رزونانس و فرورزونانس در شبکه های توزیع

علی رضائی
صنایع چوب و کاغذ مازندران

حسین افضلی
شرکت توزیع نیروی برق غرب مازندران

(اعضای هیئت مدیره انجمن مهندسین برق و الکترونیک مازندران)

کلمات کلیدی : رزونانس ، فرورزونانس ، شبکه ، توزیع ، پایداری

چکیده

بعلت اهمیت پدیده رزونانس و فرورزونانس در شبکه های توزیع ، بررسی و حل این پدیده میتواند منجر به پایداری بیشتر و بهره برداری اقتصادی تر از شبکه های توزیع شود ایجاد رزونانس و فرورزونانس در شبکه های توزیع موجب افزایش ولتاژ و صدمه به تجهیزات و اختلال در شبکه ، آسیب به ایزولاسیون تجهیزات ، لرزش در بدنه و هسته ترانسفورمرها و سوختن برقگیرها و سرکابلها و.. می شود علت ایجاد این پدیده هارمونیکها ، اشباع هسته ، تغییر اندوکتانس سیم پیچی، قطع یک یا دو فاز سیستم، بارنامتقارن ، استفاده بی مورد از فیوز و فیوزکات اوت ، استفاده از کابلها با خاصیت خازنی بالا و... می باشد جهت احتراز از ایجاد این پدیده محدود نمودن طول کابل بین کلید و ترانسفورمر اجتناب از پیش بینی فیوز بین ترانسفورمر و کلید و تجهیزات وصل مجدد تکفاز و انتخاب کلید با ترتیب مناسب وصل فازها و زمین نمودن نقطه نول ترانسفورمر با اتصال ستاره و از طریق مقاومت اهمی می باشد.

مقدمه

بررسی پدیده رزونانس و فرورزونانس در سیستمهای توزیع انرژی و مطالعه راهکارهای مقابله با آن و مرتفع نمودن معایب و عوارض ناشی از آن ، سبب عدم قطع بی مورد ، پایداری بالا و بهره برداری بهینه از شبکه خواهد شد خسارتهای ناشی از ایجاد این پدیده از نظر اقتصادی و فنی قابل تامل بوده و درصورت بکار بستن راه حلهای اصولی ، موجب جلوگیری از خسارتهای سنگین فنی و اقتصادی خواهد شد.

عوامل موثر در ایجاد رزونانس و فرورزونانس در سیستمهای توزیع عبارتند از هارمونیکها ، اشباع هسته تغییر اندوکتانس سیم پیچی ، قطع یک یا دو فاز سیستم ، بار نامتقارن ، استفاده بی مورد از فیوزها استفاده از کابلها با خاصیت خازنی بالا و ... می باشند و نیز برای حذف این پدیده ، راهکارهایی نظیر ، محدود نمودن طول کابل بین کلید و ترانسفورمر و عدم نصب فیوز بین ترانسفورمر و کلید و تجهیزات وصل مجدد تکفاز و پیش بینی کلیدهای مناسب وصل فازها و زمین کردن نقطه نول ترانسفورمر با اتصال ستاره از طریق مقاومت اهمی پیشنهاد می شود.

شرح پدیده رزونانس و فرورزونانس

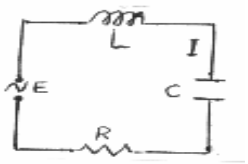
پدیده رزونانس

در مدارهایی که از خازن و سلف استفاده میشود ، در شرایط خاصی ، کمیات ولتاژ و جریان مدار برای مدت زیادی از مقادیر قابل توجهی برخوردار میشوند افزایش قابل ملاحظه این مقادیر جریان با توجه به وجود خاصیت خازنی C و خاصیت القایی L سبب از بروز پدیده ای موسوم به رزونانس می شود مداراتی که شامل خازن ، سلف و مقاومت اهمی مطابق شکل A باشد مقاومت کل مدار برابراست $Z = j\omega l_1 + R + \frac{1}{j\omega_c}$ ، بطوریکه

ولتاژ دوسر این المانها در یک امتداد نبوده ولتاژ دو سرخازن **c** و سیم پیچی **L** در امتداد مشترک عمود بر امتداد **R** واقع اند.

با توجه به برقراری جریان **I** ، ولتاژ تغذیه مدار برابراست با :

