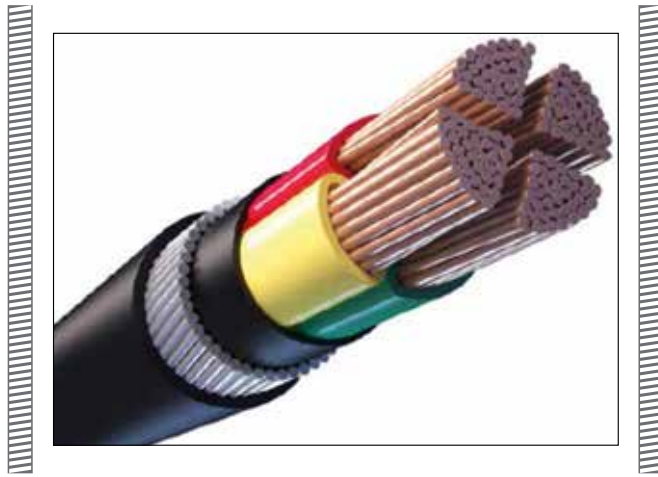


کابل های هوشمند قبل از وقوع حادثه نقص را اطلاع می دهند

کابل های SmartCore شامل یک رشته سیم اضافی هستند که در هنگام قریب الوقوع بودن مشکلات احتمالی همچون loose contact یا core break می توانند یک سیگنال را تریرگر کنند



بگیرد و در نتیجه در حین کار دچار غافلگیری نشود و از توقف خط تولید در طی ساعات کار جلوگیری کند. بر اساس تکنیک اندازه گیری استفاده شده در کابل، سیستم می تواند سایر خطرات احتمالی مثل افزایش دمای کابل (over-heating)، بیش از تحت فشار قرار گرفتن (over-tightening) کشیده شدن بیش از حد (over-expansion)، پیمیش بیش از حد (over-rotation)، گره خوردگی و پاله شدگی کابل مطلع گردد. انتظار می رود از این فناوری برای حل مشکلات نقص کابل در فرآیندهای حرکت و خمش پیوسته مثل فرآیندهای استفاده شده در سیستم های رباتیک و یا کریرهای زنجیره ای (Energy Chain Cable Carriers) بهره برداری شود. همچنین فناوری SmartCable را می توان جهت هشدار مشکلات قریب الوقوع در کابل سنسور ها استفاده کرد. شرکت Murrelektronic در بسیاری از تجهیزات جمع آوری سیگنال تولیدی خود (I/O modules) یک ورودی عیب یابی (diagnostics input) در نظر گرفته است که قابلیت دریافت سیگنال های هشدار تولید شده توسط کابل های اسمارت را دارند.

۲ شرکت آلمانی Leuze Electronic و Murrelektronic از پروژه مشترکی پرده برداشتند که با همکاری شرکت فرانسوی Nexans توسعه داده شده است. شرکت Leuze Electronic یک تولید کننده سنسور است و Murrelektronic در زمینه تولید کانکتور و اینترفیس های صنعتی فعالیت دارد و ترکیب این دو کمپانی با شرکت معتبر تولید کننده کابل یعنی Nexans می تواند منجر به عرضه محصولی انقلابی در آینده نزدیک گردد. پروژه مشترک این سه کمپانی SmartCore نام گذاری شده است و در حقیقت یک کابل هوشمند است که می تواند وضعیت نامناسب کابل را به سرعت تشخیص داده و به کاربران هشدار می مینی بر تعویض کابل قبل از وقوع مشکل بدهد. کابل های SmartCore شامل یک رشته سیم اضافی هستند که در هنگام قریب الوقوع بودن مشکلات احتمالی همچون loose contact یا core break می توانند یک سیگنال را تریرگر کنند. این سیگنال زمانی تولید می شود که کابل به ۸۰ الی ۸۵ درصد حداکثر طول عمر خود رسیده باشد. چنین امکانی کاربر را قادر می سازد که در برنامه دوره ای تعمیرات نگهداری خود، زمانی را برای تعویض کابل مشکل دار در نظر

مقاله برگزیده در پنجمین کنفرانس منطقه‌ای سیرد - محور ۴/ منابع پراکنده انرژی و بهینه سازی مصرف

بررسی اثر حضور همزمان منابع تولید پراکنده و ترانسفورماتورهای کم تلفات بر کیفیت وقوع پدیده فرورزونانس در شبکه‌های توزیع نیروی برق

