



## بررسی تأثیر المانهای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی بر پاسخ فرکانسی و گذرای آن

یاسر تک زارع، امیرعباس شایگانی اکمل، حسین محسنی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران

واژه های کلیدی: CVT، پاسخ فرکانسی، حالت گذرا، EMTP

ولتاژ بالا می‌باشند. از نظر تنوری، شکل ولتاژ خروجی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی باید یکسان با شکل موج ورودی در تمام شرایط عملکرد باشد. تحت شرایط مانا این شرط با طراحی دقیق ترانسفورماتور ولتاژ خازنی برقرار می‌شود. اما در شرایط گذرا مانند اتصال کوتاه و کلید زنی، بعلت وجود عناصر خازنی، سلفی و غیرخطی، شکل موج ولتاژ خروجی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی می‌تواند از ولتاژ ورودی متفاوت باشد [۱][۴].

تلاش‌های زیادی برای تعریف قابل قبولی از خصوصیات عملکرد گذرای CVT صورت گرفت است [۱] [۵] [۷]. اما عملکرد حالت گذرای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی توسط هیچ استاندارد پوشش داده نمی‌شود [۱]. کارهای زیادی هم برای بررسی تأثیر CVT بر عملکرد رله‌های حفاظتی شکل گرفته است [۵] [۱۰]. در مقالاتی که پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی به دست آمده به تأثیری که CVT بر فاز ولتاژ خروجی دارد اشاره‌ای نشده است [۴].

در این مقاله سعی شده است که مدل دقیقی از ترانسفورماتور ولتاژ خازنی در نرم افزار EMTP-RV پیاده شود. و برای

### خلاصه

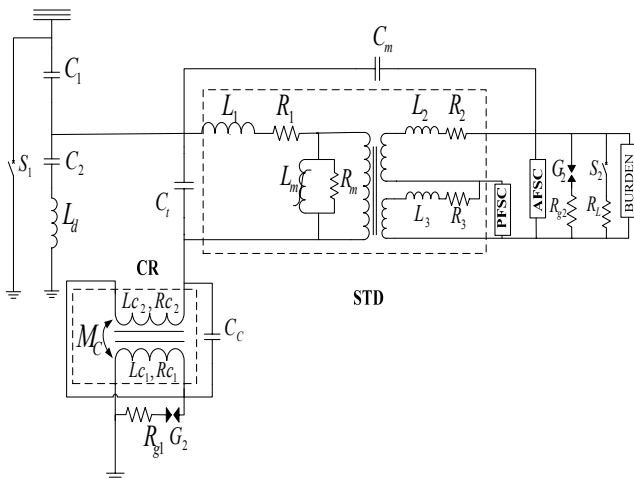
در این مقاله مدل دقیقی از ترانسفورماتور ولتاژ خازنی با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV ارائه شده و با کمک آن تأثیر پارامترهای مختلف از جمله مدارهای تضعیف فرورزونانس (فعال و غیر فعال)، پارامترهای کلی طراحی CVT و همچنین بار متصل به آن بر پاسخ فرکانسی (بهره دامنه و شیفت فاز) CVT بررسی شده است. و همچنین با استفاده از مدل ارائه شده و با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس در شاخه مغناطیسی پاسخ CVT به ولتاژ فرونشست و پدیده فرورزونانس بدست آمده و تأثیر پارامترهای مختلف از جمله شاخه حفاظت از اضافه ولتاژ و مدارهای تضعیف فعال و غیر فعال بر فرورزونانس بررسی شده است.

### ۱. مقدمه

ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی (CVT) مهمترین تجهیز تامین کننده سیگنال‌های ولتاژ برای رله‌های حفاظتی در سطوح

نظر گرفته شده اند و جزئی از مدار CVT نیستند. در ضمن، ولتاژ شکست فاصله هوایی مربوط به حفاظت اضافه ولتاژ ۲۵۰ ولت می باشد.

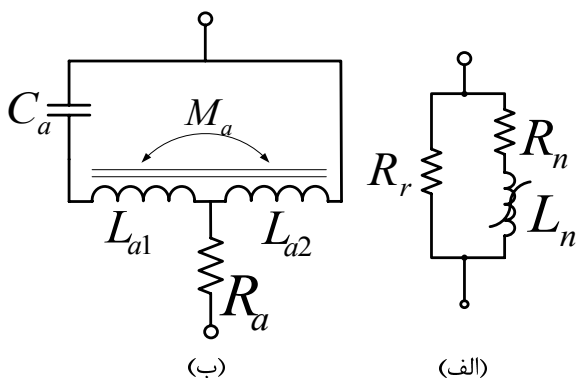
مشخصات فنی و نیز مقادیر پارامترهای مدار ترانسفورماتور ولتاژ خازنی مورد مطالعه در پیوست ارائه شده اند.



شکل ۱- مدار ترانسفورماتور ولتاژ خازنی شبیه سازی شده

## ۲.۲. مدار تضعیف فرورزونانس

دو نوع مدار تضعیف فرورزونانس در مدار ترانسفورماتورولتاژ خازنی بکار می روند، نوع فعال و نوع غیر فعال [۶] [۲]. شکل (۲) این دو نوع مدار استفاده شده در این مقاله را نشان می دهد.



شکل ۲- مدار تضعیف فرورزونانس (الف) فعال، (ب) غیر فعال

## ۴. پاسخ فرکانسی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی

### ۱.۳. خصوصیات پاسخ فرکانسی

شناخت هرچه بهتر پاسخ گذرای این تجهیز ابتدا پاسخ فرکانسی (بهره دامنه و شیفیت فاز) آن به دست آمده است. و در ادامه با استفاده از خصوصیات پاسخ فرکانسی توضیح داده شده است که چرا ترانسفورماتور ولتاژ خازنی در حالت های گذرا ممکن است هماندهی خود را از دست بدهد. و سپس فاکتورهای تاثیرگذار بر پاسخ فرکانسی معرفی شده و تاثیر هریک از این پارامترها بر پاسخ فرکانسی (بهره دامنه و شیفیت فاز) بررسی شده است. پاسخ فرکانس پایین ترانسفورماتور از جمله فرورزونانس به مشخصه مغناطیسی و تلفات هسته بسیار حساس می باشد. برای اینکه بتوان پدیده فرورزونانس را به خوبی مدل کنیم از مدل اندوکتانس با مشخصه هیستریزس برنامه EMTP\_RV استفاده شده است. در ادامه پاسخ ترانسفورماتور ولتاژ خازنی به ولتاژ فرونشست<sup>۱</sup> و تاثیر نوع مدار تضعیف فرورزونانس بر پاسخ گذرا نشان داده شده است.

## ۳. سیستم مورد مطالعه

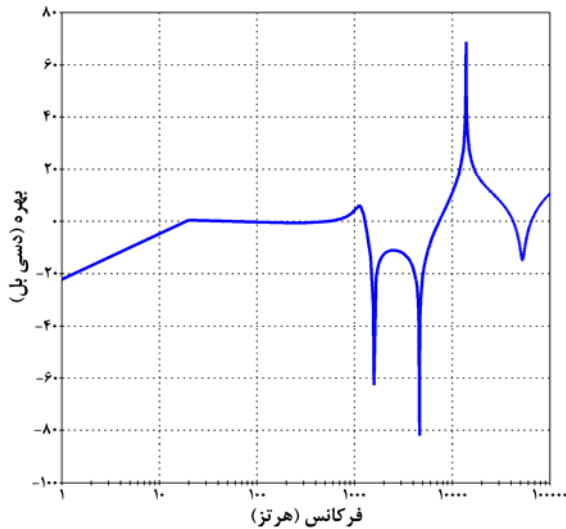
### ۱.۲. اجزای تشکیل دهنده مدار ترانسفورماتورولتاژ خازنی

در این مقاله مدل ترانسفورماتور ولتاژ خازنی TEHMP161A برای شبیه سازی مورد استفاده قرار گرفته است شکل (۱) مدار ترانسفورماتورولتاژ خازنی تحت مطالعه را نشان می دهد [۲]-[۴]. اجزای اصلی مدار ترانسفورماتورولتاژ خازنی عبارتند از: مقسم ولتاژ خازنی (C1, C2)، سیم پیچ تخلیه (La)، ترانسفورماتور ولتاژ کاهنده (STD)، راکتور جبران کننده، مدار تضعیف فرورزونانس (فعال یا غیر فعال)، تجهیز حفاظت اضافه ولتاژ (Rg1, G1) و (Rg2, G2)، و بار. خازن های Cc, Ct, Cm و نمایانگر متمرکز خازن های پراکندگی ترانسفورماتورکاهنده و راکتور جبران کننده هستند.