$$E = j\omega lI + RI + \frac{1}{j\omega c}.I$$

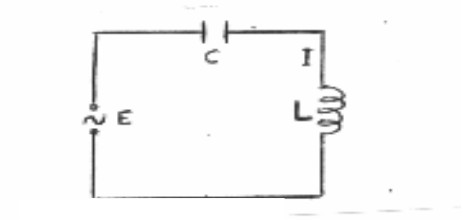


شکل **A** . مدار شامل

تغییرات ولتاژ دو سرخازن **c** و یا دو سر مقاومت **L** برحسب فرکانس ، جریان شرایط بروزرزونانس در مدار هنگامی فراهم میشود که فرکانس ولتاژ تغذیه تغییر میکند با تغییر فرکانس مقاومت سیم پیچی و خازن ، در دو جهت مخالف هم تغییر میکند ، در هنگام بروز رزونانس برابر شده ، اثر یکدیگر را خنثی میکنند که سرعت زاویه ای حاصل از رابطه زیر به سرعت زاویه ای طبیعی مدار موسوم است : $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\omega_n}$. بدین ترتیب بروز رزونانس در مدارهای الکتریکی مستلزم تغییر فرکانس ولتاژ تغذیه و تبدیل آن به فرکانس رزونانس است در کلیه مدارهای الکتریکی ، به حسب نوع مدار و تجهیزات موجود در شبکه ، ولتاژ تناوبی شبکه سینوسی کامل نبوده و ولتاژ غیر سینوسی با فرکانس ۵۰ به مولفه های سینوسی ولتاژ با فرکانسهای مختلف قابل تجزیه است به این ترتیب ولتاژ غیر سینوسی تغذیه متشکل از مولفه های سینوسی با فرکانسهای گوناگون است چنانچه فرکانس رزونانس مدار طبق را بطه $I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{c\omega}\right)^2}}$ نزدیک به فرکانس هریک از مؤلفه های فوق باشد روزنانس به ازای مولفه فوق روی داده دامنه مؤلفه تا بالاترین مقدار افزایش خواهد یافت. و سبب خسارتهای فراوانی به تجهیزات سیستمهای توزیع میشود.

پدیده فرورزونانس

از آنجائیکه فرورزونانس یک پدیده نوسانی اثر خازنی و اندوکتانس غیر خطی ترانسفورمردر مداری که از ترکیب سری دو عامل فوق پدید میآید اضافه ولتاژ و جریانهای گذرا و ماندگار حاصل از رزونانس این مدار میتوانند به تجهیزات سیستمهای توزیع خسارات فراوانی وارد کنند لذا با یک مثال مقادیر اضافه ولتاژ های ناشی از رزونانس سری مدار شامل سلف و خازن نشان داده میشود.



شکل **B**. . مدار سری

ولتاژ E_l دو سر سلف و E_c دو سرخازن از فرمول

$$E_c = \frac{E}{(1 - x_l / x_c)}, E_l = \frac{E}{(1 - x_c / x_l)}$$

محاسبه میشود که ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند اگر نمائیم $\frac{x_l}{x_c} = 0.8$ باشد مقدار E_c, E_l میشود

$$E_c = \frac{E}{(1 - x_l / x_c)} = \frac{E}{(1 - 0.8)} = 5E$$

$$E_l = \frac{E}{(1 - x_c / x_l)} = \frac{E}{(1 - 1.25)} = -4E$$

یعنی ولتاژ دو سر سلف ۴ برابر ولتاژ منبع و ولتاژ دو سرخازن ۵ برابر منبع است که مقدار آن زیاد میباشد و امکان صدمات شدید به تجهیزات را زیاد میکند. اگر مقدار راکتانس سلف ثابت باشد اما عواملی مانند ترانسفورمر توزیع ،

ترانسفورمرولتاژ و راکتور قابل اشباع، بدلیل اثراشباع دارای راکتانس سلفی غیرخطی هستند. تجهیزات غیرخطی در نزدیکی نقطه اشباع کارمیکنند آنطوریکه تاثیر یک اغتشاش امکان اشباع را فراهم میکند در زون اشباع راکتانس سلفی مقدار متفاوتی پیدا میکند که امکان دارد هریک از این مقادیر تحت شرایط خاص پدیده فرو رزونانس بوجود آید.

از طرفی با توجه به خصوصیات مناسب شبکه های توزیع ، بروز پدیده های رزونانس در این شبکه ها بسیار معمول است ، زیرا استفاده عمده از فیوز کات اوت و کابلها با خاصیت خازنی قابل ملاحظه در مقایسه با خطوط هوایی ، شرایط بروز این دو پدیده را در این شبکه ها فراهم می سازد با سوختن فیوز در یکفاز و یا قطع یکفاز توسط فیوز کات اوت ، شرایط مناسب بروز پدیده فراهم می شود.

بروز پدیده فرورزونانس در شبکه های توزیع با افزایش ولتاژ و صدمه به ایزولاسیون تجهیزات از جمله برقگیرها ، کابلها و ترانسفورمرها همراه است که ترکیدن سرکابلها و انفجار برقگیرها را موجب می شود بعلاوه جریان نشتی برقگیرهای غیر خطی را افزایش میدهد

و از عمر و دوام آنها می کاهد بنابراین بررسی در شرایط بروز پدیده و راهکارهای مقابله با آن در شبکه های توزیع حائز اهمیت است.

خصوصیات و شرایط بروز پدیده

پدیده فرو رزونانس در برابر خاصیت خازنی مناسب C و اندوکتانس L به ازای مقادیر اسمی ولتاژ و جریان روی می دهد. هنگامیکه هسته های فرومغناطیسی تجهیزات ولتاژ متوسط اشباع و در مدار با خاصیت خازنی C واقع شوند ، شرایط بروز پدیده فراهم خواهد شد. در شبکه های توزیع ، ترانسفورمرها بطور عمده توسط کابلهای ۲۰ KV تغذیه می شوند و کابلها از خاصیت خازنی بالا برخوردارند و بطور سری با سیم پیچی ترانسفورمرها مجهز به هسته فرومغناطیسی قرار میگیرند.

