



بررسی نیروهای الکترومغناطیسی وارده بر سیم‌پیچی ترانسفورماتور در اثر پدیده فرورزونانس با استفاده از FEM

علیرضا شمس^{۱*}، احمد زارع^۲، ایمان رستمی^۳، سعید صابری فیروزی^۴

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- گروه مهندسی برق، دانشگاه علمی کاربردی سعادتشهر، فارس، ایران

۳،۴- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی پسران شهرستان مرودشت، فارس، ایران

*Alirezashams.un@gmail.com

ارسال: شهریور ماه ۹۸ پذیرش: مهر ماه ۹۸

چکیده

فرورزونانس، رزونانس غیرخطی است که بین خازن شبکه نظیر خازن کابل‌ها، خطوط، کلیدهای قدرت و اندوکتانس غیرخطی تجهیزاتی نظیر راکتورها و ترانسفورماتورها، بهنگام اشباع آنها، رخ می‌دهد. در هنگام وقوع این پدیده، جریان‌های پالسی با دامنه^{-۱} زیاد از سیم‌پیچی ترانسفورماتور، عبور می‌کنند که انتظار می‌رود به تبع آنها، نیروهای الکترومغناطیسی شدیدی بر سیم‌پیچی ترانسفورماتور وارد گردند. هدف اصلی این مقاله، محاسبه و بررسی نیروهای الکترومغناطیسی وارده بر سیم‌پیچی ترانسفورماتور، ناشی از وقوع پدیده فرورزونانس می‌باشد. بدین منظور، یک مدل دو بعدی اجزاء محدود (*FEM*) از یک ترانسفورماتور ۴۰۰/۲۰KV با توان نامی ۲۵KVA توسعه داده شده و با تزویج مدار شبکه، محاسبات اجزاء محدود ترانسفورماتور در وضعیت فرورزونانس، انجام شده است. به منظور ارزیابی صحت مدل اجزاء محدود، نتایج بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود با روش تحلیلی در شرایط کاری نرمال ترانسفورماتور مقایسه شده است که بیانگر دقت مدل توسعه داده شده می‌باشد. نتایج حاصل از این مطالعه، که وجود نیروهایی با بزرگی چند پربونیت بر سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور، ناشی از پدیده فرورزونانس، را نشان می‌دهند در طراحی الکتریکی و مکانیکی ترانسفورماتورها و سیم‌پیچی‌های آن، نقش مهمی ایفاء خواهد کرد.

کلمات کلیدی: پدیده فرورزونانس، نیروی الکترومغناطیسی، روش اجزاء محدود (*FEM*)، ترانسفورماتور توزیع.

۱- مقدمه

ترانسفورماتورها یکی از مهم‌ترین و گران قیمت‌ترین تجهیزات در شبکه می‌باشند که از دست دادن آنها می‌تواند خسارات زیادی به شبکه وارد نماید از اینرو حفاظت و نگهداری آنها، از اهمیت بسیاری برخوردار است. ترانسفورماتورها در طول دوره بهره برداری تنش‌های مختلفی از جمله خطاهای الکتریکی، مکانیکی و حرارتی را تجربه می‌کنند که برخی از آنها می‌توانند سبب افزایش جریان و در نتیجه افزایش نیروی الکترومغناطیسی وارده بر سیم‌پیچی گردد. این افزایش نیرو باعث خساراتی

همچون خم شدن سیم پیچی، جابجایی و پارگی سیم پیچی می گردد از اینرو پیش بینی نیروی الکترومغناطیسی در روند طراحی ترانس امری ضروری می باشد [۱،۲]. در لحظه وقوع فرورزونانس، جریان های پالسی با دامنه چند پریونیت از سیم پیچی ترانسفورماتور عبور می کند که می تواند سبب افزایش نیروی الکترومغناطیسی وارده بر سیم پیچی گردند [۳]. مروری بر تحقیقات انجام شده در حوزه پدیده فرورزونانس، آشکار می سازد که در مورد پدیده فرورزونانس، بسیاری از کارهای گذشته، مربوط به بررسی حالت های وقوع فرورزونانس در ساختارهای مختلف شبکه می باشد. در مرجع [۴]، به مطالعه فرورزونانس رخ داده بر روی یک اتوترانسفورماتور قدرت $13/275/400\text{ KV}$ پرداخته شده است و نتایج عملی با نتایج بدست آمده از شبیه سازی مقایسه گردیده است. مرجع [۵]، تجزیه و تحلیل فرورزونانس در اثر وقوع صاعقه و کلیدزنی شدید بر روی یک ترانسفورماتور ولتاژ خازنی را مورد بررسی قرار داده است. در مرجع [۶]، تاثیر خازن مدار باز بریکر بر روی وقوع پدیده فرورزونانس در یک ترانسفورماتور ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است.

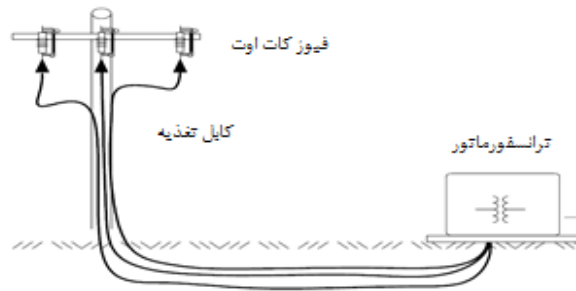
پارامترهای مختلف شبکه و ترانسفورماتور، تاثیر متفاوتی بر روی پدیده فرورزونانس دارند که در مراجع [۷،۸] به بررسی اثرات این پارامترها پرداخته شده است. همچنین تاثیر اجزا مختلف سیستم قدرت، تاثیر شرایط اولیه در وقوع فرورزونانس و تاثیر پسماند بر روی پایداری فرورزونانس در مراجع [۹-۱۱]، مورد مطالعه قرار گرفته اند. راه حل های مختلفی به منظور جلوگیری از فرورزونانس و کاهش آن در سیستم های مختلف مطرح شده است که در مرجع [۶]، یک ارائه دقیق از این روش ها بیان شده است و همچنین یک روش حفاظت از ترانسفورماتورها در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از فرورزونانس با استفاده از بار فعال در مرجع [۱۲]، نشان داده شده است. در مراجع [۱۳،۱۴] به روش های کاهش فرورزونانس در پست ها با استفاده از کنترلر ($UPFC$) و استفاده از راکتور میرا کننده در گاز عایق پرداخته شده است. مراجع [۱۵، ۱۶] با استفاده از یک مدل دو بعدی ترانسفورماتور به منظور تجزیه و تحلیل ولتاژهای ناشی از فرورزونانس در حوزه فرکانس و تجزیه و تحلیل نوسانات زیر هارمونیک پرداخته اند.

