

بررسی پدیده فرورزونانس و تأثیر پارامترهای مؤثر بر آن در ترانسفورماتورهای توزیع به کمک نرم افزار EMTP

احمد غلامی

دانشیار دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد مرادی

موسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران

بیشتر تحقیقات در این زمینه بر مدل سازی دقیقتر ترانسفورماتور و مطالعه پدیده فرورزونانس در سطح سیستم متمرکز بوده است.

اصولاً فرورزونانس پدیده ای غیر خطی است. بنابراین بسیاری از روشهای بکار برده شده جهت بررسی این پدیده مبتنی بر حوزه زمان و با بکار بردن نرم افزار EMTP می باشد. فرورزونانس اثرات تخریبی متعددی بر ترانسفورماتورها و تجهیزات دیگر دارد که مهمترین این تأثیرات را می توان به صورت زیر خلاصه نمود [۲]:

۱) به وجود آمدن ولتاژها و جریانهای بزرگ ماندگار یا موقت در سیستم

۲) ایجاد اعوجاج در شکل موجهای ولتاژ و جریان

۳) تولید صداهای گوش خراش پیوسته در

ترانسفورماتورها و راکتورها

۴) تخریب تجهیزات الکتریکی به علت گرمای زیاد یا شکست الکتریکی

۵) عملکرد ناخواسته رله ها

۶) گرم شدن ترانسفورماتور (در حالت بی باری):

به علت اشباع هسته ترانسفورماتور و عبور جریانهای لحظه ای بزرگ در سیم پیچهای ترانسفورماتور در زمان وقوع

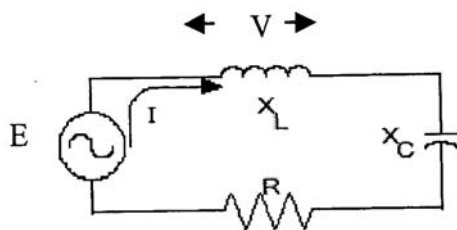
چکیده - در این مقاله با بهره گیری از مدلسازی دوگانی ترانسفورماتورهای قدرت به بررسی پدیده فرورزونانس و تأثیر پارامترهای مؤثر بر آن پرداخته شده است. نتایج شبیه سازیها نشان دهنده اضافه ولتاژهای بسیار بزرگی در هنگام قطع فازهای ترانسفورماتور می باشد. با ساختن یک ظرفیت خازنی متغیر با زمان در EMTP و اتصال آن به فازهای مختلف ترانسفورماتور رفتار پدیده فرورزونانس در محدوده وسیعی از ظرفیت خازنی معادل طول کابل مورد مطالعه قرار گرفته است. به تناسب مقدار ظرفیت خازنی، اضافه ولتاژهای فرورزونانس به دو دسته پایدار و ناپایدار تقسیم شده اند. در ادامه تأثیر سیم بندی و مقدار بار متصل به ترانسفورماتور در رفتار پدیده فرورزونانس بررسی شده است.

کلید واژه: فرورزونانس، مدل دوگانی، EMTP

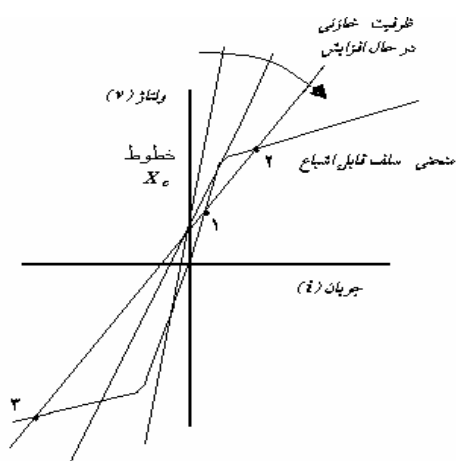
۱- مقدمه

تحقیقات در مورد پدیده فرورزونانس سابقه هشتاد ساله دارد. کلمه فرورزونانس، در مقالات علمی دهه ۱۹۲۰ دیده شد. علایق عملی در سال ۱۹۳۰ زمانی به وجود آمد که استفاده از خازنهای سری برای تنظیم ولتاژ در سیستمهای توزیع آن زمان، باعث بروز اضافه ولتاژ در شبکه توزیع می گردید [۱]. از آن زمان تاکنون

آن صورت ولتاژ و جریانهای بسیار بزرگی به وجود می آیند. در مقادیر کم ظرفیت خازنی، نقطه کار فقط نقطه سوم بوده و چون در این حالت راکتانس خازنی بزرگ است، موجب جریان پیشفاز در سیستم و ولتاژ بزرگتر روی سلف می شود. با افزایش مقدار ظرفیت خازنی نقطه تقاطع دیگری به وجود می آید که تمایل سیستم به نقطه تقاطع (۱) که دارای حالت سلفی با جریان پسفاز است، بیشتر می باشد. هر گاه مقدار ولتاژ اعمالی به اندازه کمی تغییر نماید آنگاه نقطه کار (۱) حذف و نقطه کار به نقطه (۳) پرش خواهد کرد. در این حالت جریان بسیار زیادی از سلف می گذرد و طبیعی است که با عبور این جریان بزرگ، ولتاژ دوباره کاهش یافته و دوباره نقطه کار (۱) به وجود می آید. و بدین ترتیب نقطه کار بین (۱) و (۳) پرش خواهد کرد. در این صورت ولتاژ و جریانهای به وجود آمده کاملاً تصادفی و غیر قابل پیش بینی می باشند.