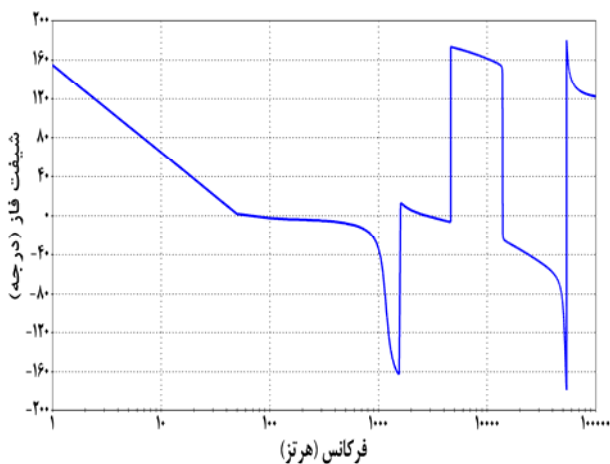
S1 برای شبیه سازی اتصال کوتاه در اولیه و مقاومت RL = 30 mΩ و کلید S2 برای شبیه سازی اتصال کوتاه در سمت ثانویه ترانسفورماتورکاهنده و ایجاد فرورزونانس در

<sup>1</sup>Subsidence

- شیفت زاویه صفر درجه ( $0^\circ$ ) برای فرکانس اصلی.
- شیفت زاویه تقدیمی<sup>۱</sup> برای DC (صفر هرتز) تا فرکانس اصلی.
- شیفت زاویه تاخیری در فرکانس های بالاتر از فرکانس اصلی.



شکل ۳- پاسخ دامنه ترانسفورماتور ولتاژ خازنی تحت مطالعه



شکل ۴- پاسخ شیفت فاز ترانسفورماتور ولتاژ خازنی تحت مطالعه

پاسخ شیفت فاز CVT با فرکانس تغییر می کند و شیفت فاز برای فرکانس های مختلف از یکدیگر متفاوت می باشد. پاسخ حالت ماندگار تاثیر نمی پذیرد چون شیفت فاز برای این فرکانس همانطور که در شکل هم مشخص است برابر با صفر می باشد. ولی پاسخ حالت گذرا تحت تاثیر قرار می گیرد چون همانطور که گفته شد ترکیبی از چندین فرکانس بوده و هر

پاسخ فرکانسی از دو پارامتر که برحسب فرکانس رسم شده اند تشکیل شده است: بهره دامنه و شیفت فاز، این دو منحنی به طور جداگانه با عناوین پاسخ دامنه و پاسخ شیفت فاز شناخته می شوند. بهره دامنه واحد ( $1/0$ ) و شیفت فاز صفر درجه برای تمام فرکانس ها به عنوان پاسخ فرکانسی ایده آل در نظر گرفته می شود.

در شکل (۳) پاسخ بهره دامنه ترانسفورماتور ولتاژ مورد مطالعه نشان داده شده است. پاسخ فرکانسی آورده شده با در نظر گرفتن پارامترهای ذکر شده در جدول ۱ پیوست و همچنین با مدار تضعیف غیر فعال و بدون در نظر گرفتن مدار تضعیف فعال و با ولتاژ خروجی و ورودی یکه شده به دست آمده است. این شکل نشان می دهد که پاسخ فرکانسی بهره دامنه ترانسفورماتور ولتاژ خازنی ایده آل نمی باشد.

مهمترین ویژگی های پاسخ فرکانسی عبارتند از:

- بهره واحد (در ولتاژهای یکه شده) برای فرکانس اصلی سیستم، مثل حالت ماندگار.
- تقویت بعضی از فرکانس های بزرگتر از فرکانس اصلی.
- تضعیف در فرکانس های بالا و در فرکانس های پایین و حالت DC (0Hz).

پاسخ دامنه CVT با فرکانس تغییر می کند و بهره دامنه همیشه واحد نمی باشد. این مساله در حالت ماندگار مشکلی را پیش نمی آورد چون در این حالت یک فرکانس داریم که برای آن بهره دامنه واحد می باشد. اما پاسخ گذرا تحت تاثیر قرار می گیرد چون پاسخ گذرا چندین فرکانس ترکیب شده است. و نتیجه ای که می توان برای شرایط حالت گذرا گرفت این است که سیگنال خروجی CVT متفاوت از سیگنال ورودی است.

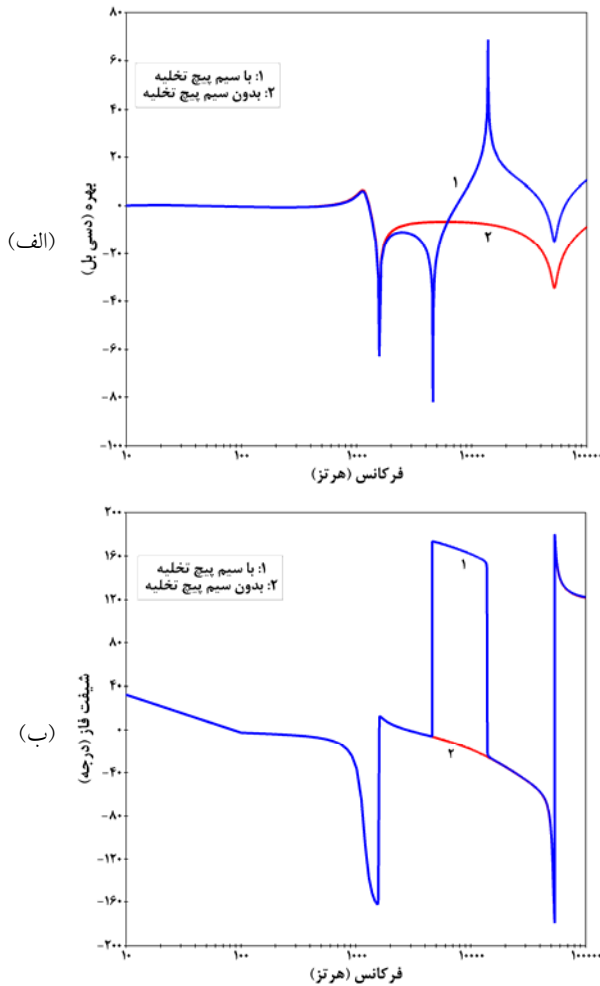
در شکل (۴) پاسخ فرکانسی شیفت فاز ترانسفورماتور ولتاژ خازنی مورد نظر نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که پاسخ شیفت فاز ترانسفورماتور ولتاژ خازنی ایده آل نبوده و با فرکانس تغییر می کند. مهمترین خصوصیات پاسخ شیفت فاز عبارتند از:

<sup>1</sup> Leading

همانطور که مشاهده می شود با مدار تضعیف فرورزونانس غیر فعال پاسخ خیلی نزدیک به وقتی است که مدار تضعیفی در مدل نمی باشد. ولی اضافه کردن مدار تضعیف فعال تاثیر قابل توجهی بر پاسخ فرکانسی دارد.

فاکتور دیگر تاثیر گذار بر پاسخ فرکانسی پارامترهای کلی طراحی CVT شامل سیم پیچ تخلیه، سلف جبران کننده و خازن های پراکنده سلف جبران کننده و ترانسفورماتور کاهنده می باشد. که در ادامه به بررسی اثر هر یک از آنها بر پاسخ فرکانسی پرداخته شده است.

شکل (۶) نشان دهنده تاثیر سیم پیچ تخلیه بر پاسخ فرکانسی است. همانطور دیده می شود سیم پیچ تخلیه به طور قابل ملاحظه ای در فرکانس های بالاتر از ۲۰۰۰ هرتز بر پاسخ فرکانسی تاثیر می گذارد.



