



کاهش اثرات فرورزونانس در خطوط انتقال کابلی-هوایی با استفاده از خازن سری

احسان رحم خدا، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان

(E.rahmkhoda@semnan.ac.ir)

محسن نیاستی، استادیار، دانشگاه سمنان

(mniastati@semnan.ac.ir)

چکیده

هدف اصلی این مقاله، ارائه روشی موثر برای کاهش اثرات فرورزونانس در خطوط ترکیبی (کابلی - هوایی) با استفاده از خازن سری در زمان وارد مدار نمودن ترانسفورماتور در سیستم قدرت می باشد. از اینرو در این مقاله با استفاده از مدل‌های معتبر در فرکانس پایین، یک خط انتقال ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته و امکان وقوع فرورزونانس در لحظه وارد مدار نمودن ترانسفورماتور در خط انتقال بررسی شده است و روشی برای کاهش اضافه ولتاژ و اضافه جریان‌هایی که بدلیل رخ داد فرورزونانس در ورودی ترانسفورماتور قدرت ظاهر میشوند، ارائه گردید. سپس خط ترکیبی (کابلی - هوایی) تحت مطالعه، در محیط نرم افزار PSCAD/EMTDC مدلسازی و شبیه سازی شده و کارائی عملکرد روش پیشنهادی نسبت به روشهای مرسوم مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: فرورزونانس، خطوط انتقال ترکیبی، نوسانات ولتاژ، خازن سری، ترانسفورماتور قدرت.



1- مقدمه

استفاده از خطوط انتقال ترکیبی هوایی-کابلی در برق رسانی به مکانهای خاص از جمله شهرهای پر تراکم، جزایر و مکانهایی که در آنها امکان استفاده از خطوط هوایی بطور یکپارچه وجود ندارد امری اجتناب ناپذیر می باشد. اگرچه استفاده از کابل در خطوط انتقال هوایی می تواند به میرا شدن و کاهش دامنه اضافه ولتاژهای گذرای صاعقه و کلیدزنی در طول و انتهای خط کمک کند [1] اما در خطوط انتقال و فوق توزیع باعث افزایش ظرفیت خازن نشی خط شده و احتمال وقوع فرورزونانس در شرایط اغتشاش و خطا را افزایش می دهد. از اینرو وقوع فرورزونانس یکی از مشکلات اصلی خطوط ترکیبی تحت شرایط گذرای سیستم مانند کلیدزنی در خط می باشد. تاکنون مطالعات گسترده ای در خصوص بررسی وقوع فرورزونانس و ارائه راه کارهای کاهش آن در خطوط ترکیبی انجام شده است. از موضوعاتی که در این خصوص مورد مطالعه قرار گرفته اند می توان به تاثیر ساختار شبکه ها بر وقوع فرورزونانس [2]، اثر کلیدزنی غیرهمزمان با فاصله دور از ترانسفورماتور پست [3]، بررسی زوایای بحرانی کلیدزنی ترانسفورماتور و اثر انتقال زاویه کلیدزنی بر وقوع فرورزونانس [4،5]، بررسی وقوع فرورزونانس بین خازن کلید قدرت و ترانسفورماتورهای پست [6]، امکانسنجی بروز فرورزونانس در خطوط انتقال و کاهش اثرات آن [7، 8]، آنالیز تئوری وقوع فرورزونانس در سیستم زمین شده [9]، بررسی نقش شرایط اولیه در وقوع فرورزونانس [10] و مطالعات مربوط به محاسبه فرکانسهای بحرانی در خطوط انتقال ترکیبی [11، 12] اشاره نمود. همچنین در سالهای اخیر توجه خاصی به استفاده از تجهیزات محدود کننده جریان خطا در خطوط انتقال برای کاهش اثرات فرورزونانس شده است [13]. در این مقاله وقوع فرورزونانس در هنگام وارد مدار کردن ترانسفورماتور در خط انتقال ترکیبی مورد بررسی قرار گرفته است و سپس روشهای موثر که با استفاده از تحلیل پارامتری مورد توجه قرار میگیرند در نرم افزار PSCAD/EMTDC مورد شبیه سازی قرار گرفته و درصد تاثیر گذاری و مشکلات متعاقب استفاده از آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

2- مدلسازی سیستم قدرت برای مطالعات فرورزونانس

به منظور بررسی احتمال وقوع فرورزونانس در شرایط مختلف شبکه قدرت و ارزیابی عملکرد روشهای پیشنهادی برای کاهش وقوع فرورزونانس در خطوط ترکیبی، مدل الکتریکی تجهیزات اصلی شبکه قدرت شامل پست فشارقوی و خط انتقال مورد بررسی قرار می گیرد.

