



دانشگاه آزاد اسلامی

واحد خمینی شهر

گروه مهندسی برق - قدرت

## پایان نامه

# جهت اخذ مدرک کارشناسی

## عنوان پروژه :

پدیده فرورزونانس و تاثیر آن بر برقرگیرهای اکسید روی

استاد راهنما :

جناب آقای مهندس پور آقابابا

دانشجویان :

علیرضا حصادی ۸۳۴۱۲۷۴۰۰۳۶

رضا بند عبدی ۸۳۴۱۲۷۴۰۰۱۲

بهار ۱۳۸۶

پروژه حاضر که تحت عنوان «پدیده فرورزونانس و تأثیر آن بر برقگیرهای ZnO» پیش روی شما اساتید گرامی قرار دارد تحقیقی است هر چند ناچیز در راستای معرفی و درک این پدیده پیچیده که متأسفانه به دلیل عدم شناخت کافی خسارات های فجیعی را به سیستم های قدرت تحمیل می کند. البته مطالعات انجام شده در سال های اخیر تا آنجایی که بتوان از این پدیده تا حدی جلوگیری کرد و یا در صورت وقوع اثر آن را کاهش دهیم رضایت بخش بوده ولی هنوز این پدیده، پیچیدگی خود را برای مهندسان حفظ نموده است. امید که پروژه حاضر که نتیجه چندین ماه تلاش اینجانبان می باشد بتواند کمک شایان توجه ای را به دانشجویان عزیزی که به دنبال تحقیق در این موضوع هستند داشته باشد.

در پایان از اساتید عزیزم به خصوص جناب آقای مهندس پور آقابابا کمال تشکر را داریم که همیشه با خلقی مثال زدنی به سوالات بیشمار من جواب دادند.

با تشکر

علیرضا حصادی

رضا بند عبدی

بهار ۸۶

## چکیده:

پدیده فرورزونانس یک رزونانس غیر خطی است که تأثیرگذار بر صحت عملکرد شبکه های الکتریکی و تجهیزات حفاظتی می باشد. وقوع این پدیده در شبکه سبب ایجاد هارمونیک های غیر معمول، اضافه ولتاژ و اضافه جریان حالت گذرا و ماندگار می شود. برقگیرهای اکسید روی از جمله تجهیزات بسیار حساس به اضافه ولتاژهای فرورزونانس می باشند که در این پروژه سعی بر شناخت (هر چند که این پدیده بسیار پیچیده می باشد) این پدیده و تأثیر متقابل این پدیده و برقگیرهای ZnO شده است.

www.markazdanesh.ir

**تکیه بر تقوا و دانش در طریقت کافرست**

**راهرو گر صد هنر دارد توکل بایدش**

[www.markazdانش.ir](http://www.markazdانش.ir)

## فهرست

صفحه	عنوان
۱.....	مقدمه
۳.....	رزونانس خطی
۴.....	فرورزونانس
۸.....	درک فیزیکی فرورزونانس
۱۰.....	مشخصه های اصلی فرورزونانس
۱۳.....	فرورزونانس در سیستم های قدرت
۲۰.....	مثال هایی از فرورزونانس در یک سیستم فشار قوی
۳۰.....	کلید زنی ناقص و فرورزونانس
۳۰.....	کلید زنی در شرایط بی باری ترانس
۳۲.....	کلید زنی در شرایط بارداری ترانسفورماتور
۳۳.....	کلید زنی ناقص با وجود انواع مختلف بار
۳۶.....	فرورزونانس در یک پست $400^{kv}$
۴۲.....	مدل ATP/EMTP پست $400^{KV}$
۴۴.....	اندازه گیری و نتایج شبیه سازی
۴۵.....	راه کارهای کاهش پدیده فرورزونانس
۴۶.....	برقگیرهای ZnO

۴۹.....	قابلیت جذب برقگیرهای اکسید روی
۴۹.....	جریان نشتی عبوری از قرص های اکسیدی روی
۵۲.....	شیبه سازی پدیده فرورزونانس (۱)
۵۵.....	شیبه سازی پدیده فرورزونانس (۲)
۵۹.....	هدایت نامنظم
۵۹.....	تخریب برقگیرهای اکسید روی
۶۱.....	نتیجه گیری
۶۳.....	مراجع

## مقدمه :

فرورزونانس یک پدیده الکتریکی پیچیده است که اگر چه از اوایل سال های ۱۹۲۰ تشخیص داده شد امروزه چندان شناخته شده نیست . این پدیده با هجوم ناگهانی اضافه ولتاژ های تقویت شده خیلی بزرگ همراه با اعوجاج شدید هارمونیک مشخص می شود. تحلیل فرورزونانس به منظور جلوگیری از آسیب تجهیزات و عملکرد نا مطلوب تجهیزات حفاظتی انجام می شود. تحلیل فرورزونانس پیچیده است بخشی به دلیل عدم وقوع منظم این پدیده و پیش بینی پاسخ آن به یک محرک ویژه می باشد و بخش دیگر بیش از یک پاسخ حالت ماندگار از تنظیم اولیه برای تمام پارامترهای یک مدار می تواند نتیجه شود .

در پاسخ به یک ولتاژ گذرا ، خطای فاز به زمین ، باز شدن CB ، انرژی دار شدن یا بی انرژی شدن تجهیزات ؛ اضافه ولتاژ های صاعقه ، یا هر تعداد دیگری از تغییرات ناگهانی ، سیستم می تواند یک جهش ناگهانی غیر خطی از پاسخ حالت عادی خود به یک وضعیت ماندگار با اعوجاج هارمونیک و اضافه ولتاژ های بزرگ (چند پریونیت ) جهش کند که می تواند به تجهیزات سیستم قدرت آسیب برساند .

البته همه جوانب این پدیده مجهول نمانده است تا آن اندازه که مهندسان را قادر به طراحی سیستم های قدرتی که از مشکلات ناشی از این پدیده جلوگیری کند، شناخته شده است .

به منظور شناخته شدن فرورزونانس که پدیده غیر خطی است بر خود لازم می دانم تا قدری در مورد رزونانس الکتریکی که یک پدیده خطی است بحث کنیم تا آن ها را از هم تشخیص دهیم .

پدیده فرورزونانس در دهه هایی قبل مورد توجه زیادی واقع نمی شد ولی در سال های اخیر این پدیده و خسارت های ناشی از آن توجه بسیاری از بهره برداران صنعت برق را به خود جلب نموده است. علت اصلی این تغییر دیدگاه را می توان در تغییرات ایجاد شده در صنعت برق جستجو کرد. به وجود آمدن سیستم های کابلی زیرزمینی طولانی، افزایش قطع و وصل تک فاز و از همه مهمتر کاهش چشمگیر تلفات در ترانسفورماتورهای قدرت و ظهور برقگیرهای اکسید روی که به اضافه ولتاژی موقت بسیار حساس می باشند، همگی از علل اهمیت یافتن اضافه ولتاژهای فرورزونانس می باشند. مقالات زیادی فرورزونانس و برقگیرها را مورد بررسی قرار داده اند. بعضی با دید تحلیلی و بعضی با شبیه سازی و بعضی دیگر با تست و آزمایش به نتایج مختلف رسیده اند. در اینجا به دلیل پیچیده بودن تحلیل که علت آن بعداً گفته خواهد شد از روش های شبیه سازی و گاهی از آزمایش استفاده می شود.

## رزونانس خطی :

در یک رزونانس خطی مقادیر امپدانس که توسط اجزای مدار تعیین می شوند قابل پیش بینی هستند آن ها با فرکانس تغییر می کنند وقتی در همان محدوده ای که طراحی شده اند استفاده شوند . یک ظرفیت همیشه به عنوان یک راکتانس کاپاسیتیو  $Z_C$

$$\left( Z_C = \frac{1}{j\omega C} \right) \text{ مشخص می شود .}$$

و یک اندوکتانس به عنوان یک راکتانس القایی  $Z_L = j\omega L$  مشخص می شود که در روابط فوق  $\omega$  فرکانس ولتاژ و جریان سینوسی می باشد . از قانون اهم داریم :

$V=IZ$  رزونانس خواه خطی یا غیر خطی ، زمانی رخ می دهد که راکتانس القایی و خازنی یک مدار دقیقاً در بالانس باشند . همان طور که معادلات نشان می دهند راکتانس القایی با افزایش فرکانس افزایش می یابد در حالی که راکتانس خازنی با افزایش فرکانس کاهش می یابد در مدارات سری در حالت رزونانس ، امپدانس در حداقل مقدار خود می باشد و در مدارات موازی امپدانس مدار در حداکثر مقدار خود می باشد. در هر دو نوع مدار رزونانس یعنی سری و موازی ، اثرات شدید ولتاژ و جریان به وسیله مقاومت خالص کاهش یافته است زیرا مقدار مقاومت خالص در هر فرکانسی یکی است . مدارات رزونانس خطی در برابر ولتاژ اعمال شده رفتار قابل پیش بینی و منظمی از خود نشان می دهند. یک ولتاژ سینوسی (در حالت ماندگار ) باعث ایجاد جریان ها و ولتاژ های سینوسی در همه جای مدار خواهد شد ، اگر چه در مقادیر مختلف ، آن ها همگی یک فرکانس دارند . اگر ولتاژ را دو برابر کنیم ولتاژ همه نقاط مدار دو برابر می شود ، حتی پاسخ مدارات به

حالت گذرا، اگر چه به نوعی پیچیده می شود ولی در تئوری قابل پیش بینی و تکرار است .

### فرورزونانس :

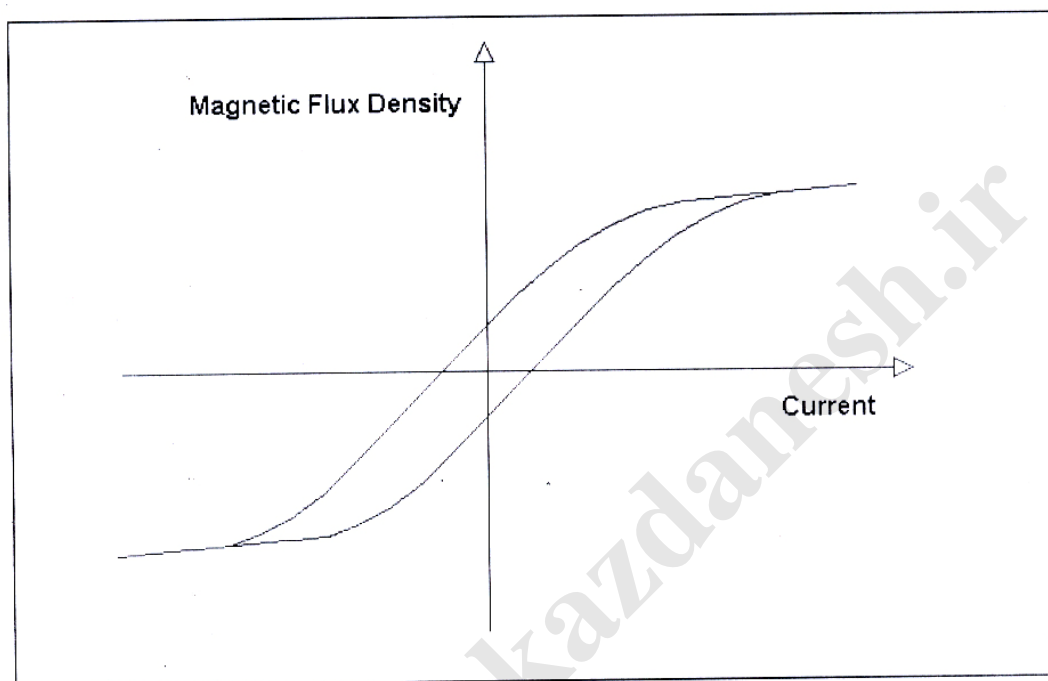
با فرورزونانس قوانین تغییر می کند . تفاوت فرورزونانس با رزونانس خطی این است :

- ۱- چندین پاسخ حالت ماندگار به هر تغییر در پارامترها وجود دارد .
- ۲- هر پاسخ ویژه ای که رخ دهد به شرایط اولیه بسیار وابسته است .
- ۳- رزونانس در یک فرکانس داده شده می تواند در یک محدوده وسیعی از مقادیر پارامترها رخ دهد
- ۴- فرکانس رزونانس می تواند برای هر پاسخ ماندگاری متفاوت باشد .

فرورزونانس رخ می دهد زیرا اندوکتانس مدار فرو مغناطیسی است به این معنی که مدار یک هسته ساخته شده از مواد فرو مغناطیسی معمولاً آهن دار و ترانسفورماتور مثال خوبی برای یک اندوکتانس فرومغناطیسی است.

در اندوکتانس معمولی غیر خطی ، مثلاً در یک سیم پیچ معمولی ، مقدار اندوکتانس با هندسه مشخص می شود : ابعاد سیم پیچ ، تعداد دور ها ، ناحیه Cross sectional و غیره. وقتی که یک ماده فرو مغناطیسی مثل آهن در داخل یک سیم پیچ قرار گرفته است ، مقدار اندوکتانس تغییر می کند . این به خاطر آن است که مواد فرو مغناطیسی خاصیت افزایش شدت فوران مغناطیسی را دارند و در نتیجه القای مغناطیسی افزایش می یابد و مقدار القای مغناطیسی را به آهن وسط سیم پیچ می توان نسبت داد که می تواند خیلی بیشتر از القای ناشی از جریان درون یک سیم پیچ خالی باشد . دو تا

خاصیت اضافی مواد فرو مغناطیسی دارند که در فهمیدن پدیده فرورزونانس خیلی مهم هستند . آن ها می توانند اشباع شوند و آن ها اثر هیستریزیس را از خود نشان می دهند یک منحنی مغناطیسی یک هسته آهنی در شکل (۱) نشان داده شده است .



شکل (۱)

همچنانکه جریان افزایش می یابد ؛ شدت میدان مغناطیسی هم افزایش می یابد . تا آنجا که به نقطه ای می رسیم که افزایش بیشتر جریان باعث افزایش کوچک و کوچکتري در شدت میدان می شود . که به این نقطه ، نقطه اشباع می گویند و با تغییر در شیب منحنی جریان - شدت میدان مشخص می شود .

شیب این منحنی با اندوکتانس سیم پیچی متناسب است که نشان می دهد مقدار اندوکتانس برای مقادیر بالای نقطه اشباع متفاوت است که این کلیدی برای درک

فرورزناس است . همچنانکه جریان در بالای نقطه اشباع افزایش پیدا می کند ، اندوکتانس سیم پیچی به صورت ناگهانی تغییر می کند .

شکل (۱) دو مشخصه شدت میدان – جریان را نشان می دهد . منحنی پایینی شاری را نشان می دهد در زمانی که منحنی از یک جریان منفی منحنی افزایش پیدا می کند . منحنی بالایی شاری را نشان می دهد که از یک جریان مثبت کاهش پیدا می کند . این یک مشخصه مواد فرو مغناطیسی است و همچنین در درک فرورزناس بسیار حائز اهمیت است . دامنه جریانی که باعث می شود آهن به اشباع برود برابر همان جریانی نیست که باعث می شود آهن از اشباع خارج می شود و مرز بین عمل خطی و عمل اشباع شده مقدار جریان ثابتی نیست ولی وابسته به مقادیر قبلی جریان است که به آن هیسرزین می گویند و به مقدار شار باقی مانده در هسته آهن بستگی دارد و وقتی جهت جریان عوض می شود بر آن غلبه می شود.

در هر فرورزناس، فرکانس رزونانس آن است که راکتانس های القایی و فازنی دقیقاً با هم برابر باشند . در رزونانس مقادیر شدید و زیاد ولتاژ و جریان می تواند ایجاد می شود . در فرورزناس ، اندوکتانس ثابت نیست و اندوکتانس براساس اشباع تغییر می کند و باعث تغییر راکتانس القایی می شود ، بنابراین فرکانس رزونانس یک هدف را دنبال می کند همچنانکه آهن به اشباع می رود ؛ یک تغییر ناگهانی در اندوکتانس یک تغییر ناگهانی در فرکانس را باعث می شود که آن جا رزونانس رخ می دهد .

راه دیگر تأمل در این پدیده ، متمرکز شدن روی مقدار ظرفیت مورد نیاز برای یک رزونانس است در یک رزونانس خطی این مقدار (در تئوری) می تواند دقیقاً تعیین شود .

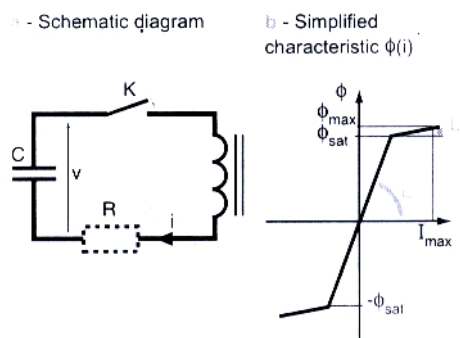
در فرورزونانس تغییرات غیر قابل پیش بینی در اندوکتانس بدان معنی است که یک محدوده وسیعی از ظرفیت های خازنی می توانند عاملی بالقوه برای رزونانس در یک فرکانس اعمال شده باشند.