محمد ابراهیم شریفزاده

شرکت توزیع نیروی برق استان هرمزگان

ایران

me.sharifzade@gmail.com

عبدالله رنجبر

شرکت توزیع نیروی برق استان هرمزگان

ایران

ranjbar@hedc.co.ir

حمید ساعدپناه

شرکت توزیع نیروی برق استان هرمزگان

ایران

hamid.saedpanah@yahoo.com

چکیده - یکی از حالت‌های گذرا در شبکه‌های توزیع نیروی برق پدیده فرورزونانس است. وقوع این پدیده می‌تواند منجر به خسارات قابل توجه به تجهیزات و ادوات موجود در شبکه گردد. به منظور کاهش تلفات و صرفه اقتصادی استفاده از ترانسفورماتورهای کم تلفات و بویژه آمورف رو به افزایش است. همچنین به دلایل متعدد انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار دارند. از این رو ضروری است پیامدها و اثرات استفاده همزمان از منابع تولید پراکنده و این نوع از ترانسفورماتورها مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله یک شبکه توزیع با اطلاعات واقعی شامل منابع تولید پراکنده (توربین بادی) در نرم افزار PSCAD شبیه سازی شده است. در ادامه تاثیر حضور همزمان منابع تولید پراکنده و ترانسفورماتورهای معمولی، کم تلفات و بسیار کم تلفات (آمورف) بر وقوع پدیده فرورزونانس با ثبت شکل موج‌های هر حالت و آنالیز هارمونیک برای تمامی فازها، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته و نتایج به صورت خلاصه ارائه شده است. نتایج به دست آمده کیفیت وقوع پدیده فرورزونانس را برای هر یک از حالات فوق نشان می‌دهد.

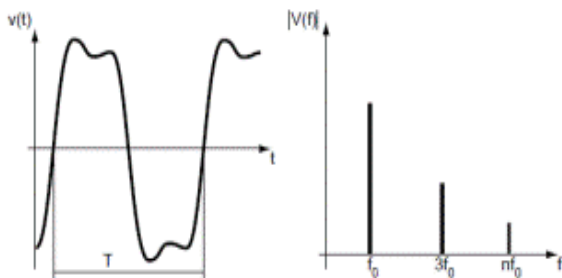
واژه‌های کلیدی - فرورزونانس؛ کم تلفات؛ تولید پراکنده؛ حالت گذرا؛ ترانسفورماتور

۱- مقدمه

فرورزونانس یک پدیده گذرای غیرخطی است که عمدتاً به دلیل تشدید سری بین اندوکتانس مغناطیسی و خازن موجود در شبکه رخ می‌دهد [۱]. به طور معمول در یک شبکه توزیع برق فرورزونانس بدلیل تشدید بین اندوکتانس مربوط به هسته ترانسفورماتور و خازن مربوط به کابل‌ها و خطوط توزیع است. در بسیاری از شبکه‌های واقعی پدیده فرورزونانس می‌تواند منجر به تولید اضافه ولتاژهای قابل توجه گردد. شکل موج این ولتاژ شامل هارمونیک اصلی و سایر هارمونیک‌ها به صورت یک نوسان غیرخطی و بی نظم است. یکی از عوامل اصلی و تاثیرگذار در این پدیده مشخصات هسته مغناطیسی ترانسفورماتور است [۲]. یکی از حالت‌های وقوع پدیده فرورزونانس قرار گرفتن یک ترانسفورماتور بی بار در حالت اشباع و قطع شدن یکی از فازهای تغذیه آن است [۳]. در این مقاله جهت بررسی پدیده فرورزونانس حالت مذکور شبیه سازی شده است.

۲- حالت گذرای فرورزونانس

الف) حالت پایه: در این حالت مطابق با شکل ۱ ولتاژ و جریان با فرکانسی معادل با فرکانس سیستم نوسان می‌کنند.



شکل ۱: حالت پایه

ب) حالت زیرهارمونیک: در حالت زیرهارمونیک مطابق با شکل ۲

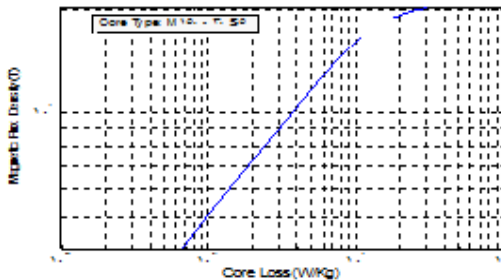
وقوع پدیده فرورزونانس در هر یک حالت‌های فوق تا حد زیادی به ساختار هسته ترانسفورماتور وابسته است. به طور کلی کاهش میزان تلفات هسته و همچنین کاهش سطح منحنی هیستریزیس و حلقه داخلی آن منجر به تشدید پدیده فرورزونانس و وقوع آن در حالت بی‌نظم می‌شوند [۴]. این ویژگی به طور خاص در هسته ترانسفورماتور آمورف وجود دارد.