2-1- محاسبه پارامترهای کابل قدرت

مدلسازی کابل تکی مستلزم محاسبه و تشکیل ماتریس های ادمیتانس و امپدانس است که ماتریس ادمیتانس خودی یک کابل در بخش کابلی را می توان با استفاده از روش ارائه شده در [14] و [15] و همچنین ماتریس امپدانس خودی یک کابل در بخش کابلی خط انتقال را براساس ساختار کابل (مطابق شکل (1)) و با استفاده از روش ذکر شده در [16] و [17] میتوان محاسبه نمود



شکل 1: ساختار امپدانس مقطع گسترده کابل

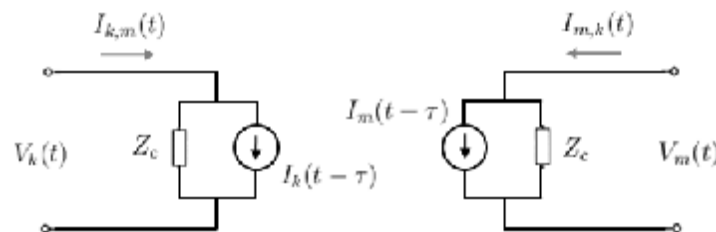
برای بدست آوردن ادمیتانس و امپدانس متقابل یا درایه های غیر قطری ماتریس های امپدانس و ادمیتانس یک سیستم چند کابلی، از روش ارائه شده در [18] استفاده شده است.

2-2- محاسبه پارامترهای خط هوایی

برای یک خط انتقال هوایی شامل چند هادی، ماتریس ادمیتانس موازی و ماتریس امپدانس سری خط، مطابق روابط ارائه شده در مراجع [19] تا [21] محاسبه شده است.

2-3- مدل خط انتقال

در این مقاله، برای افزایش دقت مطالعات در بازه وسیعی از فرکانس، از مدل برگرون خط انتقال برای مدلسازی بخش کابلی و هوایی خط استفاده می شود. شکل (2) ساختار کلی و روابط (1) و (2) بیان ریاضی مدل مذکور را ارائه می دهند [22].



شکل 2- مدل برگرون خط انتقال

$$I_k(t - \tau) = -\frac{1}{Z_c + \frac{R}{2}} V_m(t - \tau) - I_{m,k}(t - \tau) \quad (1)$$

$$I_m(t - \tau) = -\frac{1}{Z_c + \frac{R}{2}} V_k(t - \tau) - I_{k,m}(t - \tau) \quad (2)$$

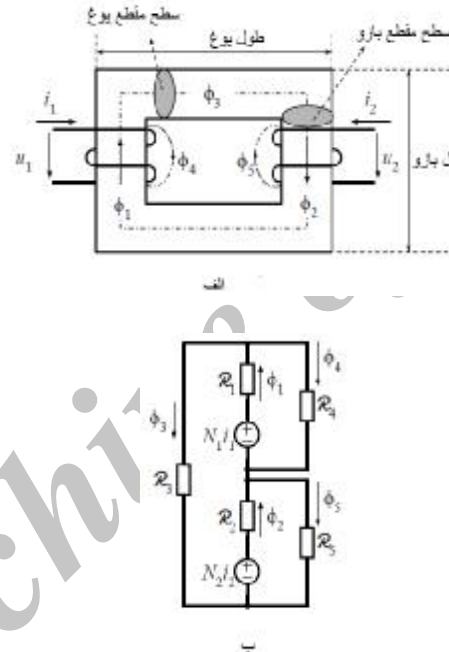


$$\tau = l\sqrt{L.C}$$

ا طول و Z_c امپدانس مشخصه خط انتقال است.

2-4- مدل سازی ترانسفورماتور پست فشارقوی

در این مقاله از مدل عمومی $UMEC^1$ برای مدل سازی ترانسفورماتور پست استفاده شده است [23]. در شکل (3-الف) ساختار یک ترانسفورماتور تک فاز دوسیم پیچه و در شکل (3-ب) مدل آن به روش $UMEC$ نشان داده شده است.



شکل 3: مدل $UMEC$ ترانسفورماتور قدرت [23]

در مدل مذکور، پارامترهای نشان داده شده در شکل مدل $UMEC$ عبارت اند از:
- ϕ_1 و ϕ_2 شار در بازوی سیم پیچه های 1 و 2، ϕ_3 شار در یوغ، ϕ_4 و ϕ_5 شار نشتی در هوا که بوسیله سیم پیچه های 1 و 2 تولید شده است، می باشد.

- مقاومت های مغناطیسی R_1 تا R_5 متناظر با ϕ_1 تا ϕ_5 می باشند.

- $N_1 i_1$ و $N_2 i_2$ نیرو محرکه مغناطیسی سیم پیچه های 1 و 2 می باشند.

