دانشگاه زنجان

عنوان پروژه کارشناسی:

# عوامل بروز پدیده‌ی تشدید در شبکه‌های قدرت

استاد راهنما:

**جناب آقای دکتر منصور اوجاقی**

تهیه و تدوین:

**سپیده قربانیان**

شماره دانشجویی:

۹۱۴۴۲۲۴۹

خرداد ماه ۹۵

## دیباچه

اینجانب با استعانت از خداوند متعال و یاری جستن از درگاه او برخود لازم می‌دانم از زحمات استاد عالیقدر جناب **آقای دکتر اوجاقی** تشکر و قدردانی به عمل بیاورم که به حق زحمات بی‌شائبه ایشان در راستای اعتلای علم و دانش بر هیچ کسی پوشیده نیست واز افتخارات بنده می‌باشد که در کسوت شاگردی ایشان علم فرا گرفته‌ام. امیدوارم خداوند به ایشان طول عمر روز افزون عطا فرموده و در تمام مراحل زندگی مؤفق و مؤید باشند.

و من الله التوفیق

نبینی باغبان چون **گل** بکارد

چه مایه غم خوردتا **گل** براید

به روز و شب بود بی‌خورد و بی‌خواب

گهی پیراید او را گه دهد آب

گهی از بهر او خوابش رمیده

گهی خارش به دست اندرخلیده

به امیدآن همه تیماربیند

که تا روزی بر او**گل** بار بیند....

تقدیم با بوسه بردستان **پدرم:**

به او که نمی‌دانم ازبزرگی‌اش بگویم یا مردانگی...

تقدیم به **مادر**عزیزتر از جانم:

از تمام رنگ‌های جهان وامدار هیچ رنگی نیستم جز نگاه تو که مادر تمام رنگهاست.

**عنوان** فهرست مطالب **صفحه**


**چکیده** ۶

**فصل اول : اضافه ولتاژ در شبکه ی توزیع** ۷

۱-۱: اضافه ولتاژهای موجی در شبکهٔ توزیع و حفاظت مصرف کنندگان در برابر آن ۸

۱-۲: مکانیزم الکترواستاتیکی انتقال موج ضربه ۱۰

۱-۳: مکانیزم الکترومغناطیسی انتقال منبع ولتاژ ضربه به ثانویه ۱۱

۱-۴: بررسی تأثیر قرار دادن برقگیر در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور ۱۳

۱-۵: اضافه ولتاژهای رزونانس در ترانسفورماتورهای توزیع ۱۶

۱-۶: بانک های ستاره – مثلث ۱۷

۱-۷: امواج طرف ثانویه ۱۸

**فصل دوم: رزونانس در شبکه‌های الکتریکی** ۱۹

۲-۱: پدیده رزونانس شبکه‌های الکتریکی و مدل سازی ریاضی و مداری آن ۲۰

۲-۲: آشنایی با پدیده رزونانس در یک شبکه الکتریکی ساده ۲۰

**فصل سوم: بررسی پدیده فرورزونانس** ۲۴

۳-۱: پدیده‌ی فرورزونانس درشبکه‌های الکتریکی ۲۵

۳-۲: دلیل بروز پدیده فرورزونانس ۲۶

۳-۳: شرایط اشباع هسته مغناطیس ۲۷

۳-۴: بررسی اثر اشباع هسته در تجهیزات دارای هسته مغناطیس در بروز پدیده فرورزونانس ۲۸

