



انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران  
شاخه ی تهران



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
قطب علمی قدرت

## فرورزونانس در نیروگاههای برق بادی و اثر آن در تخریب برقگیرها

حسین کاظمی کارگر سید رسول حسینی

دانشکده برق – دانشگاه زنجان

[h\\_kazemi\\_ir@yahoo.com](mailto:h_kazemi_ir@yahoo.com)

تلفن-فاکس: ۸۸۰۹۸۴۸۵-۰۲۱

چکیده- عامل اصلی ایجاد فرورزونانس اشباع هسته مغناطیسی است. وقوع پدیده فرورزونانس در نیروگاه بادی بدلیل وجود کابل زمینی با خاصیت خازنی به همراه ترانسفورماتو با هسته اشباع پذیر و همچنین وجود حفاظت‌های تکفاز مانند فیوز میباشد. در این مقاله ضمن توصیف پدیده فرورزونانس به بررسی اثر طول کابل در وقوع پدیده پرداخته و با توجه به تحلیل مدار فرورزونانس به ارائه راهکاری برای طراحی مناسب جهت حفاظت نیروگاه بادی در هنگام بروز فرورزونانس در اثر قطع تکفاز یا دوفاز، پرداخته شده است. نتایج بدست آمده بر اساس پارامترهای نیروگاه بادی منجیل بوده و شبیه سازی در محیط *Matlab* می باشد.

کلید واژه: اشباع ترانسفورماتور، حفاظت نیروگاه بادی، عملکرد نامتقارن فیوز، فرورزونانس

### ۱- مقدمه

پیشگیری از خطر بروز پدیده باید در هنگام طراحی شبکه احتمال بروز چنین پدیده ای مدنظر قرار گرفته و تمهیدات لازم برای جلوگیری از بروز پدیده اندیشیده شود.

با شبیه سازی مختلف سیستم هایی که براساس مشاهدات تجربی احتمال وقوع پدیده فرورزونانس در آنها بالا است و با ظاهر شدن شکل موج های جریان و ولتاژ مختلف، می توان فرورزونانس را به چهار نوع نوسانات تقسیم بندی کرد [۲-۴]

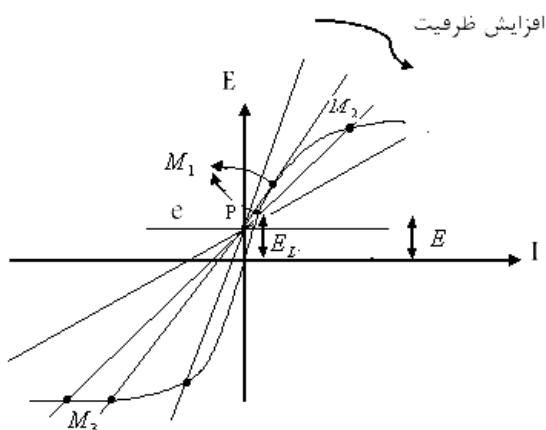
الف) در مد پایه نوسانات با فرکانس تحریک رخ می دهند. سیگنال های ولتاژ و جریان می توانند شامل هارمونیک های با فرکانس ( $nf$ ) باشند ( $f$  فرکانس شبکه و  $n$  عدد صحیح است).

ب) در مد زیرهارمونیک سیگنالهای ولتاژ و جریان می توانند شامل هارمونیک های با فرکانس  $\frac{f_0}{n}$  باشند.

ج) در مد شبه پریودیک تغییرات سیگنال های ولتاژ و

امروزه استفاده از انرژی باد و مزارع توربین های بادی به عنوان قسمتی از سیستم های الکتریکی و منابع تولید توان در شبکه در نظر گرفته می شوند. یکی از موارد مهم که باید در رابطه با این سیستم ها مد نظر قرار گیرد مربوط به حفاظت این نیروگاه در برابر اضافه ولتاژهای فرورزونانس است. در شبکه نیروگاه بادی به علت استفاده از کابل های زمینی طولانی بین توربین و شبکه توزیع و همچنین استفاده از حفاظت های فیوزی با عملکرد تکفاز، احتمال بروز پدیده فرورزونانس در اثر عملکرد نامتقارن فیوز بسیار بالا است. در اثر وقوع پدیده فرورزونانس دامنه ولتاژ یا جریان و یا هر دو به اندازه ای افزایش می یابد که می تواند خسارات جبران ناپذیری به شبکه وارد کرده و باعث سوختن تجهیزات شود [۱]. همچنین به علت تغییر شکل جریان و ولتاژ و وجود هارمونیکها و زیر هارمونیکها گهگاه عملکرد درست و نادرست رله های حفاظتی را نیز در پی دارد. برای

$M_2$  نقاط کار پایدار و نقطه  $M_2$ ، نقطه کار ناپایدار است. شرایط کار مدار در نقطه کار  $M_2$  بوجود آورنده پذیرنده فرورزونانس است.