وقتی که اندوکتانس فرو مغناطیسی به اشباع می رود ، در اشباع باقی می ماند تا زمانی که جریان کاهش یابد . اگر اندوکتانس زمانی که اشباع شده است باعث یک رزونانس شود (مثلاً یک راکتانس القایی و یک راکتانس خازنی در یک مدار با هم تطبیق داده شوند ) دامنه جریان شدیداً افزایش پیدا می کند و به علاوه آهن را به اشباع می برد و می تواند باعث تثبیت نقطه رزونانس شود . اگر جریان بتواند به زیر نقطه اشباع افت کند ، اندوکتانس تغییر می کند . همان طور که قبلاً گفته شده ، هیستریزیس مغناطیسی باعث می شود در نقاط دقیقی که القاگر اشباع می شود و از اشباع خارج می شود . متفاوت باشد .

این تغییرات در اندوکتانس برای چندین مشخصه پاسخ حالت ماندگار فرورزونانس محاسبه می شود .

هیستریزیس نشان می دهد که چگونه پاسخ ویژه ای که رخ می دهد چقدر به شرایط اولیه بستگی دارد .

## درک فیزیکی فرورزونانس :



شکل (۲)

در مدار شکل فوق تلفات نا چیز فرض شد . و منحنی مغناطیسی شوندهگی هسته آهنی هم در شکل نشان داده شده است . با وجود این فرضیات ، شکل موج های ارائه شده در شکل (۳) یک نمونه از فرورزونانس پریودیک هستند.

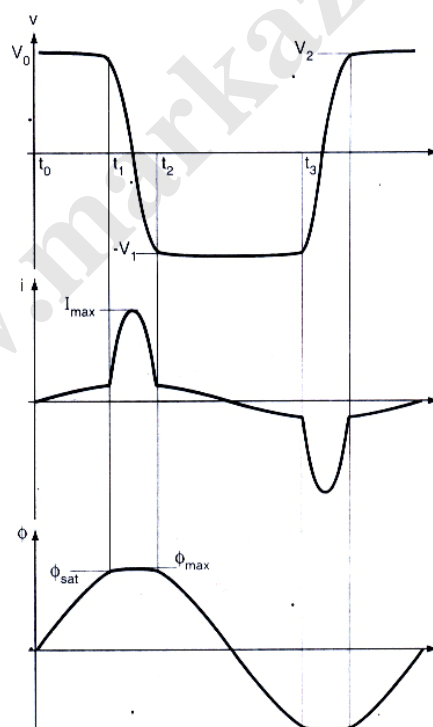


Fig. 2: free oscillations of a series ferroresonant circuit

شکل (۳)

با فرض اینکه  $V_0$  ولتاژ دو سر خازن باشد، در لحظه  $t_0$  کلید  $k$  بسته می شود. جریانی به وجود می آید و در فرکانس  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  نوسان می کند شار در هسته و ولتاژ  $V$  در ترمینال های خازن چنین هستند.

$$\phi = \left( \frac{V_0}{\omega_1} \right) \sin \omega_1 t, \quad V = V_0 \cos \omega_1 t$$

اگر  $\phi_{sat} > \frac{V_0}{\omega_1}$  باشد در پایان  $t_1$ ، شار  $\phi$  به شار اشباع  $\phi_{sat}$  می رسد، ولتاژ  $V$  برابر  $V_1$  و اندوکتانس اشباع هسته به  $L_s$  می رسد.

از آنجایی که  $L_s$  در مقایسه با  $L$  بسیار کوچک می باشد خازن به طور ناگهانی با فرکانس  $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$  در سلف تخلیه می شود. زمانی که انرژی الکترو استاتیکی ذخیره شده در خازن با انرژی الکترو مغناطیسی ذخیره شده در سلف برابر باشد، جریان و شار ماکزیموم هستند.

در لحظه  $t_2$  شار به  $\phi_{sat}$  می رسد اندوکتانس به  $L$  بر می گردد و از آنجایی که از تلفات صرف نظر شده است ولتاژ  $V$  با ولتاژ  $-V_1$  برابر می شود.

در لحظه  $t_3$  شار به  $-\phi_{sat}$  می رسد و  $V$  با  $-V_2$  برابر می شود از آنجایی که در عمل  $\omega_1$  بسیار کوچک است:

$$V_2 \approx V_1 \approx V_0$$

نتیجتاً، پریود  $T$  بین  $2\pi\sqrt{L_c}$  در حالت غیر اشباع،  $2\pi = \sqrt{L_s c}$  در حالت اشباع می باشد

هنگامی که  $\left( t_3 - t_2 = \frac{2\phi_{sat}}{V_0} \right)$  و فرکانس  $F$  هم بین  $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_s c}}$  و  $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  می باشد. این

فرکانس اولیه براساس  $\phi_{sat}$  می باشد یعنی به غیر خطی بودن و شرایط اولیه  $V_0$  بستگی دارد در عمل ، به خاطر وجود تلفات  $RI^2$  در مقاومت (به خصوص در هر بار معکوس شدن ولتاژ) دامنه  $V$  کاهش می یابد :

$$V_2 \langle V_1 \rangle V_0$$

از آنجایی که تغییرات شار  $\Delta\phi$  در هنگام پریود غیر اشباع ( $t_3 - t_2$ ) به صورت زیر است :

$$\Delta\phi = 2\phi_{sat} = \int_{t_2}^{t_3} V dt$$

کاهش  $V$  باعث کاهش فرکانس می شود . اگر تلفات انرژی (تلفات ژولی ، تلفات هسته ، ... ) به وسیله ولتاژ منبع تأمین شوند، فرکانس نوسان در حالی که کاهش پیدا می کند می تواند در فرکانس منبع قفل شود (اگر فرکانس اولیه از فرکانس منبع بیشتر باشد ) یا حتی در یک زیر ضریب فرکانس منبع قفل شود (اگر فرکانس اولیه از فرکانس منبع کمتر باشد ). این نشان می دهد که رزونانس خطی ، برای یک اندوکتانس داده شده ، رزونانس می تواند فقط در یک مقدار مشخص  $C$  رخ دهد ، نه در یک محدوده وسیع. فرورزونانس می تواند تکفاز باشد و گفته می شود می تواند سه فاز باشد اگر یک کوپلاژ مغناطیسی غیر خطی بین فاز وجود داشته باشد و سه تا تکفاز باشد در صورتی که کوپلاژ بین سه فاز غیر خطی نباشد . فرو رزونانس می تواند سری یا موازی باشد .

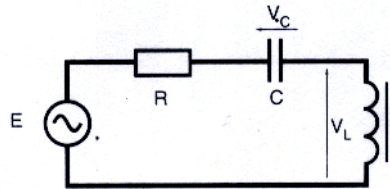
### مشخصه های اصلی فرورزونانس :

منحنی های شکل (۴) مشخصه های فرو رزونانس را نشان می دهند :

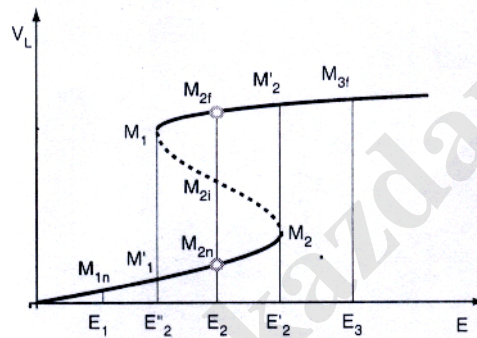
۱- حساسیت به مقادیر پارامترها (پدیده پرش) :

منحنی شکل 4-b ولتاژ پیک  $V_L$  را در دو سر اندوکتانس غیر خطی بر حسب مقدار پیک  $E$ ، دامنه ولتاژ سینوسی نشان می دهد.

a - Basic series ferroresonance circuit



b - Sensitivity to system parameters and the jump phenomenon



c - Sensitivity to initial conditions

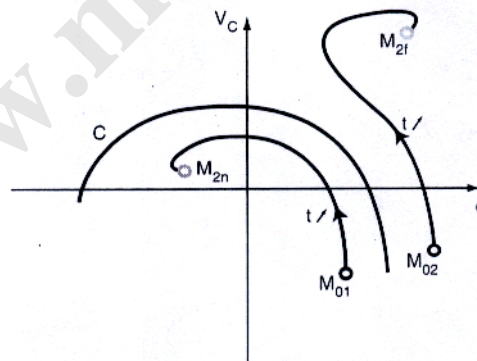


Fig. 3: Illustration of ferroresonance characteristics.

شکل (۴)

با افزایش تدریجی  $E$  از صفر، منحنی شکل 4-b نشان می دهد که سه نوع مختلف رفتار براساس مقدار  $E$  وجود دارد که به پدیده پرش معروف است.

برای  $E=E_1$ ، مقدار ولتاژ سلف  $M_{1n}$  است که مربوط به حالت عادی است (به فرض خطی بودن سیستم)

برای  $E=E_2$  سه جواب وجود دارد ( $M_{2f}, M_{2i}, M_{2n}$ ) که دو تای آن ها مربوط به حالت ماندگار است ( $M_{2f}, M_{2n}$ ) مربوط به حالت کار عادی سیستم است در حالی که  $M_{2f}$  مربوط به حالت فرورزونانس سیستم است. قسمت نقطه چین منحنی به حالت غیر ماندگار مربوط می شود. (که در عمل بدست نمی آید)

برای  $E=E'_2$  ولتاژ  $V_L$  به طور ناگهانی از  $M'_2$  به فرکانس می پرد (پدیده پرش) نقطه  $M_2$  به عنوان یک نقطه حدی شناخته می شود.

برای  $E=E_3$ ، تنها حالت فرو رزونانس  $M_{3f}$  ممکن است

وقتی که مقدار  $E$  از  $E_3$  کاهش می یابد جواب از  $M_1$  (دومین نقطه حدی) به  $M'_1$  می پرد. پدیده پرش، مشخصه فرورزونانس، می تواند به وسیله پارامترهای دیگر سیستم هم بدست آید (به عنوان مثال،  $R$  یا  $C$ ) یک تغییر کوچک در مقدار پارامتر یک سیستم یا یک تغییر گذرا می تواند باعث پرش بین دو حالت ماندگار کاملاً متفاوت شود.

## ۲- حساسیت به شرایط اولیه :

هم  $M_{2f}$  و  $M_{2n}$  براساس پارامترهای اولیه بدست آمده اند. شکل 4-C مسیرهای حالت گذاری  $\phi$  و  $V_c$  را به عنوان تابعی از زمان برای مقادیر اولیه مختلف  $M_{01}, M_{02}$  نشان می دهد. منحنی  $C$  نشان دهنده یک مرز است.

اگر شرایط اولیه (شار باقی مانده ، ولتاژ دو سر خازن ) در یک طرف مرز باشند ، جواب به  $M_{2n}$  همگرا خواهد بود . اگر شرایط اولیه در طرف دیگر باشند جواب به  $M_{2f}$  همگرا خواهد بود .

از آنجایی که  $M_{2i}$  به مرز متعلق است ، حالت ماندگار وقتی که به اطراف این نقطه رسید شدیداً به شرایط اولیه حساس است .

### فرورزونانس در سیستم های قدرت :

فرورزونانس در یک سیستم قدرت می تواند باعث یک از موارد زیر یا حتی چند تا از آن ها با هم شود :

- ۱- اضافه ولتاژ های خیلی بزرگ ، هم فاز به فاز و هم فاز به زمین
  - ۲- باعث اعوجاج شدید شکل موج جریان و ولتاژ شود.
  - ۳- اضافه ولتاژ های بزرگ
  - ۴- گرم شدن ترانسفورماتور ها و نویز شدید بار .
  - ۵- آسیب رساندن به تجهیزات الکتریکی (حرارتی یا شکست عایقی )
  - ۶- عدم کارکرد صحیح تجهیزات حفاظتی
- اگر تصادفی و بدون هشدار اتفاق بیفتد باعث نا هماهنگی سیستم می شود .

شرایطی که فرورزونانس ، می تواند در آن رخ می دهد :

- ۱- یک منبع ولتاژ سینوسی (یک ژنراتور سیستم قدرت )

۲- اندوکتانس فرو مغناطیسی ، که ترانسفورماتورهای قدرت یا ترانسفورماتورهای تجهیزات حفاظتی از این نوع اندوکتانس هستند .

۳- ظرفیت ، خازن نصب شده در سیستم قدرت ، ظرفیت نسبت به زمین سیستم انتقال ، ظرفیت بزرگ کابل های زیر زمینی ، ظرفیت خازن های grading کلید های فشار قوی، از این نوع ظرفیت هستند .

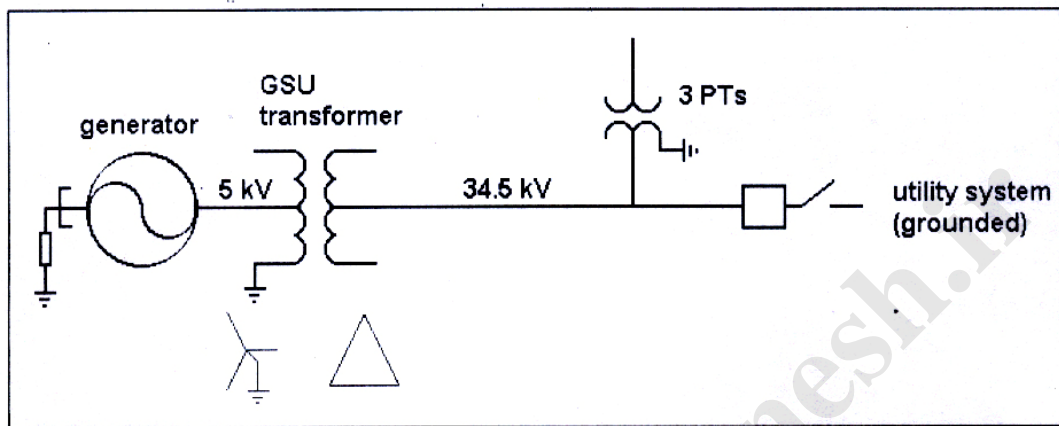
۴- مقاومت پایین - تجهیزات کم بار سیستم قدرت (به عنوان مثال ترانس بی بار)، اتصال کوتاه منبع سیستم قدرت یا تلفات اتصال کوتاه البته یک عامل دیگر که می تواند سیستم را فرورزونانسی کند وجود حداقل یک نقطه در سیستم است که پتانسیل آن ثابت نیست . به عنوان مثال یک نوترال ایزوله شده یا هنگام کلید زنی تکفاز سیستم می تواند وضعیت خود را به موقعیت فرو رزونانس تغییر دهد .

تحقیقات بر روی فرو رزونانس نشان می دهد که اگر شرایط فوق نباشند وقوع فرو رزونانس بعید است .

مدارات زیاد در سیستم های قدرت که شرایط فوق را داشته باشند خیلی زیاد است براساس تجربه چندین مدار نوعی تشخیص داده شده اند که می توانند باعث ایجاد فرو رزونانس شوند .

سیستم شکل (۵) را در نظر بگیرید . همان طوری که در شکل می بینید ، طرح زیر یک ترانس ولتاژ که اولیه آن زمین شده و به ولتاژ  $34.5^{kv}$  متصل شده است را نشان می دهد و این ترانس ولتاژ به یک سیستم نوترال ایزوله متصل است . یک طرف مدار به وسیله ژنراتور تغذیه می شود در حالی که طرف زمین شده VT به یک ترانس افزاینده

(نیروگاهی) با اتصال مثلث وصل شده است (Gsu). ترانس Gsu هیچ زمینی را به سیستم  $34.5^{kv}$  ارائه نمی دهد و آن را از هر اتصال زمینی که به وسیله خود ژنراتور تأمین شده است جدا می کند.



شکل ۵

یک منبع Utility طرف دیگر مدار را تغذیه می کند. هنگامی که با فرض زمین بودن آن، ممکن است در اثر برخی از سوئیچینگ ها بدون زمین شود.

یک ریکلوزر می تواند Cogenerator را از Utility source جدا کند و اگر نیروگاه کلید را باز کند، قسمت  $34.5^{kv}$  از خط کاملاً بدون زمین خواهد شد. فرو رزونانس هنگامی که قسمت  $34.5^{kv}$  خط به طور کافی زمین نشده باشد ممکن است رخ دهد.

