

## فصل پنجم

شناسایی پدیده فرورزونانس و  
بررسی حادثه پست ۴۰۰/۲۳۰  
کیلوولت فیروزبهرام

## ۵-۱- مقدمه:

فرورزونانس یکی از پدیده‌های نادر و مخرب در شبکه‌های قدرت می‌باشد. که به دلیل وقوع تصادفی و کم تعداد بودن آن در سیستم‌های قدرت اطلاعات دقیق، کامل و تدوین شده بسیار کمی در دسترس مهندسين و متخصصين برق قرار دارد. وقوع تعدادی از حوادث که سالانه در شبکه‌های قدرت اتفاق می‌افتد و اغلب آنها قابل تفسیر نمی‌باشند می‌تواند به دلیل وقوع این پدیده مخرب و پیچیده باشد.

شناخت پدیده فرورزونانس می‌تواند در تفسیر برخی حوادث مبهم ناشی از وقوع این پدیده در شبکه‌های قدرت و نیز جلوگیری از تکرار آن کمک نماید. در فصل حاضر ابتدا بطور مختصر به شرایط وقوع پدیده فرورزونانس در سیستم‌های قدرت پرداخته و پس از آن با استفاده از نرم افزار EMTP حادثه مورخ ۱۳۸۱/۲/۲۸ پست ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت پست فیروزبهرام مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۵-۲- شناسایی پدیده فرورزونانس:

فرورزونانس یک پدیده رزونانس غیر خطی است که می‌تواند روی شبکه‌های قدرت تاثیر گذارد. مقایده غیر عددی هارمونیک‌ها و یا اضافه ولتاژ یا اضافه جریانهای گذرا یا پایدار که توسط آن ایجاد می‌گردد معمولا برای تجهیزات برقی خطرناک است. بعضی از شکست‌های الکتریکی توجیه نشده را می‌توان به این پدیده غیر خطی نادر نسبت داد.

واژه فرورزونانس که تقریباً از اواخر دهه دوم قرن بیستم وارد مقالات و کتابها گردید، به کلیه پدیده‌های نوسانی رخ داده در مدارهای الکتریکی اطلاق می‌گردد که این مدارها حداقل شامل آیتم‌های زیر باشند:

(الف) سلف غیر خطی (فرومغناطیس قابل اشباع).

(ب) خازن.

(ج) منبع ولتاژ (عموماً سینوسی).

(د) تلفات بسیار کم.

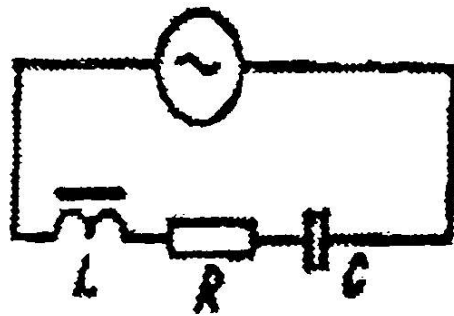
شبکه‌های قدرت شامل تعداد بسیار زیادی از این سلف‌های قابل اشباع مانند ترانسفورماتورهای قدرت، ترانسفورماتورهای ولتاژ، راکتورهای شنت می‌باشد همچنین به عنوان خازن می‌توان از کابلها، خطوط هوایی بلند، ترانسفورماتورهای ولتاژ خازنی، بانکهای خازنی موازی با پل بریکرها نام برد. اینها تجهیزاتی هستند که می‌توانند شرایط وقوع فرورزونانس را ایجاد نمایند. بزرگترین مشخصه این پدیده این است که احتمال وجود بیش از یک پاسخ حالت پایدار برای یک نوع آرایش از پارامترهای شبکه وجود دارد. حالت‌های گذرا، اضافه ولتاژهای رعد برق، برقدار یا بی برق کردن ترانسفورماتورها و وقوع خطاها می‌تواند موجب شروع فرورزونانس گردد که در این صورت پاسخ شبکه در یک حالت پایدار سیوسی - فرکانس منبع به پاسخ حالت پایدار فرورزونانسی دیگر با اضافه ولتاژهای بالا و سطوح مختلف هارمونیک که می‌تواند برای تجهیزات بسیار مضر باشد جهش نماید.

اطلاعات مختصری درباره این پدیده پیچیده بدست آمده است زیرا که این پدیده بسیار نادر بوده و با روشهای محاسباتی معمول که مهندسين برق استفاده می کنند قابل تجزیه و تحلیل و حدس زدن نمی باشد. و این ضعف اطلاعات باعث می شود که علت تعدادی از حوادث و انهدام و تخریب تجهیزات که توجیه نشده اند، پدیده فرورزونانس به نظر آید.

### ۳-۵- فرورزونانس

#### ۱-۳-۵- فرورزونانس سری یا ولتاژی:

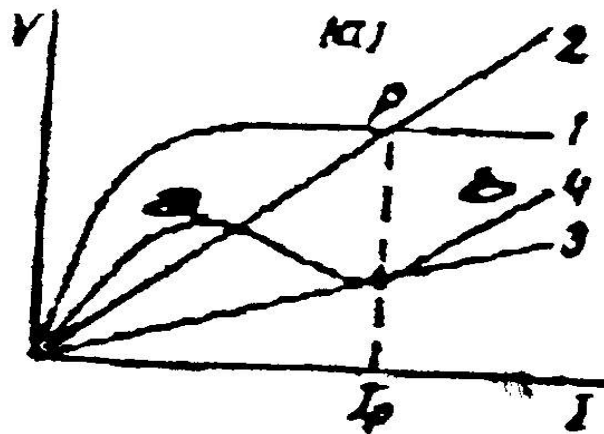
مدار RLC زیر را در نظر بگیرید که در آن کاپاسیتانس و مقاومت خطی بوده و اندوکتانس غیر خطی (سلف با هسته آهن قابل اشباع) می باشد.



شکل (۱-۵) مدار RLC سری

مشخصه ولت آمپر سلف مذکور با توجه به اینکه می دانیم مقدار ولتاژ سلف تابعی از جریان آن می باشد یعنی  $V_L = F(I)$  بصورت منحنی یک در شکل (۲-۵) خواهد بود. مشخصه ولت - آمپر

خازن با توجه به رابطه  $V_C = I/C\omega$  بصورت یک خط راست یعنی منحنی ۲ و همچنین مشخصه ولت - آمپر مقاومت با توجه به رابطه  $V=RI$  نیز بصورت خط راست یعنی منحنی ۳ خواهد بود.

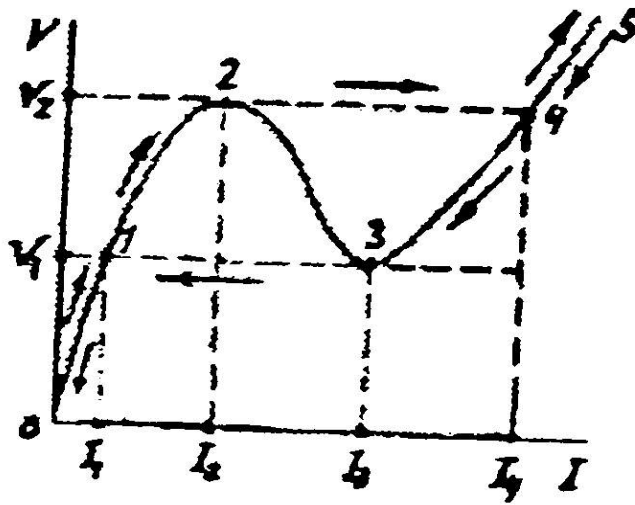


شکل (۲-۵): مشخصه ولت - آمپر المانهای مدار فرورزونانس سری

حال اگر مقادیر مختلف ولتاژ را به مدار فوق اعمال کنیم با در نظر داشتن اینکه مقدار ولتاژ روی سلف و خازن همواره  $180^\circ$  درجه با هم اختلاف فاز دارند منحنی شماره ۴ بدست می آید. لازم به ذکر است هر چه قدر مقدار مقاومت کوچکتر باشد در ازای جریان  $I_p$  که  $V_L$  و  $V_C$  از نظر قدر مطلق برابر هستند مقدار ولتاژ بین دو نقطه  $a$  و  $b$  کوچکتر بوه و به صفر نزدیکتر می شود در حوالی این نقطه که جریان هارمونیک اول با ولتاژ همفاز است، پدیده فرورزونانس روی می دهد.

پدیده فرورزونانس سری یا فرورزونانس ولتاژی را می توان با تغییر دادن مقدار ولتاژ منبع یا فرکانس آن و یا تغییر در ظرفیت خازن یا مشخصات سلف با هسته آهنی مدار، ایجاد نمود.

همانطور که گفته شد منحنی ۴ مشخصه ولت - آمپر مدار، فوق می‌باشد بار دیگر آنرا بصورت مجزا در شکل (۳-۵) نمایش داده و با افزایش تدریجی ولتاژ منبع، تغییرات جریان مدار را با توجه به منحنی مذکور بررسی می‌کنیم.



شکل (۳-۵): مشخصه ولت-آمپر مدار  $RLC$  سری

با افزایش ولتاژ منبع در صفر تا  $V_1$  و از  $V_1$  تا  $V_2$  مقادیر  $I_1$  و  $I_2$  از روی منحنی بدست می‌آید حال اگر مقدار ولتاژ منبع را بار اضافه کنیم جریان از نقطه ۲ به نقطه ۴ جهش کرده دوباره مقدار افزایش آن از نقطه ۴ به نقطه ۵ از روی منحنی ادامه می‌یابد.

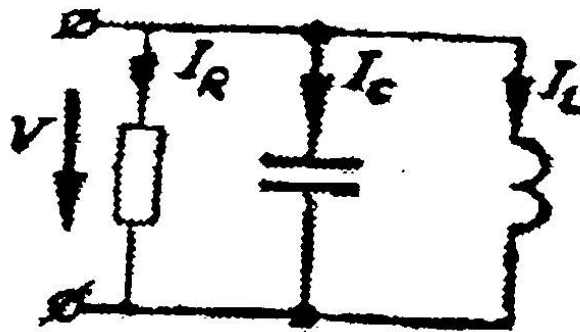
حال اگر ولتاژ را کاهش دهیم جریان از نقطه ۵ به ۴ و از آنجا به نقطه ۳ حرکت کرده و با کاهش بیشتر جریان از نقطه ۳ جهش کرده و روی نقطه ۱ قرار گرفته به طرف صفر حرکت می‌کند. همانطور که دیده می‌شود با افزایش تدریجی ولتاژ منبع به  $V_2$  جریان از  $I_2$  به  $I_4$  جهش کرده و

همزمان با آن اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ تغییر می‌کند بطوری که در نقطه ۲ جریان نسبت به ولتاژ عقب‌تر است یعنی  $V_L > V_C$  ولی در نقطه ۴ جریان از ولتاژ جلوتر است یعنی  $V_C > V_L$  می‌باشد. هنگام کاهش ولتاژ تا  $V_1$  نیز این جهش از  $I_1$  به  $I_3$  روی داده و تغییر فاز را خواهیم داشت.