۳- ترانسفورماتورهای کم تلفات

ترانسفورماتورهای با تلفات پایین که مطابق با استاندارد DIN ۴۲۵۰۰ طراحی و ساخته می‌شوند دارای ۹ دسته‌بندی مختلف هستند. تلفات بی‌باری ترانسفورماتور مطابق با استاندارد مذکور به ۳ دسته A, B, C تقسیم‌بندی می‌شود. در این تقسیم‌بندی، رده A دارای بیشترین تلفات بی‌باری و C کمترین تلفات بی‌باری را دارند. تلفات بار داری نیز به ۳ دسته A+B و C تقسیم می‌شود. رده B بیشترین تلفات و رده C کمترین تلفات را در بار کامل دارند. طرح AA دارای تلفات بار داری متوسط و تلفات بی‌باری نسبتاً بالا و طرح CC دارای تلفات بار داری پایین و تلفات بی‌باری پایین است. تلفات بی‌باری این ترانسفورماتورها به طور متوسط ۳۵ درصد و تلفات بار داری این ترانسفورماتورها به طور متوسط ۲۵ درصد کمتر از ترانسفورماتورهای معمولی است.

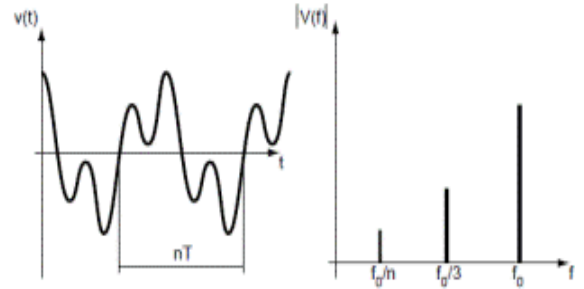
۳-۱- ترانسفورماتورهای رده AB

ترانسفورماتورهای AB دارای تلفات بار داری متوسط و تلفات بی‌باری متوسط است. جنس ورق هسته از کد $s5_30_m150$ با حداکثر تلفات $(1,07 w/kg-T^1)$ مطابق با استاندارد ICE ۱۹۹۸ است [۵]. شکل ۵ تلفات هسته بر حسب چگالی شار مغناطیسی و شکل ۶ منحنی اشباع ترانسفورماتورهای کلاس AB با هسته از نوع $s5_30_m150$ را در دستگاه لگاریتمی نمایش می‌دهد [۶].



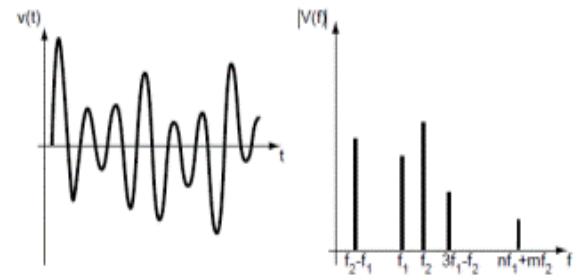
شکل ۵: تلفات هسته بر حسب چگالی شار مغناطیسی

دوره تناوب سیگنالها nT برابر دوره تناوب فرکانس منبع است. در این حالت عموماً هارمونیک‌های فرد ظاهر می‌شوند.



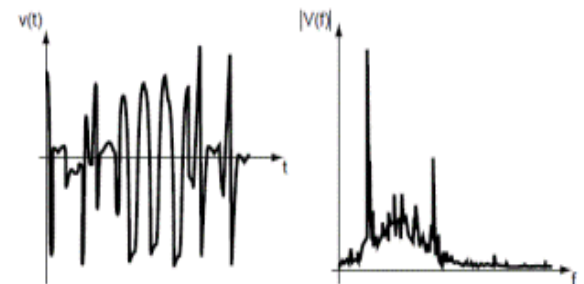
شکل ۲: حالت زیرهارمونیک

ج) حالت شبه‌پرودییک: طبق شکل ۳ در این حالت شکل موج پرودییک نیست. طیف فرکانسی آن به صورت $mf^2 + nf^1$ است (m و n عدد صحیح بوده و تقسیم f^2/f^1 عددی غیر صحیح است).