کابلهای فوق در محل انشعاب از خط اصلی ، به فیوز و یا فیوز کات اوت مجهزند در صورت سوختن فیوزها یا قطع یک یا دو فاز ، ترانسفورمر و کابل تغذیه آن بصورت تکفاز و دو فاز تحت ولتاژ واقع شده ، در این حالت شرایط بروز رزونانس در مدار های بسته دو فاز و یا تکفاز فراهم می شود مدار بشرح فوق ، تنها در شبکه های توزیع 20 KV مشاهده می شود خصوصیات مدار یا از نظر بروز پدیده فرورزونانس و روش مقابله با آن بدین شکل است از آنجائیکه مدارها شامل کابلها با خاصیت خازنی بالا

و اتصال مستقیم به ترانسفورمرها از طریق فیوز و فیوزکات اوت تنها در شبکه های توزیع معمول بوده ، درپی سوختن فیوز در یکفاز شرایط بروز پدیده فراهم می شود شرایط مناسب بروز پدیده طی رژیم گذرا و ظهور اضافه ولتاژهای موقت با دامنه بالا درپی بروز عیب و یا بروز رزونانس و افزایش قابل ملاحظه مقدار جریان و اشباع هسته مغناطیسی فراهم شده درصورت بروز پدیده رزونانس و افزایش قابل ملاحظه ولتاژ، هسته مغناطیسی سیم پیچها اشباع شده، بروز پدیده فرو رزونانس را موجب می شود اشباع هسته سیم پیچها و بروز پدیده فرو رزونانس با اضافه ولتاژها از نوع موقت، همراه بوده و دارای دامنه ضربه ای با فرکانس چند سیکل بر ثانیه خواهد بود. نمونه آن درشکل (۱-۱) نشان داده شده است . افزایش ولتاژ بشرح فوق به مدت طولانی خود بالغ برچند سیکل فرکانس ۵۰ ایزولاسیون داخلی تجهیزات توزیع از جمله ترانسفورمرها ، کابلها ، سرکابلها و ترانسفورهای ولتاژ را تهدید می کند. و شرایط بروز قوس و تخلیه را در برقگیرها بدون فاصله هوایی فراهم می سازد در برقگیرهای غیرخطی ، اضافه ولتاژ ها جریان تخلیه برقگیر را تا چند برابر افزایش می دهد و انرژی حرارتی حاصل از آن دمای المانهای غیرخطی را سرعت افزایش داده و از عمر آنها بشدت می کاهد. مطالعات صورت گرفته نشان میدهد درصد عمده بروز عیب و آسیب در برقگیرهای غیر خطی در شبکه های توزیع از بروز پدیده فرو رزونانس ناشی می شود. بهمین علت درشبکه ها و مدارها باهسته های فرومغناطیسی که احتمال بروز پدیده بالاست حتی الامکان از برقگیرهای غیرخطی استفاده نمی شود بلکه از برقگیرها با فواصل هوایی استفاده می شود. بطور کلی بروز پدیده

فرو رزونانس در شبکه های توزیع مستلزم تشکیل مدار بسته بصورت مستقل از شبکه با خصوصیات زیر است.

۱- مدار بسته شامل خاصیت القایی ناشی از هسته مغناطیسی ، خاصیت خازنی و نیروی الکتروموتوری مناسب.

۲- برقراری جریان در مدار بسته با مقدار بالا و کافی بمنظور اشباع هسته مغناطیسی سیم پیچها

۳- امپدانس معادل شبکه از سمت سیم پیچیها با مشخصه خازنی (وجود خاصیت خازنی قابل ملاحظه در مدار) وجود مؤلفه فعال در امپدانس دیده شده (بند ۳) ضربات و نوسانات پدیده را در ولتاژ شبکه مستهلک می کند بهمین علت بالاترین مقدار اضافه ولتاژ ناشی از پدیده فرو رزونانس در شرایط بی باری و یا بار راکتیو خالص مشاهده می شود در شرایط معمول و متقارن بهره برداری که درآن تجهیزات با خاصیت خازنی نظیر خطوط بی بار و یا کابلهای زمینی وجود دارد و یا بانکهای خازنی بمنظور جبران قدرت راکتیو نصب شده اند ، خاصیت خازنی مدار با سیم پیچی مجهز به هسته فرومغناطیسی بطور موازی واقع بوده ، احتمال بروز پدیده فرو رزونانس بعلت عدم اشباع هسته مغناطیسی ناچیز خواهد بود با اینحال احتمال بروز پدیده در حالت نامتقارن کمیتهای مدار افزایش می یابد، عدم تقارن بطور عمده در هنگام قطع یک یا دو فاز شبکه روی می دهد بعنوان مثال هنگام وصل کلید ، بعلت اشکال و نقص فنی در کلید ، تنها یک یا دو فاز وصل شوند و یا درخط در حال بهره برداری با سوختن فیوز و یا کات اوت ، یک یا دو فاز قطع شوند. بروز نقص و اشکال مکانیکی کلید در هنگام وصل ، امکان پذیر است ولی عدم تقارن ناشی از سوختن فیوز و یا فیوز کات اوت تنها در شبکه های توزیع مشاهده می شود . زیرا در این شبکه ها از فیوز و فیوز کات اوت استفاده میشود، بهمین علت احتمال بروز پدیده در شبکه های توزیع بالاست . احتمال بروز پدیده هنگامیکه نقطه نول در شبکه توزیع و یا نقطه نول در ترانسفورمر مورد تغذیه زمین شده باشد ، کاهش می یابد و احتمال بروز پدیده با افزایش خاصیت خازنی مدار فزونی می یابد. در شبکه های توزیع که بطور عمده به کابلهای زمینی مجهزند ، بعلت خاصیت خازنی بیشتر کابلها نسبت به خطوط هوایی، احتمال بروز پدیده به علت عوامل ذیل افزایش می یابد. -وصل یکفاز خط سری یا کابل تغذیه ترانسفورمر و وجود ترانسفورمر در انتهای آن با اتصال ستاره مثلث (شکل ۱- ۲ الف).

