سازی پدیده فرورزونانس

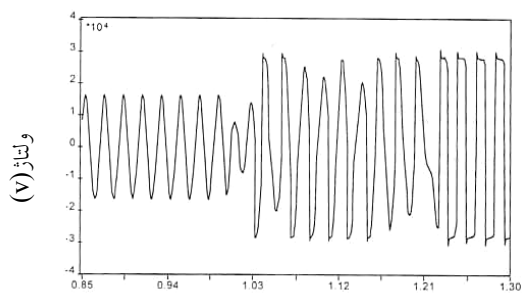
برای مطالعه پدیده فرورزونانس و تاثیر برقگیرهای اکسید روی سیستم شکل (۵) در نرم افزار EMTP مورد مطالعه قرار گرفته است.

شبیه سازیهای مختلف نشان دهنده اضافه ولتاژهای بزرگ در هنگام عدم حضور برقگیر می باشند. این اضافه ولتاژها دارای مقادیری در حدود چندین پریونیت ولتاژ نامی ترانسفورماتور به تناسب طول کابل می باشند [۱۱]. در شکل (۹-الف) اضافه ولتاژهای فرورزونانس روی فاز *a* ترانسفورماتور در هنگام قطع پشت سرهم فازهای *a, b* با فرض طول کابل ۳۰۰ متر نشان داده شده است.

شکل (۹-ب) اضافه ولتاژهای فاز *a* ترانسفورماتور در حضور برقگیرهای اکسید روی هنگامی که فازهای *a* و *b* ترانسفورماتور پشت سرهم قطع می شوند، را نشان می دهد. آنچنانکه دیده می شود در این حالت اضافه ولتاژها به مقادیر حداکثر ۳۰ kV محدود می شوند.



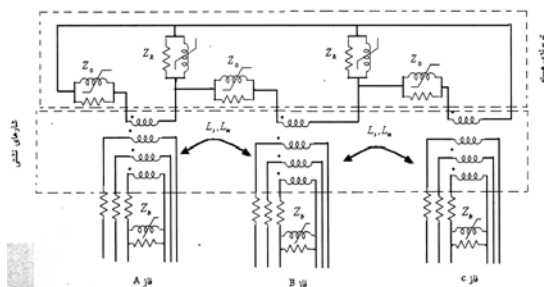
الف



ب

شکل ۹ اضافه ولتاژهای فرورزونانس در سر فاز *a* هنگام قطع پشت سر هم فازهای *a, b* (الف) در هنگام عدم حضور برقگیر (ب) در حضور برقگیر

شکل (۱۰) جریان گذرنده از برقگیر را نشان می دهد. آنچنانکه در این شکل مشخص است، جریان گذرنده از برقگیر در این حالات بسیار کم و در حدود چند آمپر می باشد در حالی که با توجه به منحنی مشخصه برقگیر و منحنی



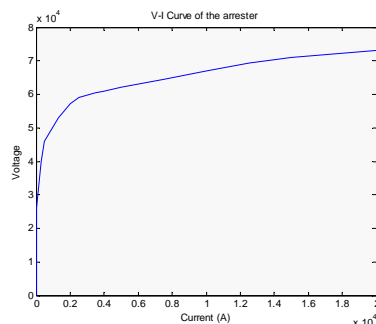
شکل ۶ مدار معادل استخراج شده از طریق تئوری دوگانی

۳-۷- کلید

کلید استفاده شده در شبیه سازیها کلید کنترل شده با زمان ایده ال در نرم افزار EMTP می باشد.

۴-۷- برقگیر

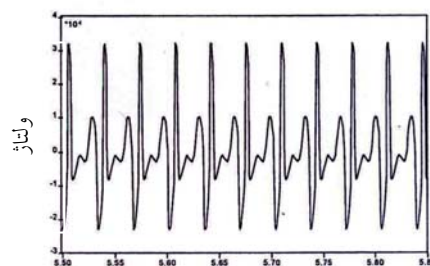
در شبیه سازیها از مدل نوع ۹۲ برقگیر استفاده شده است. منحنی مشخصه برقگیر ۲۰ kV مورد استفاده مطابق شکل (۷) می باشد.



شکل ۷ مشخصه V-I برقگیر

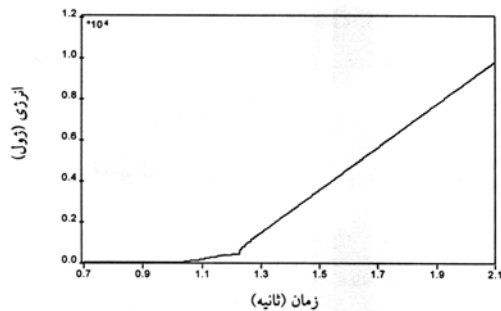
۵-۷- شبیه سازی پدیده فرورزونانس

پدیده فرورزونانس در هر حالت با قطع تک فاز یا دو فاز ترانسفورماتور بی بار در طولهای مختلف کابل مطابق شکل (۳) در هنگام عدم حضور برقگیر و یا در حضور برقگیر شبیه سازی شده است. شکل (۸) نمونه ای از این اضافه ولتاژها در سر فاز قطع شده *a* را نشان می دهد.