2-5- مدل کلید قدرت

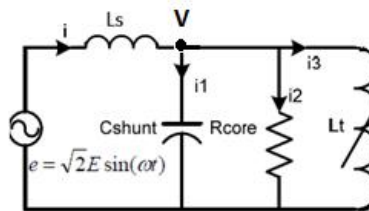
1- Unifid Magnetic Equivalent Circuit



مطابق با مدل کلید قدرت (Circuit Breaker) در نرم افزار PSCAD/EMTDC، مدل کلید از یک مقاومت تشکیل شده است که در مواقع بسته بودن کلید، مقاومت صفر و در زمان باز بودن کلید یک مقاومت خیلی زیاد و قابل تغییر (در شبیه سازی این مقاله در حدود 1×10^6 اهم) در مدار قرار میگیرد.

3- بررسی وقوع فرورزونانس در خط انتقال

بررسی وقوع فرورزونانس در سیستم از جهت آنکه سلف معادل ترانسفورماتور یک سلف غیرخطی و اشباع پذیر است، امری دشوار تلقی میشود. بطور تقریبی میتوان شکل (4) را بعنوان مدار معادل سیستم برای بررسی فرورزونانس مورد تجزیه و تحلیل قرار داد.



شکل 4: مدار معادل سیستم جهت بررسی فرورزونانس

در این مدار L_s سلف سری معادل راکتانس خط انتقال، C_{shunt} خازن موازی معادل کاپاسیتانس خط انتقال، R_{core} مقاومت مدل کننده تلفات بی باری ترانسفورماتور و L_t سلف غیرخطی معادل سلف مغناطیس کننده ترانسفورماتور است. با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل (4) معادله دیفرانسیل مربوط به ولتاژ V به صورت رابطه (3) محاسبه میشود:

$$V = e - L_s \frac{di}{dt} = e - L_s \frac{d}{dt} (i_1 + i_2 + i_3) = e - L_s \frac{d}{dt} \left(\frac{V}{R_{core}} + C_{shunt} \frac{dV}{dt} + i_3 \right)$$

$$C_{shunt} \cdot \ddot{V} + \frac{1}{R_{core}} \cdot \dot{V} + \left(\frac{1}{L_s} + \frac{1}{L_t} \right) \cdot V = \frac{1}{L_s} \cdot e$$

(3)

اگر α ضریب مشتق مرتبه اول در معادله دیفرانسیل توصیف کننده سیستم باشد، ریشه های معادله مفسر (3) بوسیله رابطه (4) محاسبه میشود:

$$\frac{-1}{2R_{core} \cdot C_{shunt}} \pm \sqrt{\frac{\alpha^2 - 4 \cdot C_{shunt} \cdot \left(\frac{1}{L_s} + \frac{1}{L_t} \right)}{2 \cdot C_{shunt}}}$$

(4)

آنچه که در سیستم بیشترین تاثیر در وقوع فرورزونانس را دارد و بیشترین چالش را ایجاد مینماید اشباع سلف معادل ترانسفورماتور (L_t) است. با به اشباع رفتن سلف معادل ترانسفورماتور مقدار L_t کاهش محسوسی می-



یابد $\left(\frac{1}{L_t}\right)$ افزایش خواهد یافت). بنابراین لازم است با افزایش یافتن $\frac{1}{L_t}$ در پروسه وارد مدار نمودن ترانسفورماتور، عبارت $\alpha^2 - 4 \cdot C_{shunt} \cdot \left(\frac{1}{L_s} + \frac{1}{L_t}\right)$ کوچکتر از صفر نگردد. هرچقدر مقدار عبارت α افزایش یابد میرایی نوسانات ولتاژ نیز افزایش خواهد یافت، از اینرو برای میرایی نوسانات ولتاژ ناشی از فرورزونانس باید مقدار α (ضریب مشتق مرتبه اول در معادله دیفرانسیل) افزایش یابد. برای این امر میتوان سه راه حل را عنوان نمود:

1- کاهش مقاومت R_{core}

2- اضافه نمودن مقاومت اهمی در سیستم [24]

3- اضافه نمودن سلف موازی در سیستم [25]

کاهش مقاومت R_{core} با افزایش توان تلفات بی باری ترانسفورماتور امکان پذیر است، هرچند از لحاظ تئوری میتوان این راه حل را بعنوان یک روش برای کاهش نوسانات در نظر گرفت اما در سیستمهای عملی معمولا بدلیل اینکه مقاومت R_{core} مدل کننده تلفات بوده و وجود فیزیکی ندارد، تغییر مقدار مقاومت R_{core} عملی نمیباشد. اما استفاده از مقاومت اهمی و اضافه نمودن سلف در سیستم را میتوان مورد توجه قرار داد.

3-1 اثر اضافه نمودن مقاومت اهمی در سیستم

در صورتی که مقاومت اهمی R بصورت موازی بین فاز سیستم و زمین متصل گردد آنگاه ضریب α معادل رابطه (5) خواهد بود:

$$\alpha = \frac{1}{R_{core}} + \frac{1}{R} \quad (5)$$

مطابق معادله (5)، استفاده از مقاومت برای میرایی نوسانات میتواند موثر باشد اما از طرف دیگر، میرایی نوسانات با عکس مقاومت های اهمی موازی متناسب است. باید توجه نمود که وارد مدار نمودن یک مقاومت کم برای بدست آوردن میرایی زیاد، میتواند باعث افزایش جریان در خط انتقال گردد که این امر باعث تهدید تجهیزات و ادوات و یا عملکرد سیستم حفاظتی خط انتقال را به دنبال دارد.