این تغییرات ناگهانی جریان نسبت به تغییرات جزئی ولتاژ ورودی را عمل سوئیچینگ<sup>۱</sup> در مدار فرورزونانس سری می‌گویند.

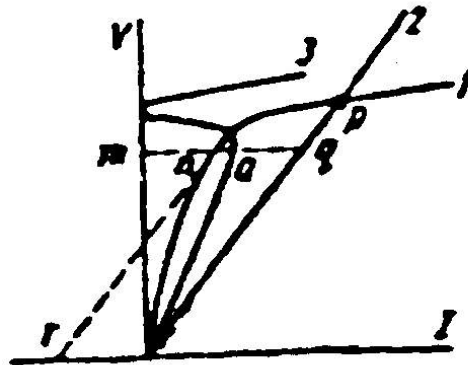
### ۵-۳-۲- فرورزونانس موازی یا فرورزونانس جریانی:

مدار RLC موازی زیر را در نظر می‌گیریم:



شکل (۵-۴): مدار RLC موازی

مطابق آنچه در بخش قبلی گفته شد مشخصه ولت - آمپر سلف و خازن به ترتیب با منحنی ۱ و خط ۲ نشان داده شده است. شکل (۵-۵).

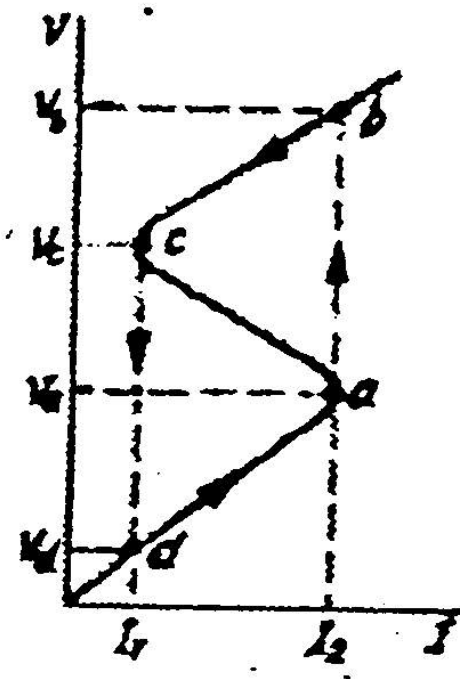


شکل (5-5): مشخصه ولت - آمپر المانهای مدار فرورزونانس موازی

منحنی شماره ۳ مقدار  $I$  یعنی حال جمع جبری  $I_c$  و  $I_L$  می باشد. پایین تر از نقطه  $P$  جریان  $I_c$  بزرگتر  $I_L$  و بالاتر از نقطه  $P$  جریان  $I_L$  بزرگتر از  $I_c$  می باشد. در نقطه  $P$  که هارمونیک اول جریان راکتیو  $I_L$  برابر  $I_c$  است فرورزونانس موازی یا (جریانی) روی می دهد. در این حالت یعنی نقطه  $C$  در شکل (5-6) مجموع جریان صفر نمی باشد بلکه برابر هارمونیک اول مؤلفه اهمی جریان  $I_L$  می باشد.

اگر مدار RLC فوق را به یک منبع جریان وصل کرده و مقدار جریان را به تدریج از صفر افزایش دهیم در  $I_2$  مقدار ولتاژ ورودی مدار از  $V_a$  به  $V_b$  جهش می کند. همچنین اگر مقدار جریان را به تدریج کاهش دهیم در  $I_1$  ولتاژ از مقدار  $V_c$  به  $V_d$  افت می کند. این تغییرات ناگهانی ولتاژ را عمل سوئیچینگ در مدار فرورزونانس موازی گویند.





شکل (5-7): مشخصه ولت - آمپر مدار فرورزونانس موازی

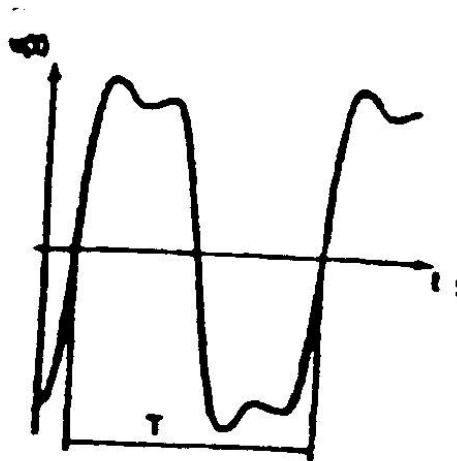
#### 5-4- طبقه‌بندی مدل‌های فرورزونانس:

با تجربه‌ای که از ظاهر شدن شکل موجهای مختلف در سیستم قدرت و همچنین از آزمایش‌های مختلف روی مدل‌های ساده شده سیستم بدست آمده و شبیه سازی عددی، قادریم حالت‌های فرورزونانس را به چهار حالت مختلف تقسیم کنیم این چهار حالت مربوط به حالت پایدار است یعنی وقتی که یک حالت گذرا تمام شده است زیرا برای مدار فرورزونانسی تفاوتی بین حالت‌های گذرای عادی و حالت گذرای فرورزونانس وجود ندارد به هر حال باید پذیرفت که حالت فرورزونانس گذرا برای سیستم خطری ایجاد نمی‌کند.

این چهار حالت عبارتند از:

0-4-1- مدل پایه<sup>۱</sup>

در این حالت ولتاژ و جریان پریودیک می‌باشد و پریود آنها یعنی  $T$  با پریود سیستم برابر است.

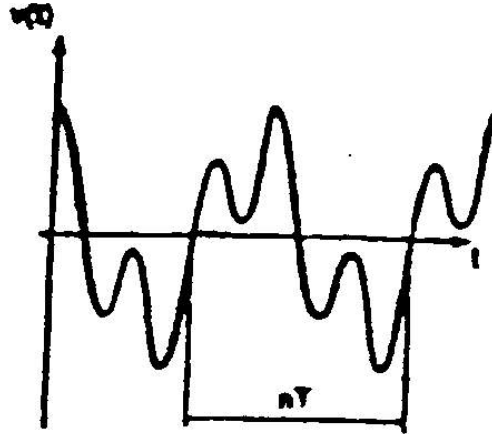


شکل (0-4): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد پایه

0-4-2- مدل زیر هارمونیک<sup>۲</sup>

در این حالت جریان و ولتاژ با پریودی نوسان می‌کنند که ضریبی از پریود منبع است. این حالت به زیر هارمونیک  $n$  ام یا هارمونیک  $\frac{1}{n}$  ام معروف است. حالت فرورزونانس زیر هارمونیک از مرتبه فرد است.

- 1- Fundamental Mode
- 2-Subharmonic Mode

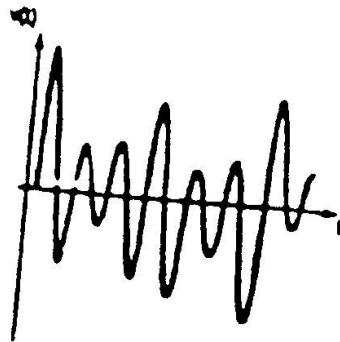


شکل (۸-۵): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد زیر هارمونیک

۵-۴-۳- مدل شبه پریودیک:

این حالت پریودیک محض نبوده ولی آشفتگی‌ها و نوسانات خود دارای پریود خاصی

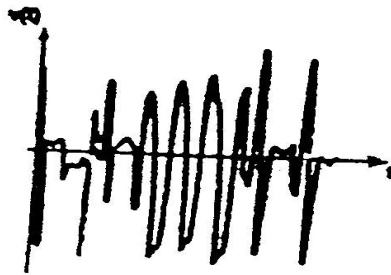
می‌باشند شکل (۹-۵) این حالت را نشان می‌دهد.



شکل (۹-۵): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد شبه پریودیک

### 0-0-0- مدل آشوب گونه: ۱

در این نوع فرورزونانس نوسانات کاملا اتفاقی و غیر پریودیک می باشند. شکل (0-10) این حالت را نشان می دهد.



شکل (0-10): تغییرات ولتاژ نسبت به زمان در مد آشوب گونه

### 0-0- شناسایی فرورزونانس:

بروز فرورزونانس معمولا با اثرات و علائمی به شرح زیر همراه است:

- اضافه ولتاژهای با دامنه زیاد و دائمی بصورت فاز به فاز یا فاز به زمین.
- اضافه جریانهای با دامنه زیاد و دائمی.
- اعوجاجهای با دامنه زیاد و دائمی در شکل موج ولتاژ و جریان.
- جابجایی ولتاژ نقطه صفر.

- افزایش دمای ترانسفورماتور (در حالت بی باری).
- افزایش پیوسته بلندی نویز ترانسفورماتورها و راکتورها.
- وارد شدن صدمات به تجهیزات الکتریکی از قبیل بانکهای خازنی و ترانسهای ولتاژ خازنی (CVT) به دلیل افزایش اثر حرارتی و یا شکست عایقی.
- تریپ بی موقع تجهیزات حفاظتی.

البته بعضی از این علائم مختص پدیده فرورزنانس نیست بطور مثال جابجایی نقطه صفر در شبکه‌هایی که نقطه صفر آنها زمین نشده است می‌تواند به دلیل وقوع اتصال فاز به زمین روی دهد. تشخیص اولیه فرورزنانس توسط مقایسه هر نوع منحنی ثبت شده از حادثه با شکل موجهای نوعی<sup>۱</sup> فرورزنانس که در بالا معرفی شده‌اند، بسیار ساده گردیده است اما وقتی با مشکل مواجه می‌گردیم که هیچ گونه ثباتی وجود نداشته باشد یا اینکه تفسیرهای مختلفی از اثرات و علائم موجود وجود داشته باشد.

در این صورت ابتدا باید اقدام به تجزیه و تحلیل ترکیب شبکه با در نظر گرفتن اثرات موجود و همچنین بررسی حوادث قبل از آن، از قبیل برقدار کردن ترانسفورماتور یا برگشت بار که می‌تواند موجب بروز پدیده فرورزنانس گردند، نمود. قدم بعدی این است که تعیین کنم آیا سه شرط لازم (نه کافی) برای بروز پدیده فرورزنانس وجود داشته است یا خیر.

این سه شرط عبارتند از:

۵-۱- حضور همزمان خازن با راکتور غیر خطی در سیستم.

۵-۵-۲- وجود حداقل یک نقطه از سیستم که دارای ولتاژ ثابت نباشد.