شکل ۲: تغییرات نقطه کار در اثر تغییر ظرفیت

## ۲-۱- پیامدهای فرورزونانس

وقوع فرورزونانس در سیستم قدرت ممکن است با پیامدهای زیر همراه باشد:

- اضافه ولتاژی دائمی فاز به فاز یا فاز به زمین
- اضافه جریان های دائمی
- اعوجاج دائمی شکل موج های جریان و ولتاژ
- تغییر ولتاژ نقطه صفر
- اضافه دمای ترانسفورماتور (در بهره برداری بی بار)
- صدای پیوسته و بسیار بلند در ترانسفورماتورها و راکتورها

- آسیب تجهیزات الکتریکی مانند بانک خازنی، برقگیر، CVT، VT و... بر اثر شکست عایقی یا اضافه دما
- عملکرد غیر منتظره تجهیزات حفاظتی [۳ و ۲]

## ۲-۲- عوامل موثر در بروز پدیده فرورزونانس

### ۲-۳-

- عدم تقارن مدار به علت قطع تکفاز یا دوفاز فیوز
- بار ترانس بصورت نامتقارن
- گروه اتصال ترانس
- مقدار ظرفیت خازنی

## ۳- شرایط مناسب بروز پدیده در نیروگاه بادی

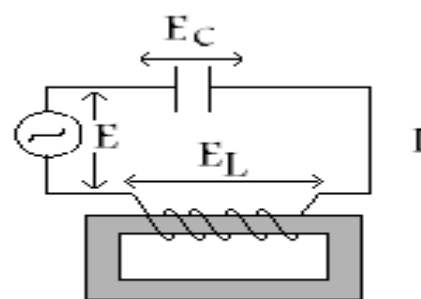
در نیروگاه بادی بدلیل استفاده از خطوط کابل زمینی

جریان پررودیک نیست. فرکانس هارمونیک ولتاژ و جریان به فرم  $mf_1 + nf_2$  بیان می شوند که  $m$  و  $n$  اعداد صحیح بوده و  $\frac{f_1}{f_2}$  کسر غیر گویا می باشد.

د) در مد آشفته تغییرات سیگنال های ولتاژ و جریان کاملاً بی نظم است. و اگر تحلیل هارمونیک صورت گیرد مشخص می شود که هارمونیکها از هر فرکانس بصورت پیوسته وجود دارد.

## ۲- فرورزونانس و پیامدهای آن

فرورزونانس نوعی تشدید غیرخطی است و وقتی اتفاق می افتد که یک اندوکتانس غیرخطی با یک ظرفیت خازنی که بصورت سری یا موازی با آن قرار گرفته است، شروع به نوسان کند. این اندوکتانس می تواند هسته آهنی ترانسفورماتورها و ظرفیت خازنی مربوط به ظرفیت موازی خطوط انتقال و کابل و یا بانک خازنی و غیره باشد. گونه ای از فرورزونانس که به نوعی می توان آن را متداولترین شکل فرورزونانس نامید ترکیب سری اندوکتانس غیرخطی و خازن است (شکل ۱). اصول وقوع پدیده فرورزونانس را می توان به روش گرافیکی که توسط رودنبرگ در ۱۹۷۲ ارائه شد تشریح نمود.