شکل ۱: مدار معادل پدیده فرورزونانس



شکل ۲: حل ترسیمی مدار LC غیر خطی

این پدیده، ترانسفورماتور داغ می شود. داغ شدن ترانسفورماتور به این علت است که به دلیل اشباع هسته ترانسفورماتور، رلوکتانس ظاهری مسیر آهنی دیده شده به وسیله سیم پیچ های ترانسفورماتور بزرگ می شود و بنابراین قسمتی از شار به بیرون هسته رانده می شود. قسمتی از این شار مسیر خود را از طریق تانک ترانسفورماتور می بندد و به علت اینکه تانک ترانسفورماتور در مقابل جریانهای فوکو طراحی نشده است، عبور شار باعث ایجاد جریانهای فوکو در آن و داغ شدن بدنه می شود. داغ شدن ترانسفورماتور قدرت عایقی آن را تضعیف کرده و منجر به شکست عایق تحت تنشهای الکتریکی می شود. در صورت عدم توقف این پدیده ترانسفورماتور شدیداً آسیب دیده و ممکن است باعث اتصال کوتاه و یا انفجار و یا حتی آتش سوزی شود. اضافه ولتاژهای ناشی از پدیده فرورزونانس می تواند تا حدود ۵ بریونیت افزایش یابد [۳ و ۹]. بدیهی است چنین اضافه ولتاژهایی به راحتی می توانند به سیم پیچی ترانسفورماتور آسیب برسانند. با توجه به مسائل و مشکلات فوق شبیه سازی و تفهیم پدیده فرورزونانس موضوع بسیاری از مقالات بوده است.

۲- مبانی پدیده فرورزونانس

به منظور تفهیم هر چه بهتر پدیده فرورزونانس مدار شکل (۱) را در نظر بگیرید که در آن سلف دارای مشخصه غیر خطی است. هر گاه منبع ولتاژ سینوسی باشد، می توان KVL را طبق رابطه (۱) نوشت:

$$R \approx 0 \quad (1)$$

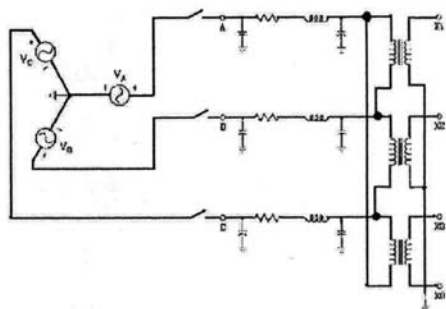
$$E = I \left(j\omega L + \frac{-j}{\omega C} \right) \Rightarrow V = E + \frac{jI}{\omega C}$$

حال با استفاده از روش ترسیمی به تشریح این پدیده می پردازیم: با توجه به شکل (۲) مشخص است که به تناسب مقدار ظرفیت خازنی، یک یا سه نقطه تقاطع بین منحنی سلف غیر خطی و راکتانس خازنی وجود دارد. نقطه تقاطع (۲) ناپایدار می باشد [۴] و فقط در حالت های گذرا چنین نقطه ای به وجود می آید. همچنین واضح است که اگر نقطه تقاطع (۳)، نقطه کار باشد، در

ترانسفورماتور به فاز قطع شده) و مشخصه مغناطیسی هسته ترانسفورماتور و ظرفیت خازنی بین کابل (یا خط انتقال) و زمین می‌باشد. در این حالت ولتاژ ظاهر شده در فاز قطع شده ترانسفورماتور به تناسب مقدار ظرفیت خازنی کابل متصل به آن و سایر پارامترها می‌تواند از چند پریونیت تجاوز نماید. شکل هسته ترانسفورماتور و منحنی مشخصه آن در رفتار ترانسفورماتور بسیار با اهمیت می‌باشد.

۴- شبیه سازی فرورزونانس در ترانسفورماتورهای توزیع

برای شبیه سازی فرورزونانس در هر حالت با قرار دادن ظرفیت خازنی معادل طول کابل و کلید زنی تک فاز و دو فاز در ترانسفورماتور بی‌بار پدیده فرورزونانس مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۳: ترانسفورماتور مورد مطالعه و کلیدزنی روی آن

فرورزونانس زمانی اتفاق می‌افتد که در هنگام بی‌باری و یا کم‌باری ترانسفورماتور، در نقطه‌ای دور از آن قطع تک فاز و یا دو فاز انجام شود. به تناسب پارامترهای مدار امکان دارد که فرورزونانس دارای دو حالت مختلف به شرح زیر باشد.