۵-۵-۳- وجود اجزاء سیستم با بار کم مانند ترانسفورماتور یا ترانسفورماتور ولتاژ بدون بار.

در صورتی که هر کدام از این سه شرط برقرار نباشد احتمال بروز پدیده فرورزنانس بسیار ضعیف است در غیر این صورت باید تحقیقات گسترده‌ای بعمل آورد.

همچنین می‌توان بوسیله مقایسه وضعیت موجود با مثالهای نوعی از حالت‌های سیستم که شرایط آنها جهت وقوع فرورزنانس مطلوب می‌باشد، ترکیب‌هایی از شبکه را که در آنها احتمال وقوع پدیده فرورزنانس وجود دارد شناسایی کرد.

#### ۵-۶- جمع‌آوری اطلاعات شبکه و پست جهت شبیه‌سازی و بررسی حادثه پست فیروز بهرام:

در این قسمت اطلاعات خطوط ورودی پست فیروز بهرام، مشخصات ترانس T4 ترانس زمین و مشخصات برقگیرهای این پست آورده شده است.

در جدول ۵-۱ مشخصات کامل خطوط ورودی پست فیروز بهرام که شامل طول خط، تعداد مدار، تعداد هادی‌های و سایر مشخصات خط است ذکر شده است.

جدول (۵-۱): مشخصات خطوط ورودی پست فیروز بهرام

ردیف	نام خط	کد خط	طول (کیلومتر)	تعداد	تعداد برجها	نام هادی	نام سیم محافظ

		مدار	مسیر	مدار	مسیر	مدار	مسیر			
7N08	CURLEW	۱۵	۱۱۸	۳	۱	۴۶	۴۶	BH۹۲۰	رودشور - فیروز بهرام ۱	۱
7N08	CURLEW	۱۵	۱۱۶	۳	۱	۴۶	۴۶	BH۹۲۱	رودشور - فیروز بهرام ۲	۲

در جدول (۲-۵) مقادیر امپدانسهای توالی صفر و مثبت خط رودشور - فیروز بهرام آمده است.

جدول (۲-۵): مقادیر امپدانسهای خط رودشور - فیروز بهرام

امپدانس توالی مثبت ( $\Omega$ )	امپدانس توالی صفر ( $\Omega$ )
$Z_{+} = .944 + 13/648$	$Z_0 = 7/68 + 42/208$

در جدول (۳-۵) مشخصات ترانسفورماتور  $T_4$  پست مذکور که شامل سطح ولتاژ ترانسفورماتور، ظرفیت، نوع اتصال سیم پیچها، نوع سیستم خنک کنندگی ترانسفورماتور و درصد امپدانس ولتاژ برای سیم پیچهای مختلف می باشد، ذکر شده است.

جدول (۳-۵): مشخصات ترانسفورماتور  $T_4$  پست فیروز بهرام

درصد امپدانس ولتاژ (در تپ نامی)			نوع سیستم خنک کنندگی	نوع اتصال سیم پیچها			ظرفیت (MVA)	سطح ولتاژ (KV)
LV-TV	HV-TV	HV-LV		LV-TV	HV-TV	HV-LV		
۶۶,۲۴	۸۴,۲۱	۱۲,۰۴	ONAN/ONAF1/ONAF2	Ynd11	Ynd11	Yan0	۱۶۶,۶۶۷	۴۰۰/۲۳۰/۱۳,۸

در جدول ۴-۵ مشخصات ترانسفورماتور زمین پست فیروز بهرام و در جدول ۵-۵ مشخصات دکلهای مورد استفاده در خط رودشور - فیروز بهرام ذکر شده است.

جدول (۴-۵): مشخصات ترانسفورماتور زمین پست فیروز بهرام

ظرفیت ترانس کمکی (KVA)	امپدانس توالی صفر ( $\Omega$ )	امپدانس ولتاژ (%)	نوع اتصال	سطح ولتاژ (V)	ظرفیت (KVA)
۳۳	۹/۷۷	۴	ZNYN11	۱۳۸۰۰/۳۸۰/۲۲۰	۵۰۰

جدول (۵-۵): مشخصات دکلهای مورد استفاده در خط رودشور - فیروز بهرام

$D_{horizontal}(m)$	$H_{mid}(m)$	$H_{tower}(m)$
۱۰/۴۵	۴۰	۴۴/۵

مشخصات فنی برقیهای سمت اولیه (۴۰۰kv) ترانسفورماتور:

برقگیر اکسید روی با محفظه پرسلین نوع EXLIM Q (۱۰KA) ساخت شرکت ABB:

ماکزیمم ولتاژ سیستم (Um) ۴۲۰Kv

ولتاژ نامی (Ur) ۳۶۰Kv

ماکزیمم ولتاژ کار دائم:

بر حسب استاندارد IEC(Uc) ۲۶۷KVrms

بر حسب استاندارد ANSI/IEEE (MCOV) ۲۹۱KVrms

ظرفیت TOV:

۱ثانیه ۴۱۷KVrms

۱۰ثانیه ۳۹۶KVrms



۱۰KA	جریان تخلیه نامی (IEC)
	جریان تخلیه با طول مدت آن:
۱۰۰KA	جریان بالا $\mu s$ (۴/۱۰)
۷۰۰A	جریان پایین $\mu s$ ۲۴۰۰
۹۰۰A	جریان پایین $\mu s$ ۲۰۰۰
۷,۵Kj/kv(Ur)	ظرفیت انرژی
Class3	کلاس تخلیه خط (IEC)
۵۰KA	جریان اتصال کوتاه
۶۳KA	ظرفیت شیر اطمینان
	<b>استقامت عایقی خارجی:</b>
۱۸۰۰KV	$\mu s$ (۱,۲/۵۰) خشک
۸۱۸KV	۵۰ هرتز مرطوب (۶۰s)
۸۰۲KV	۶۰ هرتز مرطوب (۱۰s)
۱۳۷۴KV	$\mu s$ (۲۵۰/۲۵۰۰) مرطوب
۱۰۷۰۰Mm	فاصله خزشی
۳۷۷۵Mm	ارتفاع
۱۸۰۰۰Nm	مقاومت مکانیکی (DIN48113)

۱۳۷۴Kg

جرم

تعداد ستون

شرایط سرویس:

+۴۵°C تا -۵۰°C

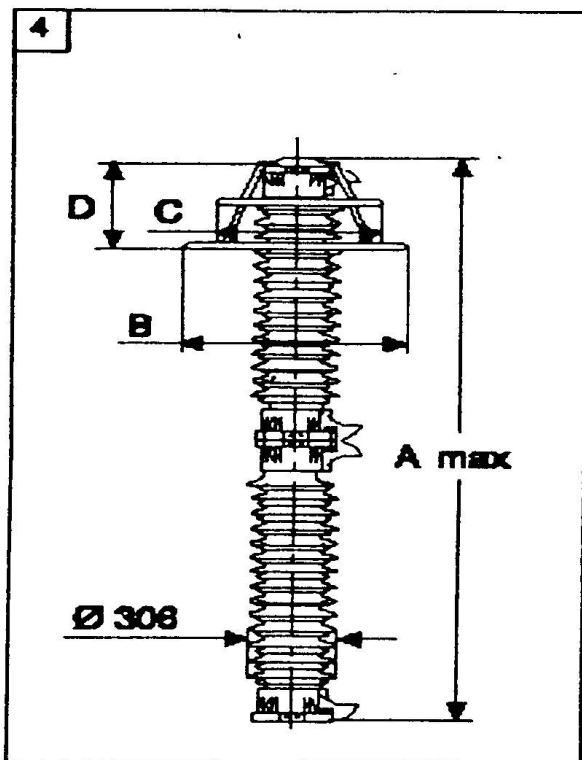
درجه حرارت محیط

۱۰۰m

ماکزیمم ارتفاع طراحی

۱۵-۶۲HZ

فرکانس



$A_{max}=3775$  mm  
 $B=1600$  mm  
 $C=1000$  mm  
 $D=650$  mm

مشخصات فنی برقگیرهای سمت اولیه (۲۳۰kV) ترانسفورماتور:

برقگیر اکسید روی با محفظه پرسلین نوع EXLIM Q (۱۰KA) ساخت شرکت ABB:

۲۴۵Kv ماکزیمم ولتاژ سیستم (Um)

۱۹۲Kv ولتاژ نامی (Ur)

ماکزیمم ولتاژ کار دائم:

۱۵۴KVmrms بر حسب استاندارد IEC(Uc)

۱۵۴KVrms بر حسب استاندارد ANSI/IEEE (MCOV)

ظرفیت TOV:

۲۲۲KVrms ۱ ثانیه

۲۱۱KVrms ۱۰ ثانیه

۱۰KA جریان تخلیه نامی (IEC)

جریان تخلیه با طول مدت آن:

۱۰۰KA جریان بالا  $(\mu s)$  (۴/۱۰)