زمان (ثانیه)

شکل ۸ اضافه ولتاژهای مد دوم فرورزونانس در فاز *a* ترانسفورماتور با قطع این فاز - طول کابل ۲۰۰ متر



شکل ۱۱ افزایش انرژی در داخل برقگیر به واسطه عبور جریان از آن

۶-۷ هدایت نامنظم^۱

از جمله مهمترین خصوصیات اضافه ولتاژهای فرورزونانس که باعث تقلیل اثرات منفی آن بر روی برقگیرها می شود، طبیعت نامنظم آنها در برخی موارد است. طبیعت نامنظم این اضافه ولتاژها باعث می شود که برقگیر در هر سیکل به جای دو بار هدایت، فقط در سیکل منفی یا مثبت از خود جریان را عبور دهد. این مسئله باعث عبور جریان نامنظم از برقگیر شده و در نهایت برقگیر کمتر از حالت‌های هدایت متقارن آنچنانکه در اضافه ولتاژهای معمول اتفاق می افتد گرم می شود. نمونه ای از این رفتار در شکل (۱۰) هنگامی که فاز a ترانسفورماتور قطع می شود، نشان داده شده است.

۸- تخریب برقگیرهای اکسید روی

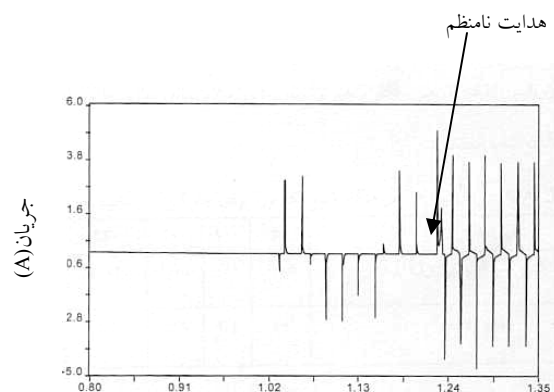
در قسمتهای قبل نشان دادیم که شرایط ناشی از پدیده فرورزونانس بر برقگیرهای اکسید روی را نمی توان به کمک منحنی های TOV تعیین نمود. هر چند که شرایط به وجود آمده بر برقگیرها دارای شدت کمتری نسبت به اضافه ولتاژهای معمولی با قله یکسان میباشند ولی این اضافه ولتاژها قادرند برقگیرهای اکسید روی را تخریب نمایند. این نکته از آنجا ناشی می شود که برقگیرهای اکسید روی توانایی جذب مقدار محدودی انرژی را دارا می باشند و در صورتی که مقدار انرژی از این مقدار تجاوز نماید دچار ناپایداری حرارتی می شوند.

های TOV و بدون توجه به تاثیر برقگیر و اثر میرایی آن جریانی حدود ۲ کیلو آمپر قابل انتظار است که این مسئله در حالت واقعی صادق نیست. هرچند عبور مداوم چنین جریانی (چند آمپر) از قرصهای اکسید روی باعث انهدام آنها خواهد شد، ولی شرایط به بدی اضافه ولتاژهای موقت سیستم با فرض مقدار قله مساوی نیست.

علت کم بودن جریان گذرنده از برقگیر طبیعت میرایی برقگیر بر اضافه ولتاژها می باشد. آنچنانکه می دانیم وجود بار در مدار فرورزونانس باعث میرایی اضافه ولتاژها می شود به گونه ای که وجود باری به اندازه ۵٪ بار نامی ترانسفورماتور می تواند اضافه ولتاژهای فرورزونانس را به راحتی میرا سازد [۱۱]. بارهای کوچکتر نیز می توانند به نسبت باعث تضعیف اضافه ولتاژها شده و از مقدار قله آنها بکاهند.

در مدار شکل (۴) با قطع کلید و ظهور اضافه ولتاژهای فرورزونانس که قله آنها از MCOV برقگیر بیشتر است، از برقگیر جریان گذشته و به علت مقاومتی بودن این جریان مانند یک بار باعث میرایی اضافه ولتاژها می شود. در نتیجه این علل و عوامل اضافه ولتاژهای فرورزونانس در مقادیر بسیار کمتر از مقادیر قبلی محدود شده و جریان عبوری از برقگیر نیز با کمک منحنی شکل (۷) در ولتاژ محدود شده مورد نظر، بدست می آید.