الف) فرورزونانس پایدار

در این حالت اضافه ولتاژهای فرورزونانس تا زمانی که فاز قطع شده بی‌برق بماند، پایدار می‌باشند. این اضافه ولتاژها ممکن است که دارای قله بسیار بزرگی نباشند ولی به دلیل

در سیستمهای توزیع، پدیده فرورزونانس زمانی اتفاق می‌افتد که بانک خازنی و یا طولی از کابل با مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتور و یک منبع ولتاژ بطور سری قرار بگیرد. برای کابلهای با طول کم فقط یک نقطه کار در ناحیه سوم وجود دارد و بنابراین شکل موج ولتاژ و جریان ناشی از فرورزونانس دارای پریودی برابر پریود شبکه می‌باشد. با افزایش ظرفیت خازنی قله این اضافه ولتاژها روی منحنی اشباع مدام بالا می‌رود تا جاییکه اندازه ولتاژ بسیار بیشتر از حالت عادی می‌شود. با افزایش بیشتر ظرفیت خازنی نقطه کار (۱) نیز فعال می‌شود و به تناسب نوع حالت گذاری پیش آمده، اضافه ولتاژهای به وجود آمده در دو سر اندوکتانس غیر خطی، ممکن است دارای پریود پایدار و یا شکل موج آشفته باشند. با افزایش دوباره ظرفیت خازنی زمانی فرا می‌رسد که نقطه تقاطع سوم حذف می‌شود و در حالت عادی در ناحیه فرورزونانس نخواهیم بود اما حالت‌های گذرا نظیر کلید زنی می‌تواند باعث به وجود آوردن چنین نقطه کاری در ناحیه سوم شوند.

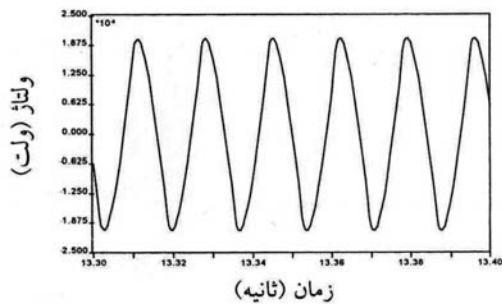
۳- فرورزونانس در ترانسفورماتورهای توزیع

با گسترش خطوط کابلی زیر زمینی و همچنین تمایل روز افزون استفاده از ترانسفورماتورهای با تلفات کم، مخصوصاً ترانسفورماتورهای ساخته شده از ورقه‌های فولاد حاوی سیلیکان، احتمال وقوع فرورزونانس در این ترانسفورماتورها بیشتر شده است. این مشکل زمانی رخ می‌دهد که ترانسفورماتور بی‌بار تغذیه شده از طریق خط کابلی (و یا متصل شده به بانک خازنی) تحت کلید زنی تک فاز و یا دو فاز قرار می‌گیرد. همچنین در خطوط انتقال توزیع طولانی نیز، این مشکل می‌تواند اتفاق بیفتد. البته در رده توزیع خوشبختانه تمامی کلیدهای قدرت دارای قطع سه فاز بوده و این مسئله زیاد جدی نمی‌باشد، اما در حالتی که از وسایل قطع تک فاز مانند کات آوت فیوز استفاده می‌شود امکان وقوع چنین شرایطی بسیار مهیا است. در این حالت مدار فرورزونانس شامل ولتاژ القایی (ولتاژ القا شده از فازهای دیگر

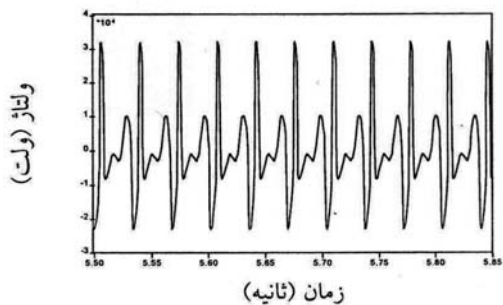


۶- تأثیر ظرفیت خازن معادل طول کابل

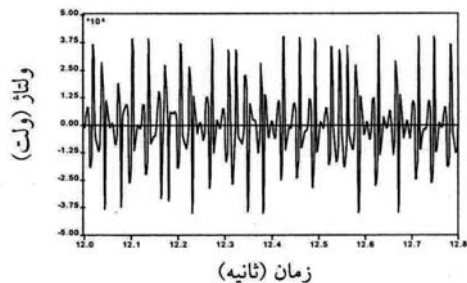
بدون شک یکی از مهمترین عوامل به وجود آورنده اضافه ولتاژهای فرورزونانس ظرفیت خازنی است. در شکلهای زیر مدهای مختلف پدیده فرورزونانس در مقادیر مختلف ظرفیت خازنی معادل طول کابل متصل به اولیه ترانسفورماتور دیده می شود.



شکل ۴: مد یک پدیده فرورزونانس هنگام قطع فاز a و ظرفیت خازنی ۲۰ نانوفاراد



شکل ۵: مد دوم پدیده فرورزونانس هنگام قطع فاز a و ظرفیت خازنی ۴۲ نانوفاراد



شکل ۶: مد آشفته پدیده فرورزونانس هنگام قطع فاز a و ظرفیت خازنی ۵۵ نانوفاراد

پایدار بودن می تواند باعث صدمات جدی به برگیرها و حتی انفجار آنها در عرض چند دقیقه شوند.