مطالعه کارهای گذشته نشان می دهد که عمده کارهای صورت گرفته، بیشتر در حوزه های بررسی وقوع فرورزونانس در سیستم های مختلف، تاثیر پارامترهای مختلف و شرایط اولیه، روش های کاهش و حذف فرورزونانس و تحلیل سیگنال های فرورزونانس می باشد.

توصیف و محاسبه نیروهای وارده بر سیم پیچی ترانسفورماتور در نتیجه پدیده فرورزونانس، علیرغم اهمیتی که در بحث طراحی الکتریکی و مکانیکی ترانسفورماتورها دارد، موضوعی است که تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. این مقاله با در نظر گرفتن یک مدل دو بعدی از یک یک ترانسفورماتور $400\text{ KV} / 20\text{ KV}$ با توان نامی 25 KVA به بررسی مقدار نیروی الکترومغناطیسی وارده بر سیم پیچی ترانسفورماتور در شرایط کار نرمال و حالت وقوع فرورزونانس پرداخته است.

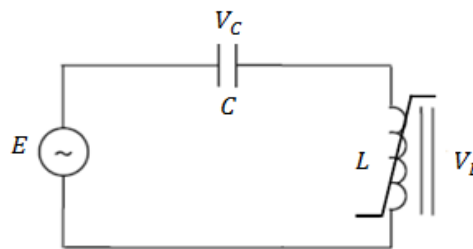
۲- فرورزونانس

فرورزونانس یا تشدید آهنی یک پدیده غیرخطی می باشد که بین خازن شبکه نظیر خازن کابل ها، خطوط، خازن کلید قدرت و بانندوکتانس غیرخطی تجهیزاتی نظیر ترانسفورماتورها رخ می دهد [۱۷]. با توجه به شکل (۱)، این پدیده هنگام بی باری و یا کم باری ترانسفورماتور در حالی که در نقطه ای دور از آن قطع تک فاز و یا دو فاز در اثر سوختن یکی از فیوزهای کات اوت صورت گیرد، در شبکه توزیع رخ می دهد.



شکل ۱- وقوع فرورزونانس در شبکه‌های توزیع

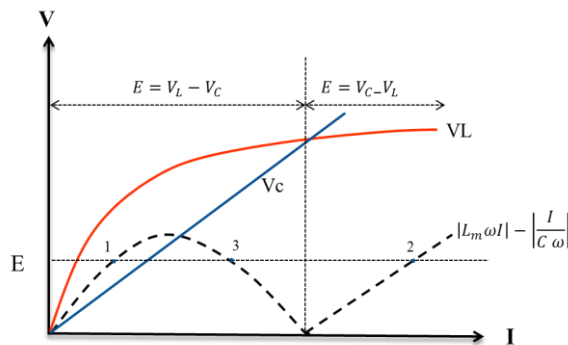
این پدیده اثرات تخریبی متعددی را بر روی شبکه دارد که از جمله آنها می‌توان به اضافه ولتاژ و جریان، ایجاد اعوجاج در شکل موج ولتاژ و جریان، ایجاد سروصدا، تخریب عایق ترانسفورماتور و ... اشاره کرد. مدار فرورزونانس با توجه به شکل (۲) متشکل از اتصال سری یک منبع متناوب V_s ، خازن C و اندوکتانس غیر خطی L می‌باشد که روابط بین المان‌های مدار به صورت رابطه ۱ می‌باشد.



شکل ۲- مدار فرورزونانس

$$|E| = |l_m \omega I| - \left| \frac{I}{C \omega} \right| = \left(l_m \omega - \frac{1}{C \omega} \right) |I| \quad (1)$$

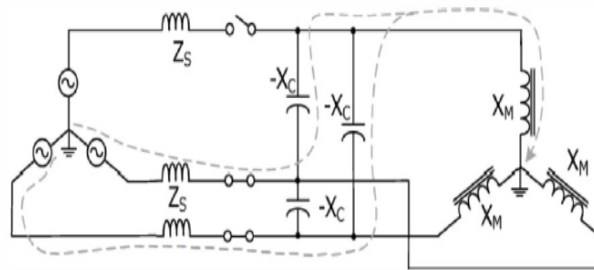
برای تعیین نقطه کار مدار غیر خطی می‌توان منحنی اختلاف ولتاژ $E = V_L - V_C$ را رسم کرد که تابع $V_L = f(I)$ به عنوان منحنی مغناطیس‌کنندگی هسته سیم‌پیچی در نظر گرفته می‌شود و ولتاژ دو سر خازن به صورت V_C در صفحه مختصات $V-I$ با ضریب زاویه $I/\omega C$ رسم شده است.



شکل ۳- نقطه کار فرورزونانس

منحنی خط‌چین در شکل (۳)، اختلاف حاصل از دو مشخصه سلفی و خازنی را نشان می‌دهد که با توجه به شکل، سه نقطه تلاقی به عنوان نقطه کار (۱، ۲ و ۳) برای مدار حاصل می‌شود. نقطه کار ۱ یک نقطه کار حالت پایدار بدون فرورزونانس، که در آن مدار در حالت سلفی قرار دارد و نقطه کار ۲ یک نقطه کار فرورزونانس پایدار، که مدار در حالت خازنی قرار دارد و نقطه کار ۳ یک نقطه کار ناپایدار مدار می‌باشد. در شبکه‌های سه فاز، عمده حالت‌های وقوع فرورزونانس بیشتر در شبکه‌های توزیع 10-35 KV با ترانسفورماتورهای که از طریق کابل تغذیه می‌شوند صورت می‌گیرد [۱۸]. در مورد این قضیه همانطور که در

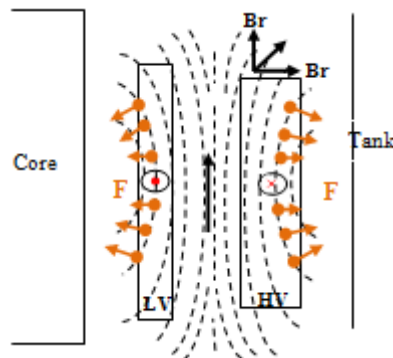
شکل (۴) مشاهده می‌گردد هنگامی که کلیدهای سه فاز به صورت صحیح عمل نکنند، جریان ممکن است از سیم‌پیچی اولیه و خازن بین خطوط مدار عبور کند که باعث به وجود آمدن مدار فرورزونانس می‌شود.