شکل ۱: مدار تشریح فرورزونانس

اگر مشخصه ولت\_آمپر هر یک از عناصر مدار شکل ۱ را در صفحه مختصات  $E-I$  با توجه به اتصال سری آنها رسم شود، نقطه کار مدار مشخص خواهد شد (شکل ۲). ولتاژ  $E_L$  با توجه به منحنی مغناطیس کننده و ولتاژ  $E_C$  بصورت خط مستقیم با ضریب زاویه  $1/C\omega$  از نقطه P رسم می شود. فاصل OP ولتاژ تغذیه ثابت  $e$  را مشخص می کند. همان طور که در شکل ۲ مشخص است، با افزایش ظرفیت خازنی نقطه کار مدار از ناحیه سوم منتقل شده و حداکثر سه نقطه کاری ممکن است بوجود آید. نقاط  $M_1$  و



استفاده شده است. مشخصات کابل مورد استفاده مربوط به کابل با سطح مقطع  $3 \times 120 \text{ mm}^2$  و مقادیر مورد استفاده در مدل  $\pi$  مطابق جدول ۱ است.

جدول ۱: مشخصات مدل  $\pi$  خط

f (Hz)	$\ell / \text{km}$		$\ell H / \text{km}$		$\ell C / \text{km}$		k (m)
			$\ell_0$		$\ell_1$		
۵۰	۰	۰/۲	۰/۵	۱/۰	۰/۴	۰/۴	۳

مشخصات مربوط به ترانس در شبکه مورد مطالعه نیز مطابق در جدول ۲ است.

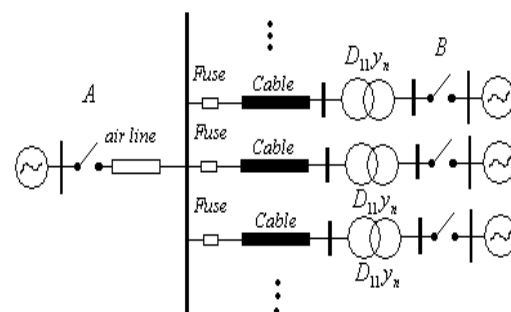
جدول ۲: مشخصات ترانس مورد استفاده در شبیه سازی

f (Hz)	S (kVA)	V (kV)	U <sub>k</sub> %
۵۰	۸۰۰	۱۰/۴ ۲۰	۶

#### ۴-۱- اثر گروه اتصال ترانس در بروز پدیده فرورزونانس

برای مشاهده اثر گروه اتصال در ایجاد و استمرار پدیده فرورزونانس، قطع فاز C در لحظه  $t=1 \text{ sec}$  برای گروه اتصال های  $D_y$ ،  $D_g$ ،  $Y_g$ ،  $Y_d$  ترانس صورت گرفته است. نتایج حاصل از بررسی در شکل های ۵ تا ۸ نشان داده شده است.

طولانی به همراه ترانسفورماتورهای با اتصال Dyn و همچنین استفاده از حفاظت های تک فاز مانند فیوز، احتمال بروز پدیده بسیار بالاست. نمودار تک خطی شبکه نیروگاه بادی در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شبکه در شرایط عملکرد نامتقارن فیوز، بخطر اغتشاشات وارد بر سیستم کلید B جهت محافظت توربین در طرف فشار ضعیف باز شده و ترانس در حالت بدون بار قرار می گیرد. همچنین در مواقع عدم وزش باد نیز، کلید طرف فشار ضعیف باز شده، ترانس در حالت بی بار قرار گرفته، احتمال بروز پدیده در این حالت افزایش می یابد.



شکل ۳: نمودار تک خطی شبکه نیروگاه بادی نمونه

علاوه بر عوامل ذکر شده در بالا کاهش چشمگیر تلفات بی باری نیز عامل مهمی در جهت افزایش احتمال بروز فرورزونانس بوده و در طراحی نیروگاه بادی باید به این نکته توجه کرد.

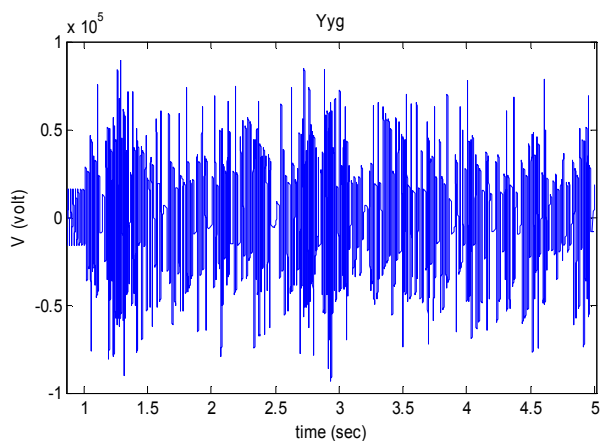
#### ۴-۲ بررسی اثر عوامل مختلف در وقوع پدیده فرورزونانس در شبکه مورد مطالعه

از میان عوامل مختلف دو عامل نوع گروه اتصال ترانسفورماتور و مقدار ظرفیت خازنی مدار در ایجاد پدیده فرورزونانس مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی در محیط Simpower نرم افزار Matlab در حالت بی بار ترانس انجام شده و نمودار تک خطی بصورت نشان داده شده در شکل ۴ است.