(ب) فرورزونانس ناپایدار

در این حالت نقاط کار سیستم در حالت پایدار در محدوده فرورزونانس نمی باشند، اما حالتی گذرا نظیر کلید زنی می تواند نقاط کار سیستم را برای مدت کوتاهی به این محدوده وارد نمایند. در این حالت اضافه ولتاژهای فرورزونانس برای مدت کوتاهی بعد از کلید زنی پدیدار شده ولی به زودی میرا می شوند.

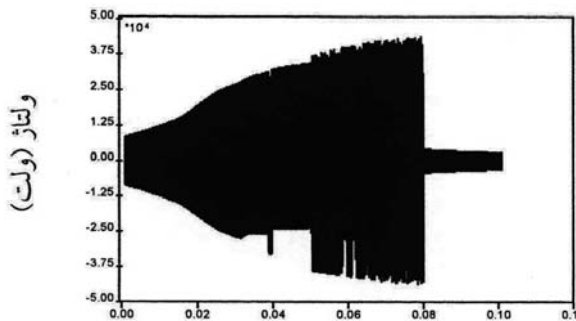
۵- مشخصات ترانسفورماتور

در بررسی حالتی گذرای فرورزونانس توپولوژی و ساختار هسته اهمیت بسزایی دارد به همین دلیل، این نیاز منجر به دسته‌ای از مدل‌های ترانسفورماتورهای قدرت شده است که در آنها ساختار هسته به نحوی گنجانده شده است. اساس این مدل‌ها تئوری دوگانی بین مدارهای الکتریکی و مغناطیسی می باشد که جزئیات مدلسازی در مرجع [۵] آمده است. ترانسفورماتور مورد مطالعه، ترانسفورماتوری سه ستونه ۶۳۰ kVA با اتصال Δ/Y و مشخصات جدول (۱) می باشد.

جدول ۱: مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه

نوع اتصال	Δ/Yn g	تلفات نامی هسته (WAT)	۱۲۰۰
توان ظاهری نامی (KVA)	۶۳۰	جریان مغناطیس کنندگی نامی (درصد)	۱/۶
جریان نامی (kV)	۱۰/۴ ۲۰	امپدانس اتصال کوتاه (درصد)	۶
جریان نامی (A)	۱۹۰۹ ۱۸	ظرفیت خازنی نسبت به زمین (PF)	۱/۸۱۶۴ ۲۰۴۱

نتیجه اضافه ولتاژهای فرورزونانس به دو حالت پایدار و ناپایدار تقسیم می‌شوند.

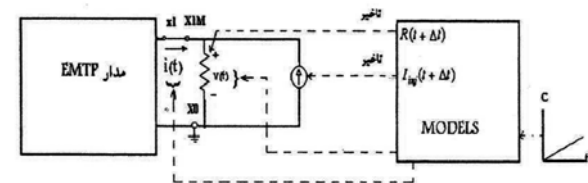
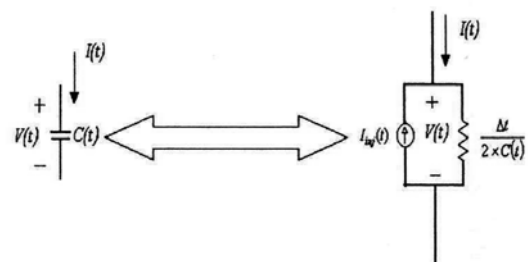


ظرفیت خازنی بر حسب میکروفاراد

شکل ۸: ولتاژ فاز قطع شده ترانسفورماتور متناسب با تغییرات ظرفیت خازنی

در ظرفیت خازنی کمتر از ۸۰ نانوفاراد، با هر زاویه کلید زنی، هنگام قطع فاز a فرورزونانس اتفاق افتاده و این اضافه ولتاژها تا زمان قطع این فاز پایدار می‌باشند، اما در ظرفیتهای خازنی بالاتر از مقدار ۸۰ نانوفاراد این اضافه ولتاژها برای مدتی به تناسب شرایط اولیه سیستم و نحوه کلید زنی به وجود آمده و بعد از چندین پریود حذف می‌شوند. شکل (۹) ولتاژ فاز a ترانسفورماتور در هنگام قطع این فاز و ظرفیت خازنی ۳۶۰ نانوفاراد را نشان می‌دهد. با انجام شبیه سازی مشابه در فاز b ترانسفورماتور ولتاژ این فاز مطابق شکل (۱۰) تغییر می‌نماید که با مقایسه با شکل (۸) می‌توان به عدم تشابه رفتار فازهای ترانسفورماتور در مقابل فرورزونانس پی برد. با قطع فاز b ترانسفورماتور، اضافه ولتاژهای بزرگتری حاصل شده و محدوده ناپایدار آن در ظرفیت خازنی کمتری شروع می‌شود. همچنین اضافه ولتاژهای فرورزونانس در ظرفیت خازنی حدود ۱۰ نانوفاراد شروع می‌شوند. عدم تشابه رفتار فازهای مختلف ترانسفورماتور در مقابل پدیده فرورزونانس به وسیله محققان دیگری در ترانسفورماتورهای پنج ستونه گزارش شده است [۷]. دلیل این امر نامساوی بودن رلوکتانس دیده شده به وسیله فازهای مختلف می‌باشد.