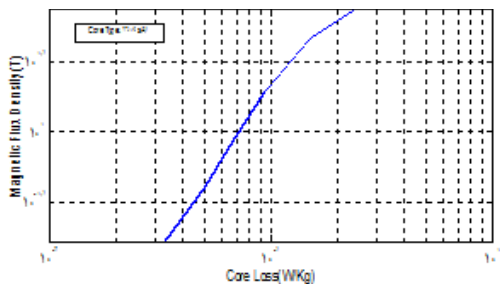


شکل ۳: حالت شبه‌پرودییک

د) حالت بی‌نظم: طبق شکل ۴ در این حالت طیف فرکانسی پیوسته و بخش‌های مختلف صفحه را پوشش می‌دهد.



شکل ۴: حالت بی‌نظم

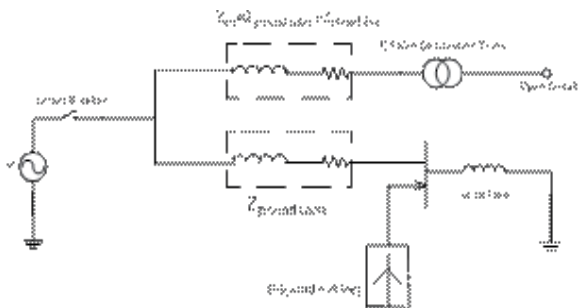


شکل ۸: منحنی تلفات هسته

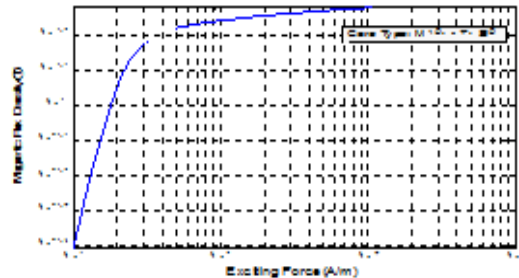
همانگونه در شکل مشاهده می شود، تلفات این دسته از ترانسفورماتورها نسبت به ترانسفورماتورهای AB و معمولی کمتر است.

۴- شبکه مورد مطالعه

شکل ۹ دیگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه را نمایش می دهد که یک شبکه توزیع انرژی الکتریکی با سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت است. در ابتدای این شبکه از کلیدهای قدرت استفاده شده که قابلیت قطع و وصل هر فاز در زمان های مشخص را دارد. فیدر نخست این شبکه شامل ۵ کیلومتر کابل ۲۰ کیلوولت زمینی و ۷ کیلومتر خط ۲۰ کیلوولت به صورت هوایی است و در انتهای آن یک دستگاه ترانسفورماتور ۳۱۵ کیلوولت آمپر قرار دارد. جهت شبیه سازی دقیق تر پدیده فرورزونانس ثانویه این ترانسفورماتور به صورت مدار باز در نظر گرفته شده است. فیدر دوم این شبکه شامل ۴ کیلومتر کابل ۲۰ کیلوولت زمینی است که یک بار محلی به ظرفیت ۱۵۰ کیلووات را تغذیه می کند. جهت تغذیه بار محلی با قابلیت اطمینان بالاتر یک منبع تولید پراکنده که شامل توربین بادی به ظرفیت ۵۰۰ کیلووات است، به انتهای فیدر متصل شده است. شکل ۱۰ شبکه شبیه سازی شده در نرم افزار PSCAD را نمایش می دهد.



شکل ۹: دیگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه

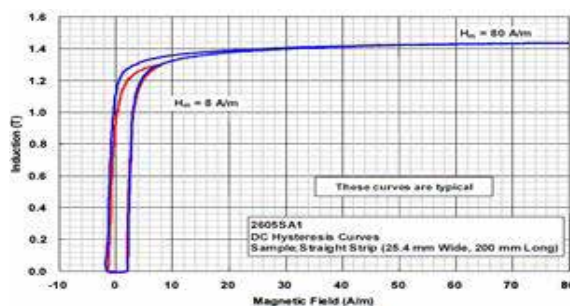


شکل ۶: منحنی اشباع ترانسفورماتور AB

۳-۲- ترانسفورماتورهای بسیار کم تلفات (آمورف)

ترانسفورماتورهای آمورف در هسته خود از آلیاژ آمورف استفاده می کنند. این آلیاژ با دارا بودن خاصیت غیر کریستالی منجر به تسریع عمل واژگونی شار و تغییر قطب های مغناطیسی می شود. به این معنا که در هر سیکل کاری انرژی کمتری صرف مغناطیس شونده و مغناطیس زدایی خواهد شد که منجر به کاهش تلفات هسته است. سطح منحنی هیستریزیس در هسته ترانسفورماتورهای آمورف در مقایسه با ترانسفورماتورهای متداول در شبکه توزیع نیروی برق کوچکتر بوده که این موضوع سبب کاهش تلفات بی باری این ترانسفورماتورها می شود [۷].