۷۰۰A جریان پایین  $\mu s$  ۲۴۰۰

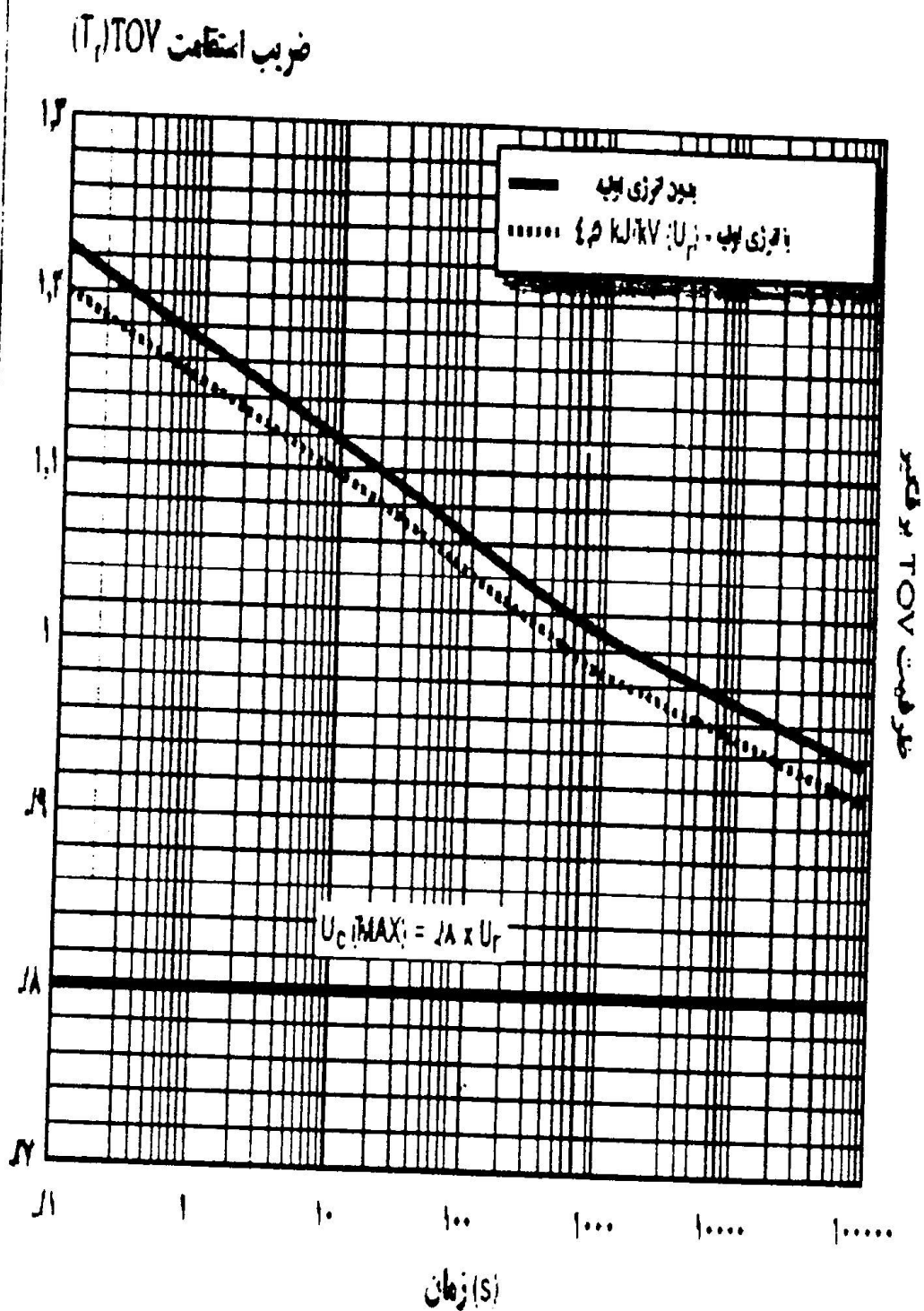
۹۰۰A جریان پایین  $\mu s$  ۲۰۰۰

۷,۵Kj/kv(Ur) ظرفیت انرژی

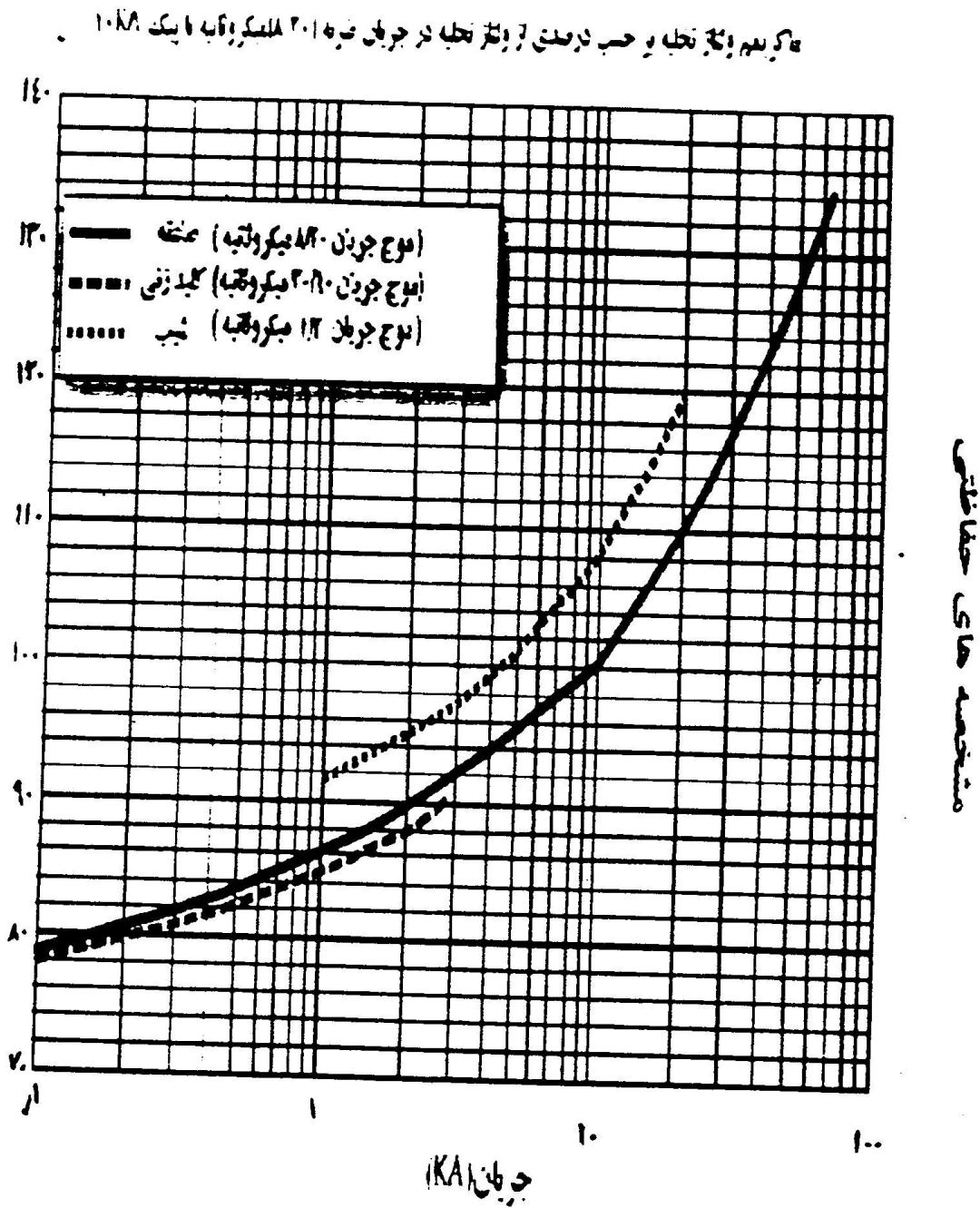
Class3 کلاس تخلیه خط (IEC)

۵۰KA	جریان اتصال کوتاه
۶۳KA	ظرفیت شیر اطمینان
	<b>استقامت عایقی خارجی:</b>
۱۱۷۲KV	$(۱,۲/۵۰) \mu s$ خشک
۵۵۶KV	۵۰ هرتز مرطوب (۶۰s)
۵۴۶KV	۶۰ هرتز مرطوب (۱۰s)
۹۲۴KV	$(۲۵۰/۲۵۰۰) \mu s$ مرطوب
۶۵۷۰Mm	فاصله خزشی
۲۵۸۵Mm	ارتفاع
۱۸۰۰۰Nm	مقاومت مکانیکی (DIN48113)
۲۳۵Kg	جرم

همچنین مشخصه‌های زمان TOV و مشخصه‌های حفاظتی برقگیر در اشکال ۱۱-۵ و ۱۲-۵ آورده شده‌اند.



شکل (5-11): مشخصه (زمان -  $TOV$ ) برگیر آسیب دیده پست فیروز بهرام



شکل (۱۳-۵): مشخصه های حفاظتی (V-I) برآیند آسیب دیده پست فیروز بهرام

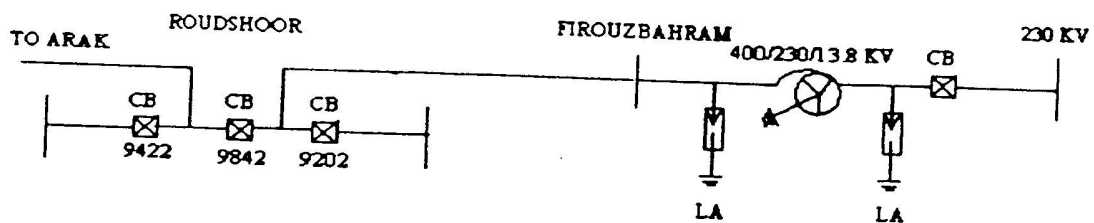
۷-۵- بررسی حادثه مورخ ۸۱/۲/۲۸ پست فیروز بهرام:

طبق برنامه قبلی برای انجام تعمیرات، خط ۴۰۰ کیلوولت رودشور - فیروز بهرام به شماره BH920 و ترانسفورماتور ۴۰۰/۲۳۰ کیلوولت T<sub>4</sub> در پست فیروز بهرام که از خط فوق تغذیه می‌شود از مدار خارج و پس از انجام سرویسهای لازم آماده برقرار شدن می‌گردد. با هماهنگی مرکز کنترل ابتدا به بریکر ۹۲۰۲ در پست رودشور فرمان وصل داده شده که بلافاصله با عملکرد حفاظت نامتعادلی پلها قطع می‌گردد. مجدداً فرمان وصل به بریکر میانی ۹۸۴۲ در پست رودشور داده می‌شود که همزمان با آن برقیگیر فاز C سمت ۲۳۰ کیلوولت ترانس T<sub>4</sub> در پست فیروز بهرام منفجر و موجب عملکرد حفاظتهای باسبار و ترانس T<sub>4</sub> می‌گردد.

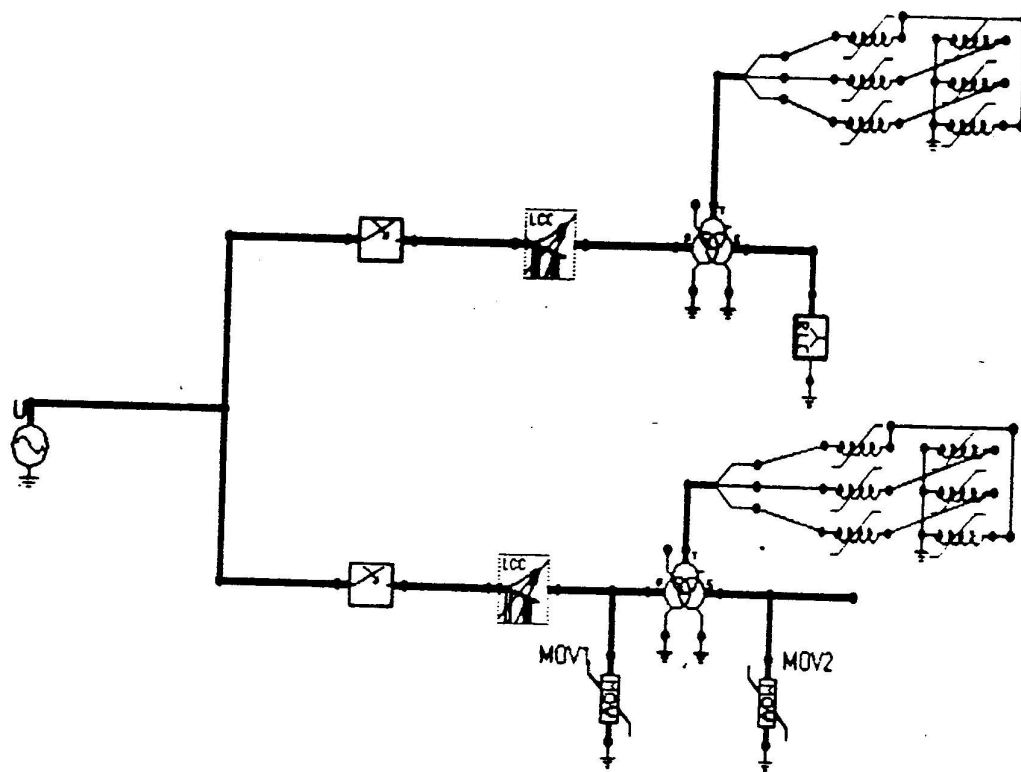
#### ۵-۷-۱- مدلسازی و مطالعه حادثه با استفاده از نرم افزار ATP:

چنانچه شماتیک مدار و خطوط ارتباطی پست را رسم کنیم خواهیم داشت:

شکل (۵-۱۴): شماتیک پست فیروز بهرام و خطوط ارتباطی ۴۰۰ KV تغذیه کننده





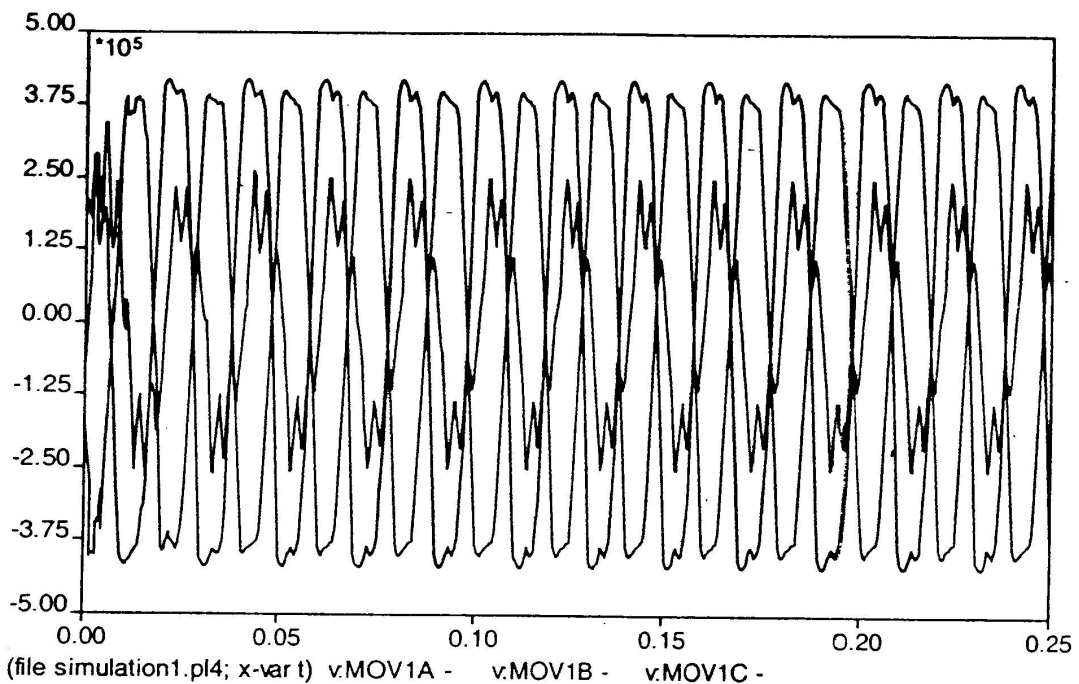


شکل (۱۴-۵): مدار معادل شبکه مورد نظر جهت شبیه سازی در محیط ATPDraw

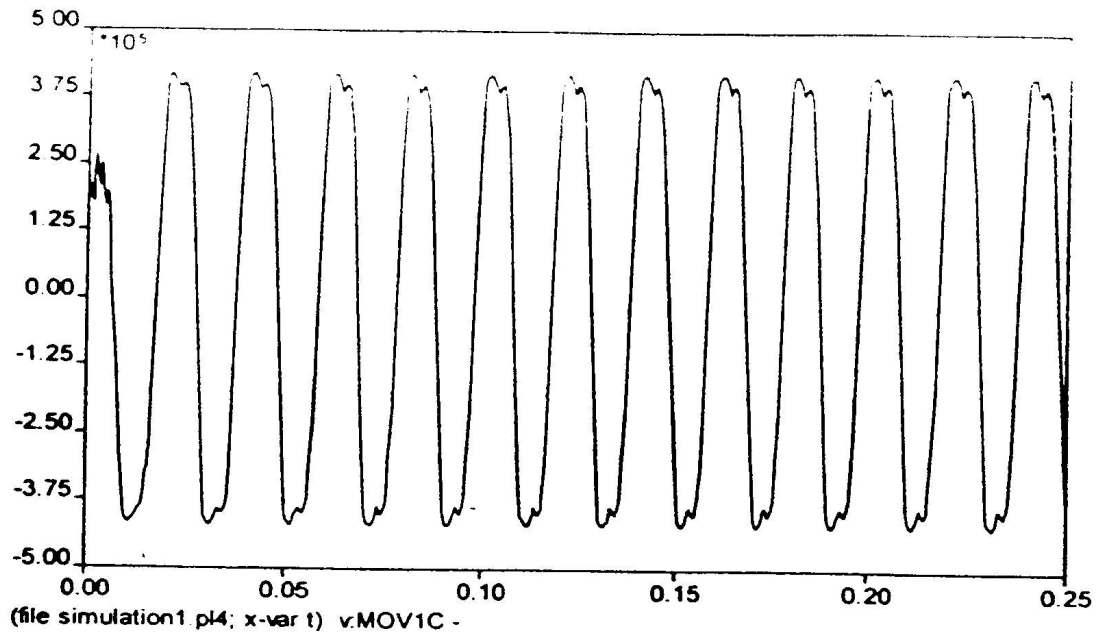
در این شبیه سازی از مدل گسترده خط غیر ترانسپوز و ترانسفورماتور سه فاز سه سیم پیچ قابل اشباع که با توجه به پارامترهای دقیق مدل گردیده اند، استفاده شده است. برای مدل دقیق برقی از برقیهای ۱۰KA نوع ABB، استفاده شده است. همچنین برای مدل دقیق هسته ترانس از برنامه کمکی SATURA استفاده شده است. حال با توجه به مدلینگ انجام شده به بررسی حادثه مورخ ۸۱/۲/۲۸ می پردازیم و در ابتدا فرض می کنیم که کلید ۲۳۰KV رودشور فیروز بهرام در پست رودشور هر دو باز و ترانس بی برق باشد. حال در این حالت فرمان وصل به

سه پل کلید ۹۲۰۲ در پست رودشور داده می‌شود که دو پل فاز R و S بسته، ولی پل فاز T موفق به وصل نمی‌شود. شکل (۵-۱۵) ولتاژ سه فاز سمت اولیه سیم پیچهای ترانس را در این حالت نشان می‌دهد. در این حالت خازن بین دو فاز برقدار و فاز بی برق و سلف ترانس تشکیل یک مدار فرورزونانس را می‌دهند. چنانچه مشاهده می‌گردد به دلیل وقوع پدیده فرورزونانس و به اشباع رفتن هسته فاز T ترانس، ولتاژ فاز به زمین T افزایش یافته و ولتاژ این فاز تا حدود ۳۹۰ کیلوولت افزایش یافته است.

شکل (۵-۱۶): ولتاژ فاز به زمین برآگیرهای سمت اولیه (۴۰۰KV) ترانسفورماتور

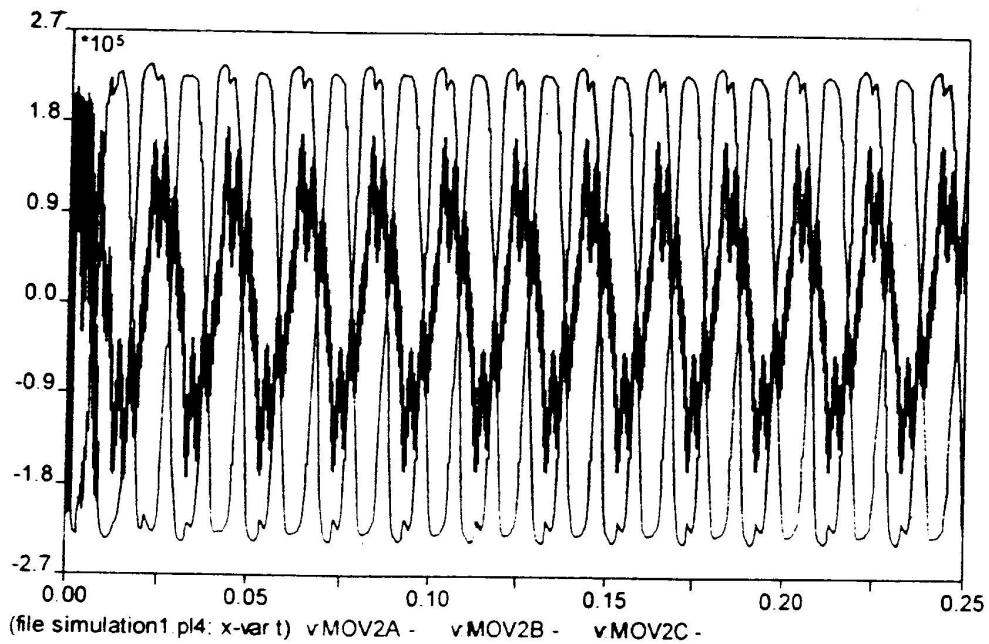


شکل (۵-۱۶) شکل موج ولتاژ برآگیر فاز T را نشان می‌دهد این شکل موج ولتاژ دقیقاً حالت فرورزونانس زیر هارمونیک را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۶): شکل موج ولتاژ برقی فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور

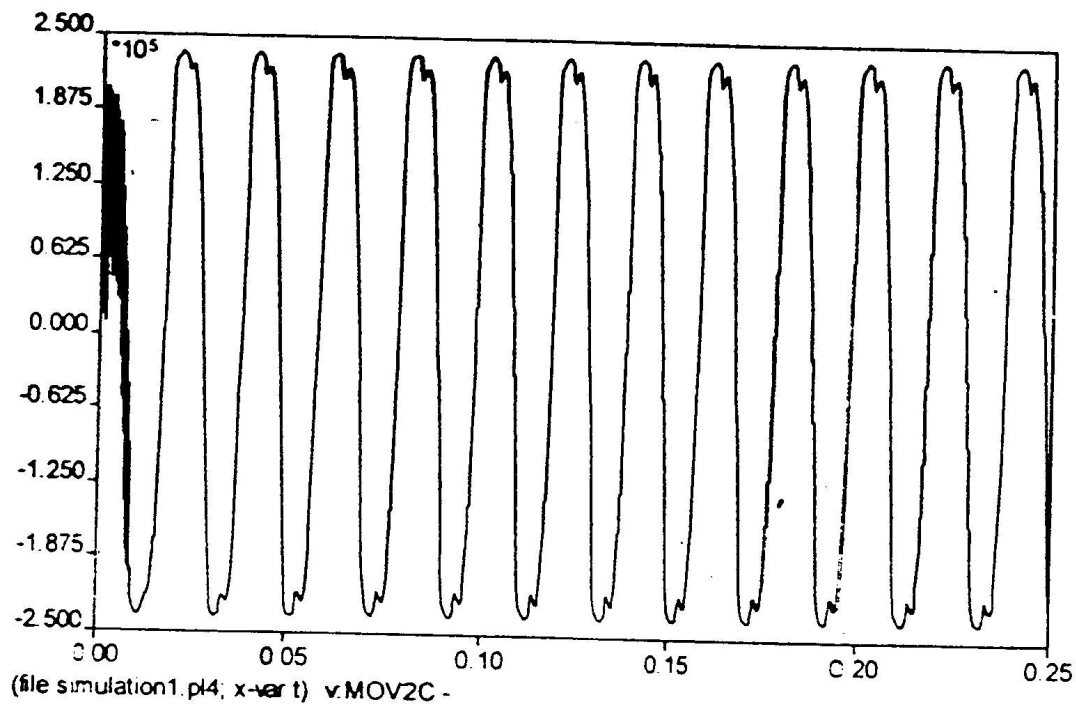
شکل (۵-۱۷) ولتاژ فاز به زمین سه فاز برقیهای سمت ثانویه (۲۳۰KV) ترانس را نشان می دهد.



شکل (۵-۱۷): ولتاژ فاز به زمین برقیهای سمت ثانویه (۲۳۰KV) ترانسفورماتور

همانطور که مشاهده می‌گردد ولتاژ فاز T در حدود ۲۳۷KV می‌باشد که بالاتر از مقدار نامی برقیگیر می‌باشد.

شکل (۱۸-۵) نیز ولتاژ فاز T ثانویه ترانس را نشان می‌دهد.



شکل (۱۸-۵): ولتاژ فاز T ثانویه ترانسفورماتور

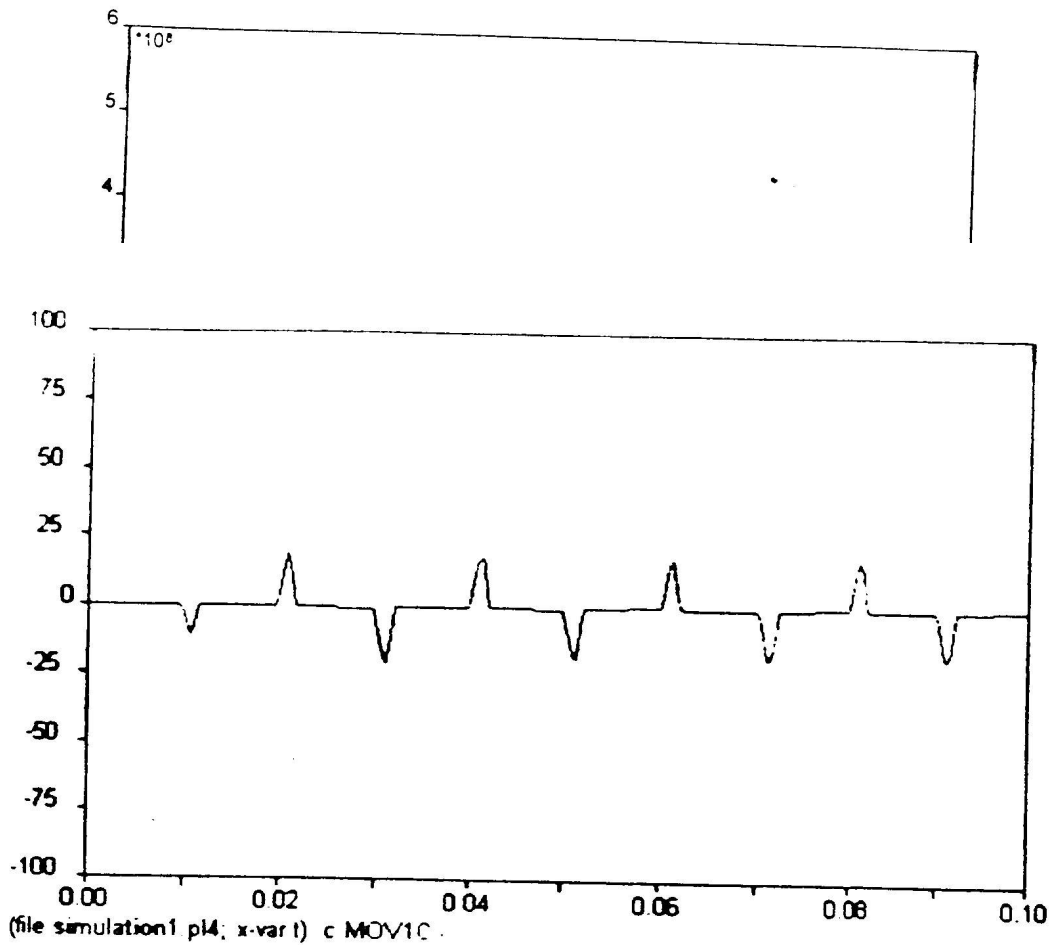
۵-۷-۱-۱- رفتار برقیگیرهای سمت اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در هنگام وقوع حادثه:

مطلب جالب و قابل توجه در هنگام وقوع حادثه رفتار برقیگیرهای سمت اولیه و ثانویه

ترانس می‌باشد که در برابر این اضافه ولتاژ بوجود آمده از خود نشان می‌دهند.

شکل (۱۹-۵) جریان عبوری از برقیگیر فاز T سمت اولیه ترانس را با توجه به اضافه ولتاژ

ایجاد شده نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۹): جریان عبوری از برقگیر فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور

مطابق نمودار در هنگام حادثه از این برقگیر جریانی در حدود ۱۵ آمپر می‌گذرد و طبق گزارشات موجود در هنگام وقوع حادثه مذکور برقگیر سمت اولیه ترانس تنها یک بار عملکرد داشته است و چون انرژی تخلیه شده توسط این برقگیر زیاد نبوده لذا دچار آسیب دیدگی نشده است. در شکل (۵-۲۰) و (۵-۲۱) نمودار توان و انرژی جذب شده توسط برقگیر نشان داده شده است.

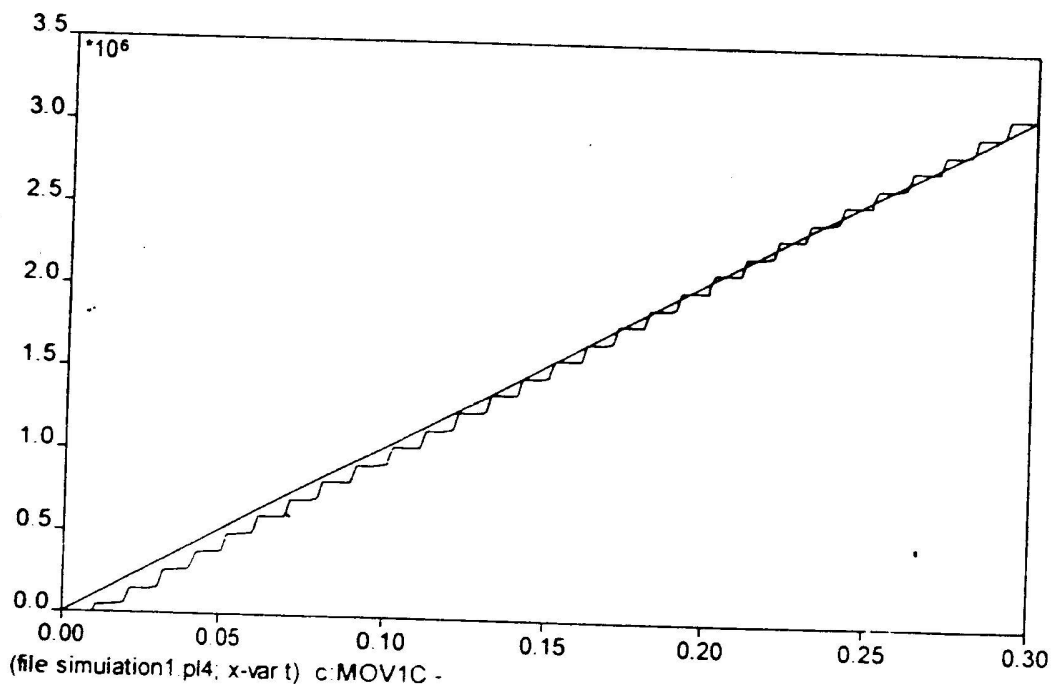
شکل (۵-۲۰): توان عبوری از برقگیر فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور

شکل (۵-۲۱): میزان انرژی جذب شده توسط برقگیر فاز T سمت اولیه ترانسفورماتور

ملاحظه می شود که انرژی جذب شده توسط برقگیر در مدت ۳۰۰ میلی ثانیه شبیه سازی رو به افزایش می باشد، ولی توان عبوری از برقگیر تقریباً ثابت است.