در حالت بعدی برای مطالعه پدیده فرورزونانس در محدوده وسیع تغییرات ظرفیت خازنی به هر کدام از فازهای ترانسفورماتور ظرفیت خازنی متغیر با زمان متصل نموده و آن را از مقدار صفر تا صد نانوفاراد تغییر داده‌ایم. از آنجا که در نرم‌افزار EMTP ظرفیت خازنی متغیر با زمان وجود ندارد با کمک زیر برنامه MODELS و عناصر TACS ظرفیت خازنی متغیر با زمان ساخته‌ایم. اساس ظرفیت خازنی متغیر با زمان و چگونگی ارتباط آن با مدار EMTP در شکل (۷) نشان داده شده است [۶].

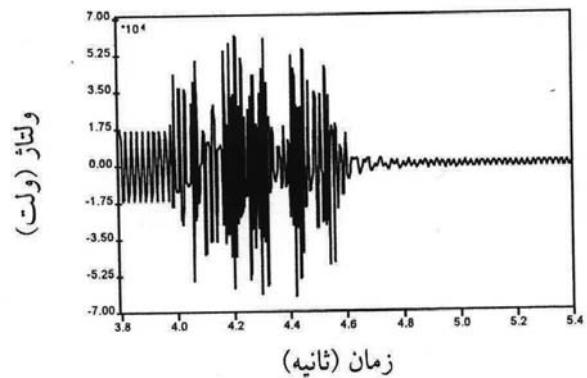
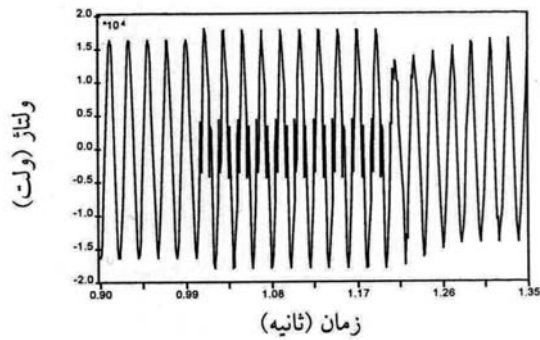


شکل ۷: مدل‌سازی ظرفیت خازنی متغیر با زمان در نرم افزار EMTP

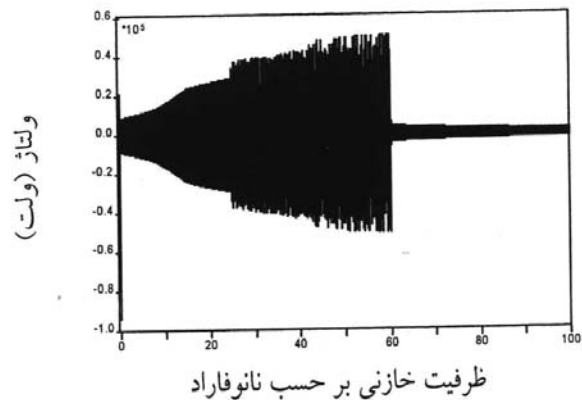
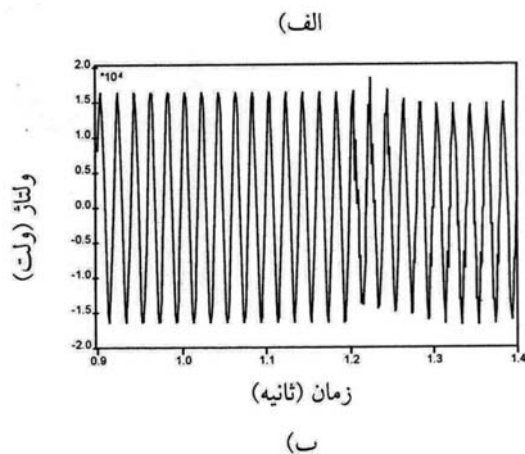
با قرار دادن ظرفیت خازنی متغیر با زمان در هر کدام از فازهای ترانسفورماتور و تغییر ظرفیت خازنی از مقدار صفر تا صد نانوفاراد در صد ثانیه ولتاژ فاز a قطع شده ترانسفورماتور مطابق شکل (۸) تغییر می‌نماید.

آنچنانکه دیده می‌شود اضافه ولتاژهای فرورزونانس از ظرفیت خازنی ۱۶ نانوفاراد شروع شده و بعد از افزایش تا مقدار ۴۰ کیلو ولت یعنی حدود ۳/۴ پریونیت ولتاژ نامی ترانسفورماتور، در مقدار ۸۰ نانوفاراد از بین می‌روند. این شبیه‌سازی با نتایج مدل ساده فرورزونانس و حل ترسیمی شکل (۲) هماهنگی دارد. در

خازنی مساوی، اضافه ولتاژهای فرورزونانس در ترانسفورماتور مورد نظر در حالت اتصال ستاره با نوترال زمین شده بسیار کمتر است.