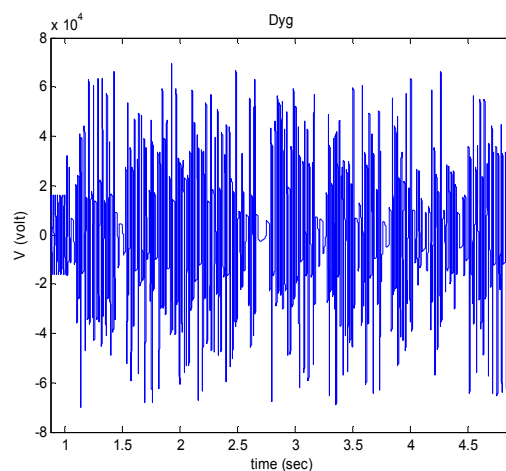


شکل ۴: نمودار تک خطی سیستم شبیه سازی شده

در این بررسی از مدل  $\pi$  خط برای شبیه سازی کابل



شکل ۸: قطع تکفاز به ازای گروه اتصال Yyg

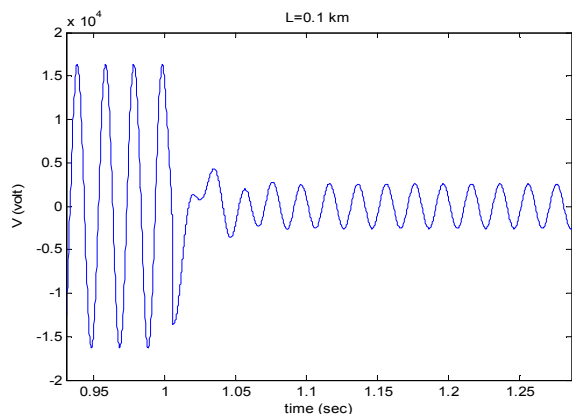


شکل ۵: قطع تکفاز به ازای گروه اتصال Dyg

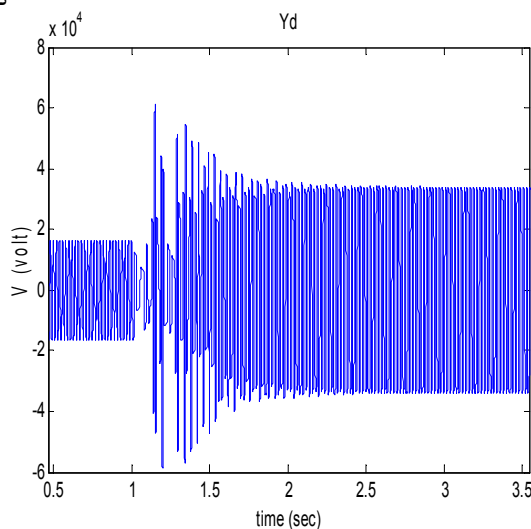
مشاهده می شود که در گروه اتصالهایی که دارای اتصال مثلث و یا ستاره با نقطه نول ایزوله در سمت فشار قوی هستند، فرورزونانس بصورت شدیدتری اتفاق می افتد. این امر در مورد گروه اتصال Dyn مربوط به ترانسهای نیروگاه بادی نیز صادق است.

## ۴-۲- بررسی اثر افزایش ظرفیت در وقوع پدیده فرورزونانس

با تغییر طول کابل مقدار ظرفیت خازنی موجود در مدار تغییر یافته و نقطه کار مدار جابجا می شود. برای بررسی اثر افزایش طول کابل، کلیدزنی تکفاز برای طول های مختلف صورت گرفته و نتایج حاصل در شکل های ۹ تا ۱۴ نشان داده شده است. در این بررسی گروه اتصال ترانس در همه حالات Dyg که گروه اتصال ترانسهای نیروگاه بادی است، انتخاب شده است.