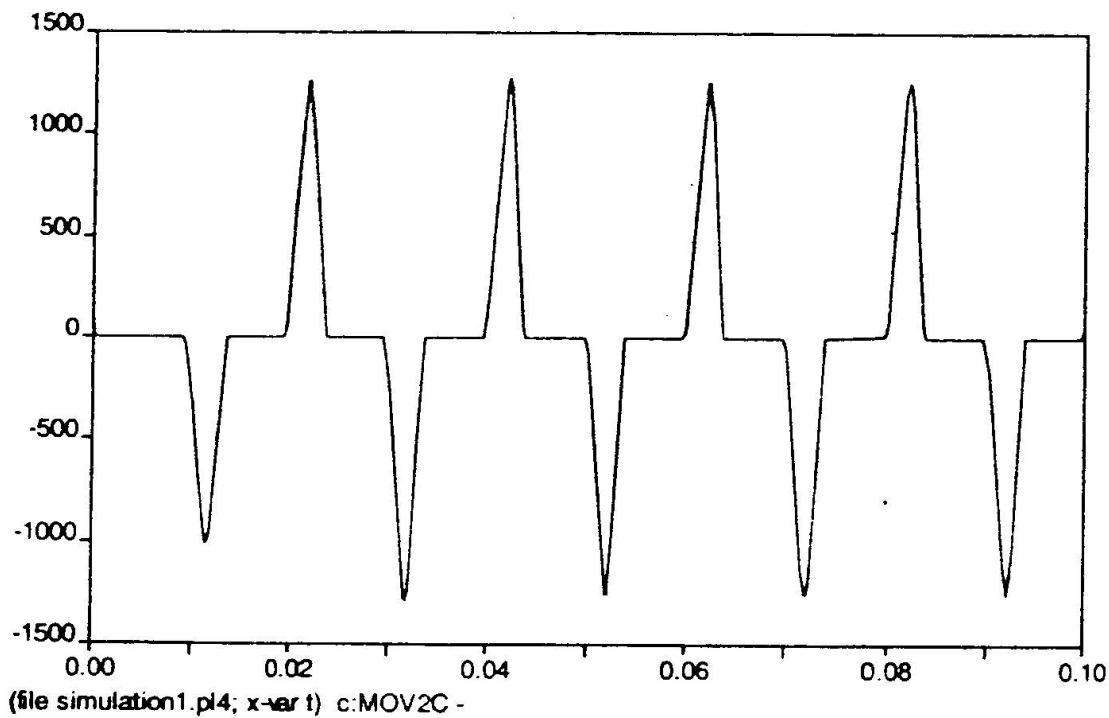
#### ۵-۷-۱-۲- رفتار برقگیر فاز T سمت KV ۲۳۰ ترانسفورماتور در هنگام وقوع حادثه:

در موقع برقدار شدن ترانسفورماتور در حالت نامتعادلی پلهای کلید ۹۲۰۲، پست رود شور به عنوان یک منبع سینوسی عمل نموده و ترانسفورماتور پست فیروز بهرام را از طریق خازن بین دو فاز برقدار



و فاز بی برق تغذیه می نماید و چون خود ترانس نیز به عنوان یک سلف غیر خطی عمل می کند لذا در این حالت شبکه ساختار یک مدار فرورزونانسی را پیدا می کند و در اثر اضافه ولتاژهای

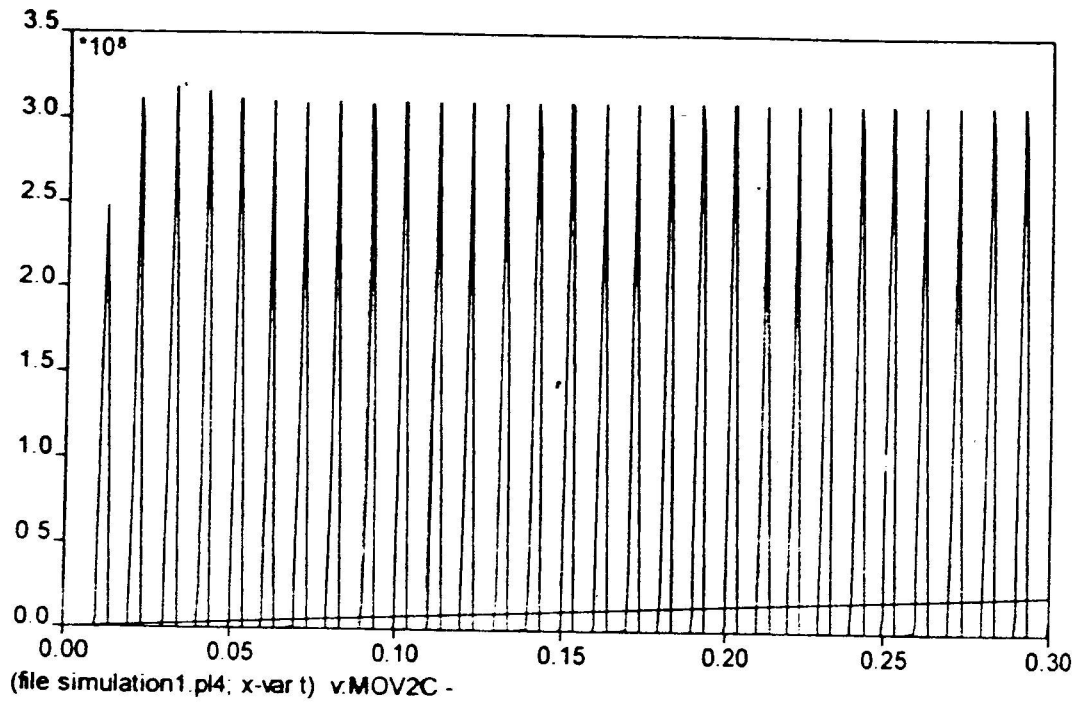
هارمونیکی ناشی از به اشباع رفتن ترانسفورماتور بر اثر پدیده فرورزونانس مطابق شکل (۵-۱۸) ولتاژ سمت ثانویه ترانس تا مقدار ۲۳۷KV بالا می‌رود و چون این ولتاژ بسیار بالاتر از ولتاژ نامی برقگیر می‌باشد لذا باعث تخلیه انرژی زیاد در برقگیر شده و نتیجتاً سبب انفجار این برقگیر می‌شود.



شکل (۵-۲۲) جریان عبوری فاز T سمت ثانویه ترانس را نشان می‌دهد. و چنانچه مشاهده می‌گردد برقگیر مذکور تعداد ۹ بار عملکرد را در مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه مورد مطالعه نشان می‌دهد، و طبق گزارشات حاصله در هنگام حادثه ۸ بار عملکرد برقگیر مذکور ثبت گردیده است.

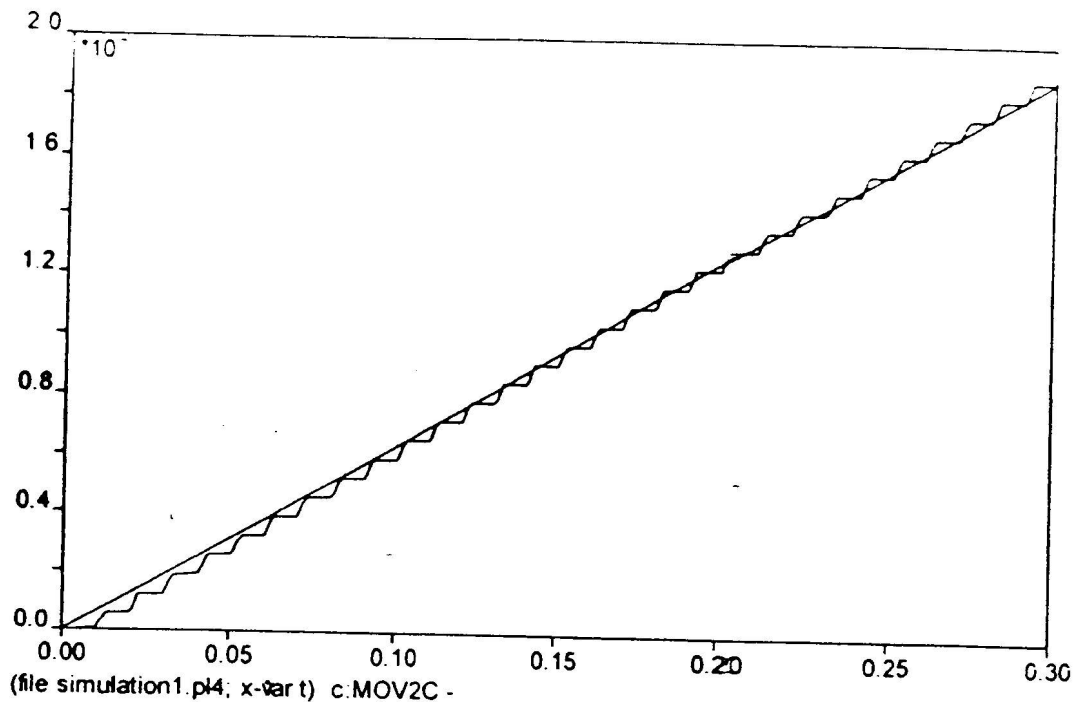
شکل (۵-۲۲): جریان عبوری از برقگیر فاز T سمت ثانویه ترانسفورماتور

در شکل (۲۳-۵) و (۲۴-۵) نمودار توان و انرژی جذب شده توسط برقگیر فاز TtT سمت ثانویه ترانس نشان داده شده است.



شکل (۲۳-۵): توان عبوری از برقگیر فاز T سمت ثانویه ترانسفورماتور





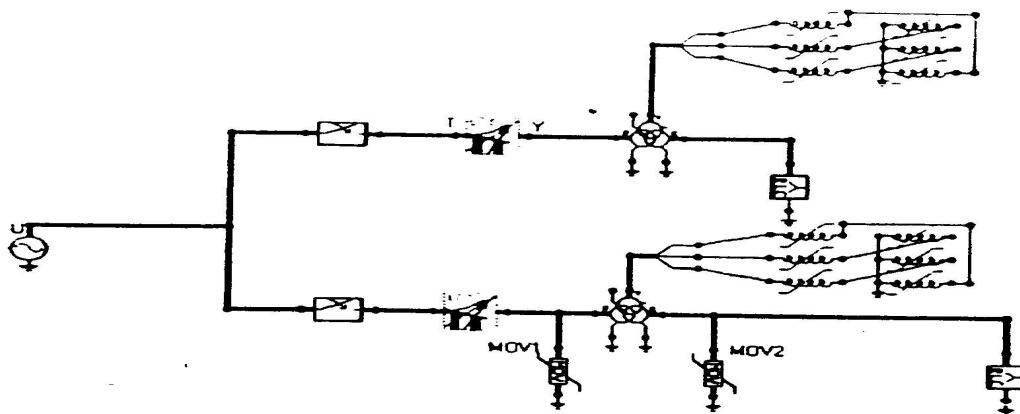
شکل (۵-۲۴): انرژی جذب شده توسط برقگیر فاز T سمت ثانویه ترانسفورماتور

همانطور که مشاهده می شود توان عبوری از برقگیر تقریباً ۳۱۲ مگاوات و انرژی جذب شده توسط آن، ۳۰۰ میلی ثانیه حادثه تقریباً به ۱۹ مگاژول می رسد که همین امر باعث ناپداری حرارتی در برقگیر شده، یعنی توان جذب شده توسط برقگیر به مراتب بیشتر از توان دفع شده توسط آن می شود ( $P > Q$ ) و باعث سوختن قرصهای اکسید روی موجود در برقگیر شده و پس از وصل بریکر میانی ۹۸۴۲ در پست رود شور، برقگیر سوخته توانایی استقامت در برابر ولتاژ کار عادی شبکه را نیز نداشته و نهایتاً منجر به انفجار این برقگیر می شود.