هر کدام از شرایط ضروری زیر باید وجود داشته باشند:

۱- یک منبع ولتاژ سینوسی - در این حالت normal utility source یا ژنراتور

نیروگاه

۲- اندوکتانس فرو مغناطیسی قابل اشباع - ترانس ولتاژ

۳- ظرفیت - ظرفیت نسبت به زمین خط

۴- مقاومت پایین - ترانسفورماتور ولتاژ خیلی کم بار است زیرا که تجهیزات حس

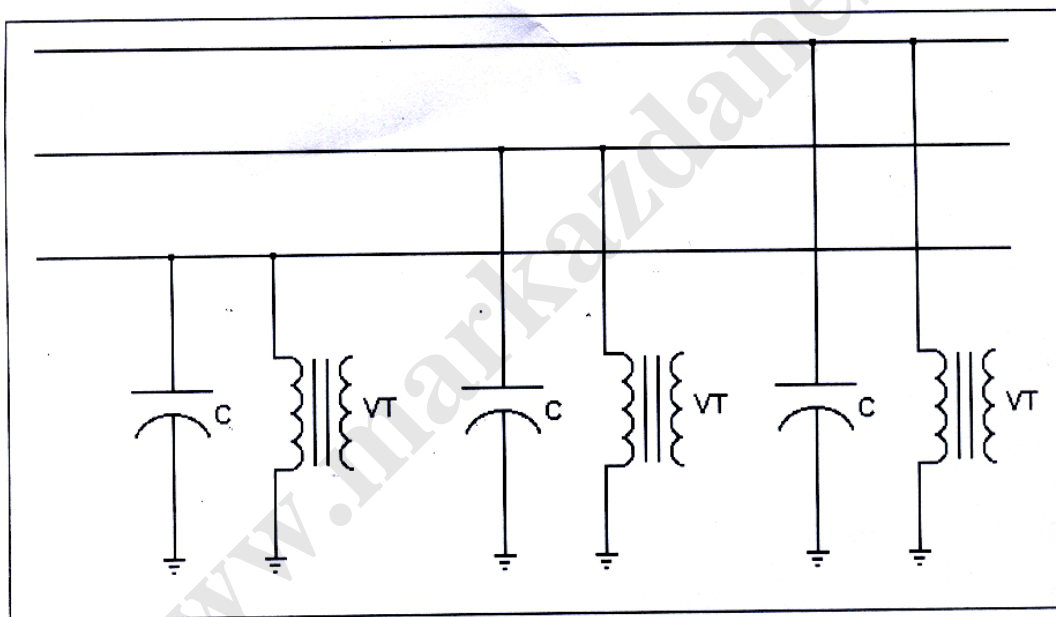
کننده ولتاژ را تغذیه می کند . حتی ژنراتور هم ممکن است کم بار باشد .

۵- وجود حداقل یک نقطه در سیستم که ممکن است ولتاژ آن نقطه ثابت نباشد . نقطه

نوترال بخش زمین نشده یا ناقص زمین شده سیستم .

اندوکتانس فرورزونانسی ترانس ولتاژ با ظرفیت سیستم موازی است همان طور که در

شکل (۶) نشان داده شده است .



شکل ۶

یک اتفاق اولیه در آغاز به کار سیستم ، مثل یک اضافه ولتاژ گذرا به دلیل سوئیچینگ یا

وقوع خطایی در سیستم یا یک خطای فاز به زمین در سیستم ناقص زمین شده می تواند

یک یا چندین VT را با اشباع ببرد . اشباع هسته آهنی باعث یک تغییر ناگهانی در

اندوکتانس که به سیستم داده می شود. توسط ترانس ولتاژ ایجاد شود . مدار فرو مغناطیسی می تواند روی یک سطح اشباع که یک راکتانس القایی را با یک راکتانس خازنی دقیقاً برابر می کند قفل شود و. منجر به فرو رزونانس شود . اضافه ولتاژ های ناشی از رزونانس موازی باعث تثبیت اشباع می شود و بنابراین باعث پایداری وضعیت فرورزونانس می شود. اضافه ولتاژ های حالت ماندگار می تواند از ولتاژ فاز به فاز عادی تجاوز کند و باعث آسیب رساندن به تجهیزات شود اعوجاج شدید هارمونیک می تواند باعث اشتباه رله های حفاظتی شود و از عمل آن ها جلوگیری کند .

#### دسته بندی حالت های مختلف فرو رزونانس :

براساس مشاهدات تجربی و شبیه سازی مداراتی که احتمال وقوع فرورزونانس در آن ها زیاد است رفتار این پدیده را می توان به ۴ دسته البته براساس شکل موج های مدار تقسیم کرد :

#### ۱- فرو رزونانس در مد پایه :

در این حالت که شکل  $a-Y$  بیان کننده شکل موج های مدار می باشد ، پررود نوسانات همانند پررود نوسانات منبع . و هارمونیک های مضارب فرد آن می باشد . در این حالت تنها یک نقطه کار نرمال و یک نقطه کار فرو رزونانسی برای مدار وجود دارد .

## ۲- فرو رزونانس در مد زیر ها رمونیک اصلی :

در این حالت که شکل  $v-b$  بیان کننده شکل موج های مدار می باشد ، پریود نوسانات هارمونیک مضاربی از  $\frac{1}{n}$  فرکانس منبع می باشد ( $n$  عدد فرد می باشد ) در این حالت چندین نقطه کار فرو رزونانس برای مدار موجود می باشد .

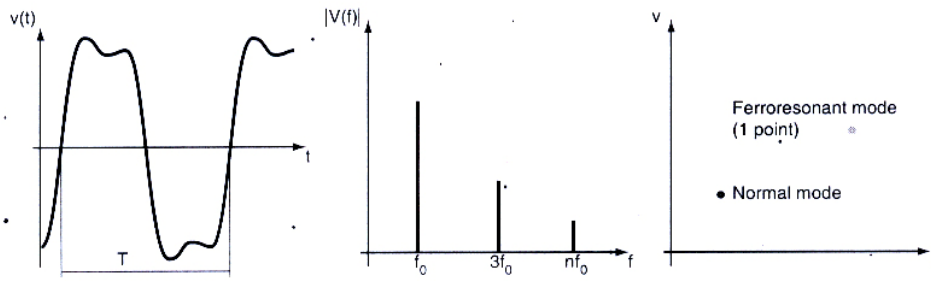
## ۳- فرو رزونانس در مد شبه پریودیک :

در این حالت که شکل  $v-c$  بیان کننده شکل موج های مدار می باشد ، شکل موج مدار غیر پریودیک است . طیف فرکانسی متغیر مدار شامل ترکیب  $nf_1 + mf_2$  ( که  $n, m$  اعداد طبیعی و نسبت  $f_2$  به  $f_1$  عدد گنگ) می باشد . در این حالت نقاط حالت مدار یک منحنی بسته را تشکیل می دهند

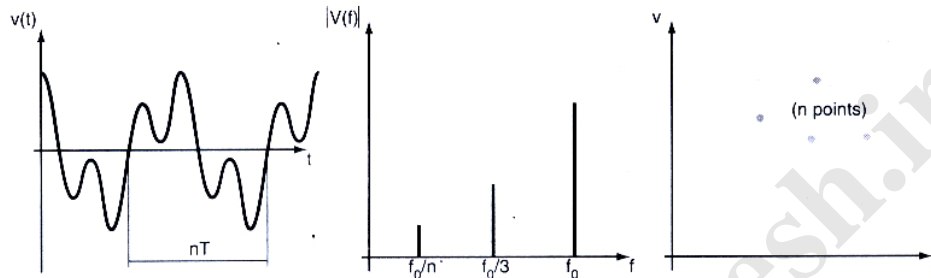
## ۴- فرو رزونانس در مد آشفته :

در این حالت که شکل  $v-d$  بیان کننده شکل موج های آن است ، شکل موج مدار کاملاً غیر پریودیک است . طیف فرکانسی متغیر مدار پیوسته بوده هارمونیک های فراوانی در این شکل وجود دارد . در این حالت نقاط حالت مدار یک سطح بسته را تشکیل می دهند.

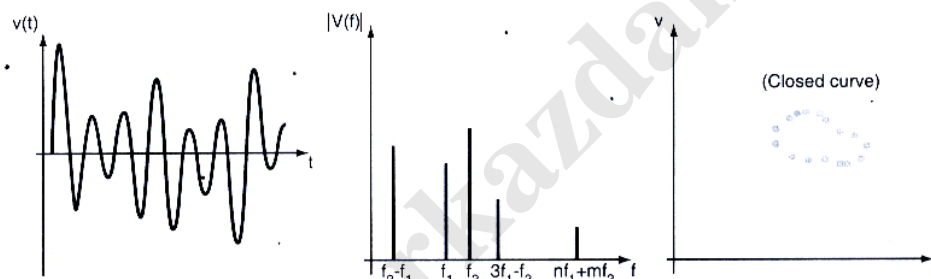
a - Fundamental mode



b - Subharmonic mode



c - Quasi-periodic mode



d - Chaotic mode

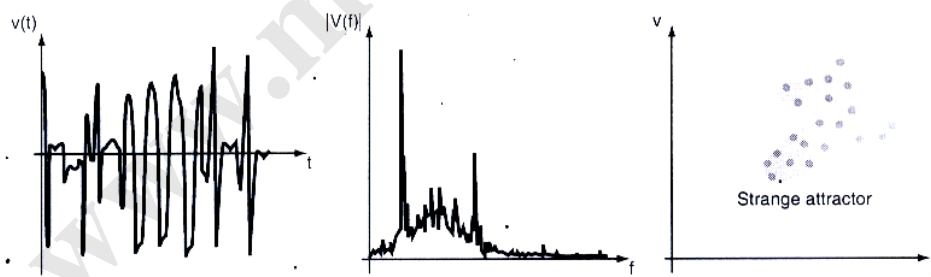


Fig. 4: illustration of ferroresonance characteristics.

با توجه به مطالب فوق می توان نتایج ذیل را بدست آورد :

- فرورزونانس یک رخداد پیچیده است که :
- حالت گذرا و ماندگار گوناگونی در یک شبکه معین ایجاد می کند .
- این پدیده به مقادیر پارامترهای شبکه حساسیت دارد .
- به شرایط اولیه شبکه حساسیت دارد .
- تغییرات کوچک در مقادیر پارامترها یا شرایط اولیه مدار سبب پرش ناگهانی از یک نقطه کار عادی به یک نقطه کار فرو رزونانسی می شود .
- هارمونیک های غیر مجاز ، اضافه ولتاژ و اضافه جریان در حالت گذرا و ماندگار سبب ایجاد خطر برای تجهیزات الکتریکی ، کاهش کیفیت توان و عملکرد نا مناسب تجهیزات حفاظتی می گردد .
- تداوم حالت ماندگار فرو رزونانسی در مدار های الکتریکی سبب افزایش تلفات و جذب انرژی از منابع ولتاژ شبکه می شود .

#### مثال هایی از فرورزونانس در یک سیستم فشار قوی :

فرورزونانس به طور طبیعی بعد از چند نوع سوئیچینگ شروع می شود . مثل رد کردن بار ، رفع خطا ، انرژی دار کردن ترانسفور ماتور ، کلید زنی تکفاز یا تلفات زمین کردن سیستم. مثال زیر برای انرژی دار کردن ترانسفور ماتور از طریق ظرفیت grading کلید فشار قوی می باشد .

## Wound pT- c3 grading cap (۱)

### الف - ظرفیت grading

تکنولوژی کلید فشار قوی شامل استفاده از واسطه های قطع کننده پیشرفته در ۵۰ سال گذشته مدارات را باز کرده اند . کلید های فشار قوی با مخزن روغن تنها چاره برای کاربرد های فشار قوی در سال ۱۹۴۰ بودند . بین سال های ۱۹۵۰ تا ۱۹۸۰ کلید های فشار قوی جریان هوا در سیستم انتقال MH استفاده می شوند . کلید های کم روغن بین سال های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰ خیلی رایج بودند . از سال ۱۹۸۸ تمام کلید های فشار قوی که به وسیله MH خریداری شدند دارای  $Sf_6$  مخلوط به  $Cf_6$  هستند به خاطر اینکه تا دمای  $50^{\circ}C$  را تحمل کنند . برای کاربرد های فشار قوی ، چندین Chamber قطع کننده که به صورت سری به هم وصل شده اند برای قطع جریان و مقاومت در برابر ریکآوری بالای ولتاژ لازم است .

خازن grading به طور موازی با هر قطع کننده قرار می گیرد تا یک توزیع ولتاژ یکسان بدست آید . زمانی که واسطه های قطع توسعه یافتند ، نیاز به چند کلید به صورت سری کاهش یافت . به عنوان مثال ، ف کلید های فشار قوی جریان هوا به ۴ تا ۶ محفظه نیاز داشتند ، کلید های کم روغن به ۲ تا ۴ و  $Sf_6$  به دو تا نیاز داشتند . ظرفیت grading هر کلید ۳۰ تا ۸۰۰ پیکوفاراد برای یک کلید جریان هوا و ۸۰۰ تا ۱۳۵۰ پیکوفاراد برای یک کلید کم روغن و ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ پیکوفاراد برای یک کلید  $Sf_6$  می باشد .

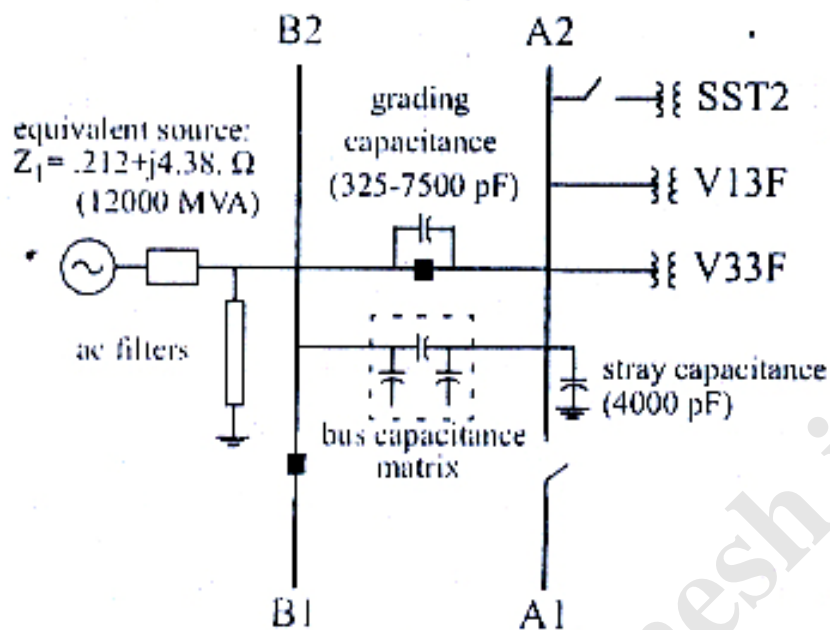
## ب- توصیف اغتشاش

شین  $230 \text{ kV ac}$  ، ایستگاه مبدل Dorsey, HVDC شامل ۴ باس سکشن می باشد که هر کدام دریچه های کانورتر و ترمینال های خطوط انتقال به آن وصل شده است . در ساعت ۲۲:۰۴ ، ۲۰ مه ، ۱۹۹۵ ، شین  $A_2$  (شکل ۸) به منظور جایگزینی کلید ها، ترانس های جریان و برای انجام تست های Trip و نگهداری و تعمیر در حالت قطع ، باز شد .

در حدود ساعت ۲۲:۳۰ یک ترانس ولتاژ ( $V13f$ ) به طور ناگهانی قطع شد و باعث آسیب رسانیدن به تجهیزات تا فاصله بیش از ۳۰ متر شد . روند یا روش سوئیچینگ منجر شد تا شین بدون برق همراه با PT ها از طریق خازن های grading ۹ تا کلید فشار قوی  $230 \text{ kV}$  باز به شین  $B_2$  وصل شوند . یک SST که به شین  $A_2$  به طور طبیعی وصل شده است ، از قبل قطع شده است. یک وضعیت فرورزونانسی باعث قطعی PT شد .

## ج- نوسانات نوعی :

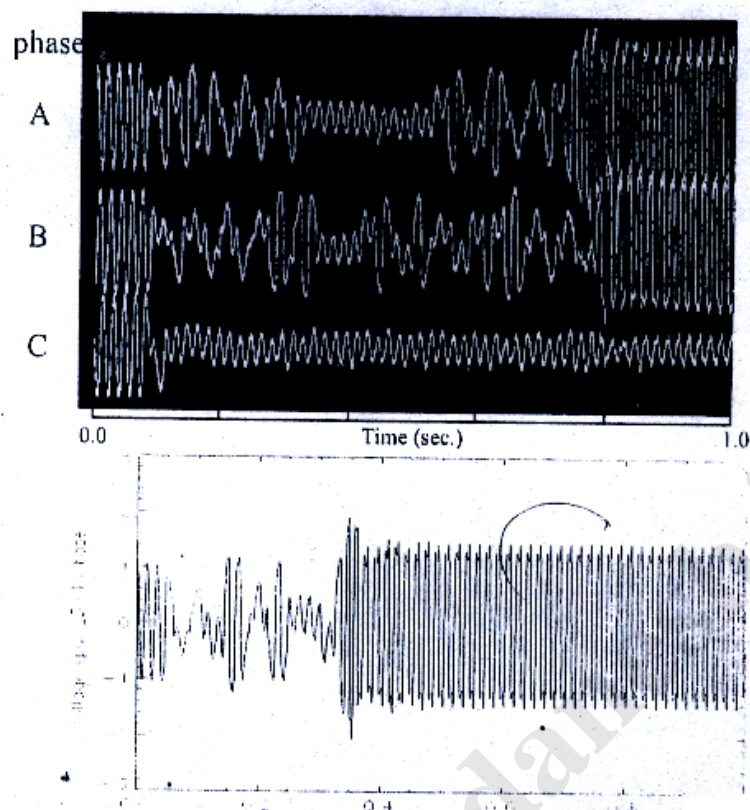
یک نوسان نگار قرار داده شده بود که نشان می دهد ولتاژ شین (۱/۲) در مدت واقعه فرورزونانس ساعت ۲۲:۰۴ ، ۹۵/۰۵/۲۰ ، بعد از اینکه آخرین کلید ، شین را قطع کرد . در شکل (۹) می توان مشاهده کرد که فاز های A,B پرش های تصادفی را بین نوسانات ۶۰ هرتزی و زیر هارمونیک بین ۷۰۰ ms اول قبل از اینکه در فرکانس حالت ماندگار حالت فرو رزونانس قرار بگیرد داشتند . فاز C فرو رزونانس را تجربه نکرد.