شکل ۴- وقوع فرورزونانس در شبکه سه فاز

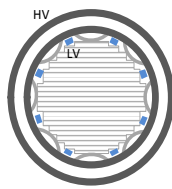
۳- نیروی الکترومغناطیسی

نیرو در اثر عمل متقابل بین جریان و بردار چگالی شار تولید می‌گردد و با توجه به این که بردار چگالی شار در دو جهت شعاعی و محوری می‌باشد، نیرو را می‌توان در دو جهت شعاعی و محوری بررسی نمود که در شکل (۵) جهت این نیروها نشان داده شده است. در ترانسفورماتورها جهت جریان در هادی‌های یک سیم‌پیچی هم جهت اما در سیم‌پیچی‌های بیرونی و داخلی به صورت مخالف می‌باشد. بنابراین نیروهای داخلی یک سیم‌پیچ در جهت فشردن حلقه‌های آن به یکدیگر به صورت محوری و نیروی بین دو سیم‌پیچی در جهت دفع سیم‌پیچی‌ها به صورت شعاعی از یکدیگر عمل می‌کند.

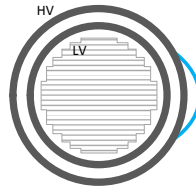


شکل ۵- جهت نیرو در سیم‌پیچی ترانسفورماتور

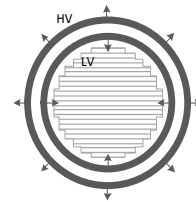
نیروی شعاعی در اثر متقابل بین جریان سیم‌پیچی و مولفه محوری چگالی شار پراکندگی به وجود می‌آید. همانطور که در شکل (۶) الف مشاهده می‌شود این نیرو باعث فشردن سیم‌پیچی درونی و باز شدن سیم‌پیچی بیرونی می‌گردد. هنگامی که در اثر وقوع اتصال کوتاه و یا فرورزونانس مقدار جریان افزایش پیدا کند، با توجه به تاثیر مستقیم جریان و نیرو، مقدار نیروی الکترومغناطیسی وارده بر سیم‌پیچی نیز افزایش پیدا می‌کند که در شرایط شدید می‌تواند باعث تغییر شکل سیم‌پیچی گردد. تغییر شکل سیم‌پیچی به دو صورت «forced» و «free» می‌باشد که در شکل (۶.ب) و (۶.ج) نشان داده شده است [۱۹]. در صورتی که تیرک‌های داخلی سیم‌پیچی استحکام کافی را نداشته باشند و رساناها از استحکام کمتری برخوردار باشند، با افزایش نیرو ممکن است تغییر شکل به صورت «forced» رخ دهد اما در صورتی که رساناها از استحکام کافی برخوردار باشند و تیرک‌ها استحکام لازم را نداشته باشند، در صورت ایجاد خطا و افزایش نیرو، ممکن است تغییر شکل به صورت «Free» صورت گیرد.



الف: نیروی شعاعی در سیم پیچی



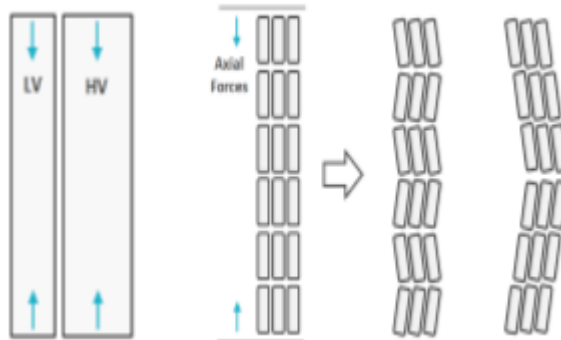
ب. تغییر شکل به صورت forced



ج. تغییر شکل به صورت free

شکل ۶- نیروی شعاعی

نیروی محوری در اثر عمل متقابل جریان سیم پیچی و مولفه عمودی شار پراکنده‌گی به وجود می‌آید که در جهت محوری سیم پیچی عمل می‌کند. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است این نیرو می‌تواند باعث فشرده شدن و در موارد شدیدتر خم شدن سیم پیچی در جهت محوری گردد [۲۰].



شکل ۷- نیروی محوری

۳-۱- محاسبه نیرو با استفاده از روش عددی

نیروی الکترومغناطیسی با توجه به چگالی شار مغناطیسی در ترانسفورماتور محاسبه می‌گردد. هنگامی که جریان در سیم پیچی‌های ترانس برقرار است معادله حاکم بر میدان مغناطیسی به صورت زیر می‌باشد [۲].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

$$B = \nabla \times A$$

که در این رابطه μ پرمابلیته مغناطیسی، A بردار پتانسیل مغناطیسی، J_s چگالی جریان و σ ضریب هدایت می‌باشد. نیروی الکترومغناطیسی وارده بر سیم پیچی‌های یک ترانسفورماتور می‌تواند با استفاده از جریان عبوری از سیم پیچی و چگالی شار مغناطیسی محاسبه گردد که با توجه به قانون لورنتز، طبق رابطه ۳ داریم:

$$df = idl \times B \quad (3)$$

که در آن B بردار چگالی شار می‌باشد:

$$B_r = -\sigma \frac{\partial A_\phi}{\partial z}$$

$$B_\phi = 0$$

$$B_z = \frac{1}{r} \sigma \frac{\partial A_\phi}{\partial r} \quad (4)$$

که B_z ، $B\phi$ و Br مولفه‌های چگالی شار مغناطیسی در دستگاه استوانه‌ای می‌باشند. به دلیل اینکه چگالی شار مغناطیسی دارای دو مولفه شعاعی و محوری می‌باشد، چنین می‌توان نتیجه گرفت که نیرو نیز در دو مولفه محوری و شعاعی به سیم‌پیچی وارد می‌شود که در زیر نشان داده شده است:

$$F = \int_V J_\phi \times (B_r \hat{r} + B_z \hat{z}) dv = F_r \hat{r} + F_z \hat{z} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_r &= B_z \times J_\phi \\ F_z &= B_r \times J_\phi \end{aligned} \quad (6)$$

همان‌طور که در بالا نشان داده شده است نیروی شعاعی به مولفه محوری چگالی شار و نیروی محوری به مولفه شعاعی چگالی شار مغناطیسی بستگی دارند.