۲-وصل دو فاز خط که ترانسفورمر با اتصال نول ایزوله را تغذیه میکند (هنگامیکه یکفاز خط سه فاز در حال بهره برداری قطع شده ویا سیم خط در یک فاز پاره شده باشد) (شکل ۱-۲ ب) .

۳-قطع یکفاز خط سه فاز در حال بهره برداری و اتصال فاز قطع شده با زمین (سیم فاز پاره شده با زمین تماس یابد) (شکل ۱-۲ ج).

۴-قطع کلید طرف دوم ترانسفورمر ، بطوریکه ترانسفورمر در شرایط بی باری واقع شود.

۴- خاصیت خازنی خط تغذیه ترانسفورمر و خاصیت القایی ترانسفورمر مقادیر لازم بمنظور بروز پدیده رزونانس را دارا هستند.

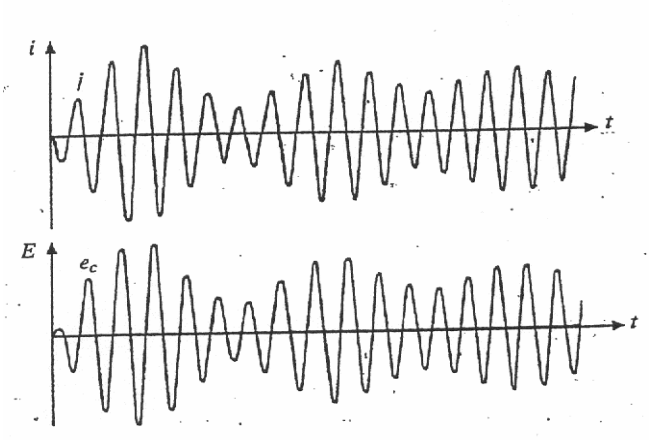
کمیتهای نشان داده شده در شکل ۱-۲ بشرح زیرند.

L: اندوکتانس مدار شامل اندوکتانس خط تغذیه ، اندوکتانس منبع تغذیه و اندوکتانس اولیه **xd** .

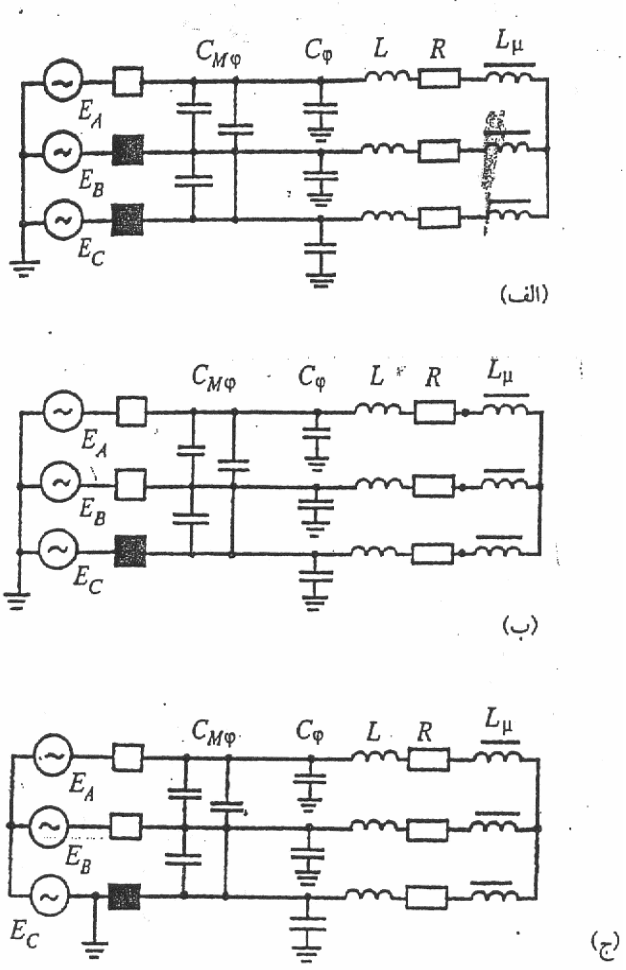
$C\varphi, C_{M\varphi}$: بترتیب خاصیت خازنی هر فاز نسبت به زمین و خاصیت خازنی بین فازها ،

R : مقاومت اهمی مدار که با توجه به افت کلی مدار شامل افت ناشی از برقراری جریان در زمین ، افت آهنی و مس ترانسفورمر و افت در سیمهای خط محاسبه می شود.