3-2 اثر اضافه نمودن سلف موازی

اگر سلف L_{sh} بطور موازی به مدار اضافه شود، آنگاه معادله دیفرانسیل توصیف کننده سیستم به صورت معادله (6) بدست می آید:

$$C_{shunt} \cdot \ddot{V} + \frac{1}{R_{core}} \cdot \dot{V} + \left(\frac{1}{L_s} + \frac{1}{L_t} + \frac{1}{L_{sh}}\right) \cdot V = \frac{1}{L_s} \cdot e \quad (6)$$

بنابراین ریشه های معادله مفسر مربوط به معادله (6) مطابق با (7) بدست می آید:

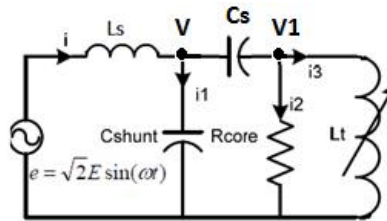
$$\frac{-1}{2R_{core} \cdot C_{shunt}} \pm \sqrt{\frac{1}{R_{core}^2} - 4 \cdot C_{shunt} \cdot \left(\frac{1}{L_s} + \frac{1}{L_t} + \frac{1}{L_{sh}}\right)} \quad (7)$$



چنانچه از معادله (7) مشخص است با استفاده از تنظیم سلف موازی می توان تاثیر خازن موازی ذاتی خود خط انتقال را تا حد مطلوب کاهش داد و نوسانات و اضافه ولتاژهای سیستم را میرا نمود. اما همانگونه که از معادله (7) مشخص است، کاهش نوسانات با معکوس سلف موازی L_{sn} متناسب است لذا احتمال وجود اضافه جریان در سیستم انتقال به ازای استفاده از مقادیر کم L_{sn} وجود خواهد داشت.

3-3- اثر اضافه نمودن خازن سری در سیستم

با استفاده از خازن سری با ترانسفورماتور در سیستم، مدار معادل بصورت شکل (5) تغییر خواهد نمود



شکل 5: مدار معادل سیستم با اضافه شدن خازن سری

استفاده از خازن سری در ورودی ترانسفورماتور باعث می شود که امپدانس سمت ترانسفورماتور از دید خط تغییر نماید، در این صورت Z_1 امپدانس از دید گره V قبل از نصب خازن و Z_2 امپدانس از دید گره V بعد از نصب خازن، از روابط (8) و (9) محاسبه می شوند:

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega L_t} + \frac{1}{R_{core}} \quad (8)$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega L_t} + \frac{1}{R_{core}} + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (9)$$

مطابق روابط (8) و (9) استفاده از خازن سری امپدانس را مشابه یک سلف موازی تغییر می دهد. استفاده از خازن سری در سیستم سبب میشود تا مرتبه سیستم قدرت افزایش یابد لذا تجزیه و تحلیل سیستم پیچیده خواهد شد اما چالش برانگیزترین موضوع در هنگام استفاده از خازن سری، انتخاب مقدار C_s است. در صورتی که مقدار خازن کم در نظر گرفته شود باعث ایجاد افت ولتاژ نامعقول روی آن و در صورتی که بیش از حد زیاد در نظر گرفته شود، سبب تشدید مشکل تشدید در سیستم خواهد گردید.

4- سیستم تحت بررسی

برای بررسی عملکرد روش بیان شده، مطالعات روی یک خط انتقال ترکیبی 400 کیلوولت مطابق شکل (6) انجام شده است. این خط انتقال دارای دو بخش ابتدا و انتهای هوایی هرکدام به طول 50 کیلومتر و یک بخش میانی کابلی به طول 30 کیلومتر می باشد. دلیل انتخاب این آرایش مرسوم بودن آن در برق رسانی به مکانهای خاص است. آرایش خط هوایی و خط کابلی مطابق شکل (7) می باشد.