۳-۲- محاسبه نیرو با استفاده از روش تحلیلی

روش تحلیلی به منظور محاسبه نیروی الکترومغناطیسی شعاعی به صورت خطی و کاملاً ایده‌آل در نظر گرفته شده است. در شرایط نرمال، چگالی شار محوری بیشترین مقدار خود را در مرکز سیم‌پیچی و کمترین مقدار را در لبه‌های سیم‌پیچی دارد. با فرض اینکه تمام خطوط شار در بین دو سیم‌پیچی به صورت محوری قرار دارند و با توجه به اینکه نیروی شعاعی از اثر متقابل جریان و چگالی شار محوری به وجود می‌آید، نیروی شعاعی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۲۱]:

$$B_a = \frac{4\pi(NI)}{10^4} [T] \quad (7)$$

$$F_r = \frac{2\pi(NI)^2 D_m}{h \times 10^7} [N] \quad (8)$$

که در این روابط I مقدار جریان سیم‌پیچی ترانسفورماتور، N تعداد دور هر سیم‌پیچی، h ارتفاع و D_m قطر متوسط سیم‌پیچی می‌باشد. محاسبه تحلیلی نیروی محوری به راحتی محاسبه نیرو در حالت شعاعی نیست به همین خاطر از روش آمپر دور اضافه، به صورت تقریبی استفاده می‌گردد. طبق این روش مقدار نیروی محوری به صورت زیر بیان می‌شود:

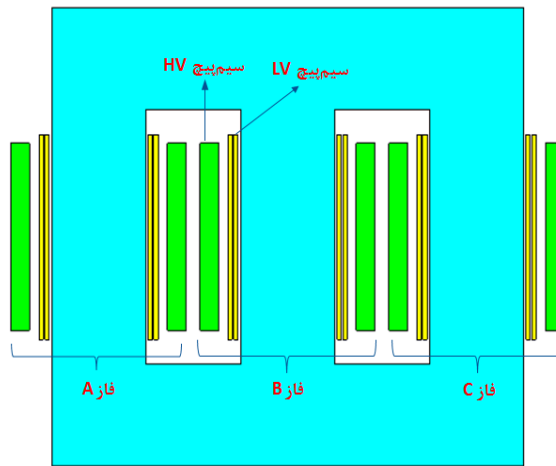
$$B_r = \frac{4\pi}{10^4} \times \frac{a(NI)}{2h_{eff}} [T] \quad (9)$$

$$F_a = \frac{2\pi a(NI)^2}{10^7} \times \frac{\pi D_m}{h_{eff}} [N] \quad (10)$$

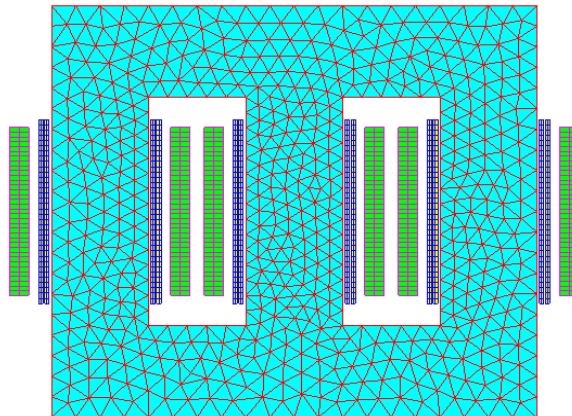
که در این رابطه، a اختلاف ارتفاع سیم‌پیچی‌ها و h_{eff} طول موثر خطوط شار پراکندگی سیم‌پیچی می‌باشد. مقدار نیروی محوری بسته به نوع سیم‌پیچ متفاوت می‌باشد [۲۲].

۴- مطالعه موردی

شکل‌های (۸) و (۹) یک مدل دو بعدی از یک ترانسفورماتور 25KVA با اتصال Yz به همراه ساختار مش بندی شده آن را نشان می‌دهند که برای سهولت شبیه‌سازی از محافظ‌ها و عایق‌ها صرف نظر شده است. جهت شبیه‌سازی ترانسفورماتور با استفاده از نرم‌افزار المان محدود و حصول نتایج ابتدا هندسه و ساختار دقیق ترانسفورماتور شامل هسته و سیم‌پیچی‌ها رسم شده است. سپس به مش‌بندی ساختار، تعیین شرایط اولیه و شرایط بار گذاری پرداخته شده است. نرم افزار مورد استفاده در این مقاله جهت بررسی حالت وقوع فرورزونانس، نرم‌افزار Flux 10.3 می‌باشد.



شکل ۸- مدل دو بعدی ترانسفورماتور



شکل ۹- ساختار مش بندی شده ترانسفورماتور

مشخصات ترانسفورماتور مورد مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است. شبکه مورد استفاده در این مقاله برگرفته شده از یک شبکه توزیع با کابل خود نگهدار فشار متوسط، شامل سه رشته کابل مطابق با شکل ۴ می باشد که اطلاعات مربوط به کابل آن در جدول ۲ نشان داده شده است. به منظور ایجاد شرایط فرورزونانس با قرار دادن یک کلید در مسیر یکی از فازهای سیم پیچی فشار قوی و قطع آن در زمان ۰.۳ ثانیه شرایط برای بروز پدیده فرورزونانس مطابق شکل (۴) مهیا گردیده است. در این حالت ترانسفورماتور در حالت بی باری قرار دارد.