μ **L** : اندوکتانس مدار مغناطیس کننده ترانسفورمر.



شکل ۱-۱ ظهو ولتاژ با دامنه ضربه ای در پی بروز پدیده فرورزونـانس در مدار



شکل ۱-۲ . نمایش مدارهای توزیع ، مناسب بروز پدیـده فرورزونـانس.الـف) قطع دو فازبا طرف تغذیه زمین شده ، (ب) قطع یک فاز با طرف تغذیه زمـین شده ، (ج) قطع یک فاز در شبکه های نول ایزوله و اتصال زمین فاز قطع شده (پاره شده).

چنانچه ترانسفورمرمجهز به سیم پیچی با اتصال مثلث باشد ، لازم است تاثیر آن در مدار معادل طبق شکل ۱-۲ در نظر گرفته شود ، بطور مشابه امپدانس بار Z_H که به سـیم پیچـی دوم ترانـسفورمر متصل است ، نیز منظور می شـود در شـرایط نامتقـارن ناشـی از وصل دو فاز و عدم وصل یکفاز ، دو فاز وصل شده در شـرایط یکسان واقع خواهند بود. در مدار معادل با یک خـط نـشان داده شده اند بعنوان مثـال فازهـای C,B در شـکل (۱-۱ الـف) و فازهای A و B درشکل (۱-۱ ب) در شرایط مشابه واقع اند.

بطورکلی با توجه به مطالعات صورت گرفته پیش بینیهای مناسب بمنظور جلوگیری از بروز پدیده فرورزونـانس بـشرح ذیـل مـی باشند.

۱- محـدود نمـودن طـول خـط یـا کابـل بـین کلیـد و ترانسفورمر.

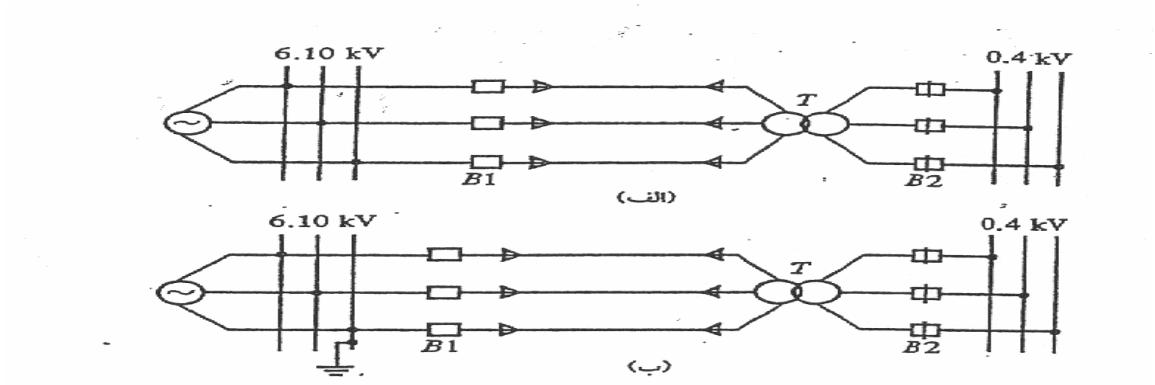
۲- طول مناسب کابل تغذیه ترانسفورمر با توجه به قـدرت ترانسفورمر برحسب ردیف ولتاژهای اسـمی مختلـف و جریان بی باری ترانسفورمر کمتر از

۳- ۳/۵٪ در جدول (۱-۱) ارائه شده است بـه ازای طـول فـوق ولتـاژ واقـع بـر ترانـسفورمر در هنگـام قطـع از $\sqrt{3u_p}$ یا ولتاژ اسمی خط تجاوز نخواهد نمود.

طول خط هایی (m)		طول کابل (m)	مشخصات ترانسفورمر تغذیه			
اتصال ترانس Δ/Y	اتصال ترانس Δ/Y	اتصال ترانس Δ/Y	اتصال ترانس Δ/Y	جریان بی باری $\%\ I_x$	قدرت ترانسفورمر(KVA)S	ولتاژ اسمی Un (KV)
۸۴۰	۶/۲۸	۱۶/۹	۱۲/۵	۱/۵	۷۵۰	۱۰
۹۷۵	۷/۳	۱۹/۶	۱۴/۶	۱/۳	۱۰۰۰	