عنوان فهرست مطالب صفحه


**فصل چهارم: پدیده رزونانس و فرورزونانس در شبکه‌های توزیع ۲۰ kV** ۳۰

۴-۱: خصوصیات و شرایط بروز پدیده در شبکه‌های توزیع ۳۱

۴-۲: تمهیدات لازم جهت جلوگیری از بروز پدیده فرورزونانس ۳۴

۴-۳: خصوصیات کلی پدیده ۳۶

**فصل پنجم: فرورزونانس در شبکه‌های انتقال انرژی** ۳۹

۵-۱: پدیده رزونانس غیرخطی یا فرورزونانس در شبکه‌های انتقال انرژی ۴۰

۵-۲: خصوصیات بروز پدیده در شبکه‌های انتقال انرژی الکتریکی ۴۱

۵-۳: فرورزونانس در هارمونی‌های بالا ۴۳

۵-۴: فرورزونانس در هارمونی‌های پایین ۴۳

۵-۵: آزمایش‌های انجام شده ۵۰

**فصل ششم: پدیده‌های رزونانس در شبکه‌های انتقال انرژی** ۵۳

بخش ۶-۱: شرح بروز پدیده رزونانس درشبکه‌های انتقال ولتاژبالا ۵۴

بخش ۶-۲: شرایط عدم تقارن بهره برداری سه فاز درخطوط انرژی ۵۵

بخش ۶-۳: تاثیرمشخصات راکتورها و ترانسفورماتور دربروز پدیده ۵۶

**فصل هفتم: شبیه سازی** ۵۸

**منابع** ۶۰

## چکیده

درمدارهای الکتریکی متشکل ازخازن با خاصیت خازنی C و سیم‌پیچی با خاصیت القایی L در شرایط خاص، کمیت‌های ولتاژ و جریان مدار برای دراز مدت از مقادیر قابل ملاحظه‌ای برخوردارمی‌شوند. افزایش قابل ملاحظه مقادیر ولتاژ و جریان با توجه به وجود خازنی C وخاصیت القایی L از بروز پدیده موسوم به رزونانس (تشدید) ناشی می‌شود.

باتوجه به خصوصیات مساعد شبکه‌های توزیع بروز پدیده‌های رزونانس و فرورزونانس در این شبکه‌ها بسیار معمول است. به عنوان مثال استفاده عمده از فیوز و Fuse-cut-out، استفاده از کابل‌های با خاصیت خازنی قابل ملاحظه در مقایسه با خطوط هوایی شرایط بروز دو پدیده را در این شبکه‌ها فراهم می‌سازد. با سوختن فیوز در یک فاز و یا قطع یک فاز توسط Fuse-cut-out، شرایط مناسب بروز پدیده فراهم می‌شود. بروز پدیده فرورزونانس در شبکه‌های توزیع با افزایش ولتاژ و صدمه به ایزولاسیون تجهیزات فشارقوی از جمله برقگیرها کابل‌ها و ترانسفورماتورها همراه است که ترکیدن سر کابل‌ها انفجار برقگیرها را موجب می‌شود. به علاوه جریان نشتی برقگیرهای غیرخطی را افزایش می‌دهد و از عمر و دوام آنها می‌کاهد.

با توجه به اهمیت کیفیت توان در سیستم‌های انتقال و توزیع، در این مقاله در ابتدا مقدمه‌ای برای آشنایی با پدیده فرورزونانس بعنوان یکی از مهمترین عوامل برهم زننده کیفیت توان آورده شده، و سپس به معرفی و بررسی عوامل ایجاد کننده پدیده‌های رزونانس و فرورزونانس پرداخته شده است. نهایتاً یک نمونه رزونانس با شبیه‌سازی در نرم افزار **MATLAB** بررسی شده است.

# فصل اول

# اضافه ولتاژ در شبکه‌ی توزیع

## ۱-۱- اضافه ولتاژهای موجی در شبکهٔ توزیع و حفاظت مصرف کنندگان در برابر آن

اضافه ولتاژهای ایجاد شونده در شبکهٔ توزیع فشارضعیف را می‌توان به دو دسته طبقه بندی کرد:

الف - اضافه ولتاژهای موقت با فرکانس ۵۰ هرتزکه می‌توانند زمانی از کسری از ثانیه تا مدت‌های طولانی را دارا باشند. علل این قبیل اضافه ولتاژها عبارتند از:

۱ - خرابی عایق بین سیم‌پیچ‌های فشارقوی و فشارضعیف در اثر ایجاد یک خطا در درون ترانسفورماتور.

۲ - پاره شدن هادی شبکه فشارمتوسط و افتادن آن بر روی شبکه فشارضعیف.

۳- انتقال اضافه ولتاژ از طریق تزویج و القاء بین اتصالات زمین ترانسفورماتور و شبکه در موارد طراحی و اجرای ناصحیح یا خطاهای نامتقارن.