جدول ۱- مشخصات ترانسفورماتور

ولتاژ نامی	۲۰ Kv/۴۰۰ v
جریان نامی	A ۳۶/A ۰.۷
تعداد دور	۵۰۲۳/۱۱۶
نوع اتصال	Yzn5
ساختار سیم پیچی	لایه ای / لایه ای
سیستم خنک کنندگی	ONAN
توان نامی	KVA ۲۵
فرکانس	Hz ۵۰

جدول ۲- مشخصات کابل خود نگهدار

KV۲۰	ولتاژ تغذیه
$\Omega/\text{km} \cdot 0.148$	راکتانس
$\text{mH}/\text{km} \cdot 0.438$	اندوکتانس
$\mu\text{F}/\text{km} \cdot 0.207$	کاپاسیتانس

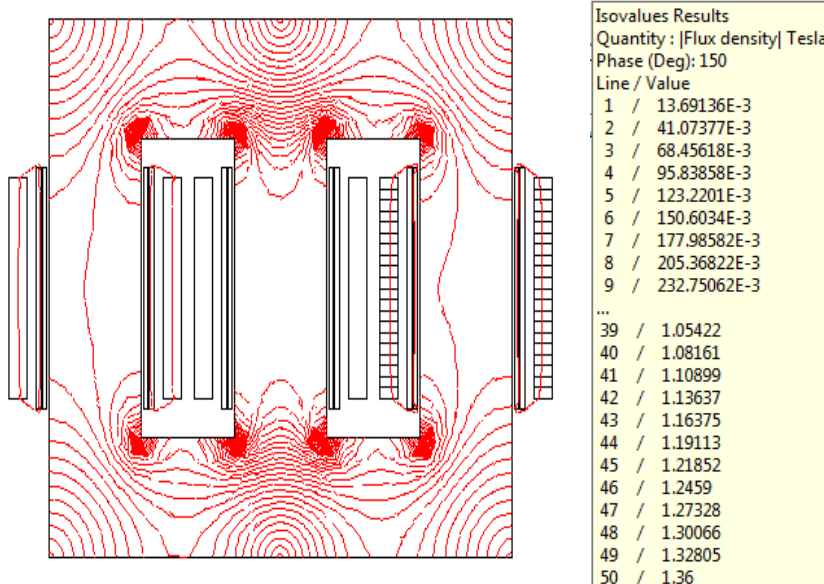
در جدول (۳) مقایسه‌ای بین نتایج تحلیلی و اجزاء محدود به منظور بررسی نیرو در شرایط کارکرد نرمال ترانس آورده شده است که نشان دهنده درستی و صحت مدل می‌باشد.

جدول ۳- مقایسه نتایج بین روش اجزاء محدود و تحلیلی

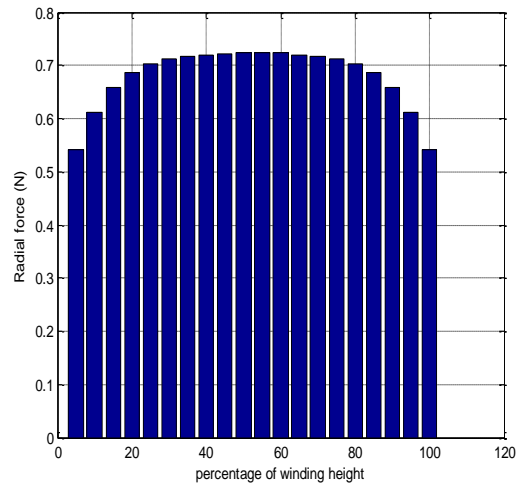
روش تحلیلی	روش اجزاء محدود	
۱۴	۱۲.۷	نیروی شعاعی سیم‌پیچی (N) فشار قوی
۰.۰۰۵۹	۰.۰۰۰۵	نیروی محوری سیم‌پیچی (N) فشار قوی

۴-۱- توزیع نیرو در شرایط نرمال

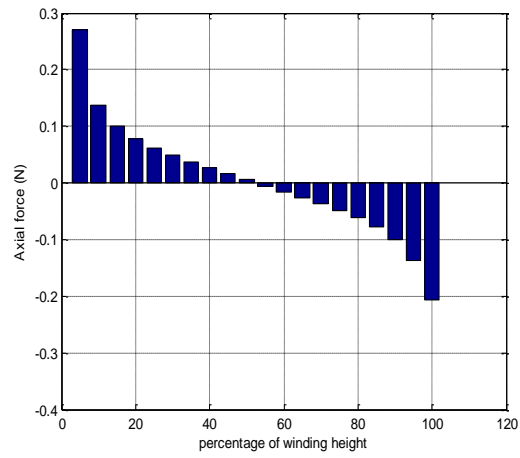
هنگامی که ترانسفورماتور در شرایط نرمال قرار دارد جریان عبوری از سیم‌پیچی‌ها، نسبت به حالت فرورزونانس کم می‌باشد در نتیجه نیروی الکترومغناطیسی وارده به سیم‌پیچی کمتر از حالت وقوع فرورزونانس می‌باشد. در این قسمت با در نظر گرفتن مدل دو بعدی ترانسفورماتور و با تقسیم سیم‌پیچی HV یکی از فازها به چند ناحیه، به بررسی توزیع نیرو در شرایط نرمال در طول سیم‌پیچی پرداخته شده است. چگالی شار مغناطیسی، توزیع نیروی شعاعی و محوری، به ترتیب مطابق شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) در حالت قبل از وقوع فرورزونانس در شرایط کاری نرمال و پایدار ترانسفورماتور در زیر نمایش داده شده است. همچنین شکل‌های (۱۳) و (۱۴) مقدار نیروی اعمالی به سیم‌پیچی ترانسفورماتور در شرایط کاری نرمال و حالت گذرا را نشان می‌دهند.