نقطه اشباع هسته ترانسفورماتورهای متداول در حدود ۲ تسلا است که این عدد در هسته های آمورف به ۱٫۶ تسلا خواهد رسید که منجر می گردد نقطه کار این دسته از ترانسفورماتورها به ۱٫۳۵ تسلا محدود گردد. نقطه اشباع هسته های آمورف عموماً در ۹۰ درصد بار نامی اتفاق می افتد [۸]. منحنی هیستریزیس هسته آمورف از نوع ۱As۲۶۰۵ به همراه لوپ داخلی در شکل ۷ نمایش داده شده است. در شکل ۸ منحنی تلفات هسته بر حسب وات بر کیلوگرم (W/Kg) به ازای چگالی شار القایی بر حسب تسلا (T) نمایش داده شده است [۹].

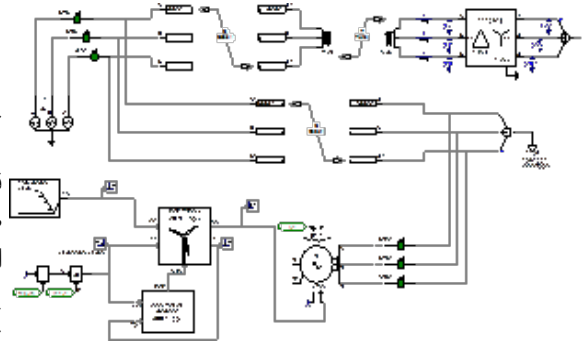


شکل ۷: منحنی هیستریزیس هسته آمورف

۵- پدیده فرورزونانس

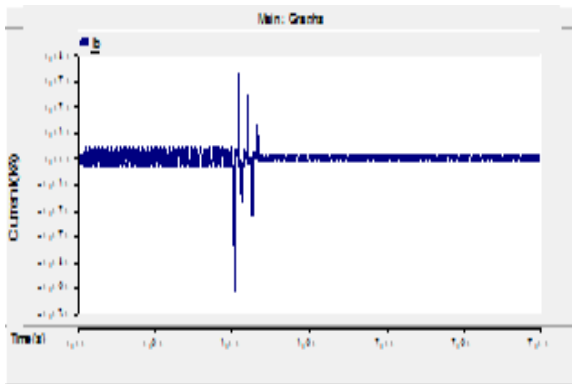
۵-۱- پدیده فرورزونانس بدون حضور منابع تولید پراکنده

یکی از حالت‌های شایع در وقوع پدیده فرورزونانس قطع یکی از فازهای متصل به ترانسفورماتور است که در صورت مدار باز بودن ترانسفورماتور و اشباع آن فرورزونانس ایجاد شده تشدید خواهد شد [۱۱]. جهت بررسی پدیده فرورزونانس سمت ثانویه ترانسفورماتور مدار باز و ترانسفورماتور در حالت اشباع قرار دارد. یک ثانیه پس از آغاز به کار سیستم کلید موجود در فاز b از حالت بسته به حالت باز تغییر وضعیت می‌دهد. شکل شماره ۱۳، ۱۴ و ۱۵ شکل موج جریان فاز b به ترتیب برای ترانسفورماتورهای معمولی، کم تلفات و آمورف را نشان می‌دهد.