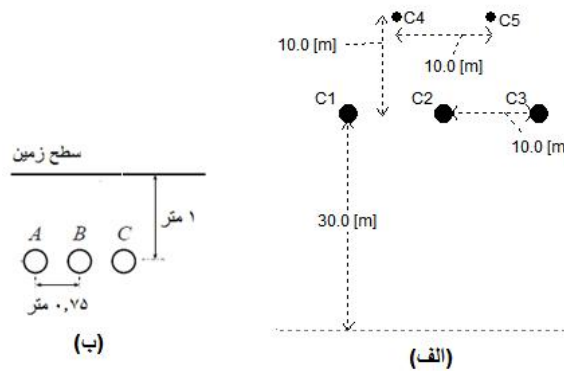


کنفرانس ملی فناوری های نوین در مهندسی برق و کامپیوتر

۲۷ دی ۱۳۹۶



شکل 6: ساختار کلی خط انتقال تحت مطالعه



شکل 7: آرایش بخش هوایی و کابلی خط انتقال

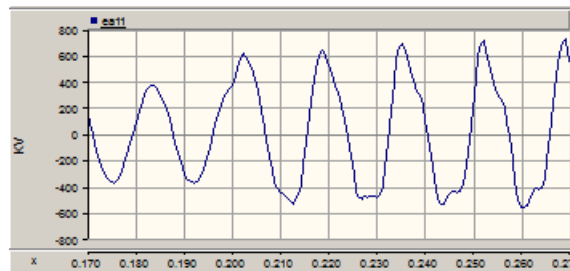
ترانسفورماتور انتهایی خط انتقال یک ترانسفورماتور اشباع پذیر با نسبت تبدیل 400/230 کیلوولت و توان 450 مگا ولت آمپر است که منحنی اشباع آن در جدول 1 نشان داده شده است.

جدول 1: منحنی اشباع ترانسفورماتور

جریان (%)	0	0.1774	0.4876	0.98	2	3.095	6.5234	20.357	60.215	124.388
ولتاژ (pu)	0	0.3241	0.6128	0.8251	1	1.080	1.1733	1.2611	1.36	1.4946

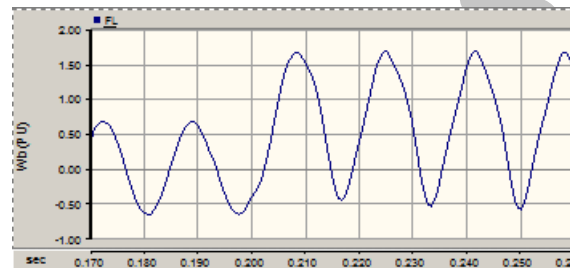
5- شبیه سازی

اگر ترانسفورماتور ورودی شبکه 230 کیلوولت در زمان 0.2 ثانیه با باری کم وارد مدار گردد، آنگاه شکل (8) شکل موج ولتاژ خط ورودی ترانسفورماتور را نشان میدهد.



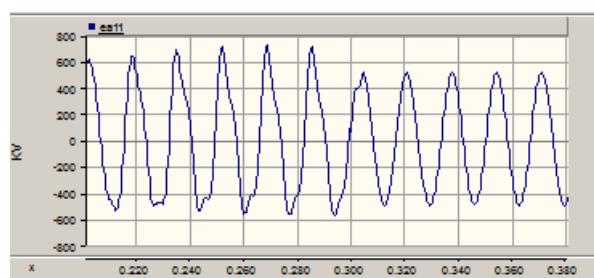
شکل ۸: ولتاژ ورودی ترانسفورماتور در لحظه ورود به مدار

مطابق شکل (۸)، ولتاژ ورودی ترانسفورماتور پس از وارد مدار شدن آن از ۶۰۰ کیلوولت نیز فراتر رفته و دارای اعوجاج در شکل موج ولتاژ می‌باشد. شکل (۹) شار مغناطیسی درون هسته ترانسفورماتور پس از وارد مدار شدن ترانسفورماتور را نشان می‌دهد.



شکل ۹: افزایش شار مغناطیسی هسته ترانسفورماتور

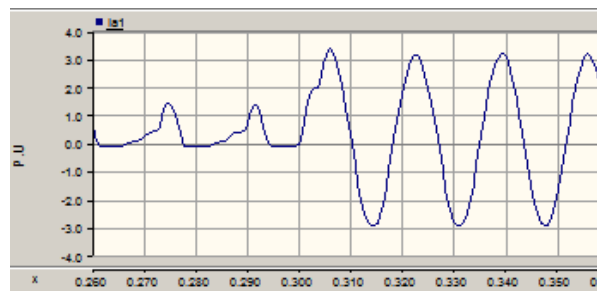
همانطور که از شکل (۹) مشاهده می‌گردد، پس از وارد مدار شدن ترانسفورماتور شار درون هسته ترانسفورماتور از ۱.۵ پرینیت فراتر میرود. افزایش ولتاژ و شار درون هسته سبب میشود که سیستم قدرت و خصوصا ترانسفورماتور در خطر مشکلات متعاقب از جمله پیری عایق قرار گیرند که معمولا اثراتی بدون علامتی مشهود در سیستم دارند اما عمر عایق ترانسفورماتور و دیگر تجهیزات را به طور قابل توجهی کاهش داده و پس از چندین با تحمل این اضافه ولتاژ، عایق تجهیزات تخریب شده و موجب انفجار میگردد. بنابراین در اینگونه مواقع سیستمی مورد نیاز است که اضافه ولتاژهای ناشی از فرورزونانس را تشخیص داده و در مواقع لزوم ادواتی جهت میرا نمودن این اضافه ولتاژها وارد مدار نماید. در صورتی که پس از وارد مدار شدن ترانسفورماتور، لحظه ۰.۳ ثانیه، یک مقاومت ۱۰۰ اهم بین هر فاز و زمین وارد مدار گردد، آنگاه شکل موج ولتاژ ورودی ترانسفورماتور به صورت شکل (۱۰) می‌باشد.