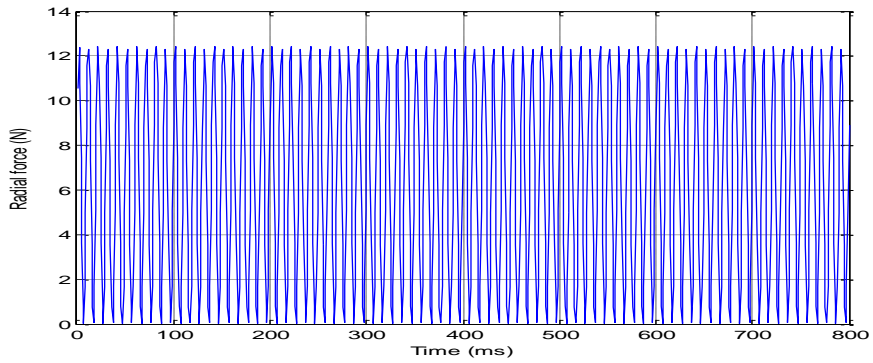
شکل ۱۰- چگالی شار مغناطیسی در شرایط نرمال



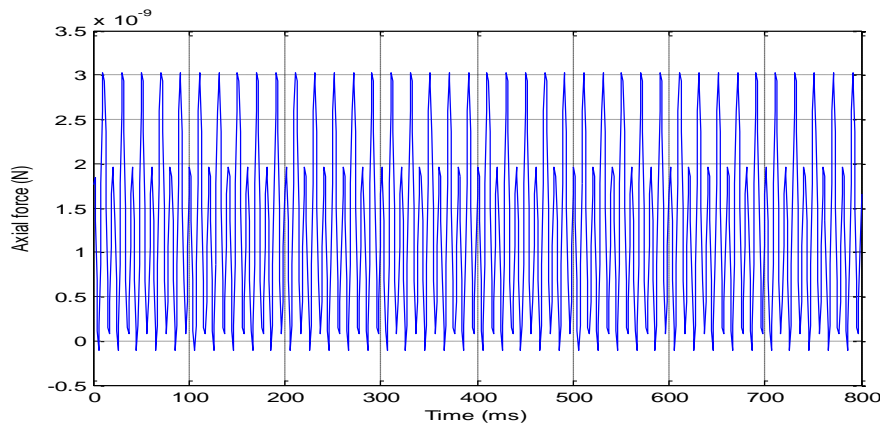
شکل ۱۱- توزیع نیروی شعاعی بر روی سیم پیچی در شرایط کاری نرمال



شکل ۱۲- توزیع نیروی محوری بر روی سیم پیچی در شرایط کاری نرمال



شکل ۱۳- نیروی شعاعی گذرای سیم پیچی در شرایط کاری نرمال

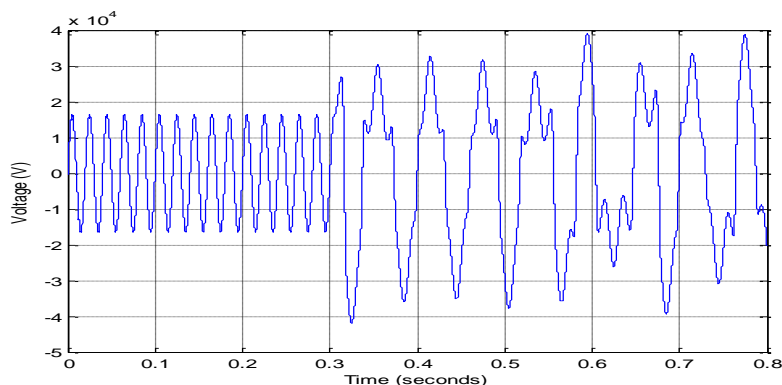


شکل ۱۴- نیروی گذرای محوری سیم پیچی در شرایط کاری نرمال

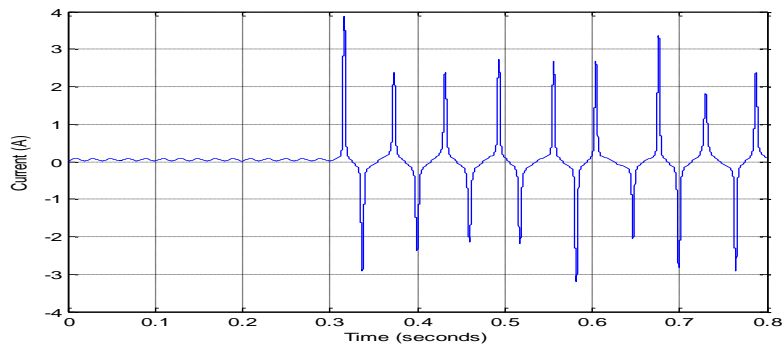
با توجه به شکل (۱۱) چنین نتیجه می شود که مقدار این نیرو در مرکز سیم پیچی بیشترین مقدار خود را دارد، به این دلیل که خطوط شار در مرکز سیم پیچی به صورت محوری می باشند. هر چه از مرکز سیم پیچی به سمت لبه های سیم پیچی برویم خطوط شار بیشتر به حالت شعاعی نزدیک می شوند که باعث کاهش نیروی شعاعی می گردد. همانطور که در شکل (۱۱) می بینیم این نیرو در جهت شعاعی و مثبت وارد می گردد که باعث باز شدن سیم پیچی HV به سمت خارج می گردد. با توجه به شکل (۱۲) اینگونه نتیجه می شود که نیروی محوری در مرکز سیم پیچی مقدار کمی دارد و رفته رفته که به لبه های سیم پیچی نزدیک می شویم به مقدار ماکزیمم خود می رسد علت این موضوع آن می باشد که خطوط شار در لبه های سیم پیچی به صورت شعاعی و در مرکز سیم پیچی به صورت محوری می باشند. در حالت نرمال مقدار این نیروی محوری نزدیک به صفر می باشد و علت این که نیمی از سیم پیچی دارای نیروی مثبت و نیمی دیگر دارای نیروی منفی می باشد، به این خاطر است که جهت مولفه شعاعی شار در دو لبه سیم پیچی مخالف یکدیگر می باشد که سبب وارد شدن نیرو در دو جهت مخالف، و در نتیجه فشرده شدن سیم پیچی می گردد. شکل های (۱۳) و (۱۴) تغییرات نیروی دینامیکی شعاعی و محوری وارده بر سیم پیچی را نشان می دهند که در شکل (۱۳) حداکثر مقدار نیروی شعاعی برابر با ۱۲ نیوتن و در شکل (۱۴) مقدار برآیند نیروی محوری برابر با صفر می باشد.

۴-۲- بررسی نیرو در حین وقوع فرورزونانس

به منظور بررسی نیروی الکترومغناطیسی وارده بر سیم پیچی در حالت فرورزونانس، ترانسفورماتور بدون بار تغذیه شده با طول کابل ششصد متر در نظر گرفته شده است که ظرفیت خازنی در این حالت برابر با 120 nF می باشد و در لحظه ۰.۳ ثانیه یکی از فازهای ترانسفورماتور بدون بار قطع می گردد تا در این مقدار حداکثر پالس های جریان ناشی از فرورزونانس ظاهر گردند. هنگامی که ترانسفورماتور به ازای این مقدار ظرفیت خازنی در حالت فرورزونانس قرار گیرد، اضافه ولتاژ و اضافه جریان هایی پالسی مطابق با شکل (۱۵) و (۱۶) بر روی سیم پیچی ترانسفورماتور ظاهر می گردد.