شکل ۶- اثر سیم پیچ تخلیه  $L_d$  بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیفت فاز

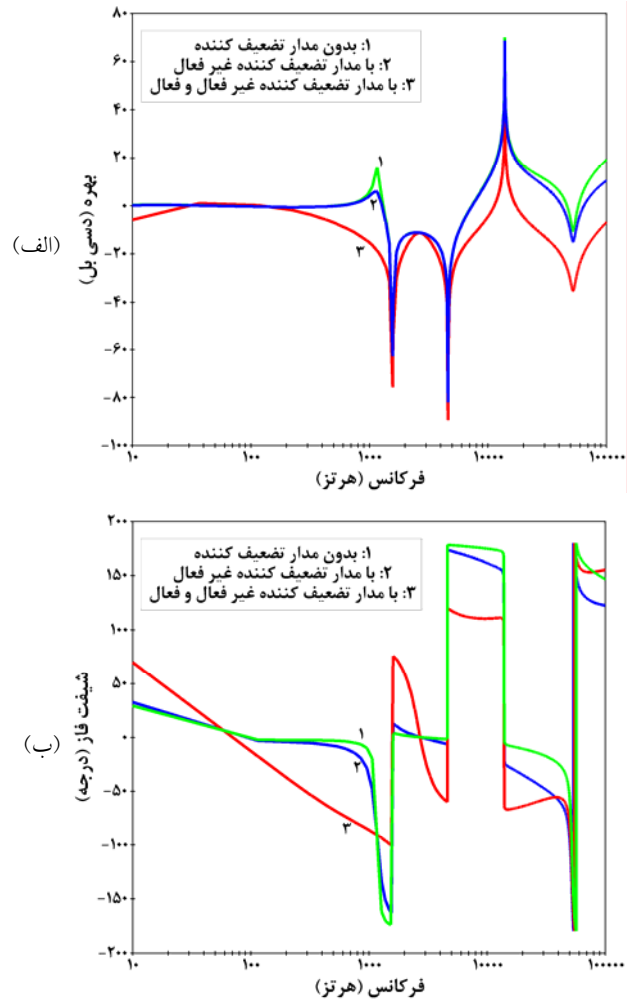
فرکانس با زاویه متفاوتی و به طور غیر خطی شیفت پیدا می کند. و بنابراین خروجی از ورودی متفاوت خواهد بود.

### ۲.۳. فاکتورهای تاثیر گذار بر پاسخ فرکانسی

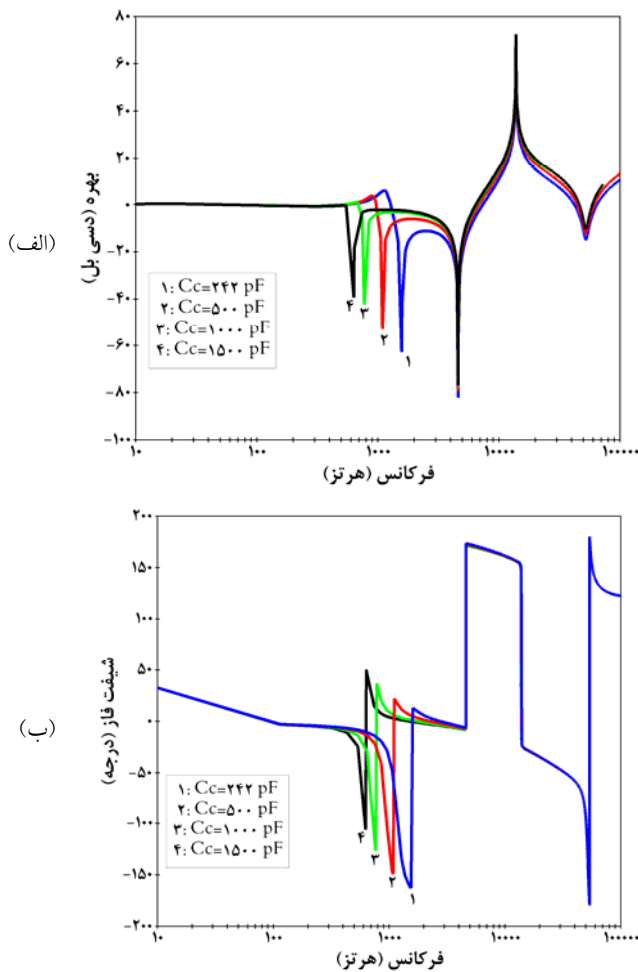
سه فاکتور تاثیر گذار بر پاسخ فرکانسی وجود دارد:

- (۱) نوع مدار تضعیف کننده فرورزونانس
- (۲) پارامترهای کلی CVT
- (۳) بار خارجی

مهمترین فاکتوری که مدار CVT را تحت تاثیر قرار می دهد نوع مدار تضعیف کننده فرورزونانس می باشد [۵][۸]. شکل (۵) پاسخ فرکانسی CVT همراه با مدارهای تضعیف فرورزونانس مختلف را نشان می دهد.



شکل ۵- اثر مدار تضعیف فرورزونانس بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیفت فاز

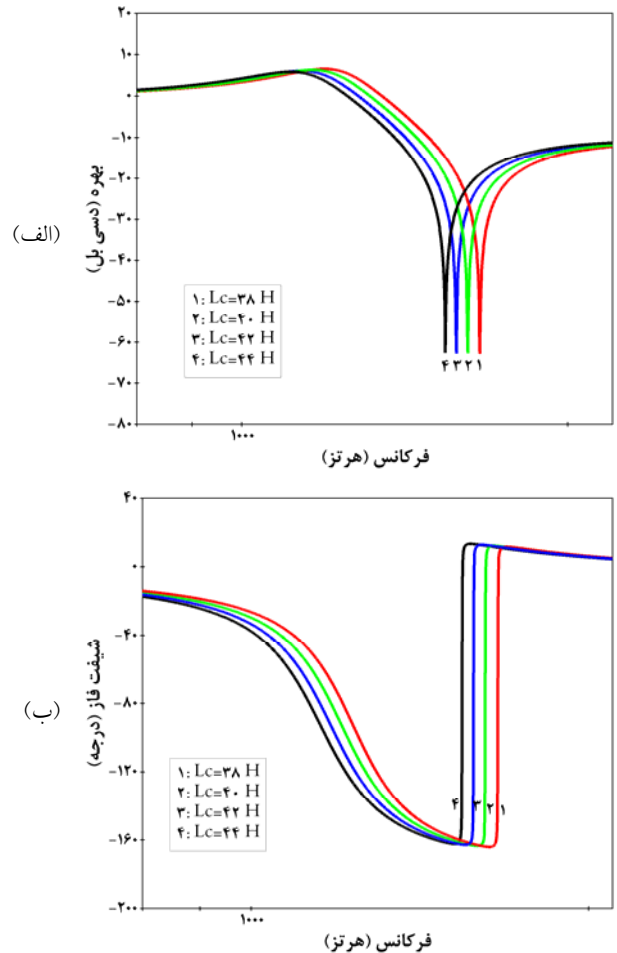


شکل ۸- اثر خازن پراکندگی سلف جبران کننده بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیفت فاز

با توجه به شکل (۹) نتیجه می‌شود که برای فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰ هرتز نمی‌توان از تاثیر خازن پراکندگی اولیه ترانسفورماتور ولتاژ کاهنده بر پاسخ فرکانسی چشم‌پوشی کرد. با توجه به اثر این خازن پراکندگی بر پاسخ فرکانسی نتیجه می‌شود برای اینکه مدلی داشته باشیم که برای فرکانس‌های بالاتر هم معتبر باشد باید خازن پراکندگی اولیه ترانسفورماتور ولتاژ کاهنده را در نظر گرفت.

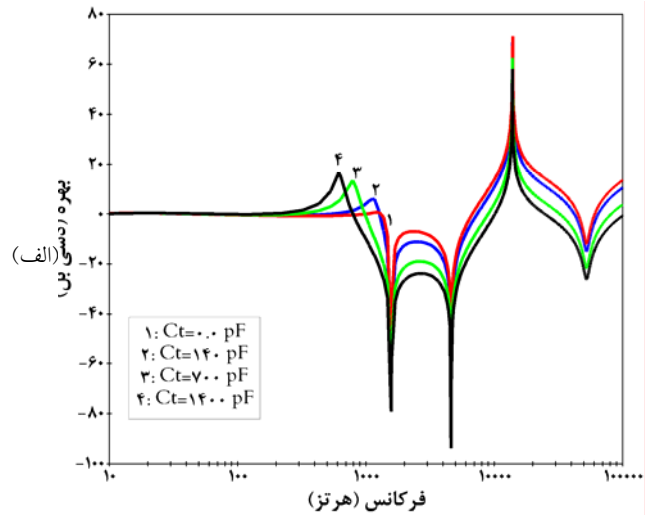
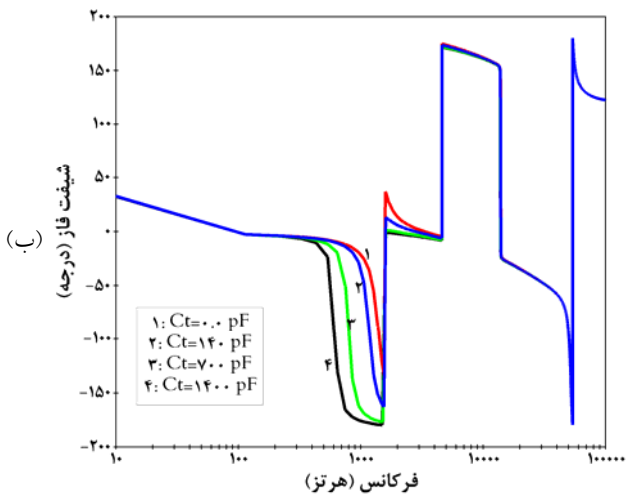
شکل (۱۰) اثر خازن پراکندگی بین سیم پیچ‌های ترانسفورماتور ولتاژ کاهنده را بر پاسخ فرکانسی را نشان می‌دهد. با توجه به اثر این خازن بر شکل پاسخ برای بررسی فرکانس‌های بالاتر باید این خازن در مدل لحاظ شود

شکل (۷) تاثیر اندوکتانس سلف سری را بر پاسخ فرکانسی نشان می‌دهد. کوچکترین فرکانس تشدید در پاسخ فرکانس توسط فرکانس طبیعی حلقه حاصل از سلف جبران کننده و خازن پراکندگی آن تعریف می‌شود، تغییر اندوکتانس این سلف و یا مقدار ظرفیت خازن پراکندگی آن مستقیماً بر روی این فرکانس تاثیر گذاشته و آن را جابجا می‌کند.