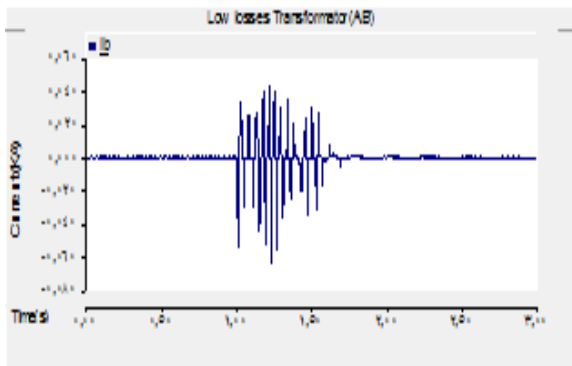


شکل ۱۰: شبکه شبیه‌سازی شده

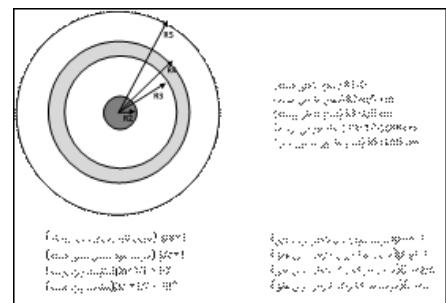
جهت تمرکز بر پدیده فرورزونانس فرض شده است که مدل باد برای توربین بادی یک مدل باد ثابت با سرعت 10 m/s است. گشتاور حاصل از چرخش توربین بادی به ژنراتور موجود در شبکه وارد شده و توان حاصل از این ژنراتور به شبکه تزریق می‌گردد. منبع تولید پراکنده از طریق کلیدهای قدرت و کنترل کننده‌های ولتاژ می‌تواند به طور دائم و یا در مواقع نوسان در ولتاژ ورودی به شبکه متصل گردد. اطلاعات مربوط به کابل‌های مورد استفاده در شبکه زمینی و هادی‌های مورد استفاده در خطوط هوایی به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است [۱۰].



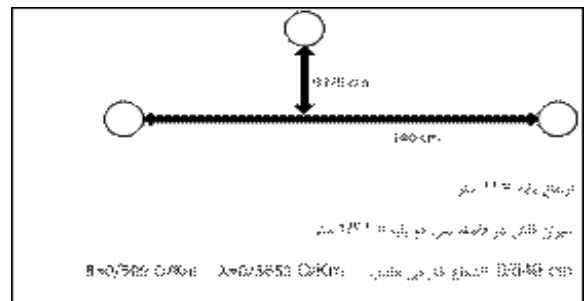
شکل ۱۳: جریان فاز b برای ترانسفورماتور معمولی



شکل ۱۴: جریان فاز b برای ترانسفورماتور کم تلفات AB



شکل ۱۱: مشخصات کابل‌های ۲۰ کیلوولت



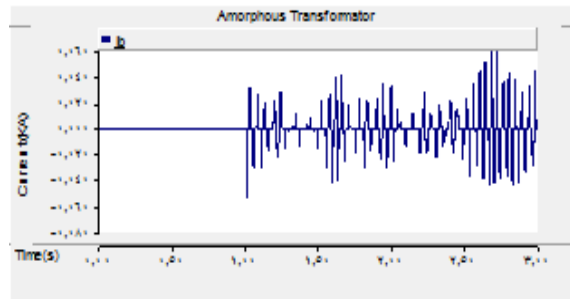
شکل ۱۲: مشخصات هادی خطوط هوایی

شکل ۱۸: THD و ولتاژ فاز b ترانسفورماتور آمورف

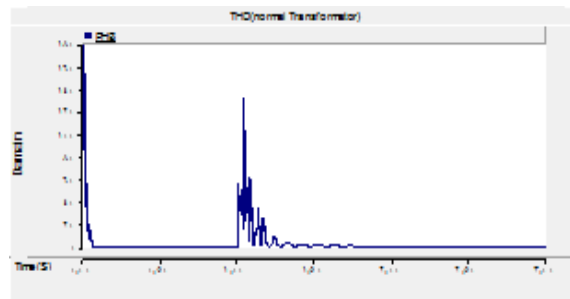
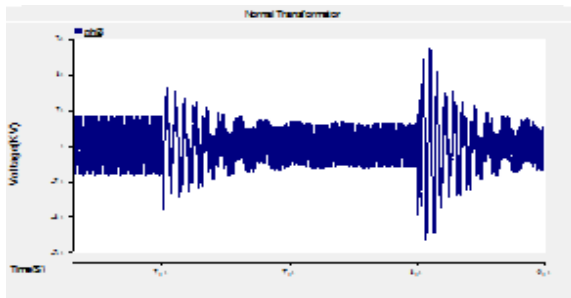
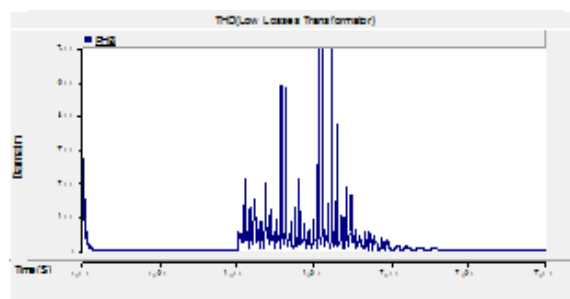
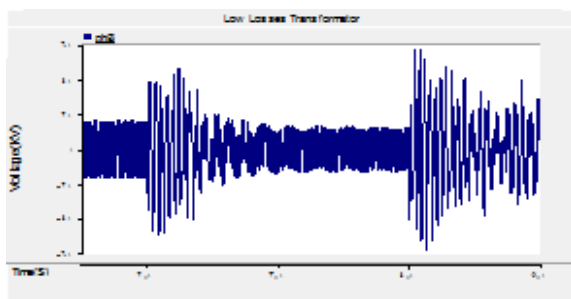
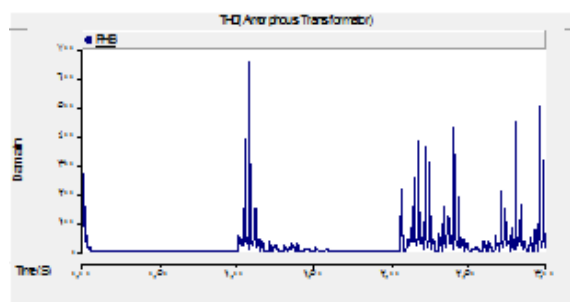
همانگونه که ملاحظه می شود شدت وقوع پدیده فرورزونانس با تلفات نسبت معکوس دارد و در ترانسفورماتورهای آمورف به بیشترین مقدار خود می رسد.