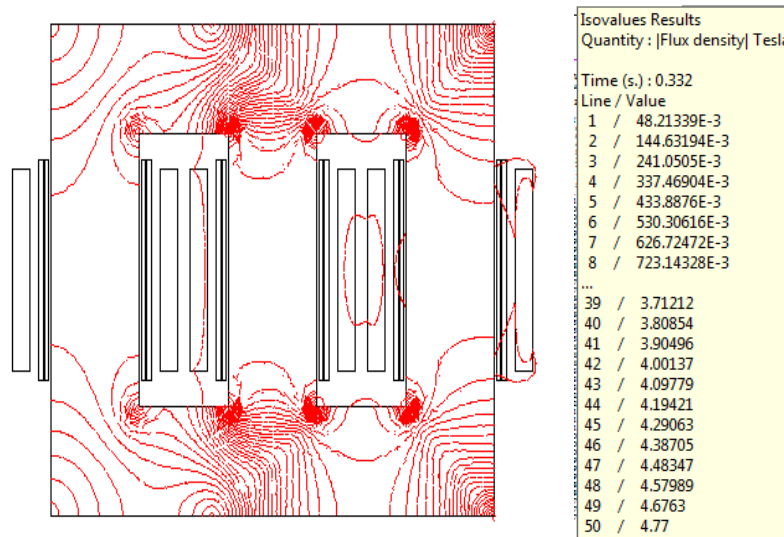


شکل ۱۵- شکل موج ولتاژ فاز سیم پیچی در زمان وقوع فرورزونانس

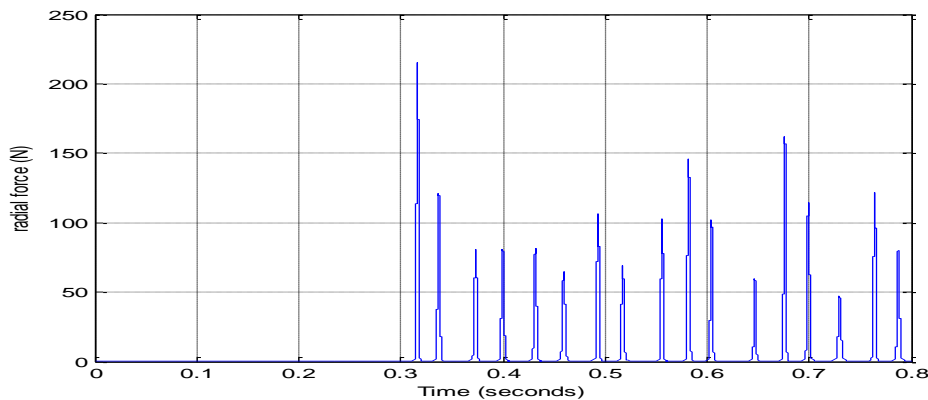


شکل ۱۶- شکل موج جریان سیم پیچی در زمان وقوع فرورزونانس

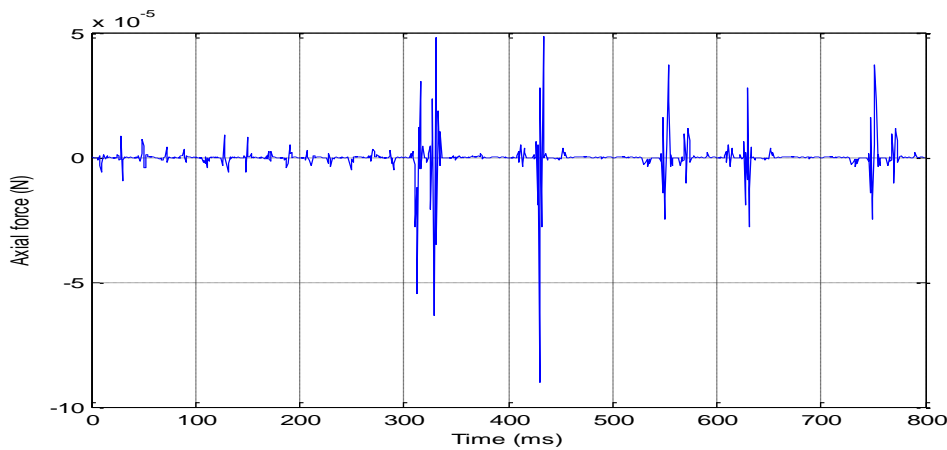
با توجه به شکل (۱۶) مشاهده می گردد که با به وقوع پدیده فرورزونانس، جریان هایی پالسی با دامنه حدود سه برابر جریان نامی از ترانسفورماتور عبور می کند که سبب می گردد سیم پیچی ترانسفورماتور تحت تاثیر نیروی دینامیکی شدیدی قرار بگیرد. شکل های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) چگالی شار مغناطیسی، نیروی شعاعی و نیروی محوری را در حین وقوع فرورزونانس را نشان می دهند.