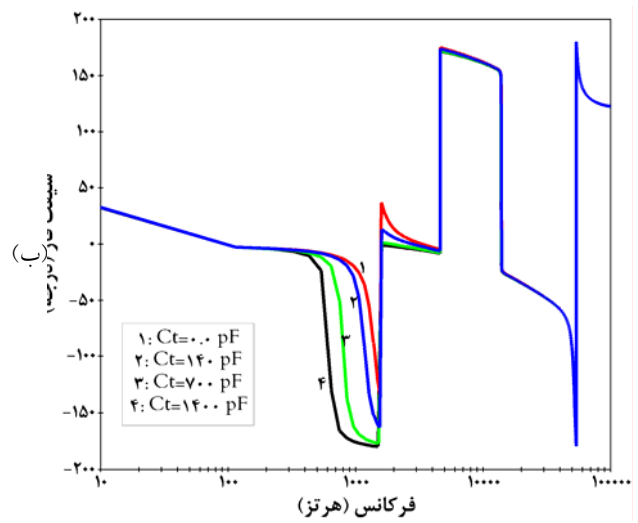
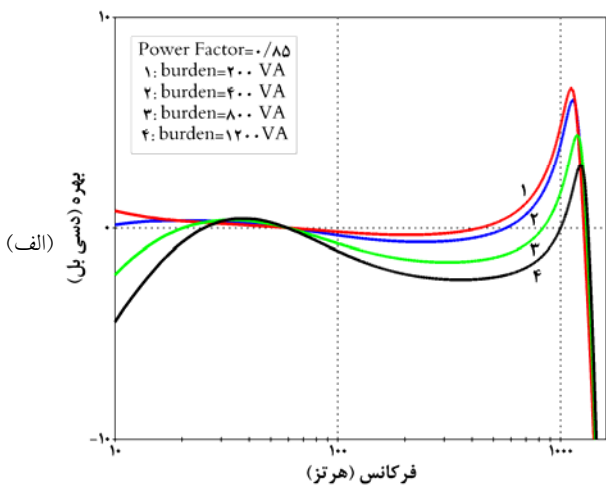


شکل ۷- اثر اندوکتانس خالص سلف جبران کننده بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیفت فاز

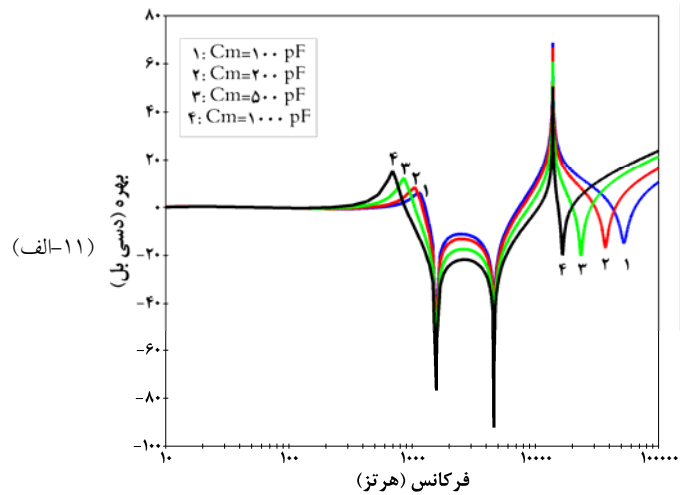
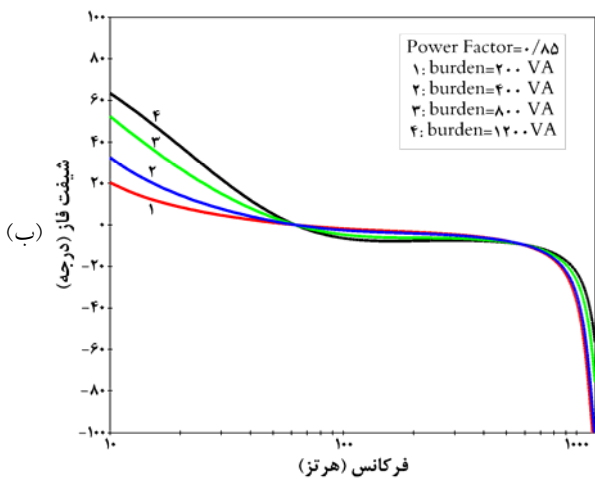
شکل (۸) نشان می‌دهد که فرو رفتگی نشان داده شده در پاسخ فرکانسی به طور قابل ملاحظه‌ای توسط خازن پراکندگی سلف جبران کننده تحت تاثیر قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰- اثر خازن پراکنده بین سیم پیچ‌های ترانسفورماتور لیتاز کاهنده بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیفیت فاز



شکل ۹- اثر خازن پراکنده اولیه ترانسفورماتور لیتاز کاهنده بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیفیت فاز



شکل ۱۱- اثر مقدار بار بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیفیت فاز

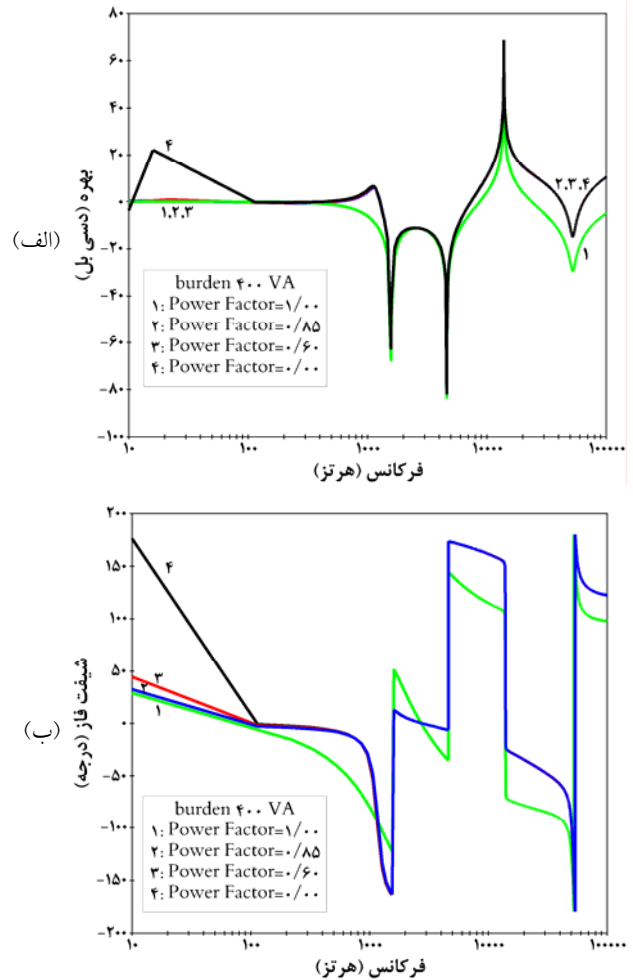
- تخلیه انرژی درونی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی در اثر اتصال کوتاه در خط انتقال مربوطه یا ولتاژ فرونشست.

#### ۱.۴. فرورزونانس

تغییرات ناگهانی ولتاژ در طرف اولیه یا ثانویه ترانسفورماتور ولتاژ خازنی، بویژه هنگام شروع از یک وضعیت مغناطیس شده قبلی و بسته به لحظه کلید زنی، می تواند سبب ایجاد نوسانات فرورزونانس شود [۱۰].