۱۳۵۰	۱۰/۱	۲۷	۲۰/۴	۱/۲	۱۵۰۰	
۱۸۱۰	۱۳۶۰	۳۶	۲۷	۱/۲	۲۰۰۰	
۳۷۴۰	۲۰۰۰	۷۰	۵۵	۱/۰	۵۰۰۰	
۹۰۵۰	۶۵۰۰	۱۵۰	۱۳۱	۱/۰	۱۰۰۰۰	
۱۱۳۰۰	۸۵۰۰	۲۲۵	۱۶۹	۱/۰	۱۵۰۰۰	
۲۵۸	۱۹۳/۵	۵/۲	۳/۹۶	۱/۵	۷۵۰	۲۰
۲۹۶	۲۲۴	۶/۰	۴/۶	۱/۳	۱۰۰۰	
۴۱۷	۳۱۲	۸/۲۵	۶/۴	۱/۲	۱۵۰۰	
۵۵۰	۴۱۵	۱۱/۱	۸/۲۵	۱/۲	۲۰۰۰	
۲۳۰۰	۱۷۲۰	۴۶	۳۹	۱/۰	۵۰۰۰	
۲۳۰۰	۱۷۲۰	۴۶	۳۹	۱/۰	۱۰۰۰۰	
۳۴۵۰	۲۵۸۰	۶۹	۵۲	۱/۰	۱۵۰۰۰	
۱۳۴	۱۰۱	۲/۷۲	۲/۱۴	۱/۵	۷۵۰	۳۳
۱۵۶/۵	۱۱۷	۳/۰۸	۲/۴۴	۱/۳	۱۰۰۰	
۲۱۶	۱۶۲	۴/۴	۳/۳۶	۱/۲	۱۵۰۰	
۲۹۰	۲۱۷	۵/۷۶	۴/۲۷۰	۱/۲	۲۰۰۰	
۵۹۸	۴۵۰	۱۲	۹/۱۵	۱/۰	۵۰۰۰	
۱۲۰۰	۹۰۰	۲۴	۱۸	۱/۰	۱۰۰۰۰	
۱۸۰۰	۱۳۴۵	۳۶	۲۷	۱/۰	۱۵۰۰۰	

جدول ۱-۱ مشخصات مدار آزمایش طبق شکل ۱-۳ و حداکثر طول قابل قبول کابل یا خط هوایی از محل کلید تا محل ترانسفورمر



شکل ۱-۳ مدار انجام آزمایشات در بروز پدیده فرورزونانس

۲- اجتناب از پیش بینی فیوز بین ترانسفورمر و کلید

۳- اجتناب از پیش بینی تجهیزات وصل مجدد تکفاز

۴- جلوگیری از ایجاد شرایط مناسب بمنظور بروز پدیده رزونانس در قبال بارهای اهمی ناچیز

۵- انتخاب کلیدها با ترتیب مناسب وصل فازها

بدین ترتیب احتمال ظهور اضافه ولتاژ های فرورزونانس با انتخاب محل مناسب کلید کاهش می یابد همچنین ضروری خواهد بود تا ترانسفورمر واقع در انتهای خط توسط کلید واقع در ابتدای خط در فاصله دور از آن برقدار نشود

۶-زمین نمودن نقطه نول ترانسفورمر با اتصال ستاره

درصورت زمین نمودن نقطه نول طرف اولیه ترانسفورمر، خاصیت خازنی فازی که وصل نشده بطور موازی با ترانسفورمرواقع نشده ، احتمال بروز پدیده فرورزونانس وجود ندارد. در شبکه های توزیع بطور معمول طرف اولیه ترانسفورمر زمین نمی شود، در این ترانسفورمرها بمنظور جلوگیری از بروز فرو رزونانس لازم است از ترانسفررمر ستاره – ستاره زمین شده استفاده شود. متقابلاً بعلت عدم وجود سیم پیچی با اتصال مثلث امکان افزایش دمای ترانسفورمر ناشی از برقراری جریان عدم تعادل و مؤلفه صفر وجود خواهد داشت راهکار مناسب ، استفاده از ترانسفورمر پنج بازویی می باشد بهمین علت ترانسفورها با اتصال ستاره – ستاره زمین شده از نوع پنج بازویی انتخاب می شوند.

۷-زمین نمودن نقطه نول ترانسفورمر از طریق مقاومت اهمی.

ترانسفورمرها با اتصال ستاره – مثلث که از طریق خط هوایی بدون کلید، برقدار می شوند ، مناسب خواهد بود در نقطه نول اتصال ستاره خود مجهز به مقاومت اهمی پیش بینی می شود . پیش بینی مقاومت در نقطه نول مانع از بروز پدید فرو رزونانس می شود طبق بررسیهای انجام شده به مقدار مناسب مقاومت در حدود ۵٪ راکتانس مغناطیس کننده ترانسفورمر خواهد بود با مقدار حداقل آن با توجه به تحمل حرارتی برقراری جریان اتصال اتصالی فاز – زمین انتخاب می شود. در صورت برقراری جریان اتصال فاز – زمین ، ولتاژ قابل ملاحظه در دوسر مقاومت ظاهر می شود، لذا بمنظور جلوگیری از صدمه به سیم پیچهای اولیه و اصلی ترانسفورمر، مقاومت توسط ترانسفورمر ایزوله کننده به نقطه نول وصل می شود.