شکل ۹: کلید زنی فاز C برای طول کابل ۰٫۱ km



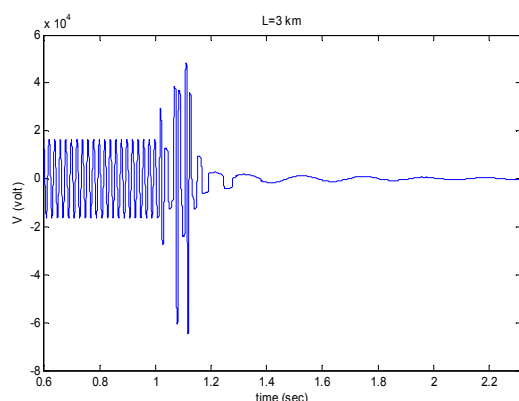
شکل ۷: قطع تکفاز به ازای گروه اتصال Yd



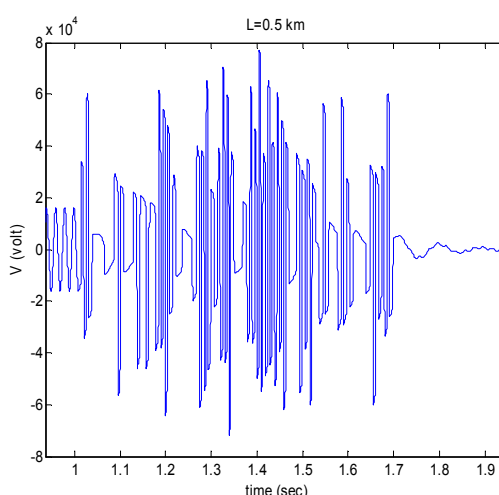
انجمن مهندسين برق و الكترونیک ایران  
شاخه ی تهران



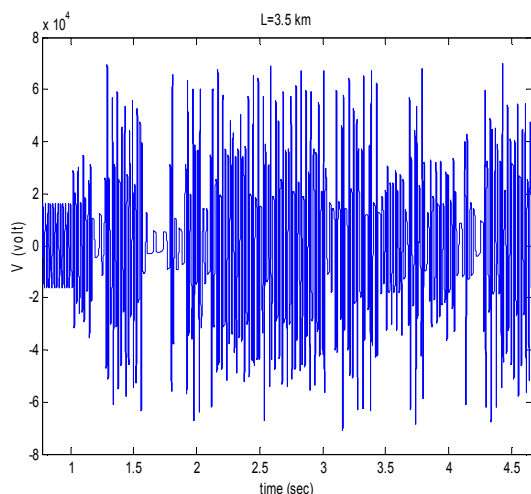
دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
قطب علمی قدرت



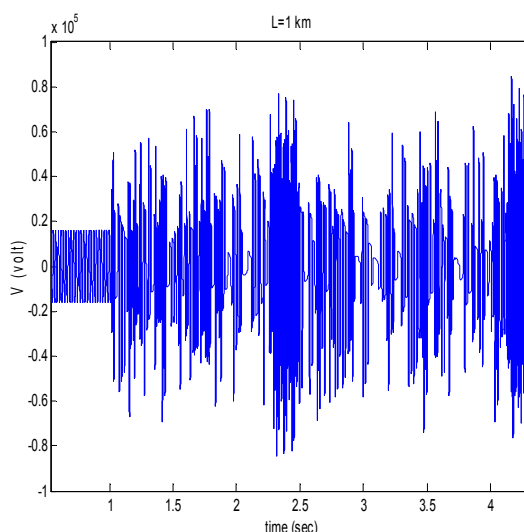
شکل ۱۳: کلید زنی فاز C برای طول کابل ۳ km