شکل (۸)

گذراهای اولیه که در نوسان نگار نشان داده است تقریباً غیر ممکن است که دو برابر شوند زیرا آن ها تابعی از باز شدن کلید ، ولتاژ قبل از سوئیچینگ و مقادیر دقیق تمام پارامتر ها در هر فاز هستند .

تست های شبیه سازی نشان دادند که به عنوان مثال با تغییر پله زمان ، تمام فازها فوراً می توانند به حالت نهایی فرو رزونانس بپرند و هر فاز یا ترکیبی از فاز ها می تواند در ولتاژ پایین بماند.



شکل (۹)

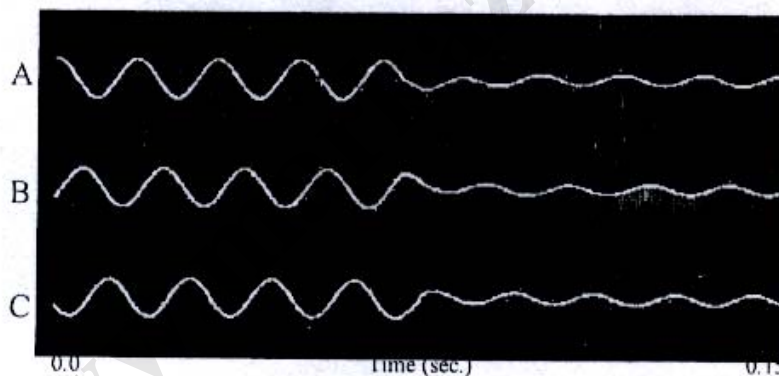
#### د- راه کارهای کاهش :

راهبرد های باز کردن دستی شین انجام شده بودند تا خطر فرو رزونانس به وسیله کاهش ظرفیت خازن های grading که دو شین را به هم کوپل می کند را کاهش دهیم .  
 قطعی همه کلید ها به جز ۲ تا که باز شده اند باعث محدود کردن ماکزیموم ظرفیت grading به ۵۰۰ pf می شود . مقاومت های Damping در این حالت که از SST استفاده می شود نیازی نیست .

مقاومت دائمی Damping ، ۲۰۰ اهمی متصل به ثانویه SST مناسب ترین شاخص کاهش کوتاه مدت برای جلوگیری از شارش فرو رزونانس به شین باز کردن اتوماتیک می باشد . مقاومت ها در سپتامبر ۱۹۹۵ قرار داده شده بودند . دیگر انتخاب هایی که می

توان داشت : یک راکتور هسته هوا 2MVA یا یک فیلتر که به طور دائمی به شین وصل شده اند (یعنی وجود ۸۰-۱۰۰MVA ) قطع کردن اتوماتیک PT/SST از طریق موتور یا یک کلید زمین کننده سه فاز.

سیستم حفاظتی کاهش داده شده ، قابلیت کاهش یافته ، سختی اپراتورینگ و هزینه موانع استفاده از راهکارهای فوق می باشند . برق گیرهای شینه از آنجایی که اضافه ولتاژهای بزرگ رخ نداده باشد عملی نیستند . مقاومت های دائمی متصل به ثانویه PTها قابل اجرا نیستند تا زمانی که حداقل بار مورد نیاز هر فاز دو برابر نسبت حرارتی 4KVA باشد. تلفات مداوم به همراه مقاومت دائمی می تواند با قرار دادن یک بار مقاومتی به مجرد شکار سازی یک سیگنال جداسازی شین ، جلوگیری می شود .



شکل ۱۰

قابلیت اطمینان کاهش یافته با المان های قرار داده شده ، این راه کار ها را نا خوشایند می سازند .

از آنجایی که بار مقاومتی باید تا بیش از ۴۰٪ افزایش پیدا کند تا حالت فرو رزونانس ایجاد شده را خفه کند ، مقاومت Damping نیاز دارد تا انرژی را نسبت به سیستمی که

می تواند انرژی را تأمین کند سریع تر مصرف کند به جهت اینکه حالت فرو رزونانس را به یک مد ۶۰ هرتز غیر فرو رزونانسی معمولی بیندازد.

## ۲) ظرفیت grading کلید - ترانسفورماتور

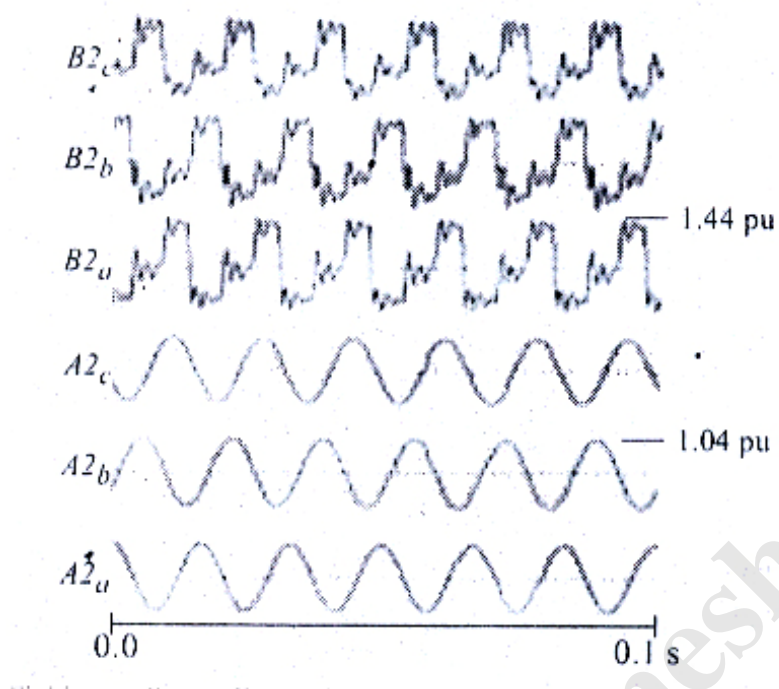
### الف - تشریح اغتشاش

در ۵ آگوست ، ۱۹۹۵ ، در ساعت ۱۴:۱۸ ، یک کلید  $4.16^{kv}$  هنگامی که می خواست یک موتور  $1500^{kw}$  القایی را در دستگاه مبدل Dorsey در Manitoba برق دار کند ، قفل شد . در نتیجه ، یازده کلید فشار قوی  $230^{kv}$  باز شدند تا شین  $B_2$  را قطع کنند ، که ترانس  $230/4.16$  ( $SST_1$ ) به آن وصل بود . سطوح نویز که از  $SST_1$  می آمدند بیشتر از حالت عادی و بیشتر از  $SST_2$  باردار نزدیک به آن بودند و فوراً به دنبال بی برق شدن شین  $230^{KV}$  رخ دادند .

ولتاژ  $230^{KV}$  Dorsey ، در روی شین خارج از مدار در تقریباً  $91^{p.u}$  / بعد از ۳۰ دقیقه پایدار می شود . بانک فیلتر  $F_q$  به طور دستی روی شین  $B_2$  قرار داده شده بود . در ساعت ۱۴:۵۸ ، حذف حالت فرو رزونانسی ، بعد از حوادث دیگر در بدست آوردن دوباره کنترل ولتاژ Dorsey ، انجام نشده بود .

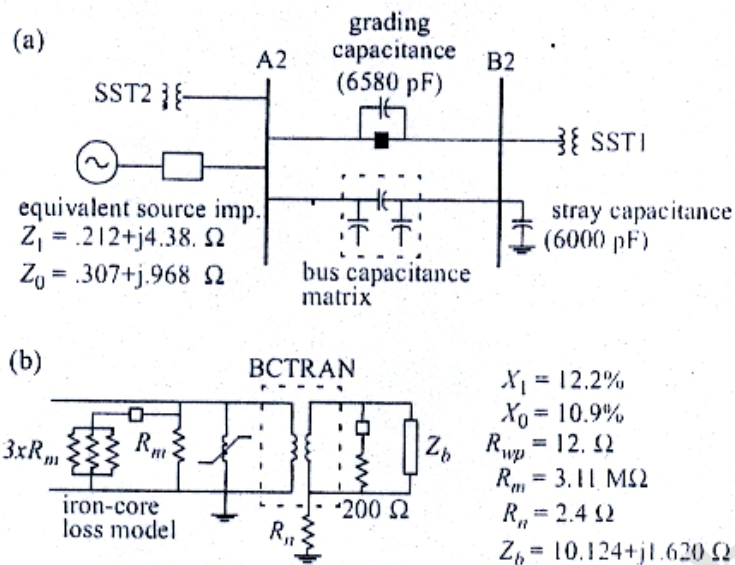
### ب) نوسانات نوعی

نمودار ضبط شکل (۱۱) اعوجاج شدید و اضافه ولتاژ هایی نزدیک به  $1/5^{p.v}$  را نشان می دهند . یک مد فرو رزونانس نا منتقارن مانای توسعه یافته است . نا متقارنی منجر به حتی وجود هارمونیک ها می شود .



شکل (۱۱)

یک مدل EMTP توسعه یافته بود و با موفقیت اصلاح شده بود تا نمودارهای ضبط شده میدان را هماهنگ کند. یک مدل با جزئیات یک ترانس سه فاز لازم است تا فرکانس نامتقارن حالت فرورزونانس را تولید کند اگر از سه ترانس تکفاز استفاده می شد، پس یک مدل تقارن شکل می گیرد (شکل ۹). یک دیاگرام تک خطی از مدل EMTP در شکل (۱۲) داده شده است.



شکل ۱۲

### ج- پارامترهای شبکه

تلفات هسته ترانس های ایستگاه ،  $17^{KW}$  در ولتاژ نامی می باشد . یک مدل دقیق تر تلفات هسته برای بدست آوردن گذراهای ثبت شده مورد نیاز است . در همان لحظه که مد نوسان به فرورزونانس تغییر می کند ، مقاومت اضافی با مقاومت تلف هسته به طور موازی قرار می گیرد . وقتی شین  $B_2$  بی برق است آن به صورت کوپل خازنی موازی با شین  $A_2$  باقی می ماند ، ماتریس ظرفیت شین برای مدل کردن کوپلاژ خازنی استفاده شده است. ظرفیت فاز به زمین  $5316^{PF}$  یعنی  $C_{pg}$  و ظرفیت متقابل  $(C_m)$   $1108^{PF}$  و ظرفیت معادل حوالی فاز مثبت به زمین برابر است با  $12424^{PF}$

### د- راه کارهای کاهش

از ۲۰ مه ؛ ۱۹۹۵ با نابودی ترانس های  $V_{13f,PT}$  ، تمام ترانس های ولتاژ اندوکتیو مربوط به ایستگاه Dorsey با CVT جایگزین شده بودند .

مقاومت دائمی ۲۰۰ اهمی در طرف ثانویه شین  $4.16 \text{ KV}$  ترانس های  $SST_1$  و  $SST_2$

وصل شده اند . روش بی برق کردن دستی که پیش از این توضیح داده شد دیگر با وجود مقاومت ها و جایگزینی CVT به جای PT لازم نیست .

۲ مثال فوق مداراتی بودند که می توانند فرورزونانس را تجربه کنند. با آگاه بودن از شرایط مختلفی که فرو رزونانس می تواند رخ می دهد ، استراتژی های کاهشی مناسب می تواند طراحی گردد قبل از اینکه تجهیزات در مدار گذاشته شوند و مشکلات بیشتر شود .

پیشرفت ها در تکنولوژی قطع کردن کلید های فشار قوی منجر به افزایش مؤثر در مقدار ظرفیت grading متصل به یک ترانس ولتاژ بی برق و ترانسفورماتور سرویس ایستگاه شد (مثال ۱) قرار دادن مقاومت ها و جایگزینی ترانس ولتاژ با ترانس ولتاژ خازنی برای کاهش این مشکل لازم بود .

درک فرو رزونانس و تحلیل گرافیکی آن : فرو رزونانس در هر سطح ولتاژی با ترکیب مناسبی از ظرفیت و اندوکتانس غیر خطی و تلفات پایین می تواند رخ دهد .  
بیشترین وضعیت های متعدد فرو رزونانس عبارتند از :

- ۱- ترانسفورماتور ولتاژ برق دار شده از طریق خازن grading کلید فشار قوی باز
- ۲- ترانس های ولتاژ متصل به یک نوترال ایزوله شده یا رزونانسی (شبکه های توزیع)
- ۳- ترانس های قدرت تغذیه شده از طریق یک یا دو فاز.
- ۴- کم زیر بار رفتن ترانس های قدرت متصل به شبکه کابلی با قدرت اتصال کوتاه

پایین

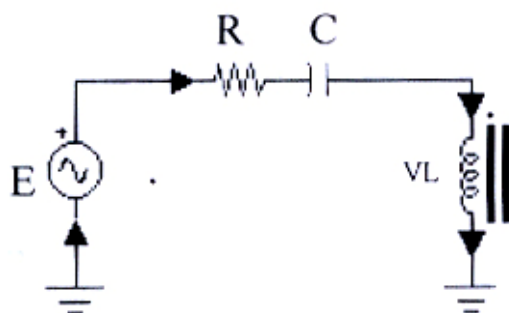
۵- کلید زنی تکفاز (fuse Blowing) در شبکه های توزیع

### کلیدزنی ناقص و فرورزونانس:

همانطور که قبلاً" گفتیم کلیدزنی یکی از عوامل مؤثر در ایجاد فرورزونانس است. منظور از کلیدزنی ناقص، قطع غیر همزمان سه فاز مدار شبکه می باشد که بر اثر عملکرد نامطلوب کلید یا عملکرد فیوز کات اوت برخی از فازها اتفاق می افتد در مطالعات انجام شده حالتی از این نوع کلیدزنی در نظر گرفته شده است که دو فاز مدار پس کلیدزنی قطع و یک فاز همچنان وصل باقی می ماند. مداری در نظر بگیرید شامل ترانسفورماتور  $20/4^{kv}$  با ظرفیت 500KVA باشد. خط توزیع ( به ازای واحد طول) مقاومت  $0.24^{\Omega}$ ، سلف  $1mH$  و خازن شنت  $1$  میکروفاراد برای شبکه زمینی و  $0.01$  نانوفاراد برای شبکه هوایی می باشد. در شبیه سازی صورت طول مدار  $4km$  در نظر گرفته شده است. در این شبیه سازی فرض شده است بر اثر کلید زنی ناقص فازهای C,B قطع ولی فاز A همچنان وصل می باشد.

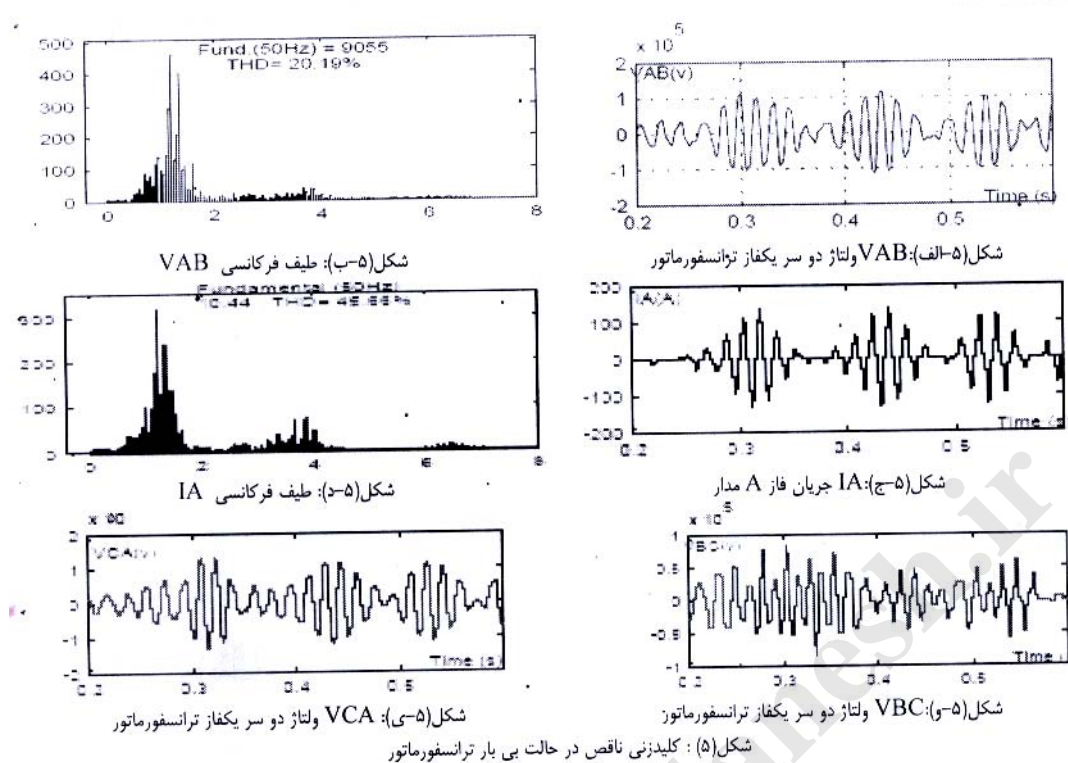
### کلید زنی در شرایط بی باری ترانسفورماتور:

در صورت کلیدزنی ناقص، ترانس از طریق فاز A و خازن های شنت فازهای C,B تغذیه می گردد که یک مدار مستعد فرورزونانس می باشد زیرا شامل سلف- خازن - و تلفات ناچیز و یک منبع سینوسی می باشد همانگونه که قبلاً" ذکر شد وجود عوامل فوق با ایجاد مدار مستعد وقوع فرورزونانس می باشد. مدار معادل شبکه فوق را این چنین می توان تصور کرد (شکل (۱۳):



شکل (۱۳)

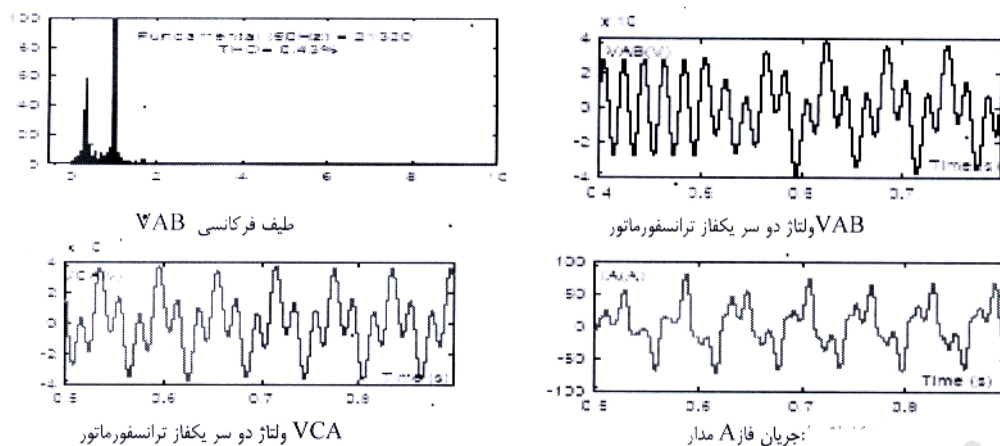
پس از کلید زنی بدلیل ثابت بودن جریان سلف، ولتاژ دوسرفازهای AC, AB افزایش یافته و هسته ترانسفورماتور وارد منطقه اشباع می شود. در مدار فوق در صورتیکه  $1e-8 < c < 1e-5$  باشد (چنین ظرفیت خازن شنتی که تنها در شبکه های توزیعی که طول کابل آن ها بیش از ۴ کیلومتر است قابل حصول است) فرورزونانس رخ می دهد. در شکل (۱۴) اثرات این کلید زنی در شبکه زمینی و در حالت بی باری ترانسفورماتور آورده شده است. پس از کلید زنی که در لحظه ی  $0.02^s$  رخ داده است، شکل موج ولتاژ به صورت شبه پریودیک با پیک ولتاژ تقریباً ۴ برابر مقدار نامی شروع به نوسان نموده و فرورزونانس مدشبه پریودیک در مدار رخ می دهد. شکل موج های جریان وفازهای دیگر نیز گویای این مطلبند. در صورتیکه کلیدزنی کامل (عملکرد قطع سه فاز به صورت همزمان) در شبکه های فوق صورت گیرد ولتاژ فازها بعد از گذشت زمانی به صفر می رسد، البته در شبکه های هوایی این زمان بسیار کم و در شبکه های زیر زمینی زمان آن به چند ثانیه نیز می رسد.



شکل ۱۴

### کلید زنی در شرایط بارداری ترانسفورماتور:

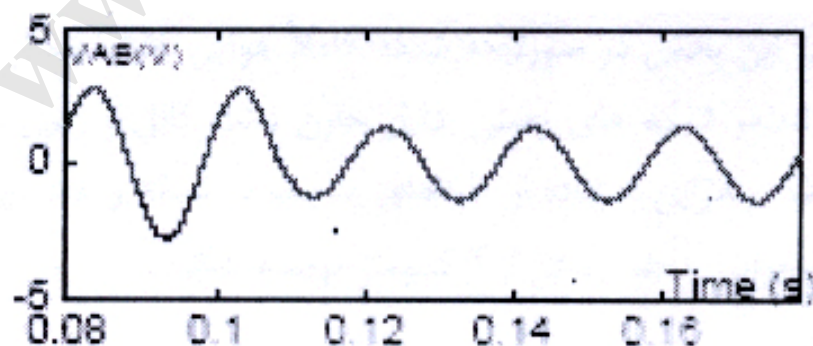
وجود بار در ثانویه ترانسفورماتور سبب ایجاد شار مخالف سیم پیچ اولیه شده و سبب محدود نمودن تغییرات  $H$  (میدان مغناطیسی) در هسته می گردد. شکل ۱۵ شکل موج های ولتاژ و جریان ترانسفورماتور رادر این شرایط نشان می دهد. با توجه به طیف فرکانس شکل موج ولتاژ فرورزونانس مد زیرهارمونیک در شبکه رخ داده است. در این حالت بار ترانسفورماتور  $S=300+j150$  KVA در نظر گرفته شده است. پیک ولتاژ در این حالت تقریباً "1.2 برابر پیک ولتاژ نامی است.



شکل ۱۵

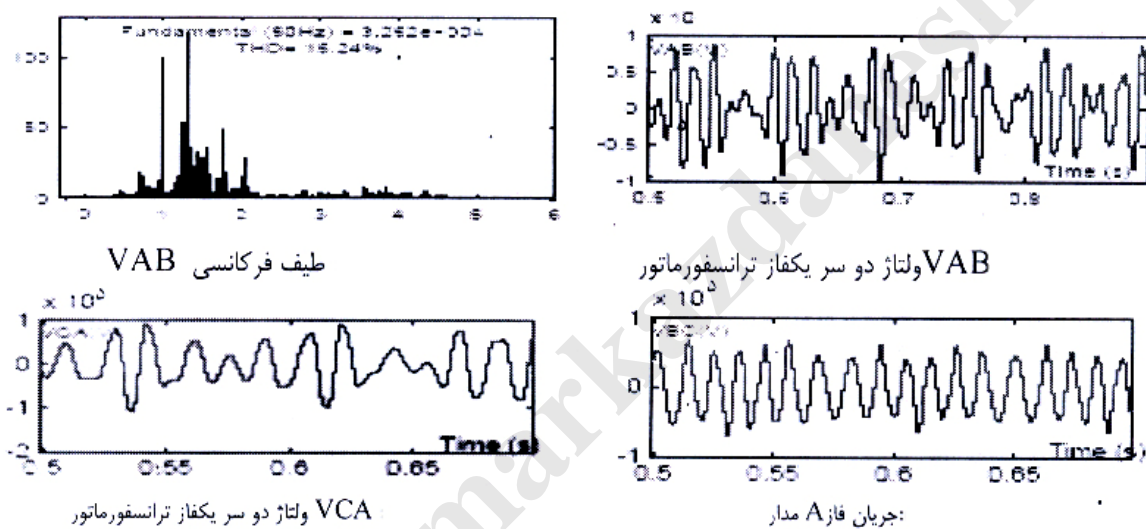
### کلید زنی ناقص با وجود انواع مختلف بار:

در این بخش به منظور بررسی اثر وقوع پدیده فرورزونانس در کلید زنی ناقص در ۳ حالت بار کاملاً "مقاومتی"، بار کاملاً "سلفی"، بار کاملاً "خازنی"، شبکه مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. در شرایطی که بار کاملاً "مقاومتی" باشد پس از کلید زنی شکل موج ولتاژ حالت سینوسی با فرکانس منبع خود را حفظ کرده و با ثابت زمانی مدار شروع به کاهش می نماید. در شکل ۱۶ موج های ولتاژ در زمان کلیدزنی این حالت نشان داده شده است. (زمان کلید زنی  $0.01^{second}$  می باشد)



شکل ۱۶

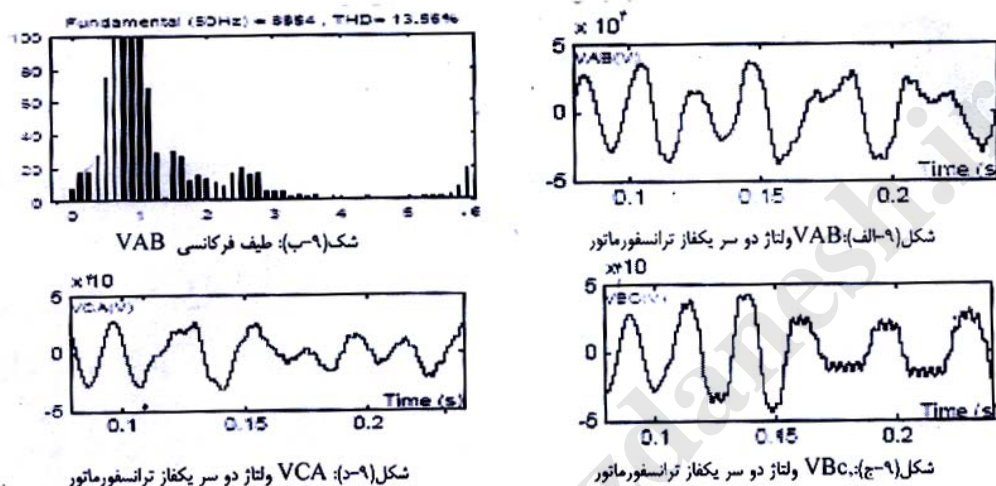
در شرایطی که بار کاملاً "سلفی باشد، که بیشتر در مناطق صنعتی رخ می دهد، پس از کلیدزنی شکل موج ولتاژ حالت سینوسی خود را از دست می دهد و شرایط برای وقوع پدیده فرورزونانس با توجه به افزایش ناگهانی ولتاژ ترانسفورماتور فراهم می گردد. در شکل ۱۷ شکل موج های مدار در زمان کلید زنی این حالت نشان داده شده است. (زمان کلید زنی  $0.5^s$  می باشد) مقدار بار ترانسفورماتور در این حالت 300KVAR سلفی می باشد.



شکل ۱۷

همانگونه که در شکل (۱۷) مشاهده می گردد پس از کلید زنی در لحظه ی  $T=0.5s$  حالت فرورزونانس در مد شبه پریودیک در شبکه رخ داده است. در شرایطی که بار کاملاً "خازنی باشد، که به دلیل خازن گذاری بیش از حد در زمان کم باری شبکه رخ می دهد، پس از کلیدزنی شکل موج ولتاژ، حالت سینوسی خود را از دست می دهد و شرایط برای وقوع پدیده فرورزونانس با توجه به افزایش ناگهانی ولتاژ مجدداً فراهم می

گردد. در شکل ۱۸ شکل موج های مدار در زمان کلیدزنی این حالت نشان داده شده است. (زمان کلیدزنی  $0.1^s$  می باشد) مقدار بار ترانسفورماتور در این حالت 300 KVAR خازنی می باشد.



شکل ۱۸

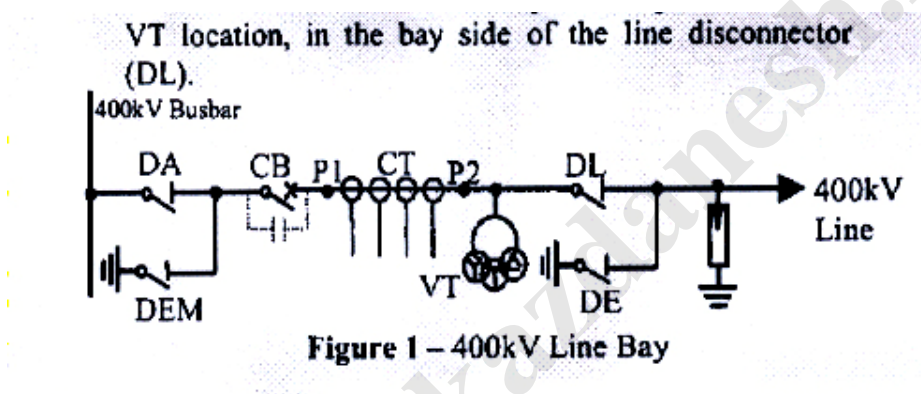
با توجه به بررسی های انجام شده در این بخش در صورتیکه شبکه کاملاً "هوایی باشد احتمال وقوع پدیده فرورزونانس در طول های کمتر از 20Km غیر ممکن است. در شبکه های زمینی به دلیل خازن شنت کابل وزمین در صورت کلید زنی ناقص در شبکه امکان وقوع این پدیده فراوان می باشد. بنابراین استفاده از کلیدهای مناسب در شبکه و همچنین عدم استفاده از فیوزکات اوت در مدارات کابلی منشعب شده از خطوط هوایی با طول بیش از 4 km توصیه می گردد.

همان طور که در طول بحث گفته شد یکی از پدیده های ناشناخته و خطرناک در شبکه های توزیع فرورزونانس است. فرورزونانس که یک رزونانس غیر خطی است که سبب افزایش هارمونی، اضافه ولتاژ و اضافه جریان در شبکه شده و علاوه بر تحمیل خسارات فراوان به تجهیزات شبکه، موجب کاهش کیفیت توان و افزایش تلفات در شبکه می شود. شناسایی این پدیده در شبکه سبب دسته بندی مناسب برخی از خطاهای نامعلوم شبکه شده که خود موجب بهبود طراحی و بهره برداری از شبکه های توزیع می گردد. همان گونه در این بخش دیدیم تحت شرایط کلید زنی ناقص در یک فیدر توزیع که طول شبکه آن بیش از ۴ کیلومتر باشد وقوع این پدیده محتمل است. همچنین سلفی یا خازنی شدید بودن بار شبکه می تواند موجب تشدید این پدیده گردد. بنابراین جهت جلوگیری از وقوع این پدیده تحت شرایط فوق پیشنهاد می گردد در شبکه های توزیع از کلیدهای مناسب جهت قطع فیدرهای زمینی استفاده گردد. همچنین از به کار بردن تجهیزات حفاظتی یا قطع کننده تکفاز برای کابل های منشعب از خطوط هوایی با طول بیش از ۴ کیلومتر اجتناب گردد.

### فرورزونانس در یک پست $400\text{ kv}$ :

سوئیچینگ در هنگام راه اندازی یک پست  $400\text{ kv}$  جدید در ایرلند سهواً دو ترانس ولتاژ تکفاز را به حالت فرو رزونانس وارد کرد. شکل (۱۹) دیاگرام تک خطی شامل Bay سیستم را در این حادثه نشان می دهد.

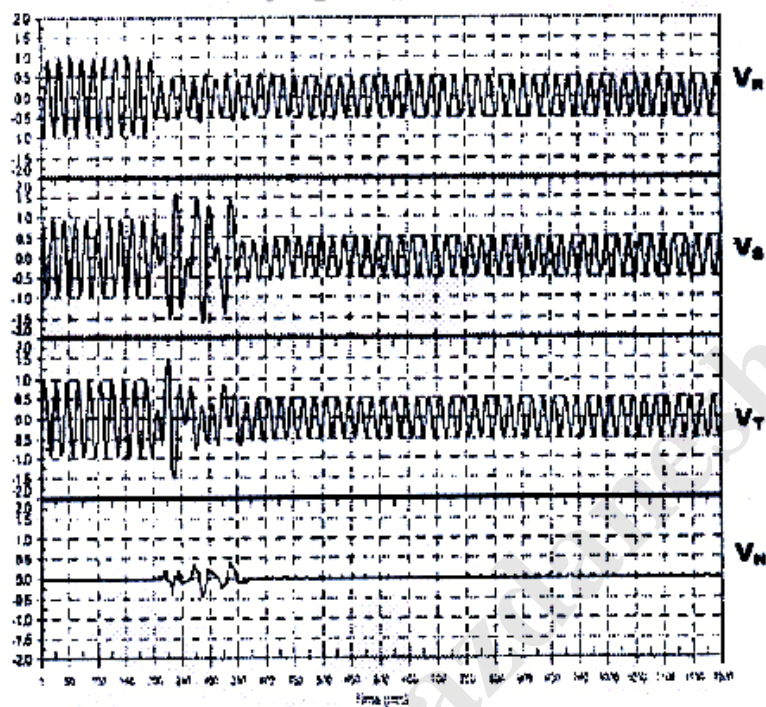
به دنبال یک "live test" شامل انرژی دار کردن VT خط از طریق باس بارها با DL باز، VT خط به وسیله باز کردن کلید فشار قوی خط بی برق شده بود. یک مدار فرورزونانسی شکل گرفت به محض باز کردن CB با قطع کننده باس بار بسته (DA) و قطع کننده خط باز (DL). قبل از انرژی دار شدن، VT از طریق خازن های grading تغذیه می شد که قبلاً صرف نظر شده بود. اضافه ولتاژهای گذرا 2p.u در دو فاز ضبط شده بود.