همچنانکه در شکل (۱۱) دیده می شود انرژی تخلیه شده در برقگیر در حالت قطع دو فاز با شیب بیشتری نسبت به قطع تک فاز بالا می رود که این مسئله به خاطر هدایت متقارن برقگیر در هنگام قطع دو فاز و همچنین بزرگتر بودن جریانه‌ها می باشد.



شکل ۱۰ جریان عبوری از برقگیر هنگام قطع پشت سر فازهای a,b ترانسفورماتور

^۱ -erratic conduction

۸- جلوگیری از وقوع پدیده فرورزونانس

به علت طبیعت تصادفی این پدیده و همچنین زیاد بودن عوامل موثر در آن، جلوگیری از وقوع این پدیده برای بهره برداران بسیار مشکل و بعضاً غیر ممکن است. اما در سالهای اخیر به کمک تجارب بدست آمده در بهره برداری سیستم قدرت و همچنین شبیه سازیهای انجام شده، تعدادی از حالاتی که منجر به اضافه ولتاژهای فرورزونانس می شود شناخته شده اند که می توان حالتیهای مختلف را در مرجع [۱۲] یافت.

با توجه به نکات فوق بهترین پیشنهادی لازم برای میرائی اضافه ولتاژهای فرورزونانس و یا جلوگیری از وقوع آنها را می توان به صورت زیر عنوان نمود.

۱- جلوگیری از قطع تک فاز

۲- استفاده از ترانسفورماتورهای با اتصال اولیه زمین شده

۳- استفاده از برقگیرهای اکسید روی به منظور میرا نمودن اضافه ولتاژهای فرورزونانس: باید توجه نمود که برقگیرهای اکسید روی اضافه ولتاژهای فرورزونانس را محدود می کنند ولی خود به زودی دچار ناپایداری حرارتی می شوند. برای مبارزه با این مشکل باید منتظر پیشرفتهای آتی در زمینه ساخت قرصهای اکسید روی با قابلیت جذب انرژی بالا بود.

۴- استفاده از بارهای کوچک هنگام کلید زنی ترانسفورماتورهای بی بار

۵- شناسایی ترانسفورماتورهای مستعد به این پدیده و انتخاب برقگیرهای با قابلیت جذب انرژی بیشتر روی آنها: معمولاً ترانسفورماتورهایی که فصولی از سال بی بار و یا کم بار هستند به این پدیده بسیار حساس هستند. از جمله این ترانسفورماتورها می توان به آنهایی اشاره نمود که برای کشاورزی و یا قایقرانی مورد استفاده واقع می شوند.

۶- هنگام قطع ترانسفورماتور به گونه ای عمل کنید که ابتدا کابل و سپس ترانسفورماتور قطع شود. در هنگام وصل

بر عکس عمل نمایید [۵].

با فرض قابلیت جذب انرژی 2 kJ/cm^3 و حجم فرضی 170 Cm^3 ، برقگیرهای توزیع متداول می توانند 340 kJ انرژی را تحمل نمایند. برای نشان دادن مدت زمان تحمل برقگیر در مقابل اضافه ولتاژهای فرورزونانس در مقاطع مختلف کابل هنگام قطع تک فاز و دو فاز مقدار انرژی تخلیه شده در برقگیر شبیه سازی شده و با فرض قابلیت جذب انرژی ثابت، این زمان مطابق جداول ۳ و ۴ برای قطع تک فاز و دو فاز به دست آمده است. از آنجا که اضافه ولتاژهای فرورزونانس ممکن است بصورت پایدار یا ناپایدار ظاهر شوند [۱۱] آبی نبودن تخریب برقگیر در بسیاری از مواقع باعث سالم ماندن آن می شود زیرا ممکن است با گذشت زمان قبل از آنکه انرژی تخلیه شده در برقگیر از ظرفیت جذب آن بالاتر رود اضافه ولتاژهای فرورزونانس میرا شوند و در نتیجه برقگیر سالم بماند. این حالت بیشتر مربوط به اضافه ولتاژهای فرورزونانس ناپایدار می باشد. به علت متفاوت بودن شرایط وقوع حالتیهای مختلف پدیده فرورزونانس بررسی این امر محتاج تحقیق بیشتر به همراه بررسی آماری می باشد.