یکی از عمده ترین حالاتی که سبب ایجاد فرورزونانس در ترانسفورماتور ولتاژ خازنی می شود اشباع ترانسفورماتور ورودی رله ها که بار ترانسفورماتور ولتاژ خازنی را تشکیل می دهند می باشد. هنگامی که این ترانسفورماتور از اشباع خارج می شود، افزایش ناگهانی امپدانس از یک مقدار خیلی کم به یک مقدار خیلی زیاد سبب ایجاد فرورزونانس می شود [۷].

فرورزونانس پدیده ای است که به مشخصه مغناطیسی و تلفات هسته بسیار حساس می باشد. تلفات هسته از تلفات جریان گردشی و هیستریزس تشکیل می شود. تلفات جریان گردشی با توان دو شار مغناطیسی و فرکانس متناسب است. در نتیجه یک مقاومت ثابت با دقت خوبی می تواند این تلفات را مدل کند. بنابراین چون شاخه مقاومت موازی تنها تلفات جریان گردشی را مدل می کند به جای  $4/96M\Omega$  مقدار  $9/92M\Omega$  در نظر گرفته شده است. ولی تلفات هیستریزس به فرکانس و سطح محصور در منحنی هیستریزس و در نتیجه به مدل هیستریزس وابسته هستند. برای اینکه بتوان پدیده فرورزونانس را به خوبی مدل کنیم از مدل اندوکتانس با مشخصه هیستریزس برنامه EMTP\_RV استفاده شده است. در شکل (۱۳) حلقه اصلی هیستریزس در حالت کار عادی و به ازای افزایش ولتاژ ورودی نشان داده شده است. مدل هیستریزس نرم افزار EMTP\_RV قادر به مدل سازی حلقه های فرعی متقارن و نامتقارن نیز می باشد که در شکل (۱۴) با تغییر حالت کاری از حالت عادی به حالت فرورزونانس حلقه های فرعی نیز نشان داده شده اند.



شکل ۱۲- اثر ضریب توان بار بر پاسخ فرکانسی. الف- بهره دامنه ب- شیف فاز

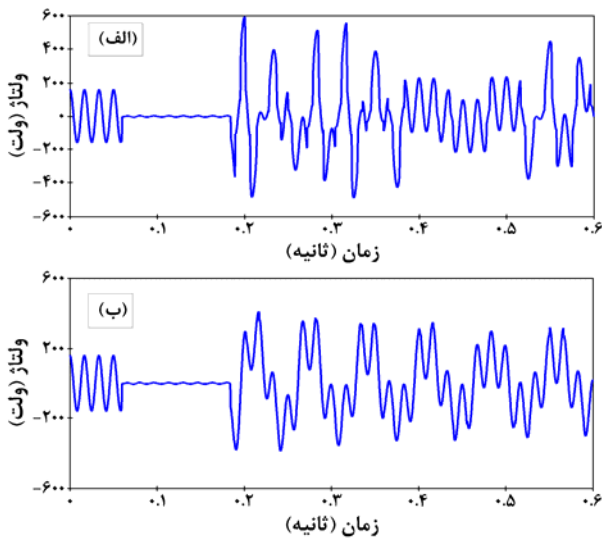
بار متصل به ترانسفورماتور ولتاژ خازنی، اگرچه خارج از آن قرار دارد، اما فاکتور مهم دیگر تاثیرگذار بر پاسخ فرکانسی است. و برای تعریف دقیق رفتار فرکانسی CVT لازم می باشد. شکل های (۱۱) و (۱۲) وابستگی پاسخ فرکانسی به بار را نشان می دهد.

#### ۵. پاسخ حالت گذرای CVT در حوزه زمان

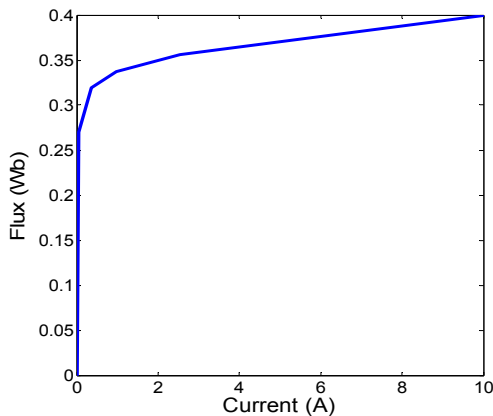
رفتار گذرای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی را به دو نوع می توان تقسیم بندی کرد [۹]:

- نوسانات غیرخطی در اثر اشباع هسته مغناطیسی ترانسفورماتور کاهنده یا فرورزونانس

شده در شکل (۱۵) نشان می‌دهد که تأثیر پدیده هیستریزیس بر نوسانات فرورزونانس در ترانسفورماتورولتاژ خازنی قابل صرف نظر کردن نمی‌باشد.

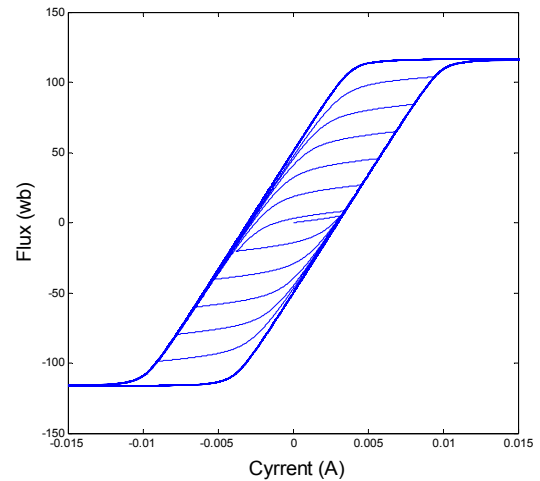


شکل ۱۵- ولتاژ خروجی در هنگام پدیده فرورزونانس بدون حضور مدار میراکننده الف- بدون در نظر گرفتن اثر هیستریزیس - با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس

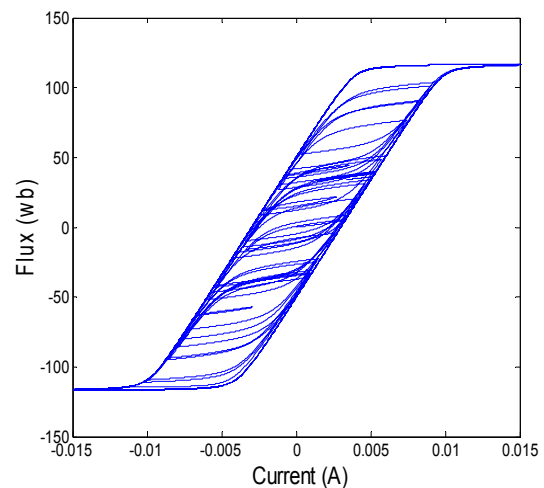


شکل ۱۶- مشخصه مغناطیسی سلف اشباع شونده در مدار تضعیف فرورزونانس غیرفعال

در مورد بعدی تأثیر مدار تضعیف فرورزونانس غیرفعال را بر روی پدیده فرورزونانس در CVT وقتی مدار تضعیف فعال و  $G_2$  و  $R_{g2}$  در مدار CVT نیستند را بررسی می‌کند. مدار تضعیف فرورزونانس از مقاومت  $R_p = 75\Omega$  موازی با سلف اشباع شونده تشکیل شده است. سلف این مدار دارای مشخصه مغناطیسی مطابق شکل (۱۶) و مقاومت داخلی  $R_n = 1.35\Omega$  می‌باشد. شکل (۱۷-الف) رفتار فرورزونانسی CVT را با وجود مدار تضعیف غیرفعال نشان



شکل ۱۳- حلقه هیستریزیس ترانسفورماتور ولتاژ در حالت کار عادی به ازای افزایش ولتاژ ورودی



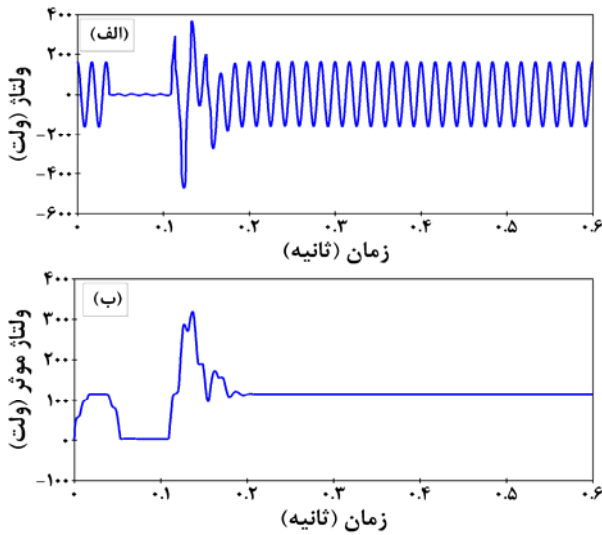
شکل ۱۴- تغییرات حلقه هیستریزیس هسته در هنگام تغییر مد از مد کار عادی به مد فرورزونانس

برای شبیه سازی پدیده فرورزونانس بر اثر اشباع ترانسفورماتور ورودی رله کلید  $S_2$  در شکل (۱) ابتدا باز است کلید  $S_2$  بسته می‌شود و بعد از چند سیکل باز می‌شود. باز شدن  $S_2$  ترانسفورماتورکاهنده را اشباع می‌کند و در نتیجه فرورزونانس رخ می‌دهد. برای شبیه سازی بدترین شرایط بار ترانسفورماتور ولتاژ خازنی مقدار ناچیز ۱VA در نظر گرفته شده است.