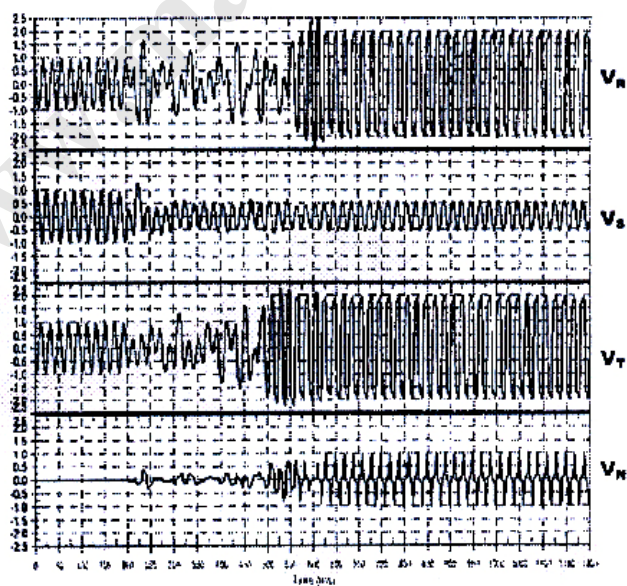
شکل ۱۹

بعد از این تجربه فرورزونانسی، و براساس پیشنهادات سازنده VT یک مقاومت Damping با مقدار  $0.5\Omega$  به ضلع سوم سیم پیچی اتصال مثلث باز وصل شد. هدف از مقاومت ایجاد تلفات کافی در مدار بود که می بایست نوسانات فرو رزونانس را خفه کند. سوئیچینگ های مجدد دیگر برای تعیین تأثیرات آن انجام شد. دو تا آزمایش اولی که با مقاومت های Damping انجام شدند منجر به مقداری نوسانات شبه پریودیک اولیه شدند که در 6 سیکل میرا شد (شکل ۲۰) و به حالت عادی با فرکانس سیستم قدرت و ولتاژهایی با دامنه  $5^{p.u}$  وارد شد.

سومین آزمایش کلید زنی ، به هر حال ، یک پاسخ کاملاً متفاوت تولید کرد . شکل موج های ضبط شده در شکل (۲۱) هستند .

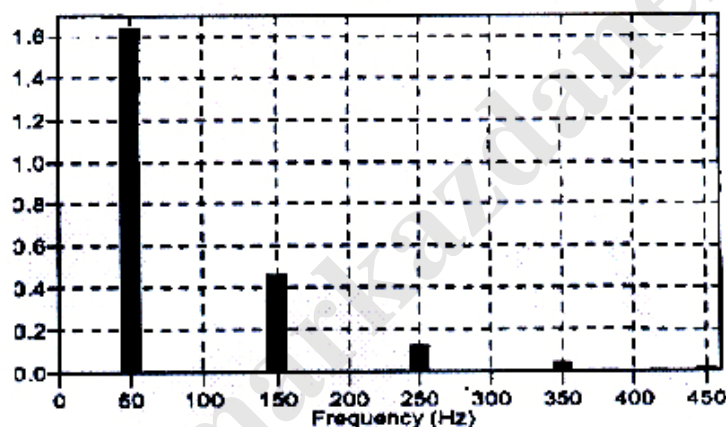


شکل ۲۰



شکل ۲۱

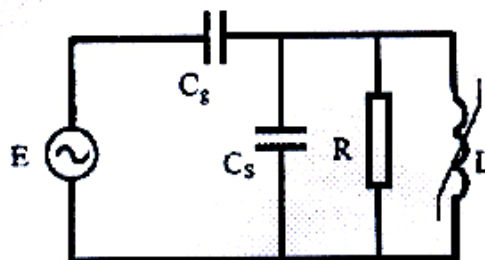
مشاهده می شود. که فرورزونانس با نوسان شبه پریودیک آغاز شده فقط بعد ۳۰۰ ms به یک حالت فرورزونانسی گذارا با ولتاژ 2Ru در دو فاز پرش کرد. نمودار نشان داده شده در شکل (۲۲) طیف فرکانسی شکل موج های فرورزونانسی است که ترکیب فرکانس پایه ای غالب و تعدادی هارمونیک فرد در حال ضعیف شدن را نشان می دهد. یک نویز غیر عادی بلند ترکیب شده با ولتاژهای بالا اپراتور محلی را مجبور به ایزوله نمودن سریع باس بار ۷ ۴۰۰u در عرض چند ثانیه کرد که به نوسانات فرورزونانسی خاتمه داد. این عکس العمل سریع از خرابی های فجیع جلوگیری کرد .



شکل ۲۲

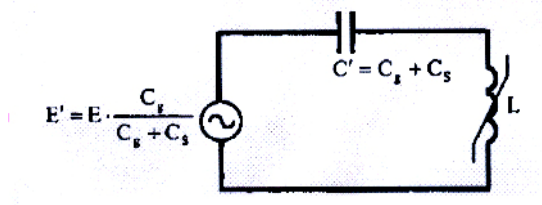
بدیهی است که در این لحظه مقاومت Damping ۵/۰ اهمی متصل به سیم پیچی ثالثیه موفق توقیف نوسانات نشده است. حادثه فرورزونانس مشابه شامل VT و خازن های grading کلیدهای فشار قوی در بسیاری از پست های فشار قوی گزارش شده است. مدهای حالت ماندگار فرورزونانس تشریح شده از طبیعت زیر هارمونیکی یا پایه ای بر خوردار بودند.

تحلیل فرورزونانس تجربه شده در پست 400kv: اندوکتانسی غیر خطی VT ها تحلیل ریاضی این پدیده را خیلی پیچیده می کند. به خاطر محدودیت های روش های آنالیز عددی، نیاز به حل معادلات دیفرانسیل غیر خطی است به دلیل پیچیدگی سیستم سه فاز. تصمیم به استفاده از شبیه سازی های زمان - دامنه برای مطالعه فرورزونانس گرفته شد. این روش، هر چند، فقط پاسخ مدار را برای یک تنظیم ویژه پارامتر ها یا شرایط اولیه به ما می دهد و نمی تواند رفتار سیستم را در حالات متفاوت نشان دهد. به منظور تخمین مطمئن خطر فرورزونانس یک مدار خاص تعداد خیلی زیادی شبیه سازی لازم است، با هدف کم کردن محاسبات یک تحلیل ساده مقدماتی به شرح زیر انجام شد 400kv bay نشان داده شده در شکل (۱۳) با DA بسته و CB و DL باز به عنوان مدار تکفاز نشان داده در شکل (۲۳) بدون در نظر گرفتن ظرفیت بین فازی ارائه شده است. در این دیاگرام  $C_g$  ظرفیت خازن grading کلید فشار قوی می باشد.  $(1600 \text{ pf})$ ؛  $C_s$  ظرفیت فاز به زمین هادی ها، VT ها و CT ها و ظرفیت پراکندگی  $(460^{\text{PF}})$  CB،  $R$  مقاومت معادل که تلفات هسته VT و بار مقاومتی آن را نشان می دهد و  $L$  هم اندوکتانس غیر خطی VT می باشد.



شکل ۲۳

با اعمال قضیه تونن و صرف نظر از تلفات ؛ مدار شکل (۲۳) می تواند به مانند مدار شکل (۲۴) نشان داده شود .



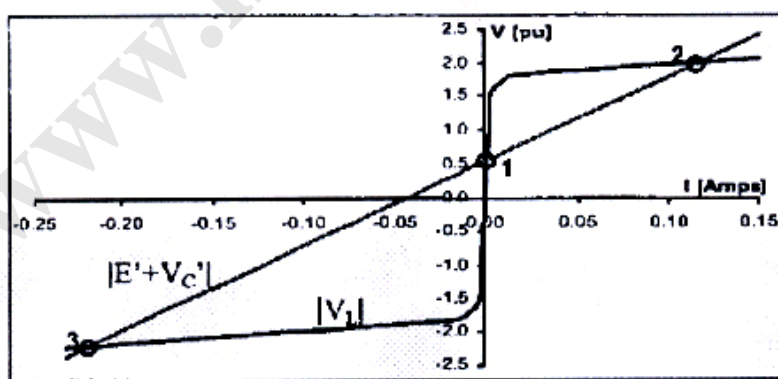
شکل ۲۴

حل فرکانس پایه ای حالت مانای مدار به وسیله معادله (۱) با  $m=1$  بدست می آید که حل گرافیکی آن در شکل (۲۵) نشان داده شده است .

$$|E'| = |\bar{V}_L^{(M)}| - \left| \frac{\bar{I}}{M\omega \cdot C'} \right| \quad (۱)$$

$$V_L^{(M)} = \psi \cdot m \cdot \omega \quad (۲)$$

برای این پارامتر های تحت مطالعه مدار سه حالت ممکن را در فرکانس سیستم ارائه می دهد که در شکل (۲۵) نشان داده است .



شکل ۲۵

نقاط ۱ و ۳ نماینده حل حالت ماندگار هستند در حالی که نقطه ۲ مربوط به حل حالت گذرا و غیر ماندگار است. نا پایداری نقطه ۲ می تواند با افزایش نا چیز جریان از بین رود که منجر به تجاوز  $|E + V_C|$  از  $|V_L|$  خواهد شد و به نوبت جریان را مجبور به افزایش می کند. اگر، از سوی دیگر، جریان کاهش یابد،  $|V_L|$  از  $|E + V_C|$  بزرگتر خواهد شد منبع قادر به تأمین افت ولتاژ نخواهد بود و جریان افت بیشتری می کند.

توجه به این نکته جالب است که این تحلیل گرافیکی ساده می تواند برای تولید دوباره با دقت بسیار بالا دو پاسخ ضبط شده در آزمایشات میدان انجام شود: نقطه (۱) به پاسخ حالت عادی مربوط می شود. که در شکل (۲۰) ضبط شده است. و نقطه (۳) به حالت فرورزونانسی مربوط می شود که در شکل (۲۱) ضبط شده است. بایسته است که ذکر گردد که ترکیب فرکانس پایه ای ولتاژهای فرورزونانسی ضبط شده همانطور که در شکل (۲۲) نشان داده است. به دلیل ساده سازی در تحلیل به ویژه در تلفات، کمی پایین تر از مقدار پیش بینی شده است.

### مدل ATP/EMTP پست ۴۰۰ KV:

روش های شبیه سازی زمان - دامنه به منظور درک بهتر عوامل مؤثر بر وقوع فرورزونانس و به منظور ارزیابی روش هایی برای کاهش یا جلوگیری اضافه ولتاژهای سیستم انجام می شوند. Bay نشان داده شده در شکل (۱۹) در نرم افزار ATP/EMTP مدل شده است

شبیه سازی های اولیه نشان می دهد که نمایش دقیق ترانس ولتاژ برای مطالعه فرو رزونانس ضروری است سه ترانسفورماتور ولتاژ نماینده ۳ سیم پیچ تکفاز سیم پیچی سه فاز ترانس ها بودند ، سیم پیچ ثالثیه آن ها به صورت مثلث باز بود با یک مقاومت 0.5 اهمی همان طور که در آزمایشات بود . رفتار مغناطیسی هسته با منحنی اشباع آن نشان داده شده که از منحنی بی باری ارائه شده توسط سازنده بدست آمد.

رفتار هیستریزیسی هسته فولادی نقش مهمی را ایفا می کند زیرا تلفات اضافی را تحمیل می کند که برای پایداری یک حالت فرو رزونانسی است گزارش شده است که تلفات معادل هسته آهنی یک VT عایق گازی  $245 \text{ KV}$  می تواند افزایش یابد به ۴ برابر مقدار نامی اش وقتی که در منطقه اشباع بالایی کار می کند .

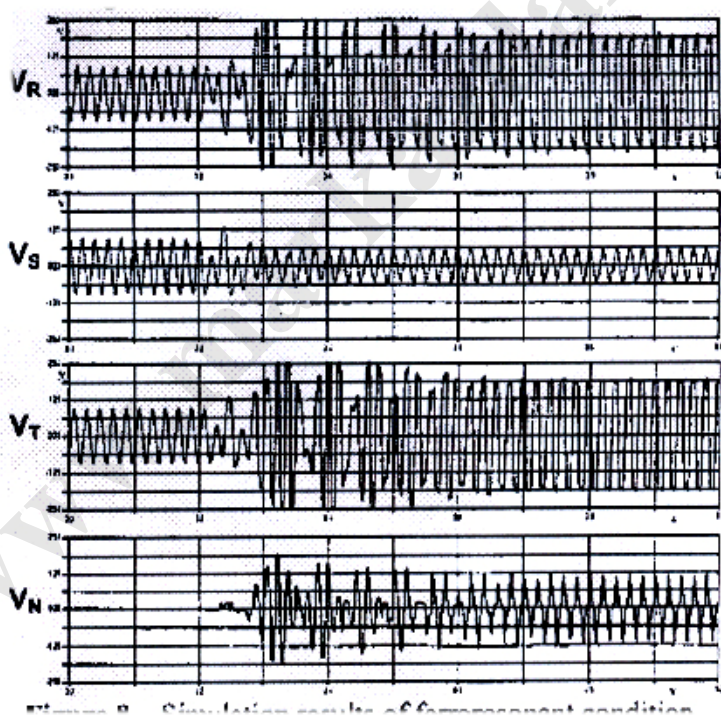
تلاش هایی برای نشان دادن تلفات هسته آهنی اشباع شده با استفاده از مقاومت های دینامیکی که سطوح شار را محاسبه می کند یا به عنوان تابعی از دامنه و شکل نوسان می باشد انجام شد . مشکل اصل هنگام پیاده کردن مدل دینامیکی رخ می دهد که کمبود اندازه گیری برای تأیید اعتبار آن هاست.

از این گذشته ترانس های تکفاز به تلفات هسته چندان حساس نیستند و بنابراین قابل قبول است که از یک مقاومت خطی با مقداری نزدیک به ولتاژ نامی استفاده شود .

از آنجایی که اندازه گیری های هیستریزیس برای VT های تحت مطالعه موجود نبودند تلفات هسته را با یک مقاومت خطی  $182 \text{ M}\Omega$  نشان دادیم ( $293 \text{ W}$  در ولتاژ  $400 \text{ KV}$ )

## اندازه گیری و نتایج شبیه سازی :

نتایج شبیه سازی سوئیچینگ به فرورزونانس نشان داده شده در شکل ۲۶ منجر می شود که با شکل موج های نشان داده شده در شکل (۱۵) مقایسه می شود و مقدار اضافه ولتاژ های فرورزونانس ماندگار (از  $200 \text{ MS}$  تا  $500 \text{ MS}$  در شکل ۲۱) تقریباً غیر ممکن است که تکرار شود، اگر چه شکل موج های شبیه سازی شده رفتار شبه پریودیک را از خود نشان دادند که این مسئله به دلیل ترکیب تصادفی پارامترهایی از قبیل زمان کلید زنی ، ولتاژ قبل از کلید زنی ، شار پس ماند و تلفات توان ، که آخری هنگام اشباع در هسته مغناطیسی متغیر است، رخ می دهد.



شکل ۲۶

## راه کارهای کاهش پدیده فرورزونانس :

- ۱- در مرحله طراحی جلوگیری کنیم: با استفاده از یک VT که اولیه آن مثلث باشد .  
(این راهکار ممکن است عملی نباشد زیرا یکی از اهداف VT این است که خطاهای زمین را با استفاده از اتصال مثلث باز در ثانویه آشکار کند .
- ۲- از حالتی که سیستم بدون زمین شود جلوگیری کنیم (این به طور کامل ممکن نیست)
- ۳- ترانس ولتاژی را خریداری کنیم که طراحی شده باشد تا در مقادیر اندوکتانس خیلی پایین تری عمل کند ، در این حالت نقطه اشباع حداقل دو برابر ولتاژ سیستم است.
- ۴- تلفات را به وسیله مقاومت ایجاد کنیم (این راه حلی است که معمولاً انتخاب می شود )

## برقگیرهای ZNO :

این نوع برقگیرها از المان های مقاومتی، شامل ترکیبی از اکسید روی و اکسید فلزات دیگر تشکیل شده اند. دیسک های ورستور معمولاً "از نظر اندازه دونوع می باشند واین مقادیر اندازه می تواند با توجه به کارخانه سازنده ونوع طراحی اعمال شده متفاوت نیز باشد.

انواع معمول از نظر اندازه به صورت زیر هستند:

الف) قطر ۳۲ میلیمتر و ارتفاع ۴۵ میلی متر، که در برقگیرهای بخش توزیع استفاده می شوند.

ب) قطر ۶۳ میلی متر و ارتفاع ۲۳ میلی متر، که در برقگیرهای پست های فشار قوی استفاده می شوند.

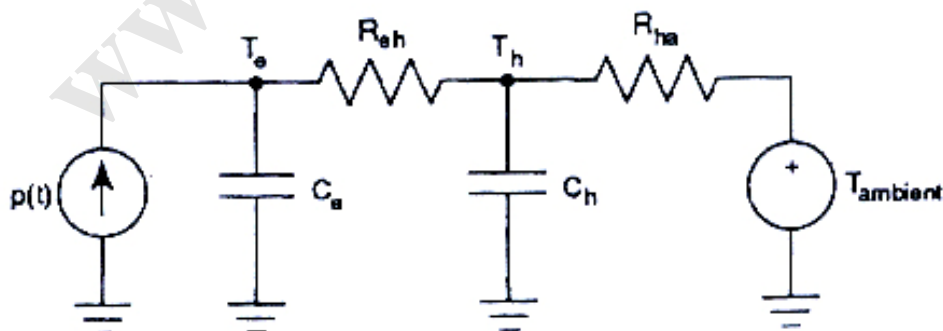
در طراحی برقگیر های ZnO باید به انتقال حرارت دیسک های ZnO به محیط اطراف توجه کرد. در برقگیرهای ZnO چون فاصله هوایی نداریم، المان های مقاومتی به طور دائم تحت ولتاژ فاز به زمین قرار دارند. پس از اعمال ولتاژ به برقگیر، مقدار معینی حرارت در نتیجه عبور جریان ناشی تولید می شود. این مقدار حرارت موجب افزایش دمای قرص برقگیر می شود. اگر ولتاژ اعمال شده از حد معینی بالاتر رود، این موازنه به هم خورده و درجه حرارت به طور پیوسته افزایش می یابد و متعاقباً "مقدار جریان ناشی نیز زیاد می شود، که خود افزایش دما را تسریع می کند تا آنکه فروپاشی حرارتی قرص برقگیر به دلیل افزایش غیر مجاز دما اتفاق می افتد.