شکل ۹: اضافه ولتاژهای فرورزونانس در فاز a



شکل ۱۰: ولتاژ فاز قطع شده ترانسفورماتور با تغییرات ظرفیت خازنی

شکل ۱۱: الف) شکل موج ولتاژ فاز a و ب) شکل موج فاز b در هنگام قطع متوالی فازهای a و b در ظرفیت خازنی ۵۵ نانوفاراد در ترانسفورماتور با نوترال زمین شده

۷- تأثیر نوع سیم بندی ترانسفورماتور

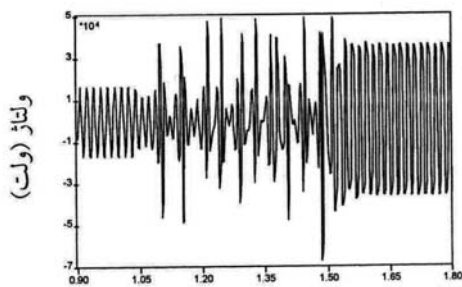
با قطع نوترال ترانسفورماتور مورد نظر و قطع تک فاز و دو فاز اضافه ولتاژهای بسیار بزرگتری حاصل می‌شوند که حتی از حالت اتصال مثلث - ستاره بزرگتر می‌باشند. نتایج شبیه سازیها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در شکل (۱۳) ولتاژ فاز a ترانسفورماتور در هنگام قطع این فاز و تغییر ظرفیت خازنی از مقدار صفر تا صد نانوفاراد نشان داده شده است. همچنانکه دیده می‌شود اضافه ولتاژهای بسیار بزرگی در این فاز به وجود می‌آیند.

یکی از مزایای مدلسازی دوگانی ترانسفورماتورهای قدرت که در این مطالعه استفاده شده است، این است که بدون تغییر در مدل هسته ترانسفورماتور، می‌توان سیم‌بندی ترانسفورماتور را تعویض نمود [۶]. در این حالت سیم‌بندی هسته ترانسفورماتور استفاده شده را به صورت اتصال ستاره زمین شده - ستاره زمین شده بسته و شبیه سازیها دوباره تکرار شده‌اند. در این حالت نتایج قطع تک فاز و دو فاز روی ترانسفورماتور مورد نظر به صورت شکل‌های (۱۱) می‌باشند. آنچنانکه دیده می‌شود در ظرفیتهای

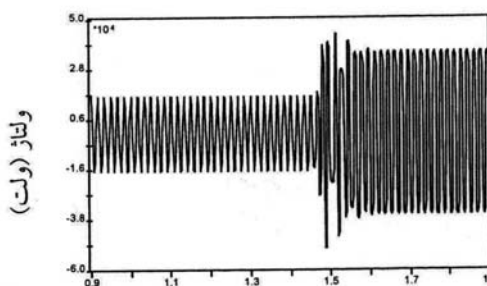
بنابراین قطع تک فاز و یا دو فاز در ترانسفورماتور با اولیه ستاره ایزوله، اضافه ولتاژهای بسیار بزرگتری به وجود می‌آورد.

۸- تأثیر بار بر اضافه ولتاژهای فروزونانس

همچنانکه می‌دانیم اضافه ولتاژهای فروزونانس در هنگام بی‌باری و یا کم‌باری ترانسفورماتور به وجود می‌آید. برای نشان دادن تأثیر بار بر اضافه ولتاژهای فروزونانس بارهای مقاومتی مختلفی با اتصال ستاره زمین شده به ثانویه ترانسفورماتور متصل نموده و روی ترانسفورماتور قطع تک فاز دو فاز انجام می‌شود. شبیه‌سازیها نشان می‌دهد که در مقادیر پایین ظرفیت خازنی مقدار بار لازم برای حذف پدیده فروزونانس بسیار کم است ولی با اضافه شدن ظرفیت خازنی مقدار بار لازم برای قطع تک فاز و دو فاز بیشتر می‌شود.

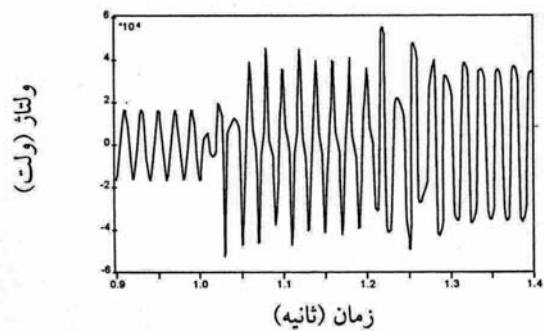


الف

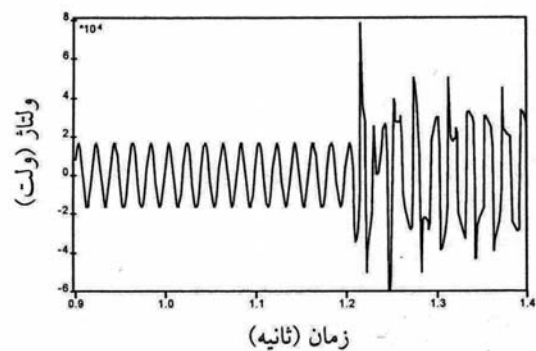


ب

شکل ۱۴: قطع تک فاز و دو فاز در $C = 0.005 \mu F$ و بدون وجود بار الف) ولتاژ فاز b) ولتاژ فاز a