ابتدا پدیده فرورزونانس بدون استفاده از مدار تضعیف فرورزونانس بررسی می‌شود. شکل‌های (۱۵-الف) و (۱۵-ب) به ترتیب نوسانات فرورزونانس در ولتاژ خروجی را بدون و با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس در مشخصه مغناطیسی ترانسفورماتورکاهنده نشان می‌دهند. مقایسه نتایج نمایش داده



در مرحله دوم شبیه سازی از مدار تضعیف فرورزونانس فعال مطابق شکل (۲) به جای مدار تضعیف غیر فعال استفاده شده است. همانطور که در شکل (۱۹) مشاهده می شود فرورزونانس زودتر برطرف می شود و مدار فرورزونانس اکتیو سریع تر از نوع غیر اکتیو عمل می کند. اما مانند نمونه قبل اضافه ولتاژ سیکل اول میرا نشده است.



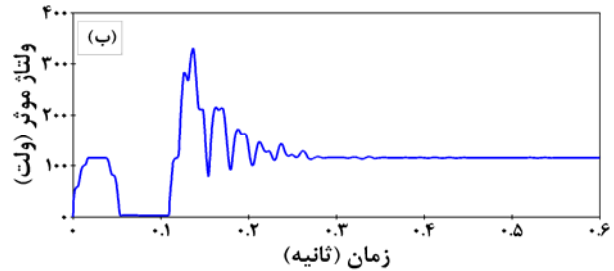
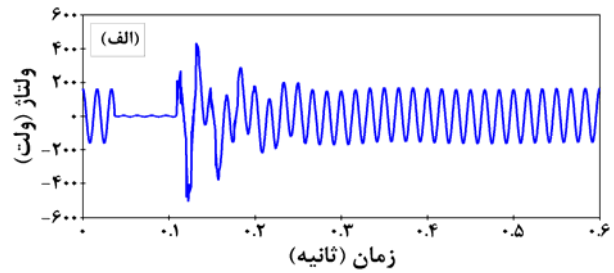
شکل ۱۹- عملکرد ترانس ولتاژ خازنی دارای مدار تضعیف فعال الف- ولتاژ خروجی ب- مقدار موثر

#### ۲.۴. ولتاژ فرونشست

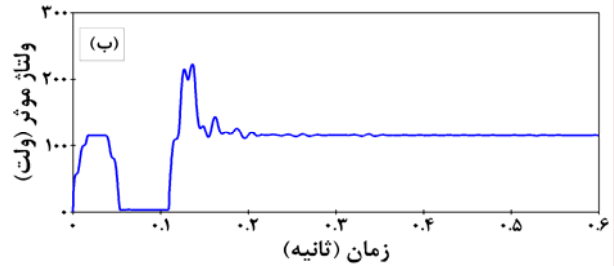
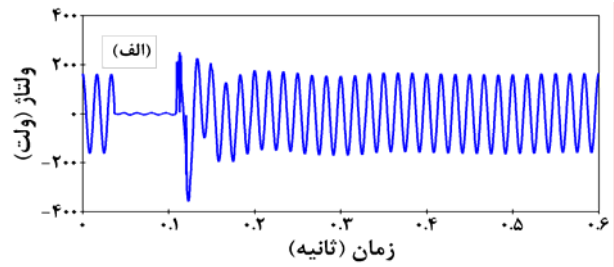
حالت گذرای فرونشست خطایی است که در پایانه های ترانسفورماتور ولتاژ خازنی در اثر یک افت شدید ناگهانی در ولتاژ ورودی ظاهر می شود [۱]. در حین اتصال کوتاه در خطوط انتقال، وقتی که ولتاژ اولیه کاهش پیدا می کند و انرژی ذخیره شده در خازن های تقسیم کننده ولتاژ و راکتور جبران کننده شروع به تلف شدن می کند، ترانسفورماتور ولتاژ خازنی حالت گذرای شدیدی تولید می کند. در این شرایط ولتاژ ثانویه ترانسفورماتور ولتاژ خازنی سریعاً ولتاژ اولیه را نشان نمی دهد، زیرا عناصر ذخیره کننده انرژی مذکور نمی توانند بار الکتریکی و شار مغناطیسی خود را به صورت آنی تغییر دهند [۵]. پاسخ CVT به خطای خط به زمین موقت نزدیک به آن با بستن و باز کردن کلید  $S_1$  نشان داده شده در شکل (۱) شبیه سازی شده است. (در ابتدا کلید های  $S_1$  و  $S_2$  باز هستند).

شکل (۲۰-الف) شکل موج ولتاژ ورودی CVT را نشان می دهد. در شکل (۲۰-ب) پاسخ CVT (ولتاژ خروجی) به

می دهد. شکل (۱۷-ب) نشان می دهد که با استفاده از مدار تضعیف فرورزونانس غیر فعال فرورزونانس بعد از نزدیک به ۱۰ سیکل میرا شده و برطرف می شود.



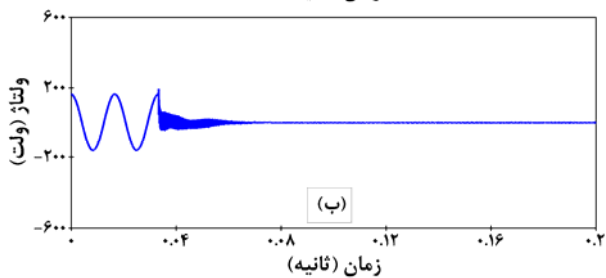
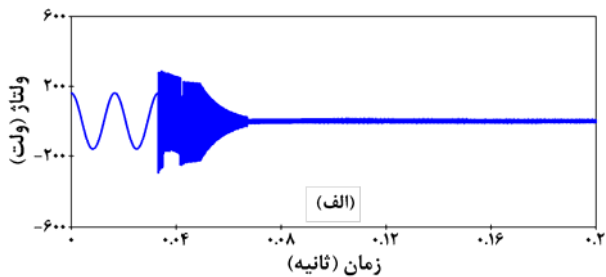
شکل ۱۷- عملکرد ترانس ولتاژ خازنی دارای مدار تضعیف غیر فعال الف- ولتاژ خروجی ب- مقدار موثر



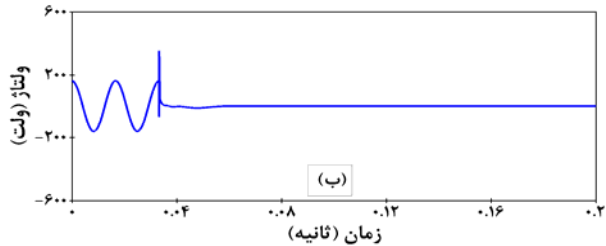
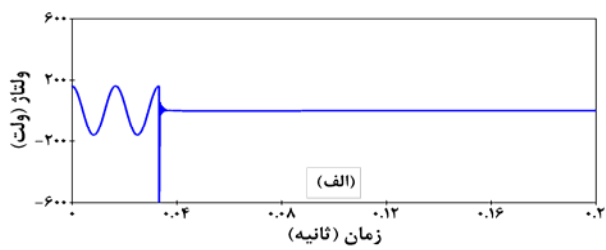
شکل ۱۸- عملکرد ترانس ولتاژ خازنی دارای مدار تضعیف غیر فعال به همراه شاخه حفاظتی در ثانویه الف- ولتاژ خروجی ب- مقدار موثر

برای بهبود عملکرد مدار تضعیف فرورزونانس غیر فعال می توان از تجهیز اضافه ولتاژ  $G_2$  به همراه مقاومت  $R_{g2}$  استفاده کرد. شکل (۱۸-الف) ولتاژ خروجی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی را با استفاده از تجهیز حفاظت اضافه ولتاژ فعال  $G_2$  به همراه مقاومت  $R_{g2} = 6\Omega$  را نشان می دهد. مشاهده می شود که در صورت استفاده از تجهیز اضافه ولتاژ فرورزونانس بعد از حدود ۶ سیکل میرا می شود.