شکل ۱۷- چگالی شار مغناطیسی در حین وقوع فرورزونانس



شکل ۱۸- نیروی شعاعی وارده بر سیم پیچی در حین وقوع فرورزونانس



شکل ۱۹- نیروی محوری وارده بر سیم پیچی در حین وقوع فرورزونانس

با توجه به مقادیر شکل (۱۷) مشاهده می گردد که در حالت فرورزونانس چگالی شار در مقایسه با شرایط نرمال افزایش یافته است. نیروی شعاعی در حالت فرورزونانس مطابق با شکل (۱۸) در بدترین شرایط نزدیک به ۲۰۰ نیوتن می باشد که در مقایسه با شرایط نرمال کاری ترانسفورماتور مقدار زیادی می باشد. این افزایش نیرو می تواند باعث وارد شدن خسارات شدیدی به سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور گردد. با توجه به شکل (۱۹) همان گونه که نشان داده شده است مقدار نیروی محوری در حالت فرورزونانس نیز ناچیز می باشد که علت این امر ناشی از آن می باشد که مولفه محوری شار در دو نیمه سیم پیچی تغییر جهت داشته است و سبب گرده که مقدار برآیند این صفر باشد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود، با مدلسازی اجزاء محدود ترانسفورماتور در وضعیت فرورزونانس و توصیف رفتار ترمینالی ترانسفورماتور در این وضعیت، به محاسبه نیروهای الکترومغناطیسی ناشی از جریان های پالسی فرورزونانس بر روی یک ترانسفورماتور توزیع پرداخته شد. نتایج حاصل از مطالعه، وجود نیروهای شعاعی بیش از ۱۰ برابر بر روی سیم پیچی های ترانسفورماتور را نشان می دهد. این افزایش نیرو می تواند باعث وارد شدن خسارات شدیدی به سیم پیچی اولیه ترانسفورماتور و به تبع آن، ایجاد خطاهای مکانیکی بر روی سیم پیچی شود. همچنین این اضافه جریان ها می توانند باعث افزایش نیروی محوری گردد، اما با توجه به این که نیروی محوری در راستار محور در دو جهت مخالف وارد می گردد برآیند این نیرو نیز در حالت فرورزونانس برابر با صفر می باشد. درک صحیح از نیروهای اعمالی به سیم پیچی های ترانسفورماتور و توصیف دقیق آن، موضوعی که در طی این مقاله به آن پرداخته شد، نقش مهمی در مرحله طراحی الکتریکی و مکانیکی ترانسفورماتور و سیم پیچی ها آن خواهد داشت.

۶- مراجع

1. Steurer, Michael, and Klaus Fröhlich. "The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 17.1, pp. 155-160, 2002.
2. Ahn, Hyun-Mo, et al. "Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer." *Industry Applications, IEEE Transactions on* 47.3, pp. 1267-1272, 2011.
3. Bátorá, Branislav, and Petr Toman. "Using of PSCAD Software for Simulation Ferroresonance Phenomenon in the Power System with the Three-phase Power Transformer." *TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENGINEERING* 102. 2013.
4. Charalambous C, Wang ZD, Osborne M, Jarman P. Sensitivity studies on power transformer ferroresonance of a 400 kV double circuit. *Gener Trans Distri, IET*;2(2):159-66. 2008.

5. field-Bakar AHA, Rahim NA, Zambri MKM. Analysis of lightning-caused ferroresonance in Capacitor Voltage Transformer (CVT). *Electric Power Energy Syst*;33:1536–41. 2011.
6. Radmanesh H, Rostami M. Effect of circuit breaker shunt resistance on chaotic ferroresonance in voltage transformer. *Adv Electric Comput Eng*;10(3):71–7. 2010.
7. Barbisio E, Bottauscio O, Chiampi M, Crotti G, Giordano D. Parameters affecting ferroresonance in LCR electric circuits. *IEEE Trans Magn*;44(6):870–3. 2008.
8. Model for ferroresonance analysis of a transformer. *IEEE Trans Power Deliv*;23(3):1448–56. 2008.
9. Milicevic Kruno, Emin Zia. Impact of initial conditions on the initiation of ferroresonance. *Electric Power Energy Syst*;31:146–52. 2009.
10. Li Yunge, Shi Wei, Li Furong. Novel analytical solution to fundamental ferroresonance power frequency excitation characteristic. *IEEE Trans Power Deliv*;21(2):788–93. 2006
11. Moses PS, Masoum MAS, Toliyat HA. Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers. *IEEE Trans Energy Convers*;26(2):581–92. 2011.
12. Piasecki W, Florkowski M, Fulczyk M, Mahonen P, Nowak W. Mitigating ferroresonance in voltage transformers in ungrounded MV networks. *IEEE Trans Power Deliv*;22(4):2362–9. 2007.
13. Lima L, Semlyen A, Iravani RM. Harmonic domain periodic steady-state modeling of power electronics apparatus: SVC and TCSC. *IEEE Power Eng Rev*:56. 2002.
14. Tseng KH, Cheng PY. Mitigating 161 kV electromagnetic potential transformers' ferroresonance with damping reactors in a gas-insulated switchgear. *Gener Trans Distrib – IET*;5(4):479–88. 2011.
15. Charalambous CA, Wang ZD, Jarman P, Sturgess JP. Frequency domain analysis of a power transformer experiencing sustained ferroresonance. *Gener Trans Distrib – IET* 2011;5(6):640–9.
16. Kavasserri Rajesh G. Analysis of subharmonic oscillations in a ferroresonant circuit. *Electric Power Energy Syst*;28:207–14. 2005.
17. Moses, Paul S., Mohammad AS Masoum, and Hamid Toliyat. "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers." *Energy Conversion, IEEE Transactions on* 26.2 581-592. (2011).
18. Hanjie Kong; Baohui Zhang; Zhiqian Bo, "A novel ferroresonance recognition method based on the excitation characteristic of potential transformer," in *Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on*, vol., no., pp.121-126, 20-22 Oct. 2014
19. Rasheed, K. "Finite element calculation of leakage reactance in distribution transformer wound core type using energy method." *Journal of Engineering and Development* 16, pp. 297-320. 2012.
20. Bagheri, Mehdi, Mohammad Salay Naderi, and Trevor Blackburn. "Advanced transformer winding deformation diagnosis: moving from off-line to on-line." *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on* 19.6, pp. 1860-1870. 2012.
21. Kulkarni, Shrikrishna V., and S. A. Khaparde. *Transformer engineering: design and practice*. Vol. 25. CRC Press, 2004.
22. De Azevedo, Ana C. "Investigation of transformer electromagnetic forces caused by external faults using FEM." *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES. IEEE*, 2006.

Abstract

Ferroresonance is a non-linear resonance which occurs between the capacitors of the cables, lines, and breakers and nonlinear inductance of the reactors and transformers when their core is saturated. Due to ferroresonance, it has been proved that large pulse currents pass through the transformer winding which seems to cause severe electromagnetic forces on the transformer windings. This research work is aimed at characterizing the transformer behavior at ferroresonance mode and calculation of the electromagnetic forces applied on the windings. To this end, a 2D FEM model of a 25KVA distribution transformer is developed. The accuracy of the FEM model is validated by comparing the FEM results and those obtained from the analytical methods. The results of this study are of great importance in the electrical and mechanical design of transformers and their windings.