کمیتهای مؤثر در بروز پدیده

بمنظور تعیین میزان تاثیر کمیتهای مختلف در بروز پدیده فرورزونانس، دامنه اضافه ولتاژ های ناشی از بروز پدیده برای مدار شکل (۱-۳) تعیین شده است ترانسفورمرهای شبکه توزیع از طریق کابل تغذیه شده ، طول کابل تغذیه بین ۳۰-۱۵۰ متر تغییرداده شده ، ترانسفورمربصورت متقارن سه فاز کامل و یا نامتقارن (وصل یک یا دو فاز) برقدار شده است در جدول (۱-۱) مشخصات مدار آزمایش ارائه می دهد. ولتاژ اعمال شده بیش از ولتاژ اسمی یا معادل آن می باشد. در برخی آزمایشات بطور همزمان اتصالیهای فاز _ زمین نیز ترتیب داده شده که نتایج حاصل از آزمایشات و احتمال ظهور اضافه ولتاژها و پدید فرورزونانس در شکل (۱-۴) نشان داده شده است .منحنیهای رسم شده بشرح ذیل می باشند.

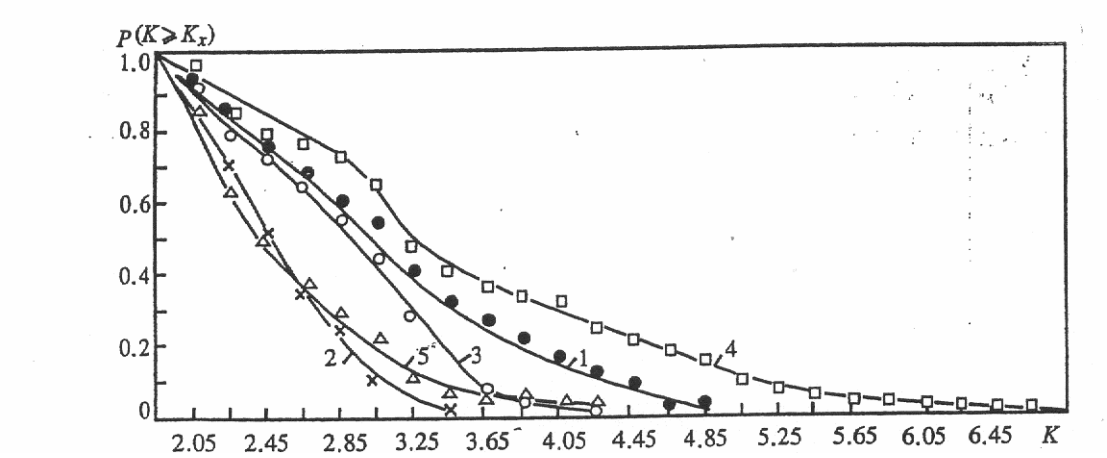
- منحنیهای ۱ و ۲ برای وصل و قطع ترانسفورمر از طریق کابل رژیمهای تکفاز و دو فاز
- منحنیهای ۳ و ۴ برای قطع و وصل ترانسفورمرها از طریق کابل در شرایط تکفاز و دو فاز همراه با وجود اتصالی فاز – زمین در طرف تغذیه (قبل از کلید).
- منحنی ۵ برای قطع و وصل ترانسفورمرمجهز به کابل در سه فاز و وجود اتصالی فاز – زمین در شبکه تغذیه

مشخصات ترانسفورمر و کابل تغذیه در آزمایشات فوق در جدول (۱-۲) ارائه شده اند بهترین روش بمنظور مقابله با پدیده و فرورزونانس در شبکه ها با نقطه نول ایزوله ، وصل مقاومت در نقطه نول می باشد، برای این منظور مقاومت بالغ بر چند ده کیلو اهم در نقطه نول نصب می شود. مقاومت با توجه به شرایط زیر انتخاب می شود.

الف) ظرفیت خازنی کل شبکه در فاصله زمانی کمتر از ۰/۰۱ ∠ ثانیه توسط مقاومت فوق تخلیه شود.

ب) مقدار مقاومت لازم است کمتر مقدار بحرانی طبق $Rc = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ نباشد ، L و C اندوکتانس و ظرفیت خازنی مدار دیده شده از نقطه نول .

ج) وصل مقاومت در نقطه نول نباید موجب افزایش جریان اتصالی فاز _ زمین را فراهم سازد. به عبارت دیگر شرایط کار نقطه نول شبکه را تغییر دهد. نصب مقاومت در نقطه نول سبب جلوگیری از بروز پدیده فرورزونانس اضافه ولتاژهای ناشی از عیوب توام با قوس را نیز موجب میشود.