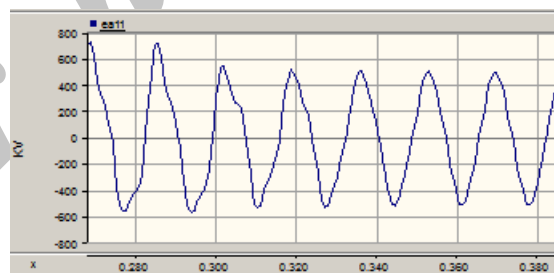
شکل 10: میرایی اضافه ولتاژ در صورت استفاده از مقاومت میرا کننده

همانطور که قبلا ذکر شد، مهمترین مشکل استفاده از مقاومت میرا کننده جهت رسیدن به حدود ولتاژ مطلوب، وقوع اضافه جریان در سیستم جهت رسیدن به ولتاژ مطلوب در سیستم است. این اضافه جریان سبب تلفات در خط شده بعلاوه میتواند موجب عملکرد نادرست سیستم حفاظتی گردد. شکل (11) تغییرات جریان سیستم در هنگام وارد مدار شدن مقاومت در 0.3 ثانیه را نشان می دهد.



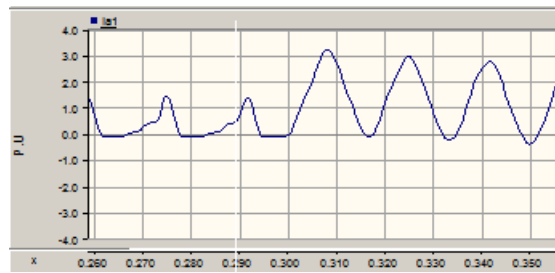
شکل 11: اضافه جریان در سیستم هنگام وارد مدار نمودن مقاومت میرا کننده

مطابق شکل (11)، پس از وارد مدار شدن مقاومت جریان خط سیستم تا حدود 3 پریونیت افزایش میابد. در صورتیکه بجای مقاومت از سلف 500 میلی هانری بین فاز و زمین استفاده شود نیز اثری مانند مقاومت در مدار ظاهر خواهد شد. شکل (12)، شکل موج ولتاژ ورودی ترانسفورماتور را در هنگام استفاده از سلف بعنوان میرا کننده نشان می دهد.



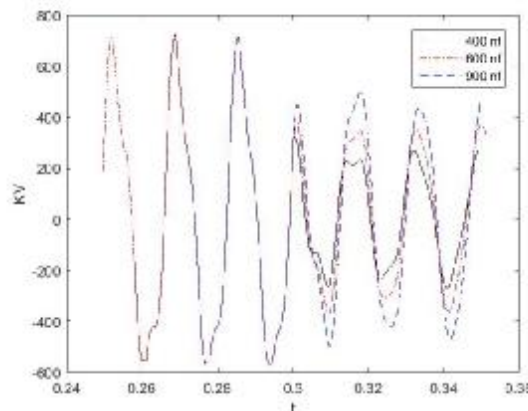
شکل 12: میرایی اضافه ولتاژ به هنگام استفاده از سلف میرا کننده

مطابق شکل (13)، در صورت استفاده از سلف نیز مشکل اضافه جریان در سیستم وجود خواهد داشت.



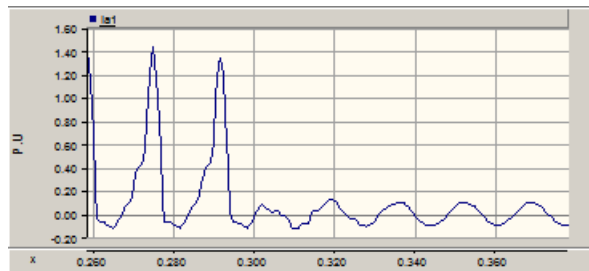
شکل 13: اضافه جریان در سیستم هنگام وارد مدار نمودن سلف میرا کننده

بنابراین، براساس نتایج شبیه سازیها، روش بهینه میرا کردن نوسانات ولتاژ ناشی از وقوع فرورزونانس باید همراه با محدود سازی جریان خط باشد تا خطری سیستم را تهدید نکند. از اینرو لازم است که از عناصر سری جهت میرایی نوسانات استفاده گردد تا قیود مربوط به جریان و جلوگیری از اضافه جریان برآورده شود. اگر از خازن سری بعنوان میرا کننده نوسانات استفاده شود، آنگاه شکل موج ولتاژ ورودی ترانسفورماتور در لحظه وارد مدار شدن خازن برای سه حالت مختلف استفاده از خازن (400، 600 و 900 نانوفاراد)، مطابق شکل (14) خواهد بود.