۴- وصل فیوزهای کات اوت سه فاز سمت فشارمتوسط با فواصل زمانی طولانی و در نتیجه تک فاز یا دو فاز باقی ماندن شبکه.

۵– اتصالی‌های نامتقارن.

۶- بارهای شدیداً نامتقارن.

۷ - وقوع تشدید( رزونانس ) و تشدید آهنی( فرورزونانس).

۸- قطع بار ناگهانی.

ب - اضافه ولتاژهای گذرا با فرکانس‌های کیلوهرتز تا مگاهرتز که می‌توانند در اثرعواملی بشرح زیر ایجاد شوند:

۱ - اصابت مستقیم صاعقه به خط فشارضعیف که البته احتمال آن کم است. زیرا خطوط فشارضعیف ارتفاع کمی دارند و در موارد زیادی توسط ساختمان‌ها یا اشیاء بلندتر احاطه شده‌اند.

۲ - تخلیهٔ جریان صاعقه به زمین در نزدیکی خط توزیع برق که می‌تواند در آن اضافه ولتاژهای قابل ملاحظه‌ای القاء نماید (شکل ۱ -۱).

۳ - انتقال اضافه ولتاژ از طرف فشارقوی به طرف فشارضعیف ترانسفورماتورهای توزیع که می‌تواند به صورت الکتروستاتیکی و یا الکترومغناطیسی باشد.

۴ - کلید زنی نامناسب از قبیل وصل ناهمزمان قطب‌های کلید.

شکل ۱-۱ اصابت صاعقه به نقطه‌ای در نزدیک یک خط توزیع نیروی برق

به راه افتادن اضافه ولتاژهای موجی یا موقت در شبکه فشارضعیف و رسیدن آنها به منازل و کارگاه‌ها می‌تواند خطراتی را متوجه تجهیزات و انسان‌ها نماید عایق بندی دستگاه‌های فشارضعیف باید طوری باشد که بتواند ولتاژ $2U_n+1000$ ولت را تحمل کند. که در اینجا $U_n$ ولتاژ نامی دستگاه یعنی ۲۲۰ولت تک فاز است. بنابراین با توجه به حاشیه اطمینان لازم، باید اضافه ولتاژهای گذرای بیشتر از ۱۰۰۰ ولت حذف شوند و از ورود آنها به مدارهای داخلی منازل و کارگاه‌ها جلوگیری به عمل آید.

یکی از منابع مهم ایجاد اضافه ولتاژهای ضربه‌ای در شبکه فشارضعیف انتقال آنها از شبکه فشارقوی از طریق ترانسفورماتورهای توزیع است. موج‌های ولتاژ ضربه می‌توانند در داخل ترانسفورماتور با دو مکانیزم از یک سیم‌پیچ به سیم‌پیچ دیگر منتقل شوند:

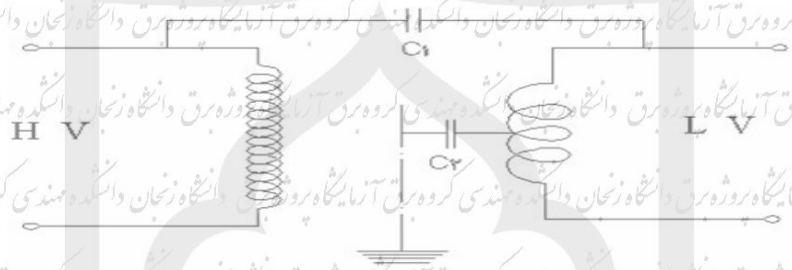
۱- الکترواستاتیکی

۲- الکترومغناطیسی

اکنون به تشریح این دو مکانیزم می‌پردازیم:

## ۱-۲ - مکانیزم الکترواستاتیکی انتقال موج ضربه

هنگامی که یک موج ولتاژ ضربه، مانند موجی که از برخورد مستقیم صاعقه به خط فشارمتوسط برق بر روی شبکه‌ی توزیع به راه می‌افتد، به ترانسفورماتور می‌رسد، در اولین لحظه تنها خازن‌های ذاتی سیم‌پیچ دخالت دارند و نقش توزیع و تقسیم ولتاژ بر روی سیم‌پیچ فشارقوی را بازی می کنند. سیم‌پیچ فشارضعیف که به هستهٔ زمین شدهٔ ترانسفورماتور نزدیکتر است، یک خازن کلی $C_2$ با زمین می‌سازد و سیم‌پیچ فشارقوی، که بر روی سیم‌پیچ فشارضعیف واقع شده، یک ظرفیت خازنی کلی $C_1$ با این سیم‌پیچ تشکیل می‌دهد (شکل ۱).