۵-۷-۱-۳- بررسی روشهایی جهت جلوگیری از وقوع پدیده فرورزونانس در پست فیروز بهرام

### الف- وجود بار در سمت ثانویه ترانسفورماتور

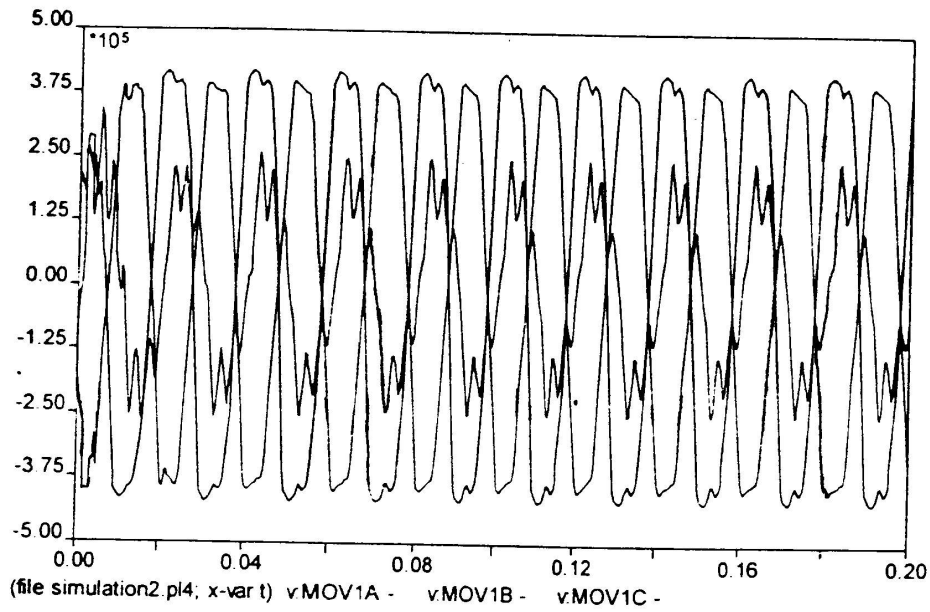
شکل شبکه مورد نظر در این حالت در محیط ATP Draw بصورت زیر می باشد.



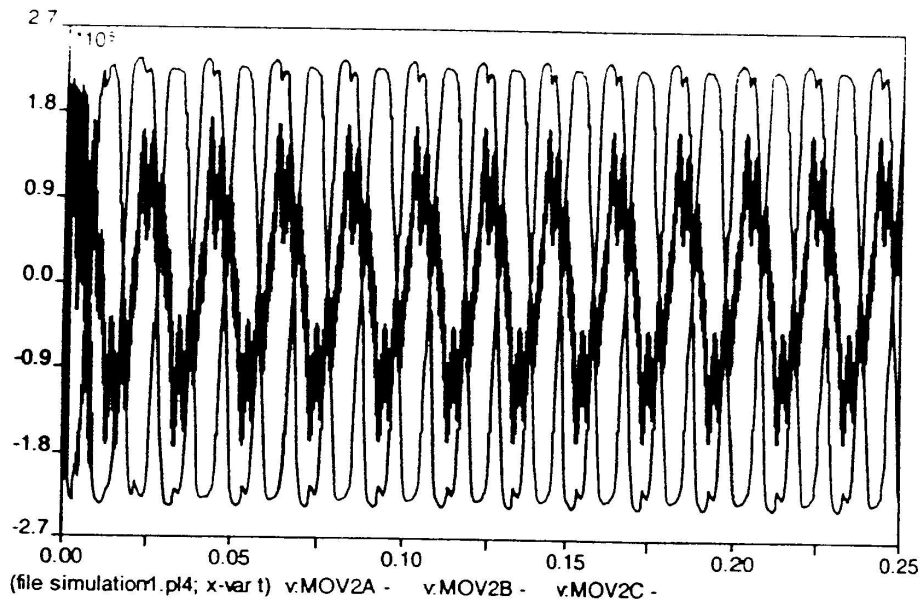
ملاحظه می شود که در این حالت ثانویه ترانس باز نبوده و به یکبار متصل است. اگر حادثه

مورد نظر را در این حالت بررسی کنیم. شکل موج ولتاژ برقگیرهای اولیه و ثانویه ترانس به صورت

زیر خواهد بود.



شکل (۲۵-۵): شکل موج ولتاژ دو سر برتگیرهای  $400\text{ KV}$  در حالت بارداری ترانسفورماتور

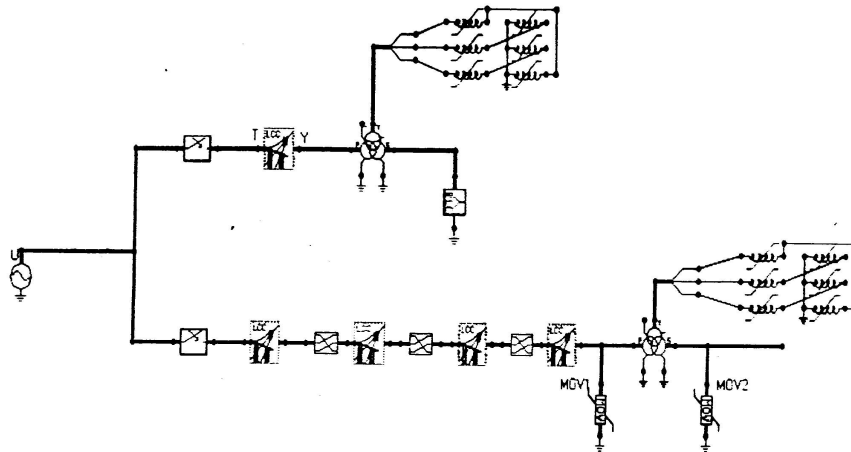


شکل (۲۶-۵): شکل موج ولتاژ دو سر برتگیرهای  $230\text{ KV}$  در حالت بارداری ترانسفورماتور

ملاحظه می شود که شکل موج و دامنه آن در حالت باردارای ترانسفورماتور هیچ تفاوتی با حالت بی باری ترانس ندارد، البته ممکن است در مدارات دیگر این روش جهت جلوگیری از وقوع فرورزونانس موثر باشد ولی در این شبکه خاص پاسخگو نیست.

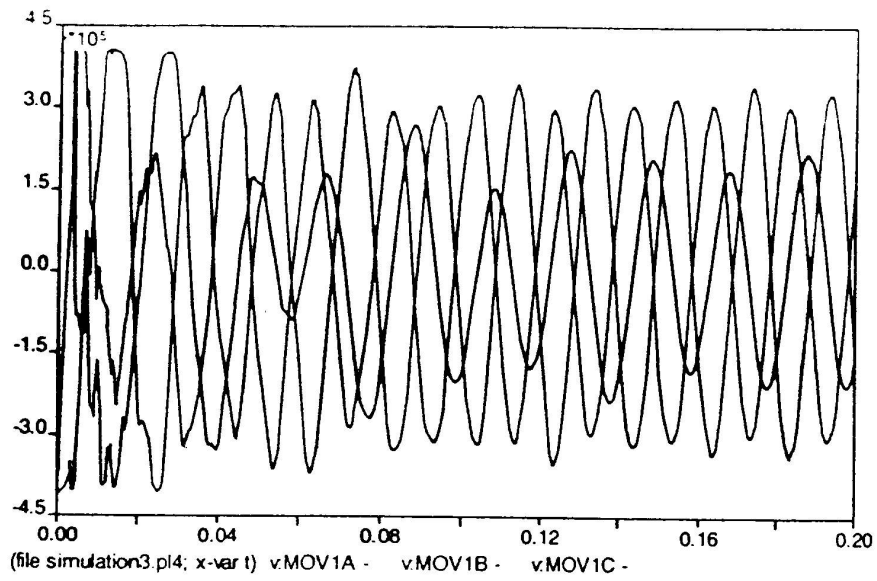
### ب- ترانسپوز کردن خط رودشور - فیروز بهرام

شبکه مورد بحث و نتایج حاصله در این حالت در محیط ATP Draw به صورت زیر می باشد.

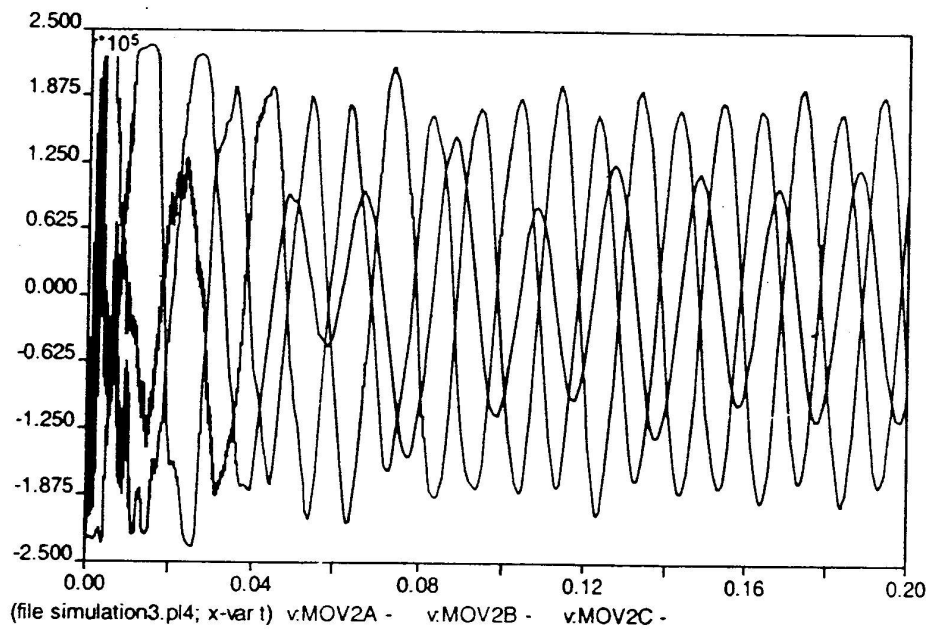


شکل (۲۷-۵): مدار مورد استفاده جهت شبیه سازی شبکه مورد نظر در حالت ترانسپوز کردن

خط رودشور - فیروز بهرام



شکل (۵-۲۸): شکل موج ولتاژ اولیه ترانس در حالت ترانسپوز کردن خط رودشور - فیروز بهرام



شکل (۵-۲۹): شکل موج ولتاژ ثانویه ترانس در حالت ترانسپوز کردن خط رودشور - فیروز بهرام

مطابق نتایج بدست آمده در حالت ترانسپوز کردن خط نیز شبکه در حالت فرورزونانس خارج نشده و شکل موج ولتاژ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور هارمونیکی می باشد. البته دامنه ولتاژ فاز T کمتر شده است ولی دامنه ولتاژ فازهای S , R بیشتر شده و احتمال عملکرد برقگیرهای فاز S , R و تخلیه انرژی بالا در آنها تحت اضافه ولتاژهای موقت فرورزونانسی می رود، در نتیجه استفاده از این روش نیز در این شبکه منطقی به نظر نمی رسد.