در برقگیرها احتمال وقوع سه نوع عمده از آسیب ها وجود دارد:

۱- ناپایداری حرارتی، که ناشی از تجاوز دمای برقگیر از ماکزیموم دمای مجاز پایداری (حدود ۲۰۰ درجه سانتی گراد) می باشد.

۲- سوراخ شدن موضعی دیسک (puncture)، که در اثر تمرکز جریان های بالا در یک مسیر و بالا رفتن دمای نقطه داغ تا حدود ۸۰۰ درجه سانتی گراد رخ می دهد.

۳- ترکیدن برقگیر (cracking) که در اثر گرم شدن غیر یکنواخت برقگیر، بالارفتن فشاروتنش ماده از حد مجاز تنش رخ می دهد. در سیستم های توزیع زمینی هنگامی که از برقگیر برای حفاظت ترانس استفاده می کنیم، در صورت وقوع پدیده فرورزونانس و استمرار این پدیده ممکن است برقگیر دچار فروپاشی حرارتی می شود. چون برقگیر در این حالت طی مدت زیادی تحت ولتاژی بالاتر از ولتاژ کار دائم قرار می گیرد، جریان تنشی نیز در آن افزایش می یابد ولی نکته ای که حائز اهمیت می باشد این است که برای برقگیر ZnO مورد استفاده در سیستم های توزیع، توانایی تحمل انرژی معمولاً برای جریان های تخلیه با دامنه بالا و مدت زمان کم تعیین می شود و این در حالی است که در زمان وقوع فرورزونانس دامنه جریان تخلیه کمتر و مدت زمان عبور این جریان طولانی تر است. و در این زمان نسبتاً طولانی تبادل حرارتی بین قرص های ZnO و محیط نیز انجام می گیرد. و از طرفی نیز قرص های ZnO طی مدت بیشتری تحت اضافه دما قرار می گیرند که مسئله پیری قرص های ZnO مطرح می گردد. مدل حرارتی در شکل زیر برای تخمین دمای وریستور ارائه شده است.



شکل (۲۷)

یک برقگیر اکسید روی از دیسک های وریستور تشکیل شده است که معمولاً "اطراف آن را پرسلین در بر گرفته است. بین دیسک و پرسلین هوای خشک وجود دارد. با توجه به این مشخصه فیزیکی برقگیر، یک مدار معادل که شامل دو خازن، دو مقاومت و دو منبع ولتاژ می باشد پیشنهاد شده است. در این مدار معادل  $Th, Te$  نشان دهنده ی دمای دیسک  $zno$  و پرسلین،  $ch, ce$  ظرفیت حرارتی دیسک و پرسلین  $Reh$  مقاومت حرارتی بین دیسک و پرسلین و  $Rha$  مقاومت حرارتی بین پرسلین و محیط می باشد و  $p(t)$  نیز منبع حرارتی می باشد.

استفاده از این مدل سه مشکل را به همراه دارد: اولاً "با استفاده از این مدل تنها می توان پایداری حرارتی برقگیر را بررسی نمود و این مدل دمای نقطه داغ برقگیر و یا مقدار تنش های حرارتی را به ما نمی دهد. ثانیاً "پارامترهای حرارتی برقگیر وابسته به تغییرات دما می باشد و یک رابطه غیر خطی با دما دارد. البته به دلیل اینکه ماکزیمم دمای مجاز پایداری حرارتی برقگیر در حدود ۲۰۰ درجه سانتی گراد است، می توان تغییرات پارامترهای حرارتی را خطی فرض کرد. ثالثاً "بدست آوردن پارامترهای این مدار معادل جهت شبیه سازی ، مستلزم انجام تست آزمایشگاهی با تجهیزات دقیق و در محیط استاندارد می باشد، تا بتوان از طریق حداقل انجام یک تست و برازش نتایج به روش های گوناگون ، پارامترهای این مدار معادل را تخمین زد.

برقگیرهای اکسید روی از سال ۱۹۷۶ به بعد مورد استفاده قرار گرفتند . در بعضی از مقالات استفاده از برقگیری های اکسید روی را به عنوان یکی از راهکارهای محدود نمودن اضافه ولتاژ های فرورزونانس پیشنهاد کرده اند .

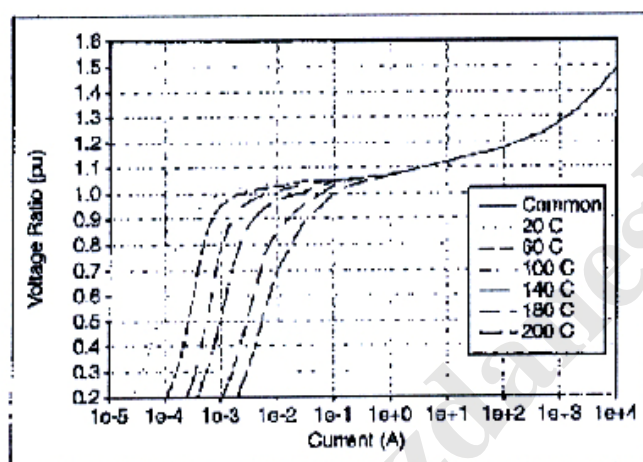
### قابلیت جذب برقگیری های اکسید روی :

هنگامی که از برقگیر های اکسید روی جریان می گذرد ؛ به علت افت ولتاژ دو سر برقگیر در آن انرژی تلف می شود . قابلیت هدایت گرمایی قرص های اکسید روی کم است و در حالت هایی مانند وقوع صاعقه توزیع دما در داخل قرص های اکسید روی را بی در رو (adiabatic) فرض می نمایند . بنابراین در هنگام وقوع حالت های گذرا مانند صاعقه ، قرص های اکسید روی باید توانایی تحمل و جذب این انرژی را داشته باشند . پس از وقوع صاعقه ، گرمای به وجود آمده در برقگیر به آرامی به محیط اطراف تحویل داده می شود و برقگیر به آرامی سرد می شود . قابلیت تحمل برقگیر های اکسید روی در حالت های وقوع صاعقه با حالت های اضافه ولتاژ های موقت متفاوت می باشد . آنچه که توسط سازندگان مختلف به عنوان قابلیت جذب انرژی در واحد  $\text{kJ/kV}$  ارائه می شود مربوط به تحمل برقگیر ها در مقابل اضافه ولتاژ های صاعقه است که از مقدار قابلیت جذب قرص های اکسید روی در مقابل اضافه ولتاژ های ماندگار که بر حسب  $\text{kJ/cm}^3$  در حجم قرص بیان می شود بسیار کم تر است .

### جریان نشتی عبوری از قرص های اکسید روی :

در هنگام کارکرد متداول برقگیر های اکسید روی ، جریان عبوری از آن ها بسیار نا چیز بوده و بیشتر خازنی می باشد مؤلفه مقاومتی این جریان باعث گرم شدن قرص ها می

شود . مؤلفه مقاومتی جریان نشتی بر خلاف جریان تخلیه آن به شدت تابع دمای قرص بوده و با افزایش دما ، مقدار این جریان افزایش می یابد . شکل (۲۸) منحنی ولتاژ - جریان برقگیری در دماهای مختلف را نشان می دهد . یکی از عوامل تخریب برقگیر های اکسید روی به واسطه فیدبک ناشی از این پدیده می باشد .



شکل (۲۸)

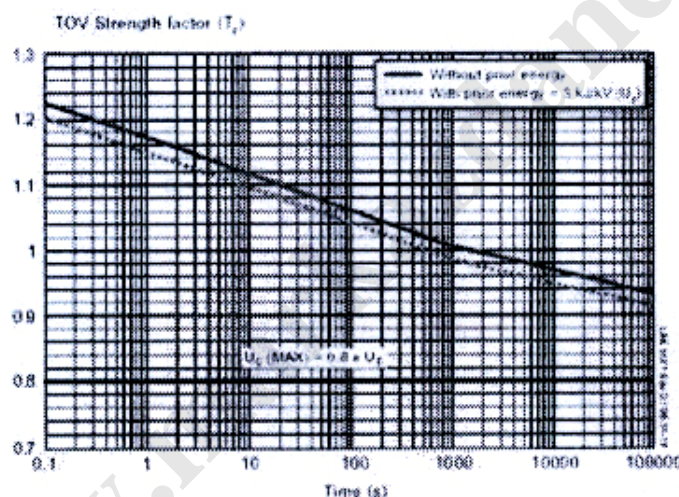
در هنگام اصابت صاعقه ممکن است در ابتدای امر برقگیری بتواند انرژی صاعقه را جذب کرده و در هنگام صاعقه پایدار بماند ، اما به علت دمای زیاد در لحظات پس از اصابت صاعقه ؛ در صورتی که دفع گرمای آن سریع نباشد ، جریان نشتی آن مرتباً بالا رفته و در نهایت باعث نا پایداری حرارتی می شود .

تأثیر پذیری جریان نشتی برقگیر های اکسید روی از دما بر خلاف اضافه ولتاژ های صاعقه در هنگام اضافه ولتاژ های فرو رزونانس نه تنها باعث تخریب برقگیر ها نمی شود

بلکه با افزایش میرایی موجود در سیستم، شدت اضافه ولتاژهای فرو رزونانس را کاهش داده و در نتیجه نقش مثبتی در محدود نمودن اضافه ولتاژها ایفا می کند .

منحنی های قابلیت تحمل اضافه ولتاژ های موقت :

سازندگان برقگیر های اکسید روی منحنی هایی را به عنوان قابلیت تحمل اضافه ولتاژ های موقت به بهره برداران ارائه می دهند که با توجه به آن ها می توان مدت زمان تحمل برقگیر را در مقابل اضافه ولتاژ های موقت سیستم بدست آورد . نمونه ای از منحنی های مورد نظر در شکل ۲۹ نشان داده شده است .



شکل ۲۹

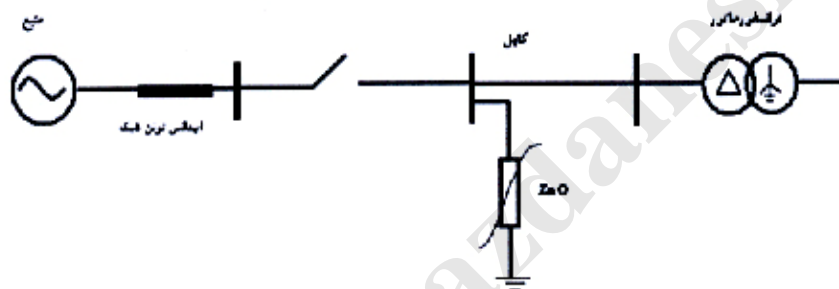
استفاده از این منحنی ها برای بررسی میزان تحمل برقگیر های اکسید روی در مقابل اضافه ولتاژ های فرو رزونانس به دو دلیل جای بحث فراوان دارد :

- ۱- منحنی های ارائه شده توسط سازندگان با فرض منبع قوی و ثابت تولید اضافه ولتاژ می باشد که به علت ضعیف بودن منبع تولید اضافه ولتاژ های فرو رزونانس این مسئله صادق نمی باشد .

۲- منحنی های TOV برای اضافه ولتاژ های فرکانس قدرت ارائه شده اند . در حالی که اضافه ولتاژ های فرو رزونانس در بسیاری از حالات دارای فرکانس متفاوت با فرکانس شبکه می باشند .

### شبیه سازی پدیده فرو رزونانس : (۱)

برای مطالعه پدیده فرو رزونانس و تأثیر آن بر برقگیر اکسید روی سیستم شکل (۳۰) مورد مطالعه قرار می گیرد .



شکل ۳۰

۱- مدل کابل . در این مطالعه از مدل T برای شبیه سازی کابل استفاده شده است . به علت اینکه فرو رزونانس جزو حالت های گذرای آهسته می باشد مدل مورد نظر کفایت می کند . پارمترهای مورد نظر در جدول (۱) نشان داده شده است . جدول ۱

جدول ۱ پارامترهای کابل استفاده شده در شبیه سازیها

مقطع کابل	۹۵ # ۳ mm <sup>2</sup>
مقاومت	۰/۲ $\Omega / km$
اندوکتانس	۰/۴۱ mH/km
ظرفیت خازنی چرخه مثبت	۰/۲۱ $\mu F / km$
ظرفیت خازنی چرخه صفر	۰/۱۹ $\mu F / km$

## ۲- مدل ترانسفورماتور

برای مدلسازی ترانسفورماتور از مدل دو گانی ترانس های قدرت (شکل ۳۱) استفاده می

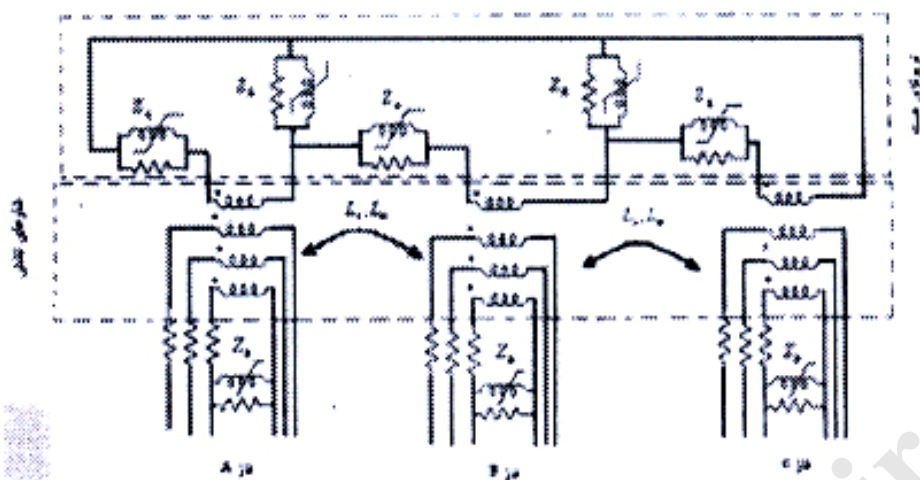
کنیم که در آن به راحتی ساختار هسته را می توان مدل نمود .

جزئیات بیشتر در مورد مدل سازی هسته را قبلاً بحث کرده ایم مشخصات ترانسفورماتور

مورد نظر در جدول (۲) نشان داده شده است . جدول ۲

جدول ۲ مشخصات ترانسفورماتور شبیه سازی شده

اتصال	$\Delta/Yng$	تلفات (Wat)	۱۲۰۰
قدرت ظاهری (KVA)	۶۳۰	جریان مغناطیس کنندگی (%)	۱/۶
ولتاژ ظاهری (KV)	۲۰/۰/۴	امپدانس اتصال کوتاه (%)	۶
جریان نامی (A)	۱۸/۹۰۹	ظرفیت خازنی نسبت به زمین (PF)	۸۱۶۴ ۲۰۴۱



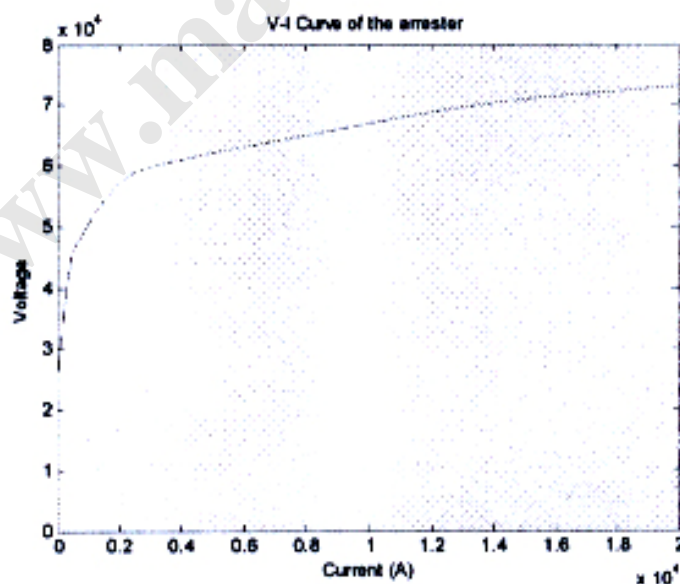
شکل ۳۱

۳- کلید : کلید استفاده شده در شبیه سازی ها کلید کنترل شده با زمان ایده آل در

نرم افزار EMTP می باشد .