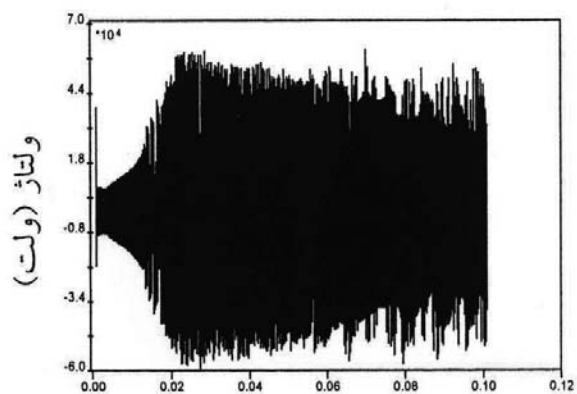


الف



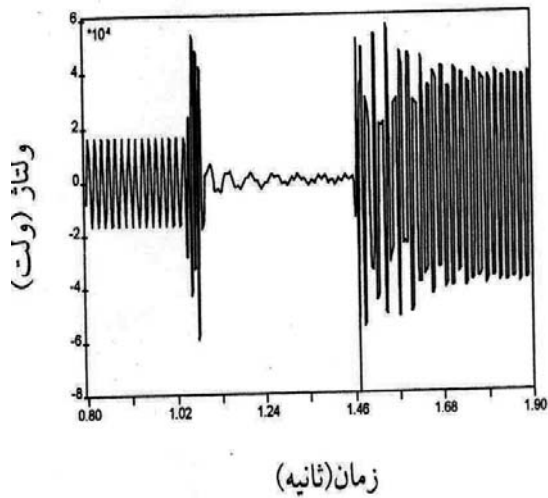
ب

شکل ۱۲: الف) شکل موج ولتاژ فاز a و ب) شکل موج ولتاژ فاز b در هنگام قطع متوالی فازهای a و b در ظرفیت خازنی ۵۵ نانوفاراد در ترانسفورماتور با نوترال زمین نشده



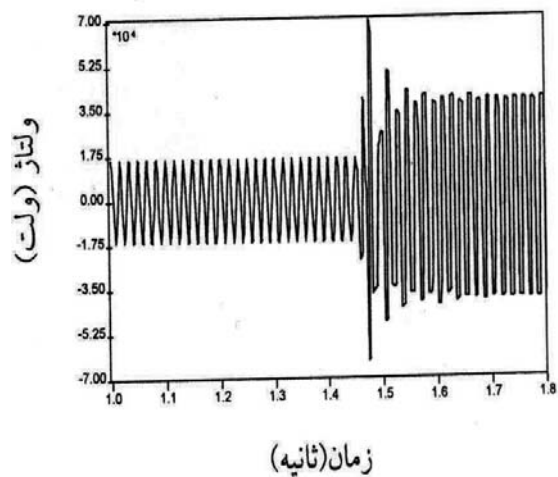
ظرفیت خازنی بر حسب میکروفاراد

شکل ۱۳: تغییرات ولتاژ فاز قطع شده a با تغییرات ظرفیت خازنی در ترانسفورماتور با نوترال ایزوله



زمان (ثانیه)

الف



زمان (ثانیه)

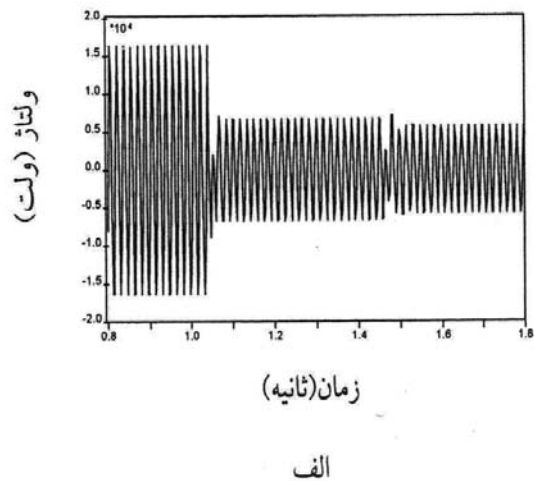
ب

شکل ۱۶: قطع تک فاز و دو فاز در $C = 0.14 \mu F$ و بار ۱۲ کیلووات (الف) ولتاژ فاز b (ب) ولتاژ فاز a

تنها با افزایش بار به ۳۰ کیلووات یعنی باری در حدود ۵٪ بار نامی ترانسفورماتور این اضافه ولتاژها هم در قطع تک فاز و هم هنگام قطع دو فاز حذف شده‌اند. شکل (۱۷) ولتاژ فاز b ترانسفورماتور را در هنگام کلید زنی تک فاز و دو فاز نشان می‌دهد.