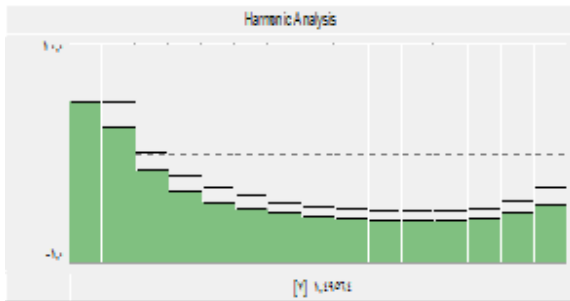
۵-۲- پدیده فرورزونانس در حضور منابع تولید پراکنده

جهت بررسی اثر حضور همزمان منابع تولید پراکنده و ترانسفورماتورهای کم تلفات، مانند حالت قبل فرض می شود ترانسفورماتور در حالت اشباع قرار دارد و ثانویه آن مدار باز است. پس از ۲ ثانیه از آغاز به کار سیستم کلید موجود در فاز b به حالت مدار باز تغییر وضعیت می دهد. جهت تامین مطمئن توان الکتریکی بار محلی، کنترل کننده ولتاژ موجود بر روی فیدر فشار متوسط متصل به منبع تولید پراکنده با بررسی لحظه ای ولتاژ شبکه، اختلال ولتاژ ناشی شده از قطع یکی از فازها را تشخیص داده و با تاخیر ۲ ثانیه ای در ثانیه ۴ منبع تولید پراکنده را وارد مدار می نماید. نتایج شبیه سازی نشان می دهد هر چند حضور منبع تولید پراکنده موجب تامین توان الکتریکی بار محلی موجود در شبکه خواهد شد اما با توجه به اینکه در فیدر دیگر ترانسفورماتور در حالت اشباع و تشدید قرار دارد، حضور منبع تولید پراکنده موجب تشدید پدیده فرورزونانس و ظهور جهشی شدیدتر در شکل موج ولتاژ و جریان فاز b خواهد شد. شکل ۱۹، ۲۰ و ۲۱ به ترتیب شکل موج ولتاژ فاز b ترانسفورماتور معمولی کم تلفات و آمورف را نشان می دهد.

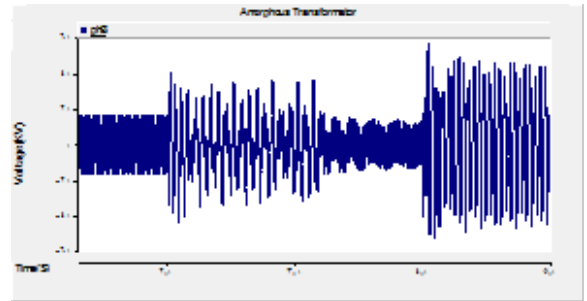
**شکل ۱۵: جریان فاز b برای ترانسفورماتور آمورف**

ضریب اعوجاج کلی هارمونیک (THD) برای ولتاژ فاز b در شکل های ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ به ترتیب برای ترانسفورماتورهای معمولی، کم تلفات و آمورف نمایش داده شده است.