که در این حالت اضافه ولتاژ سیکل اول بعد از خطا محدود شده است.



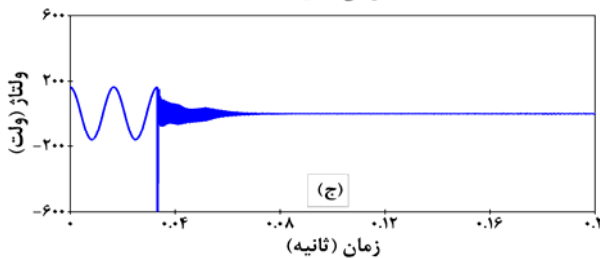
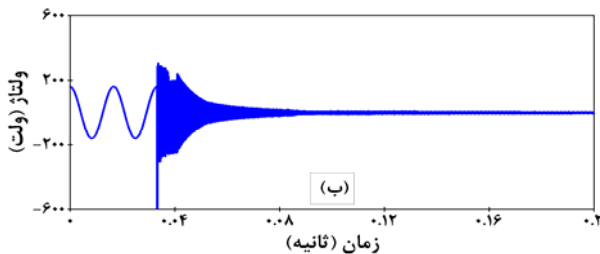
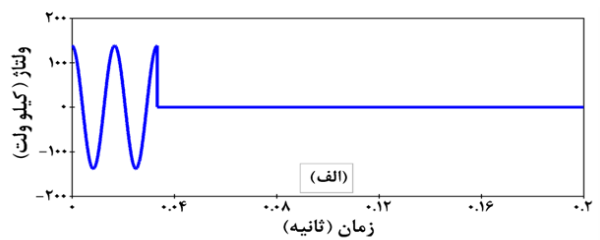
شکل ۲۱- پاسخ گذرای CVT به بسته و باز شدن کلید  $S_1$  در شکل (۱) الف- ولتاژ خروجی با سیم پیچ تخلیه و بدون خازن پراکندگی و با مدار غیر فعال ب- ولتاژ خروجی با سیم پیچ تخلیه و بدون خازن پراکندگی و با مدار فعال



شکل ۲۲- پاسخ گذرای CVT به بسته و باز شدن کلید  $S_1$  در شکل (۱) الف- ولتاژ خروجی بدون سیم پیچ تخلیه و با خازن پراکندگی و با مدار غیر فعال ب- ولتاژ خروجی بدون سیم پیچ تخلیه و با خازن پراکندگی و با مدار فعال

شکل (۲۲) پاسخ CVT را در حالتی که مدل شامل سیم پیچ تخلیه نبوده ولی خازن‌های پراکندگی در مدل لحاظ شده‌اند را نشان می‌دهد. در این حالت نوسانات فرکانس بالا در خروجی

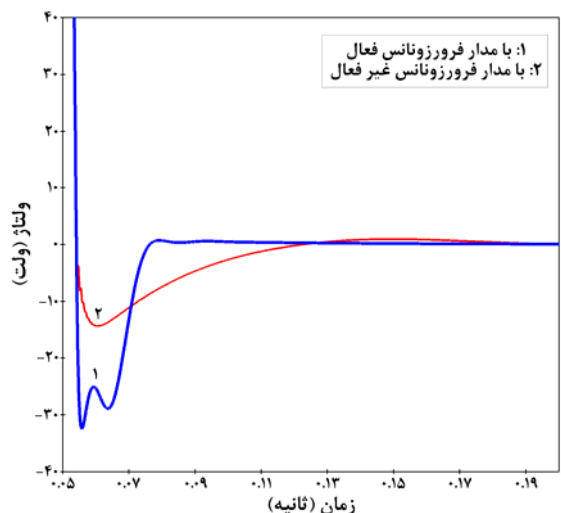
وقوع خطا در قله ولتاژ با مدار تضعیف فرورزونانس غیر فعال آورده شده است. شکل (۲۰-ب) پاسخ CVT با مدار تضعیف فرورزونانس فعال را نشان می‌دهد. بسته شدن  $S_1$  مولفه ولتاژ فرکانس بالایی را در خروجی CVT نتیجه می‌دهد. این نوسانات به خاطر تبادل انرژی مابین مقسم ولتاژ خازنی و سیم پیچ  $L_d$  می‌باشد. فرکانس این مود نوسانی توسط فرکانس طبیعی حلقه حاصل تشکیل شده از  $C_1, C_2$  و  $L_d$  (۱۳/۹۵۶-KHz) تعریف می‌شود. این فرکانس نوسان به خوبی در شکل (۳) نیز نشان داده شده است. در عمل مقامت خالص  $C_1, C_2$  و مخصوصاً  $L_d$  مقدار حداکثر ولتاژ را محدود کرده و مود فرکانسی را میرا می‌کند. با مقایسه شکل‌های (۲۰-الف) و (۲۰-ب) نتیجه می‌شود که مدار فرورزونانس فعال به طور موثرتر نوسانات را محدود می‌کند.



شکل ۲۰- پاسخ گذرای CVT به بسته و باز شدن کلید  $S_1$  در شکل (۱) الف- ولتاژ ورودی ب- ولتاژ خروجی با سیم پیچ تخلیه و خازن پراکندگی و مدار غیر فعال ج- ولتاژ خروجی با سیم پیچ تخلیه و خازن پراکندگی و مدار فعال

شکل (۲۱) پاسخ CVT را در حالتی که مدل شامل خازن‌های پراکندگی نمی‌باشد را نشان می‌دهد. دیده می‌شود

شود، ولی فرونشست حاصل از مدار تضعیف فرورزونانس فعال سریع‌تر میرا می‌شود.



شکل ۲۴- ولتاژ خروجی ترانسفورماتورولتاژ خازنی در حالت وقوع خطا در صفر ولتاژ برای مدار تضعیف فرورزونانس ۱- فعال ۲- غیرفعال

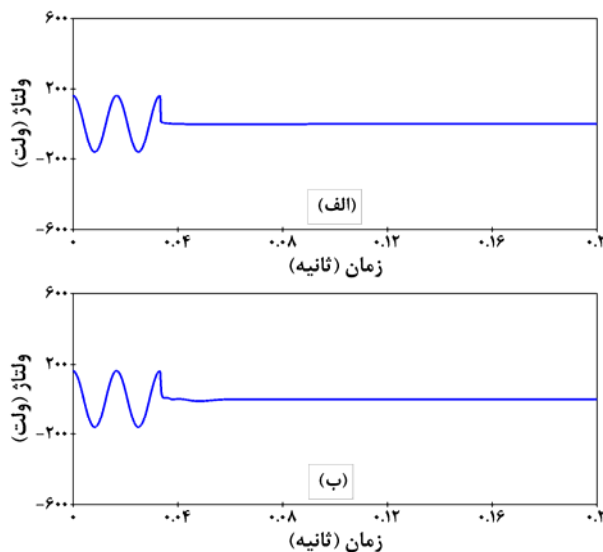
## ۶. نتیجه گیری

در این مقاله مدل دقیقی از ترانسفورماتور ولتاژ خازنی در نرم‌افزار EMTP-RV پیاده شده و پاسخ فرکانسی و حالت گذرای آن به دست آمد. با توجه به پاسخ فرکانسی دیدیم که غیر از اثری که ترانسفورماتور ولتاژ خازنی بر دامنه ولتاژ خروجی دارد باید به شیفت فازی که این تجهیز در ولتاژ خروجی ایجاد می‌کند نیز توجه کرد و نمی‌توان از این اثر چشم‌پوشی کرد.

با شبیه‌سازی‌های انجام شده مشاهده گردید که مدار تضعیف فرورزونانس فعال اثر زیادی بر پاسخ فرکانسی دارد. و با توجه به اثر خازن‌های پراکندگی بر پاسخ فرکانسی نتیجه می‌شود که برای فرکانسهای بالاتر از ۱۰۰ هرتز باید این خازن‌ها در مدل لحاظ شود تا به یک مدل مناسب و دقیق تر رسید.

با مطالعه پدیده فرورزونانس در CVT دیدیم که مدار فرورزونانس فعال خیلی سریع‌تر از مدار غیر فعال فرورزونانس را برطرف می‌کند. در بررسی‌های انجام شده بر روی پاسخ CVT به ولتاژ فرونشست نتیجه شد که با طراحی مناسب به منظور حداقل کردن خازن‌های پراکندگی و انتخاب مناسب سیم پیچ تخلیه می‌توان نوسانات حاصل از ولتاژ

حذف شده است ولی اضافه ولتاژ سیکل اول بعد از خطا در خروجی دیده می‌شود.