جدول (۳) زمان بحرانی تخریب برقگیر در هنگام قطع تک فاز

| طول کابل (m) | ۳۰۰ | ۲۵۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | ۵۰ |
|------------------------------|------|------|------|-----|------|
| میانگین تغییرات انرژی (kJ/s) | ۲/۹۸ | ۲/۰۲ | ۱/۰۱ | ۰/۶ | ۰/۰۸ |
| زمان (دقیقه) | ۱/۹ | ۲/۸ | ۵/۶ | ۹/۴ | ۷۰ |

جدول (۴) زمان بحرانی تخریب برقگیر در هنگام قطع دو فاز

| طول کابل (m) | ۳۰۰ | ۲۵۰ | ۲۰۰ | ۱۰۰ | ۵۰ |
|------------------------------|------|------|------|------|-----|
| میانگین تغییرات انرژی (kJ/s) | ۱۱/۳ | ۸/۰۸ | ۶/۶۵ | ۲/۴۸ | ۱/۲ |
| زمان (دقیقه) | ۰/۵ | ۰/۷ | ۰/۸۵ | ۲/۲۸ | ۴/۷ |

- [۴] A. Narang and R.H Brierly , “ Topology Based Magnetic Model for steady state and Transient studies for three- phase core type Transformers , “ *IEEE PES , SM PWRs*.
- [۵] J. B Wareing, F Perrot, "Ferroresonance Overvoltages in Distribution Networks", Paper for *IEE Colloquium on Ferroresonance* 12 November, 1997, Glasgow.
- [۶] R. A. Walling, R. K. Hartana, and W. J. Rose, " Self-Generated overvoltages due to open phasing of Ungrounded – wye delta transformer banks," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, January 1995
- [۷] R. A. Walling R. K. Hartana , R. M. Rechard, M. P. Sampat, T.R. Balgle, "Performance of metal oxide Arresters exposed to ferroresonance in padmount transformers", *IEEE Transaction on power delivery*, Vol. 9, No. 2, April 1994.
- [۸] Chen, X.S.; Neudorfer, P.; Cheng, S. Simulation of ferroresonance in low-loss grounded wye-wye transformers using a new multi-legged transformer model in EMTP, *IEE International Conference On Advances in Power System Control, Operation and management*, November 1993, Hong kong
- [۹] R. A. Walling, K. D. Baker, " Ferroresonance Overvoltages in Grounded Wye-Wye Padmount Transformers with Low-Loss Silicon – Steel Cores," *IEEE Transaction On Power Delivery*, Vol. 8, No. 3 July 1993.
- [۱۰] S. Lam Du, T. Tran-Quoc, H. Vo-V.-Huy, K. Nguyen-Boi, Q. Nguyen, "Overvoltages On Distribution Systems," 1998 IEEE.
- [۱۱] A. Gholami, M. Morady, "simulation of ferrorsonance overvoltages in distribution transformers Using EMTP", *Iran Electrical Engineering Magazine*, Vol. 1, April 2004

[۱۲] محمد مرادی "بررسی و شبیه سازی پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورهای قدرت به کمک نرم افزار EMTP" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، پاییز ۱۳۸۲

۹- نتیجه گیری

برقگیرهای اکسید روی توانایی میرا نمودن اضافه ولتاژهای فرورزونانس را دارند ولی خود نیز با گذشت زمان دچار ناپایداری حرارتی می شوند. با توجه به تاثیر برقگیر در میرایی اضافه ولتاژهای فرورزونانس تخریب برقگیر سریع نیست و محتاج گذشت زمان است. با توجه به ضعیف بودن منبع تولید کننده این اضافه ولتاژها و آشفته بودن آنها منحنی های TOV برای تعیین مدت زمان استقامت این تجهیزات کاربرد ندارند. با شبیه سازی مدار متشکل از ترانسفورماتور و کابل و برقگیر کلیدزنی های تک فاز و دو فاز نشان داده شد که قطع تک فاز باعث تخریب سریعتر برقگیر می شود. برای در امان ماندن برقگیرهای اکسید روی در مقابل اضافه ولتاژهای فرورزونانس نمی توان ولتاژ نامی (Rating Voltage) آنها را بالا برد زیرا این عمل باعث کاهش سطح حفاظت شبکه در مقابل اضافه ولتاژهای صاعقه شده و تجهیزات دیگر را در مقابل این اضافه ولتاژها در معرض خطر قرار می دهد. پیشرفتهای آتی در زمینه ساخت قرصهای با قابلیت جذب انرژی بالاتر در آینده ممکن است کارایی این تجهیزات در مقابل اضافه ولتاژهای فرورزونانس را بالا ببرد.

مراجع

- [۱] R. A. Walling R. K. Hartman, R. M. Rechard, M. P. Sampat, T.R. Balgle, "Performance of metal oxide Arresters exposed to ferroresonance in padmount transformers", *IEEE Transaction on power delivery*, Vol. 9, No. 2, April 1994.
- [۲] E. C Sakshaug, J. J. Burke, J. S. Kresge, "Metal Oxide Arresters on distribution systems –fundamental considerations," *IEEE Transaction On Power Delivery*, Vol. 4, No. 4, October 1989, pp. 2076-2089
- [۳] T. A. Short, J. J. Burke , R. T. Mancao, "Application of MOV's in the distribution environment, " *paper 93 WM 047-IPWRD presented at the IEEE PES Winter Meeting*, Coulumbus, Ohio, Jan. Jan. 31-Feb. 5 1993.