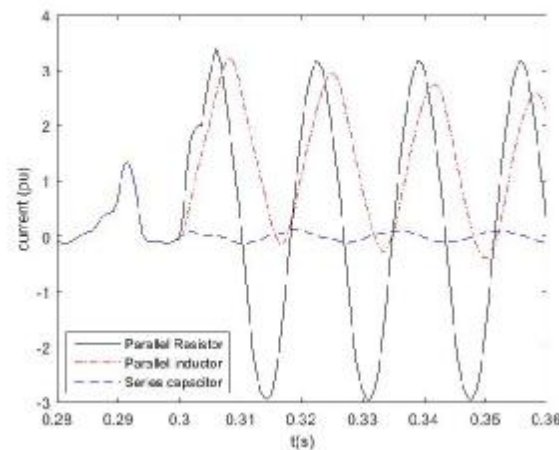
شکل 14: ولتاژ ورودی ترانسفورماتور به ازای استفاده از خازن های سری

اگر مقدار خازن سری از مقدار مشخصی بیشتر شود باعث افزایش شدت رزونانس خواهد شد بنابراین انتخاب مقدار مناسب خازن سری امری بسیار ضروری است. اگر از خازن 900 نانو فاراد بصورت سری با ترانسفورماتور استفاده گردد آنگاه شکل موج جریان سیستم مطابق شکل (15) می باشد.

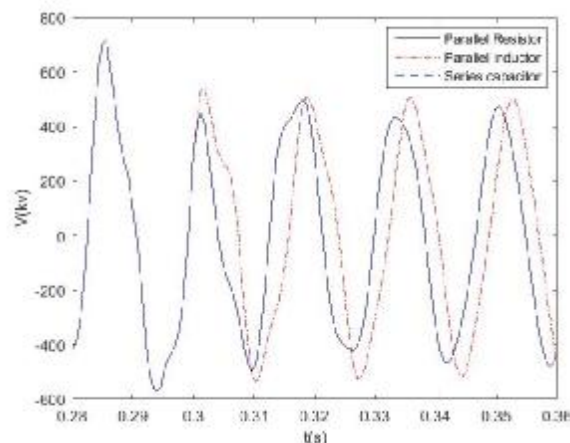


شکل 15: تغییرات جریان سیستم در لحظه وارد مدار شدن خازن سری

براساس شکل (15)، قبل از لحظه 0.3 ثانیه وقوع فرورزونانس موجب جریان هجومی به سمت ترانسفورماتور گردیده و پس از وارد مدار شدن خازنهای سری جریان ترانسفورماتور به مقداری پایدار و معین میرسد. برای قیاس بهتر شکل (16) جریان و شکل (17) ولتاژ سیستم در هنگام استفاده از هر سه روش را در یک صفحه نشان میدهد.



شکل 16: مقایسه جریان سیستم در استفاده از میرا کننده های مختلف



شکل 17: مقایسه ولتاژ سیستم در استفاده از میرا کننده های مختلف



در شکل (17) بدلیل منطبق شدن منحنی ولتاژ مربوط به مقاومت موازی و خازن سری روی یکدیگر، ولتاژ هر دو حالت با یک منحنی نشان داده شده است.

6- نتیجه گیری

استفاده از ادوات مختلف جهت میرا نمودن اضافه ولتاژها و سایر اثرات وقوع فرورزونانس در سیستم قدرت امری معمول است. در این مقاله روشی مبتنی بر وارد مدار نمودن خازن سری در ورودی ترانسفورماتور خط انتقال پیشنهاد گردید که قابلیت میرا نمودن اضافه ولتاژهای ناشی از فرورزونانس را مانند روش مقاومت و سلف موازی دارا می باشد. به طور کلی، مزایای روش پیشنهادی در مقیاسه با سایر روشهای مرسوم عبارتند از:

- 1- وجود جریان پایین در سیستم در مقایسه با روشهای وارد مدار نمودن مقاومت و سلف موازی میرا کننده در سیستم قدرت.

2- امکان تنظیم نمودن ولتاژ انتهای خط با مقادیر مختلف خازن سری.

3- افزایش ضریب بازده خط انتقال بدلیل کاهش درصد کلی تلفات ولتاژ در خط انتقال.

اما با وجود این مزایا، چالش هایی در هنگام استفاده از این روش وجود دارد که مهمترین آنها انتخاب مقدار خازن سری است. اگر مقدار بهینه خازن انتخاب نگردد و مقدار آن بیش از حد زیاد در نظر گرفته شود موجب تشدید وقوع فرورزونانس در سیستم میشود.