شکل ۱۰: کلید زنی فاز C برای طول کابل ۰.۵ km

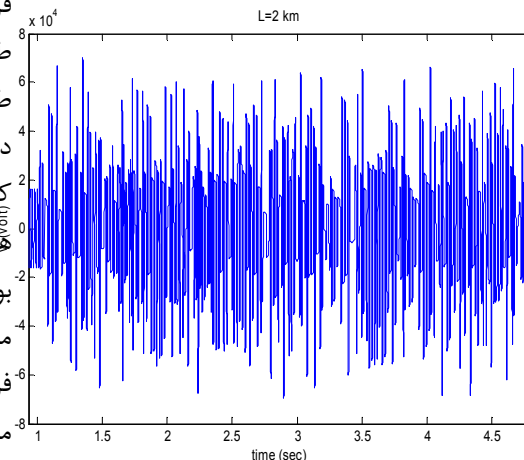


شکل ۱۴: کلید زنی فاز C برای طول کابل ۳.۵ km



شکل ۱۱: کلید زنی فاز C برای طول کابل ۱ km

مشاهده می شود که برای طول های کم فرورزونانس اتفاق نیفتاده و شکل موج میرا شده است. با افزایش طول، فرورزونانس با دامنه اضافه ولتاژ زیاد بوجود آمده و در یک طول معین دوباره اضافه ولتاژ میرا می شود. با ادامه افزایش طول، فرورزونانس با دامنه بالا اتفاق افتاده و روند افزایشی در دامنه پیدا می کند. این تغییرات مربوط به تغییر نقطه کار مدار در اثر افزایش ظرفیت خازنی می باشد. برای طول های خیلی کم نقطه کار مدار در قسمت خطی ناحیه سوم بوده و فرورزونانس اتفاق نمی افتد، با افزایش طول نقطه کار مدار وارد قسمت اشباع ناحیه سوم شده و باعث ایجاد فرورزونانس می شود، با ادامه روند افزایش طول نقطه کار مدار وارد ناحیه اول شده و روی زانوی منحنی غیرخطی قرار می گیرد. در این حالت فرورزونانس اتفاق نیفتاده و شکل موج ولتاژ میرا می شود. بعد از این با افزایش طول نقطه کار وارد قسمت اشباع در ناحیه اول شده و وقوع

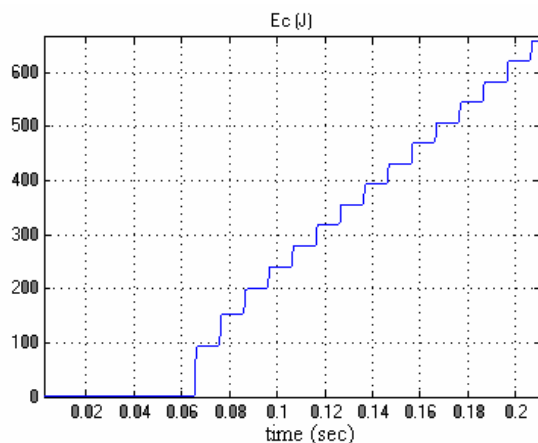


شکل ۱۲: کلید زنی فاز C برای طول کابل ۲ km

جریان پیک بدست آمده می توان چگالی جریان متوسط  
را برای برقگیر مورد نظر از رابطه زیر بدست آورد:

$$J = \frac{I}{A} = \frac{5}{8.04} = 0.622 A / Cm^2 \quad (1)$$

برای حالت فوق با توجه به کاتالوگ برقگیر، چگالی  
انرژی ورستور تا رسیدن به دمای ناپایداری حرارتی و  
همچنین وقوع پدیده Puncter برابر  $600 J / Cm^3$  و تا  
وقوع پدیده Cracking را در وضعیت فشردگی برابر  
 $350 J / Cm^3$  میباشد که در شکل (۱۶) روند جذب انرژی  
توسط برقگیر فاز نشان داده شده است.



شکل ۱۶: روند جذب انرژی در برقگیر در هنگام قطع یکفاز

همانطور که در شکل (۱۶) دیده می شود، در صورت  
تداوم پدیده فرورزونانس، انرژی جذب شده توسط برقگیر در  
مدت ۲۸ ثانیه به  $102600$  ژول خواهد رسید و در طی ۱۷  
ثانیه به  $59850$  ژول افزایش میابد. یعنی قبل از رسیدن به  
ناپایداری حرارتی و یا وقوع پدیده Puncter در برقگیر،  
برقگیر دچار Cracking خواهد شد.