شکل ۲۳- پاسخ گذرای CVT به بسته و باز شدن کلید  $S_1$  در شکل (۱) الف- ولتاژ خروجی بدون سیم‌پیچ تخلیه و بدون خازن پراکندگی و با مدار غیر فعال ب- ولتاژ خروجی بدون سیم‌پیچ تخلیه و بدون خازن پراکندگی و با مدار فعال

شکل (۲۳) خروجی ترانسفورماتورولتاژ خازنی به خطا را در حالتی که سیم‌پیچ تخلیه و خازن‌های پراکندگی از مدل حذف شده‌اند را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های (۲۰) و (۲۳) مشخص می‌کند که نوسانات فرکانس بالا به خاطر حضور سیم پیچ تخلیه و خازن پراکندگی می‌باشد. بنابراین با طراحی مناسب به منظور حداقل کردن خازن پراکندگی و انتخاب درست ضریب کیفیت  $Ld$  در عمل می‌تواند مولفه فرکانس بالای نشان داده شده در شکل (۲۰) را حذف کند.

بدترین اعوجاج (نوسان حالت گذرا) در خروجی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی از نظر تاثیر آن بر عملکرد رله‌ها در حالتی است که خطا در لحظه عبور از صفر ولتاژ رخ می‌دهد ایجاد می‌شود [۱۰]. چون در این حالت خازن انرژی ذخیره شده بیشتری دارد. شکل (۲۴) تاثیر نوع مدار فرورزونانس را بر ولتاژ فرونشست ترانسفورماتور ولتاژ خازنی که در اثر وقوع خطا در صفر ولتاژ ایجاد می‌شود را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود ولتاژ فرونشست در صورت استفاده از مدار تضعیف فرورزونانس فعال شدیدتر از حالتی است که از مدار تضعیف فرورزونانس غیرفعال استفاده

فرونشست در خروجی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی را حذف کرد.

۷. مراجع

- “Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers”, IEEE Transactions on Power, Vol. 15, No. 1, pp 62-72, January 2000.
- [8] Kezunovic, M., Fromen, C.W. and Nilsson, S.L., “Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Transient Studies”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, Oct 1992, pp. 1927-1935.
- [9] J. Izykowski, B. Kasztenny, E. Rosolowski, M. M. Saha, B. Hillstrom, “Dynamic Compensation of Capacitive Voltage Transformers,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 1, pp. 116-122, Jan 1998.
- [10] J. R. Lucas, P. G. McLaren, W. W. L. Keerthipala, R. P. Jayasinghe, “Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Studies,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 152-159, Jan 1992.
- [1] Working Group of the Relay Input Sources Subcommittee of the Power System Relay Committee, “Transient Response of Coupling Capacitor Voltage Transformers,” IEEE Trans. Power Appl. Syst., vol. PAS-100, no. 12, pp.4811- 4814, Dec. 1981.
- [2] F. B. Ajaei, M. Sanaye-Pasand, A. Rezaei-Zare and R. Iravani, “Analysis and Supression of the Coupling Capacitor Voltage Transformer Ferroresonance Phenomenon,” IEEE Trans. Power Delivery, VOL. 24, NO. 4, pp. 1968-1977 Oct. 2009.
- [3] M. Graovac, R. Iravani, X. Wang, R. D. McTaggart, “Fast Ferroresonance Suppression of Coupling Capacitor Voltage Transformers,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 158-163, Jan 2003.
- [4] M. R. Iravan, X. Wang, I. Polischchuk, J. Riebeiro, A. Sarshar, “Digital Time-Domain Investigation of Transient Behavior of Coupling Capacitor Voltage Transformer,” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 622-629, April 1998.
- [5] D. Hou, J. Roberts, “Capacitive Voltage Transformer: Transient Overreach Concerns and Solutions for Distance Relaying,” Canadian Conf. on Elec. And Comp. Eng., pp. 119 – 125, 26-29 May 1996.
- [6] M. Sanaye-Pasand, A. Rezaei-Zare, H. Mohseni, Sh. Farhangi and R. Iravani, “Comparison of Performance of Various Ferroresonance Suppressing Methods in Inductive and Capacitive Voltage Transformers” , Power India Conference, 2006.
- [7] Working Group C-5 of the Systems Protection Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee,

## ۸ پیوست

جدول ۱- مشخصات فنی ترانسفورماتور ولتاژ خازنی TEHMP161A

| مقدار نامی | مشخصه فنی         |
|------------|-------------------|
| ۹۸ KV      | ولتاژ اولیه نامی  |
| ۴۹/۲۹ V    | ولتاژ ثانویه نامی |
| ۶۵/۷۱ V    | ولتاژ ثالثیه نامی |
| ۴۰۰ VA     | بار نامی          |

جدول ۲-اطلاعات منحنی اشباع ترانسفورماتور کاهنده

| شار پیوندی (ولت ثانیه) | جریان (میلی آمپر) |
|------------------------|-------------------|
| ۱۲۳/۷۹                 | ۷/۴۲۵             |
| ۱۲۹/۵۹                 | ۱۸/۵۶۲            |
| ۱۳۶/۴۵                 | ۷۴/۲۴۶            |
| ۱۳۷/۸۲                 | ۲۲۲/۷۳۹           |

جدول ۳-اطلاعات منحنی اشباع راکتور اشباع شونده

| شار پیوندی (ولت ثانیه) | جریان (آمپر) |
|------------------------|--------------|
| ۰/۲۷۰۰۰                | ۰/۰۴۹۴۱۳     |
| ۰/۳۱۸۸۶                | ۰/۳۵۸۲۲۲     |
| ۰/۳۳۷۶۲                | ۰/۹۸۰۲۹۸     |
| ۰/۳۵۶۳۷                | ۰/۵۳۸۵۵۲     |
| ۰/۴۰۰۰۰                | ۱۰/۰۰۰۰۰۰    |

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ترانسفورماتور ولتاژ خازنی

| نماد | مقدار     | توضیح                                       |
|------|-----------|---|
|      | ۱۴/۶۱۱ nF | خازن ولتاژ سطح بالا                         |
|      | ۱۱۸/۱ nF  | خازن ولتاژ سطح متوسط                        |
|      | ۷/۳۳۸ H   | اندوکتانس نشستی اولیه ترانسفورماتور کاهنده  |
|      | ۲۸۴/۵ Ω   | مقاومت اولیه ترانسفورماتور کاهنده           |
|      | ۴/۹۶ MΩ   | مقاومت مغناطیسی ترانسفورماتور کاهنده        |
|      | ۶۳ μH     | اندوکتانس نشستی ثانویه ترانسفورماتور کاهنده |

|              |  |
|--------------|--|
| ۱۹ mΩ        | مقاومت ثانویه ترانسفورماتور کاهنده                       |
| ۷۲ μH        | اندوکتانس نشستی ثالثیه ترانسفورماتور کاهنده              |
| ۲۰ mΩ        | مقاومت ثالثیه ترانسفورماتور کاهنده                       |
| ۱۰۰ pF       | خازن پراکندگی  |
| ۲۴۲ pF       | خازن پراکندگی  |
| ۱۴۰ pF       | خازن پراکندگی  |
| ۰/۰۱ H       | سیم پیچ تخلیه  |
| ۷۵Ω          | مقاومت مدار تضعیف فرورزونانس غیر فعال (بار ثابت)         |
| ۱/۳۵ Ω       | مقاومت راکتور اشباع شونده مدار تضعیف فرورزونانس غیر فعال |
| ۲۹۵/۴ mH     | اندوکتانس راکتور جبران کننده (قسمت حفاظت شده)            |
| ۴۰/۳۸ H      | اندوکتانس راکتور جبران کننده (قسمت حفاظت نشده)           |
| ۶/۲۶ Ω       | مقاومت راکتور جبران کننده (قسمت حفاظت شده)               |
| ۲۴۹/۷۲ Ω     | مقاومت راکتور جبران کننده (قسمت حفاظت نشده)              |
| mH<br>۲۶۹۷/۳ | اندوکتانس مزدوج راکتور جبران کننده                       |
| ۲۵ Ω         | مقاومت بارگذاری (سری) $G_1$                              |
| ۶ Ω          | مقاومت بارگذاری (سری) $G_2$                              |

- مقادیر پارامترهای مدار تضعیف فرورزونانس فعال

$$C_a=10 \mu F, R_a=10 \Omega, L_{a1}=0.491 H, L_{a2}=0.01922 H,$$

$$M_a=0.097 H$$