شکل ۱-۴. منحنی احتمال بروز پدیده در شبکه توزیع و تغذیه ترانسفورماتور در شرایط گوناگون

مشخصات	مدار اول طبق شکل ۳- ۱۹ (الف)	مدار دوم طبق شکل (ب)	مدار سوم طبق شکل (الف)	مدار چهارم طبق شکل (ب)
طول کابل (m)	۱۵۰	۱۵۰	۳۰	۳۰
نوع کابل	۳ * ۷۰	۳ * ۷۰	۳ * ۵۰	۳ * ۵۰
فدرت ترانسفورمر(S(KVA	۳۲۰	۳۲۰	۱۶۰	۱۶۰
ولتاژ تغذیه (UN (KV	۶	۶	۱۰	۱۰
تعداد فازهای مورد قطع و وصل	۱و۲	۱و۲و۳	۱و۲	۱و۲و۳
تعداد نمونه ؟ و برداست شده توسط اسیوگراف	۱۱۹	۹۷۸	۱۲۹	۲۵۸
ضریب اضافه ولتاژ (PU)	۴/۸	۶/۴	۶	۷

جدول ۱-۲ مشخصات تجهیزات فشارقوی در مدارآزمایش شکل ۱-۳

نتایج

با توجه به تنوع زیاد در مدارها ، بروز پدیده در شبکه های توزیع و تاثیر عوامل متعدد ، ارائه نتیجه کلی ومشخص در مورد شرایط بروز پدیده و کمیات مؤثر در آن دشوار و غیرممکن است . با اینهمه احتمال بروز پدیده دربرخی مدارها افزایش نشان می دهد. آگاهی از نوع مدارها و مشخصات آنها ، امکان جلوگیری از پدیده را میسر میسازد.

خصوصیات کلی پدیده بشرح ذیل است.

۱- پدیده رزونانس و فرو رزونانس بصورت اضافه ولتاژ با فرکانس کمتر و یا بیشتر از فرکانس ۵۰ با دامنه ثابت و یا متغیر در ولتاژ های فاز – فاز و یا فاز – زمین ظاهر می شوند ، دامنه اضافه ولتاژ در فاصله p.u ۵-۲ متغیراست.

۲- در معمولترین حالت پدیده تحت ولتاژ فرکانس ۵۰ روی داده دامنه ولتاژ بتدریج افزایش ، سپس کاهش و مجدداً افزایش می یابد. افزایش و کاهش دامنه ولتاژ بصورت منظم و هماهنگ تکرار شده

منحنی پوششی بصورت ولتاژ ضربانی ظاهر میشود که پریود نوسانهای آن ۱- ۰/۵ سیکل بر ثانیه است .

۳- در حالت معمول دیگر اضافه ولتاژ تحت ولتاژ فرکانس ۵۰ با دامنه ثابت بالغ بر p.u ۵-۲ ظاهر می شود.

۴- در حالت دیگر اضافه ولتاژ فرکانس ۵۰ بصورت غیر منظم ظاهر می شود ، در این حالت فاصله پریودهای اضافه ولتاژ ضربانی بتدریج کاهش یا افزایش میابد این حالت بعنوان نوسانهای نا هماهنگ جابجا شونده (Erratic) موسوم است.

۵- اضافه ولتاژ در سیم پیچی با هسته اشباع شده واقع در مدار فرو رزونانس ، چگالی بالای فوران را موجب میشود.چگالی

بالای فوران بصورت صدای قابل ملاحظه و یا لرزش هسته و سیم پیچی ظاهر میشود صدا بصورتهای گوناگون نظیر انفجار ، و یا صدای سوت شنیده می شود.

۶- اضافه ولتاژ در سایر موارد با جریان قابل ملاحظه همراه است.

شرایط بروز پدیده و راههای مناسب مقابله با آن در دستور العملهای استاندارد بشرح ذیل میباشد :

۱- در شبکه های توزیع در پی سوختن فیوز و با قطع یک یا دو فاز مربوط به کابل تغذیه ترانسفورمرها در سمت فشار قوی ، احتمال بروز پدیده بشرح زیر افزایش می یابد.

الف) هنگامیکه همزمان با سوختن فیوز بار ترانسفورمرناچیز باشد (شرایط بی باری ترانسفورمر)

ب) ترانسفورمر در طرف فشار ضعیف و فشار قوی دارای اتصال مثلث بوده ، در سیم پیچی دیگر دارای اتصال ستاره زمین شده نباشد.

ج) ترانسفوراز نوع پنج هسته ای (5leg) باشد

۲- در بند(۱) احتمال بروز پدیده با افزایش ردیف ولتاژ اسمی افزایش می یابد ، طبق بررسیهای انجام شده در ردیف ولتاژ های اسمی کمتر از 12KV احتمال بروز پدیده ناچیز است.

۳- در بند(۱) احتمال بروز پدیده با کاهش قدرت ترانسفورمر توزیع (۷۵-۵۰ **KVA**) افزایش می یابد.

۴- احتمال بروز پدیده با افزایش خاصیت خازنی رساناها و یا وجود بانک خازنی افزایش می یابد .

۵- احتمال بروز پدیده در صورت تغذیه ترانسفورمر با اتصال ستاره زمین شده با نول ایزوله افزایش مییابد.

۶-احتمال بروز پدیده در ترانسفورمرها با اتصال زیگزاک تقلیل می یابد.

مراجع :

1.Applicasion of the studying and understanding the global behavior of feeroresonant power circuit .c.kieny IEEE Trans.on power delivery April 1999 .

2. Feero resonance study using garkin method with pseude – Arclenghth method . IEEE Trans. On power cotinuation delivery October 1999.

۳. رزونانس و فرورزونانس در شبکه های توزیع انرژی آقای مهندس شاهرخشاهی - ۱۳۸۲