## ۶- نتیجه گیری:

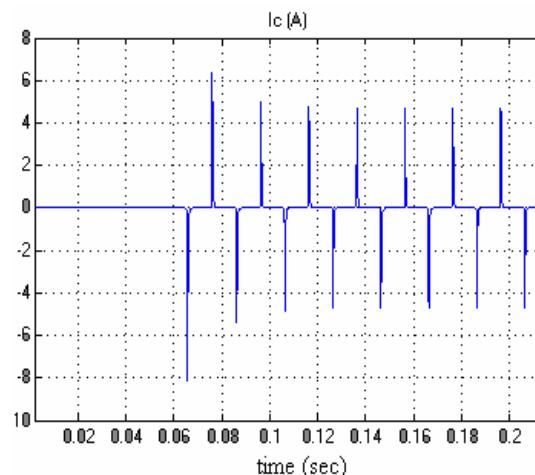
با توجه شرایط مناسب نیروگاه بادی برای وقوع  
فرورزونانس، برای جلوگیری از خطرات ناشی از بروز این  
پدیده، باید پیش بینی های لازم در خصوص جلوگیری  
وقوع این پدیده از پیش اندیشیده شود. به منظور جلوگیری  
صحیح از اثرات پدیده فرورزونانس لازم است تا این پدیده  
کاملاً شناسایی شده، شرایط وقوع پدیده پیش بینی شود و  
طراحی صحیح شبکه براساس پیش بینی های فوق صورت  
گرفته بطوریکه حداقل امکان از بروز این پدیده جلوگیری شود.

فرورزونانس را موجب می شود.

لذا از این بررسی نتیجه می شود که اگر ظرفیت  
خازنی مدار طوری تنظیم شود که امتداد ولتاژ خازن مماس  
بر منحنی اشباع قرار گیرد در این صورت فرورزونانس اتفاق  
نیفتاده و اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی میرا می شود. برای  
تنظیم این مقدار ظرفیت می توان از ظرفیت خازنی موازی  
یا سری با کابل استفاده کرده و یا محل کلید یا فیوز را  
طوری تنظیم کنیم که مقدار ظرفیت خازنی مورد نظر در  
آن طول بدست آید.

## ۵- زمان بحرانی تخریب برقگیر در قطع تکفاز

در صورت قطع شدن یک فاز و بروز پدیده  
فرورزونانس، شکل موج جریان برقگیر در شکل (۱۵) نشان  
داده شده است.



شکل ۱۵: شکل موج جریان برقگیر در اثر قطع یکفاز و وقوع پدیده  
فرورزونانس

همانطور که در شکل (۱۵) دیده می شود، پیک جریان  
تخلیه برقگیر در حالت ماندگار به حدود ۵ آمپر می رسد.  
دیسک های ورستور مورد استفاده در برقگیرهای توزیع  
دارای سطح مقطع  $4 / Cm^2$  می باشند. برقگیر مورد  
مطالعه دارای حجم  $171 Cm^3$  می باشد. پس با توجه به



با انتخاب مناسب طول كابل و يا محل فيوز مي توان احتمال بروز پديده را بطور قابل ملاحظه کاهش داد. منظور از طول مناسب كابل، طول است كه در آن طول ظرفيت خازني مدار فرورزونانس به اندازه اي برسد كه امتداد مشخصه ولت\_آمپر خازن به منحنی اشباع ترانسفورماتور مماس بوده و نقطه كار روی زانوی منحنی قرار گیرد. در این حالت ترانسفورماتور اشباع نشده و فرورزونانس اتفاق نمی افتد.

با توجه به اینکه تحلیل نظری فرورزونانس به علت ماهیت تصادفی آن در حالت کلی امری غیرممکن است، لذا پیشنهاد می شود كه مطالعات آماری كاملي در خصوص وقوع پديده در سيستم ها عملي صورت گرفته تنها به مطالعات نظری اکتفا نشود.

## ۷- مراجع

[۱] فرشاد، محمد، ساده، جواد، "فرورزونانس در شبکه های توزیع و تاثیر آن بر برقگیرهای ZnO"، نوزدهمین كنفرانس بين المللي برق، ۲۰۰۴ psc.

[۲] شاهرخشاهی، طهماسبقلی، رزونانس و فرورزونانس در شبکه های توزیع و انتقال، ۱۳۸۲، نشر علوم دانشگاهی تهران

[۳] L. J. Bohmann, J. McDaniel, and E. K. Stanek, " Lightning Arrester Failure And Ferroresonance on a Distribution System", IEEE Transaction on industry application, Vol. ۲۹, NO. ۶, November/December ۱۹۹۳, PP. ۱۱۸۹-۱۱۹۵

[۴] P. Ferracci, "Ferroresonance", Group Schneider: Cahier n° ۱۹۰, pp. ۱-۲۸, March ۱۹۹۸