۴- برقگیر : در شبیه سازی از مدل نوع ۹۲ برقگیر استفاده شده است . منحنی

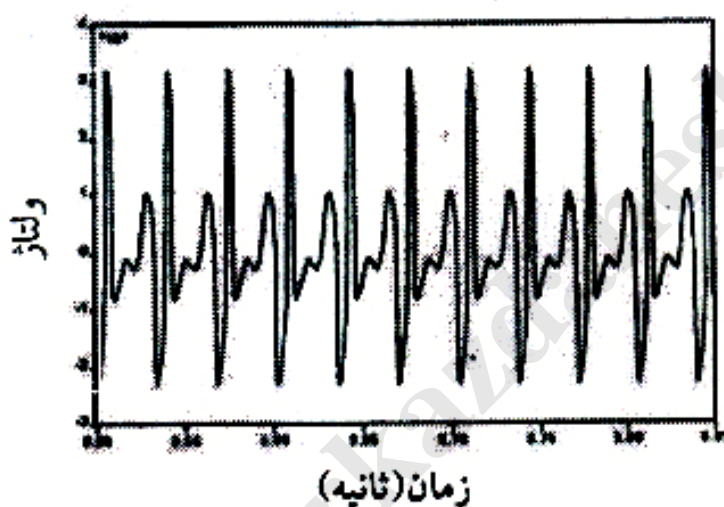
مشخصه برقگیر  $20 \text{ KV}$  مورد استفاده مطابق شکل (۳۲) می باشد .



شکل (۳۲)

## شبیه سازی پدیده فرورزونانس : (۲)

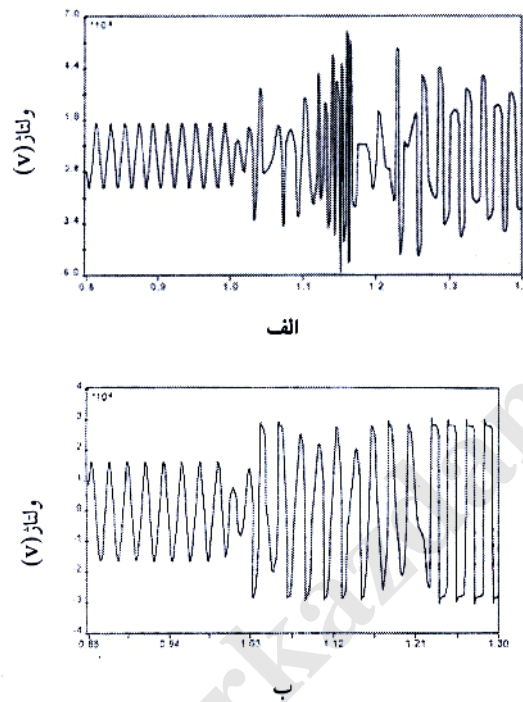
پدیده فرورزونانس در هر حالت با قطع تک فاز یا دو فاز ترانسفور ماتور بی بار در طول های مختلف کابل مطابق شکل (۲۸) در هنگام عدم حضور برقگیر و یا در حضور برقگیر شبیه سازی شده است . شکل ۳۳ نمونه ای از این اضافه ولتاژ ها در سر فاز قطع شده a را نشان می دهد .



شکل ۳۳

شبیه سازی مختلف نشان می دهند اضافه ولتاژ های بزرگ در هنگام عدم حضور برقگیر می باشد . این اضافه ولتاژ ها دارای مقادیری در حدود چندین پریونیت ولتاژ نامی ترانسفور ماتور به تناسب طول کابل می باشند در شکل (۳۴-الف) اضافه ولتاژ های فرورزونانس روی فاز a ترانسفور ماتور در هنگام قطع پشت سر هم فاز های a,b با فرض طول کابل ۳۰۰ متر نشان داده شده است .

شکل (۳۴-ب) اضافه ولتاژهای فاز a ترانسفورماتور در حضور برقگیرهای اکسید روی هنگامی که فازهای a ترانسفورماتور در حضور برقگیرهای اکسید روی هنگامی که فازهای a,b ترانسفورماتور پشت سر هم قطع می شوند را نشان می دهد .



شکل ۳۴

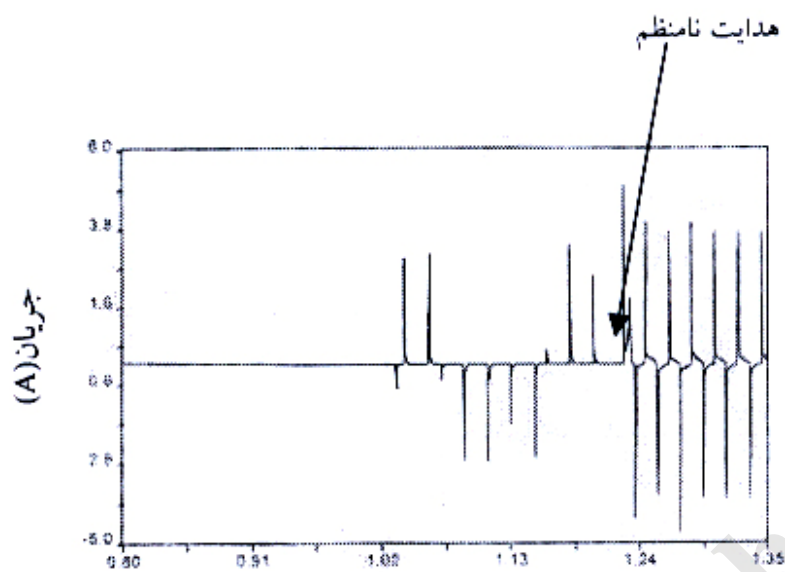
آنچنانکه دیده می شود در این حالت اضافه ولتاژها به مقادیر حداکثر  $30 \text{ kv}$  محدود می شوند . شکل (۳۵) جریان گذرنده از برقگیر را نشان می دهد. آنچنانکه در این شکل مشخص است ، جریان گذرنده از برقگیر در این حالت بسیار کم و در حدود چند آمپر می باشد در حالی که با توجه به منحنی برقگیر و منحنی های TOV و بدون توجه به تأثیر برقگیر و اثر میدانی آن جریانی حدود ۲ کیلو آمپر قابل انتظار است که این مسئله در حالت واقعی صادق نیست .

هر چند عبور مداوم چنین جریانی (چند آمپر) از قرص های اکسید روی باعث انهدام آن ها خواهد شد ، ولی شرایط به بدی اضافه ولتاژ های موقت سیستم با فرض مقدار قله مساوی نیست .

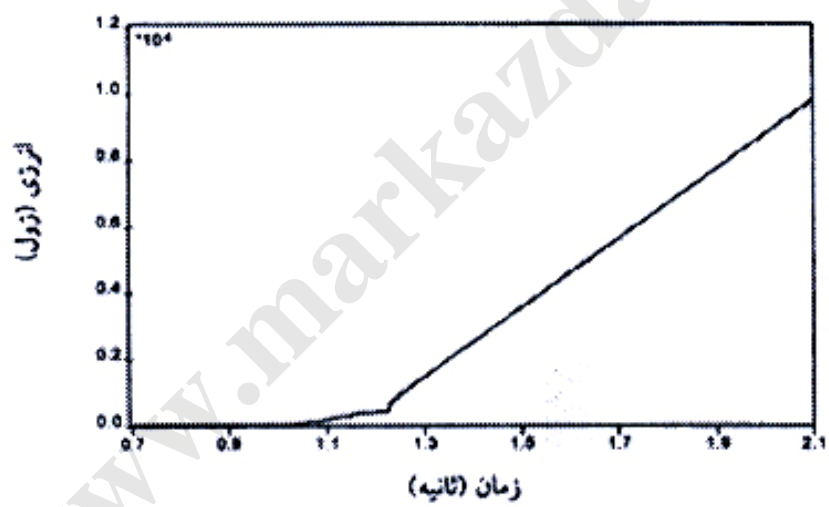
علت کم بودن جریان گذرنده از برقگیر طبیعت میرائی برقگیر بر اضافه ولتاژ ها می باشد . آنچنانکه می دانیم وجود بار در مدار فرو رزونانس باعث میرائی اضافه ولتاژ ها می شد . به گونه ای که وجود بار به اندازه ۵٪ بار نامی ترانس می تواند اضافه ولتاژ های فرو رزونانس را به راحتی میرا سازد . بار های کوچکتر نیز می توانند باعث تضعیف اضافه ولتاژ ها شده و از مقدار قله آن بکاهند .

در مدار شکل (۳۰) با قطع کلید و ظهور اضافه ولتاژ های فرورزونانس که قله آن ها از MCOV برقگیر بیشتر است ، از برقگیر جریان گذشته و به علت مقاومتی بودن این جریان مانند یک بار باعث میرائی اضافه ولتاژ های می شود . در نتیجه این علل و عوامل اضافه ولتاژ های فرورزونانس در مقادیر بسیار کمتر از مقادیر قبلی محدود شده و جریان عبوری از برقگیر نیز با کمک منحنی شکل (۳۲) در ولتاژ محدود شده مورد نظر بدست می آید.

همچنانکه در شکل ۳۶ دیده می شود انرژی تخلیه شده در برقگیر در حال قطع دو فاز با شیب بیشتری نسبت به قطع تک فاز بالا می رود که این مسئله به خاطر هدایت متقارن برقگیر در هنگام قطع دو فاز و همچنین بزرگتر بودن جریان ها می باشد.



شکل ۳۵



شکل ۳۶

## هدایت نامنظم:

از جمله مهمترین خصوصیات اضافه ولتاژهای فرورزونانس که باعث تقلیل اثرات منفی آن بر روی برقگیرها می شود طبیعت نامنظم آن ها در برخی موارد است. طبیعت نامنظم این اضافه ولتاژها باعث می شود که برقگیر در هر سیکل به جای دو بار هدایت فقط در سیکل منفی یا مثبت از خود جریان عبور دهد. این مسئله باعث عبور جریان نامنظم از برقگیر شده و در نهایت برقگیر کمتر از حالت های هدایت متقارن آنچنانکه در اضافه ولتاژهای معمول اتفاق می افتد گرم می شود. نمونه ای از این رفتار در شکل ۳۵ هنگامی که فاز a ترانسفورماتور قطع شده است، نشان داده شده است.

## تخریب برقگیرهای اکسید روی:

در قسمت های قبل نشان دادیم که شرایط ناشی از پدیده فرورزونانس بر برقگیرهای اکسید روی را نمی توان به کمک منحنی های TOV تعیین نمود. هر چند که شرایط به وجود آمده بر برقگیرها دارای شدت کمتری نسبت به اضافه ولتاژهای معمولی با قله یکسان می باشند ولی این اضافه ولتاژها قادرند برقگیرهای اکسید روی را تخریب نمایند. این نکته از آنجا ناشی می شود که برقگیرهای اکسید روی توانایی جذب مقدار محدودی انرژی را دارا می باشند و در صورتی که مقدار انرژی از این مقدار تجاوز کند دچار ناپایداری حرارتی می شوند.

با فرض قابلیت جذب انرژی  $2\text{kJ/cm}^3$  و حجم فرضی  $170\text{cm}^3$ ، برقگیرهای توزیع متداول می توانند  $340\text{kJ}$  انرژی تحمل نمایند. برای نشان دادن مدت زمان تحمل برقگیر

در مقابل اضافه ولتاژهای فرورزونانس در مقاطع مختلف کابل هنگام قطع تک فاز و دو فاز مقدار انرژی تخلیه شده در برقگیر شبیه سازی شده و با فرض قابلیت جذب انرژی ثابت، این زمان مطابق جداول ۳ و ۴ برای قطع تک فاز و دو فاز به دست آمده است. از آنجا که اضافه ولتاژهای فرورزونانس ممکن است به صورت پایدار یا ناپایدار ظاهر شوند آنی نبودن تخریب برقگیر در بسیاری از مواقع باعث سالم ماندن آن می شود زیرا ممکن است با گذشت زمان قبل از آنکه انرژی تخلیه شده در برقگیر از ظرفیت جذب آن بالاتر رود اضافه ولتاژهای فرورزونانس میرا شوند و در نتیجه برقگیر سالم بماند. این حالت بیشتر مربوط به اضافه ولتاژهای فرورزونانس ناپایدار می باشد. به علت متفاوت بودن شرایط وقوع حالت های مختلف پدیده فرورزونانس بررسی این امر محتاج تحقیق بیشتر به همراه بررسی آماری می باشد.

جدول (۳) زمان بحرانی تخریب برقگیر در هنگام قطع تک فاز

طول کابل (m)	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
میانگین تغییرات انرژی (KJ/S)	۰/۰۸	۰/۶	۱/۰۱	۲/۰۲	۲/۹۸
زمان (دقیقه)	۷۰	۹/۴	۵/۶	۲/۸	۱/۹

جدول (۴) زمان بحرانی تخریب برقگیر در هنگام قطع دو فاز

طول کابل (m)	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۳۰۰
میانگین تغییرات انرژی (KJ/S)	۱/۲	۲/۴۸	۶/۶۵	۸/۰۸	۱۱/۳
زمان (دقیقه)	۴/۷	۲/۲۸	۰/۸۵	۰/۷	۰/۵

## نتیجه گیری:

وقوع در شبکه های توزیع زیرزمینی به دلیل وجود کابل با خاصیت خازنی همراه با ترانسفورماتور با هسته اشباع پذیر، امری محتمل است. همان طور که در طول بحث عنوان مشاهده شد یکی از مواردی که می تواند باعث راه اندازی فرورزونانس شود، تکفاز و یا دو فاز شدن سیستم است. اکثراً این اتفاق در شبکه های توزیع به دلیل استفاده از فیوز جهت حفاظت سیستم رخ می دهد. همان طور که در شبیه سازی مشاهده شد، دامنه اضافه ولتاژهای فرورزونانس می تواند نسبت به حداکثر ولتاژ نامی سیستم بسیار بزرگ باشد، که این امر به سیستم عایقی صدمه خواهد زد و با توجه به مدت زمان تداوم این اضافه ولتاژ، ممکن است شکست عایقی رخ دهد. برای جلوگیری از تکفاز یا دو فاز شدن سیستم می توان به جای فیوز از حفاظت های سه فاز مانند رله اضافه جریان استفاده نمود که البته با توجه به گستردگی و وسعت شبکه های توزیع، اقتصادی به نظر نمی رسد. راه آسانتر آن است که فیوزهای شبکه توزیع، حداقل برای شبکه های زیر زمینی که احتمال وقوع پدیده فرورزونانس در آن ها بیشتر است، طی دوره های زمانی تست شوند، تا حداقل از عملکرد ناصحیح آن ها پیشگیری شود. اکثراً در شبکه های توزیع در سمت 20kV برای حفاظت ترانس در مقابل صاعقه از برقگیرهای ZnO استفاده می کنند، همانگونه که مشاهده شد وجود برقگیر می تواند دامنه اضافه ولتاژ ناشی از فرورزونانس را تا حدود حداکثر ولتاژ فاز به فاز سیستم کاهش دهد. که این امر در سیستم هایی که سیستم عایقی متناسب با حداکثر فاز به فاز انتخاب شده است، از آسیب عایقی جلوگیری می کند و در سایر موارد می تواند باعث کاهش شدت آسیب عایقی شود

و یا مدت زمان تحمل عایق در برابر فرورزونانس را افزایش دهد. تداوم اضافه ولتاژ برای یک زمان معین که از مشخصه حرارتی  $ZnO$  حاصل می شود، می تواند منجر به ناپایداری و فروپاشی حرارتی و یا سوراخ شدن موضعی و ریسور شود. در هنگام وقوع فرورزونانس، اضافه ولتاژهای ناشی از آن می تواند باعث عبور جریان های ناشی در برقگیر شود. معمولاً برقگیرها جهت تخلیه جریان های با دامنه بسیار بالا و در مدت زمان کم، طراحی می شوند. اطلاعاتی که در خصوص جذب انرژی برقگیر توسط کارخانه سازنده ارائه می شود برای جریان های تخلیه با دامنه بالا و در مدت زمان کم، در رنج زمانی میکرو ثانیه می باشد. مدت زمان تداوم فرورزونانس می تواند طولانی باشد و از طرفی دامنه جریان های تخلیه برقگیرها در این حالت معمولاً در حدود ۱۰ آمپر و یا کمتر است، و اطلاعاتی که کارخانه سازنده در خصوص حداکثر انرژی قابل جذب توسط برقگیر ارائه داده است، در این مورد قابل استناد نیست و باید زمان آسیب حرارتی برقگیر تخمین زده شود و البته قبل از آن، انرژی که برقگیر در طی وقوع پدیده می تواند تحمل کند محاسبه گردد و نوع آسیب هم باید مشخص شود.

## مراجع:

1- "Understanding Ferroresonance" Marta Val Escudero<sup>(1)</sup>, "Ivan Duduryeh<sup>(2)</sup>", Miles Red fern (IEEE article).

(1) ESB international , Ireland. (2) ESB National Grid Irland. (3) University of Bath, uk.

2- "Example of Ferroresonance in a High Voltage Power System" David A.N.jacoloson, Member, IEEE.

3- Technical Bulletin – 004a , ferroresonance, May 29, 2002 Cadick Corporation.

4- Cahier technique Schneider n° 190 Pages: 6-9.

۵- "فرورزونانس در شبکه های توزیع و تأثیر آن بر برقگیرهای ZnO" محمد فرشاد، جواد ساده، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق (PSC 2004).

۶- "بررسی وقوع پدیده فرورزونانس بر اثر کلید زنی ناقص در شبکه های توزیع" عبدالامیر یاقوتی، برق منطقه ای تهران، دانشگاه تربیت مدرس.

۷- "بررسی اثر متقابل برقگیرهای اکسید روی و اضافه ولتاژهای فرورزونانس به کمک

نرم افزار EMTP" محمد مرادی، احمد غلامی، نوزدهمین کنفرانس بین المللی برقی (PSC 2004).