**شکل ۱۶: THD ولتاژ فاز b ترانسفورماتور معمولی****شکل ۱۹: ولتاژ فاز b ترانسفورماتور معمولی****شکل ۱۷: THD ولتاژ فاز b ترانسفورماتور کم تلفات****شکل ۲۰: ولتاژ فاز b ترانسفورماتور کم تلفات (AB)**



شکل ۲۳: آنالیز هامونیک ولتاژ فاز b ترانسفورماتور آمورف

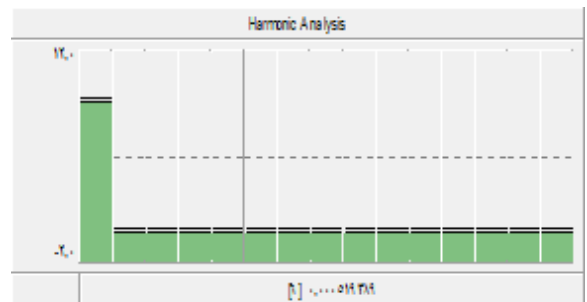


شکل ۲۱: ولتاژ فاز b ترانسفورماتور آمورف

۶- نتیجه گیری

در این مقاله کیفیت وقوع پدیده گذرای فرورزونانس در حضور همزمان منابع تولید پراکنده و ترانسفورماتورهای کم تلفات مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد پدیده مذکور علاوه بر ایجاد جهش قابل توجه در شکل موج جریان و ولتاژ، منجر به تولید هارمونیک با دامنه بالا خواهد شد. همچنین می توان نتیجه گرفت ترانسفورماتورهای آمورف که دارای کم ترین تلفات بی باری هستند بیشترین اثر در وقوع پدیده فرورزونانس را دارند. شدت این پدیده در ترانسفورماتورهای کم تلفات (AB) از ترانسفورماتورهای آمورف کم تر و از ترانسفورماتورهای معمولی بیشتر است. از سوی دیگر حضور منابع تولید پراکنده اگرچه موجب افزایش قابلیت اطمینان در تامین تقاضای توان بار موجود در شبکه می گردد اما می تواند موجب تشدید پدیده فرورزونانس گردد.

از جمله اثرات مخرب پدیده فرورزونانس، تولید هارمونیک در شبکه توزیع است. هارمونیک ایجاد شده مولفه اصلی و طیف وسیعی از زیرهارمونیک ها را شامل می شود. حضور منابع تولید پراکنده موجب تشدید پدیده فرورزونانس و متعاقباً افزایش هارمونیک در شبکه می گردد. شکل ۲۲ و ۲۳ آنالیز هامونیک به ترتیب برای ولتاژ فاز b ترانسفورماتور معمولی و ترانسفورماتور آمورف را نشان می دهد.



شکل ۲۲: آنالیز هامونیک ولتاژ فاز b ترانسفورماتور معمولی

شمراجع

- [1] Amir Tokic and Jasmin Smajic, "Modeling and Simulations of Ferroresonance by Using BDF/NDF Numerical Methods" IEEE Transactions on Power Delivery Volume: 30, Issue: 1, Feb. 2015
- [2] Hamid Radmanesh, Amir Heidary, Seyed Hamid Fathi, Gevork Babamalek Gharehpetian, "Dual function ferroresonance and fault current limiter based on DC reactor", IET Generation, Transmission & Distribution, February 2016
- [3] Javier A. Corea-Araujo, Francisco González-Molina, Juan A. Martínez, José A. Barrado-Rodrigo, and Luis Guasch, "Tools for Characterization and Assessment of Ferroresonance Using 3-D Bifurcation Diagrams" IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 29, No.6, December 2014
- [4] Paul S. Moses, Mohammad A. S. Masoum, Hamid A. Toliyat, "Impacts of Hysteresis and Magnetic Couplings on the Stability Domain of Ferroresonance in Asymmetric Three-Phase Three-Leg Transformers" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, June 2011

[۵] محسن اولادی هادی انبیايي، نیما مقیسه "ارزیابی فنی و اقتصادی ترانسفورماتورهای توزیع کم تلفات رده AB" بیستمین کنفرانس شبکه های توزیع برق زااهدان اردیبهشت ۱۳۹۴

[6] Technical Manual of Baosteel GO Silicon Steel Products "Electrical Steel" Website: <http://www.baosteel.com>

[7] R. Hasegawa Metglas, Inc "Energy Efficiency of Amorphous Metal Based Transformers" Website: <http://www.leonardo-energy.org>

[۸] فرزاد فیروز آبادی، "شناسایی با ساختار و تکنولوژی تولید ترانسفورماتورها با هسته آمورف" معاونت تحقیق و توسعه شرکت ایران ترانسفو

[۹] Metglas® Magnetic Material, "Amorphous Alloys for Transformer Cores" april 2011 Website: <http://www.metglas.com>

[۱۰] علیرضا صدیقی انارکی، "شناسایی خطای امپدانس بالاد شبکه های توزیع انرژی الکتریکی" رساله دکترای مهندسی برق دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۸۳

[11] Roger C. Dogan, Mark F. Mc Granaghan, Surya Santos and H. Wayne Beaty "Electrical Power Systems Quality, second Edition" 2004