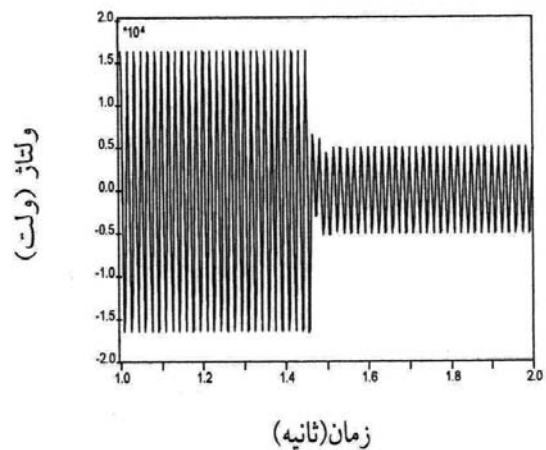
با اتصال بار ۷ کیلووات به ثانویه این ترانسفورماتور، با قطع تک فاز و دو فاز روی این ترانسفورماتور فقط اضافه ولتاژهای قطع تک فاز حذف گردید. برای حذف کامل این اضافه ولتاژها باری به بزرگی ۱۲ کیلووات به ثانویه ترانسفورماتور متصل شد. نتایج شبیه سازیها در شکل (۱۵) نشان داده شده است.

در حالت بعدی ظرفیت خازنی متصل به ترانسفورماتور به مقدار ۴۰۰ نانوفاراد افزایش یافته است بار ۱۲ کیلووات در این حالت حتی قادر به حذف اضافه ولتاژهای قطع تک فاز هم نمی باشد (شکل (۱۶)).



زمان (ثانیه)

الف



زمان (ثانیه)

ب

شکل ۱۵: قطع تک فاز و دو فاز در $C = 0.05 \mu F$ و بار ۱۲ کیلووات (الف) ولتاژ فاز b (ب) ولتاژ فاز a

مراجع

[۱] Slow Transient Task Force of the IEEE Working Group on Modelling and Analysis of System Transient Using Digital Programs, "Modeling and Analysis Guidelines for slow Transients – part III : The Study of Ferroresonance", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.15, No.1, January 2000

[۲] Ferracci, p. , "Ferroresonance" Chaier Technique No.190 Group Shnieder

[۳] D.R.smith S.R.Swanson, and J.D.Borst, "Overvoltages with remotely switched cable – fed grounded wye- wye transformers", IEEE Transaction on power Apparatus and System, Vol. pas – 94, no. 5 September/october 1975

[۴] Dieter Kind, Kurt Feser, "High Voltage Test Techniques" Newnes, second edition, 1986

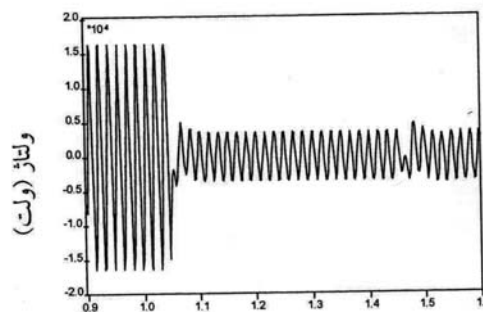
[۵] A. Narang and R.H Brierly, " topology Based Magnetic Model for steady state and Transient studies for three- phase core type Transformers", IEEE PES, SM PWRs.

[۶] B.A .Mork, "Five – legged wound-core Transformer Model : derivation, parameters, implementation, and Evaluation", IEEE Transaction on power delivery, vol. 14, No. 4 october 1999

[۷] B.a.mork, D.L. Stuehm, " application of nonlinear Dynamics and chaos to ferrorsonance in distribution systems" IEEE Transaction on power Delivery, vol. 9, no. 2 April 1994

[۸] H.W. Domell, " EMPT Theory Book", University of British colombia, Vancocouver, canada, August 1986

[۹] R.A. Walling, K.d.Baker, T.M. compton, and L.E. zimmerman, "Ferroresonance Overvoltages in Grounded Wye – Wye Padmount Transformers with Low – Loss Silicon – Steel Cores", IEEE / PES 1992 Summer Meeting 92 SM 362-4 PWRD



شکل ۱۷: ولتاژ فاز b در هنگام قطع تک فاز و دو فاز در $C = 0.4 \mu F$ و بار ۳۰ کیلووات

۹- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله با بهره گیری از مدل دوگانی ترانسفورماتورهای قدرت به بررسی و شبیه سازی پدیده فرورزونانس در ترانسفورماتورهای قدرت پرداخته شد. نشان داده شد که اضافه ولتاژهای فرورزونانس دارای دو حالت پایدار و ناپایدار می باشند. این اضافه ولتاژها مقادیر بسیار بالایی در حدود چندین پروینیت ولتاژ شبکه را دارا بوده و به راحتی می توانند به سیم پیچی و سایر دستگاههای الکتریکی آسیب برسانند. همچنین تأثیر عوامل مختلف از جمله ظرفیت خازنی، سیم بندی و تأثیر بار مورد بحث و بررسی قرار گرفت. اضافه ولتاژهای فرورزونانس در ترانسفورماتورهای با اولیه زمین شده دارای مقدار بسیار کمتری نسبت به ترانسفورماتورهای با اولیه زمین نشده هستند. همچنین نشان داده شد که فازهای مختلف ترانسفورماتور دارای رفتار مساوی در مقابل اضافه ولتاژهای فرورزونانس نیستند. با افزایش ظرفیت خازنی، میزان بار لازم برای حذف اضافه ولتاژهای فرورزونانس افزایش می یابد. باری در حدود ۵٪ بار نامی ترانسفورماتور در بیشتر حالات، قادر به حذف اضافه ولتاژهای فرورزونانس می باشد.