منابع و ماخذ

- [1] Mohamed M. Saied. (2015). *Modifying the Transient Overvoltages in Mixed Power Networks by Inserting Cable Sections*, Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XVIII, No. 1,.
- [2] V. Valverde, G. Buigues, A. J. Mazón, I. Zamora, I. Albizu. (2012) . *Ferroresonant Configurations in Power Systems*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRE PQ'12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March.
- [3] Guillermo F. Di Mauro. (2015). *Overvoltage by Ferroresonance on a Rural Distribution Feeder*. INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY .
- [4] Madhab Roy. Chinmay Kanti Roy. (2009). *A Study on Ferroresonance and Its Dependence on Instant of Switching Angle of the Source Voltage*. Third International Conference on Power Systems, Kharagpur.
- [5] J. A. Corea-Araujo, F. González-Molina, J. A. Martínez-Velasco, J. A. Barrado-Rodrigo, L. Guasch-Pesquer. (2013). *An EMTP-based analysis of the switching shift angle effect during energization/de-energization in the final ferroresonance state*. international Conference on Power System Transients (IPST), At Vancouver, Canada .
- [6] Shyh-Jier Huang, Chien-Hsien Hsieh. (2013). *Relation analysis for ferroresonance of bus potential transformer and circuit breaker grading capacitance*. Electrical Power and Energy Systems 51.
- [7] C. Charalambous, Z.D. Wang, M. Osborne and P. Jarman.(2008). *Sensitivity studies on power transformer ferroresonance of a 400 kV double circuit*. The Institution of Engineering and Technology.
- [8] S. I. Kim, B. C. Sung, S. N. Kim, Y. C. Choi, H. J. Kim. (2015). *A Study on Ferroresonance Mitigation Techniques for Power Transformer*. International Conference on Power Systems Transients in Cavtat, Croatia.
- [9] Fan Liu, Min Li, Ping Liu, Yongxing Cao, Hong Zeng.(2011). *Theoretical Research on Ferroresonance in Neutral Grounded Power System*. ICSGCE Chengdu, China.



- [10] Kruno Milic'evic´ a , Zia Emin b. (2009). *Impact of initial conditions on the initiation of ferroresonance*. Electrical Power and Energy Systems 31 146–152.
- [11] Andreas I. Chrysochos, Theofilos A. Papadopoulos, Grigoris K. Papagiannis.(2015). *Rigorous calculation method for resonance frequencies in transmission line responses*. The Institution of Engineering and Technology.
- [12] S. Rahimi, W. Wiechowski, M. Randrup, J. Østergaard and A. H. Nielsen.(2008). *Identification of Problems when Using Long High Voltage AC Cable in Transmission System II: Resonance & Harmonic Resonance*. Transmission and Distribution Conference and Exposition.
- [13] Hamid Reza Abbasi Fordoei, Ahmad Gholami, Seyyed Hamid Fathi, Ataollah Abbasi. (2015). *A new approach to eliminating of chaotic ferroresonant oscillations in power transformer*. Electrical Power and Energy Systems 67 152–160.
- [14] R.P. Clayton.(1994). *Analysis of multiconductor transmission lines*. John Wiley & Sons, Inc., ISBN:0-471-02080-X,.
- [15] U.S. Gudmundsdottir, B. Gustavsen, C.L. Bak, and W. Wiechowski. (2011). *Field test and simulation of a 400-kv cross-bonded cable system*. IEEE Transactions on Power Delivery, 26(3):1403–1410.
- [16] O. Saad, G.Gaba, and M. Giroux.(1996). *A closed-form approximation for ground return impedance of underground cables*. IEEE Transactions on Power Delivery, 11(3):1536–1545.
- [17] A.B. George, H.J. Weber, and F.E. Harris. (2013). *Mathematical Methods for Physicists. A Comprehensive Guide*. Academic Press, Elsevier, 7th Edition.
- [18] L.M. Wedepohl and D.J. Wilcox. (1973). *Transient analysis of underground powertransmission systems. system-model and wave-propagation characteristics*. Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of, 120(2):253–260.
- [19] L. M. Wedepohl, H.V. Nguyen.(1996). *Frequency- dependent transformation matrices for un transposed transmission line using Newton-Raphson Method*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 3.
- [20] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira.(1981). *The complex ground return plane - a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, (8):3686–3693.
- [21] W.D. Stevenson and J.J. Grainger.(1994). *Power System Analysis*. McGraw-Hill International Editions.
- [22] Pablo Torrez Caballero Eduardo C. Marques Costa Sérgio Kurokawa.(2015). *Frequency-dependent multiconductor line model based on the Bergeron method*. Electric Power Systems Research 127 -314–322.
- [23] L. M. R. Oliveira and A. J. M. Cardoso.(2000). *Three-phase, three-limb, steadystate transformer model: the case of a ynzn connection*. International Conference Power and Energy Systems Marbella, pages 467–472.
- [24] Wojciech Piasecki, Marek Florkowski Marek Fulczyk, , Pentti Mahonen, and Wieslaw Nowak.(2007). *Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 22, NO. 4.
- [25] S.Huang, Chien-Hsien. (2013). *Relation analysis for ferroresonance of bus potential transformer and circuit breaker grading capacitance*. Electrical Power and Energy Systems 51 61–70.