شکل ۱-۲ ظرفیت‌های خازنی کلی C۱ بین سیم‌پیچ‌ها و C۲ بین سیم‌پیچ فشارضعیف و هسته

ظرفیت خازنی بین سیم‌پیچ‌های فشارقوی و بدنه به لحاظ زیادی فاصله بین آن دو کوچک بوده و قابل صرف‌نظر است. با توجه به مدار معادل (شکل ۱-۲) در این حالت مدار بصورت مقسم خازنی عمل کرده و دامنهٔ ولتاژ صاعقه به نسبت عکس ظرفیت‌های خازنی بین آنها تقسیم می‌شود.

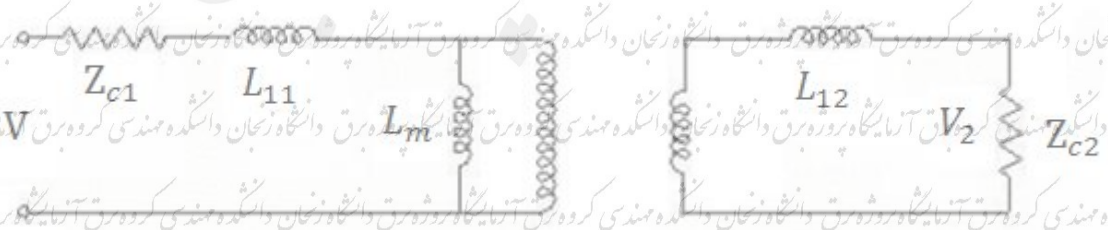
دراین حالت دامنهٔ اضافهٔ ولتاژ منتقل شده به ثانویه، ارتباطی به نسبت تبدیل مربوط به تعداد دور سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور یعنی N1/N2 نداشته و تابع شکل ساختمانی سیم‌پیچ‌ها، جنس عایق‌ها و فواصل عایقی ترانسفورماتور خواهد بود. القاء الکترواستاتیکی موج ولتاژ ضربه از سمت فشارقوی به طرف فشارضعیف دارای مدت زمان بسیار کوتاهی است. زیرا سایر اجزاء مدار یعنی سلف‌ها و مقاومت‌ها سریعاً وارد بازی شده،

نقش خود را در میرایی اضافه ولتاژ به انجام می‌رسانند. اما با این حال شیب افزایش ولتاژ و زمانی که اضافه ولتاژ در مدار ثانویه باقی می‌ماند و بر روی آن سیر می‌کند به قدر کافی بزرگ هست که حتی اگر عایق خود سیم‌پیچ فشارضعیف را دچار خرابی نکند، تجهیزات متصل شده به آن را گرفتار مشکل نماید. این امر به خصوص در ترانسفورماتورهای توزیع با نسبت تبدیل بزرگ به خاطر شکل ساختمانی خاصی که دارند می‌تواند مشکل‌ساز باشد. برای کاهش دامنهٔ اضافه ولتاژ ضربه‌ای منتقل شده به ثانویه ناشی از القاء الکترواستاتیکی می‌توان به دو طریق عمل کرد. طریق اول آن است که ظرفیت خازن را با نصب خازن اضافی بین ترمینال‌های ثانویه و زمین بزرگتر نمائیم. روش دوم آن است که حفاظ زمین شده Earthed Shield درکارخانه بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه قرارداده شود. این کار منجر به کوچکتر شدن خازن$C_1$ گردیده، دامنهٔ ولتاژ انتقال را کاهش خواهد داد. لازم به ذکر است که تاکنون از هر دو روش در صنعت برق استفاده شده است. در مرجع [۲] می‌توان طراحی و اجرای یک نمونه حفاظ زمین شده بین سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه را ملاحظه نمود. هر دو راه ذکر شده دارای هزینه‌های خاص خود بوده و به لحاظ اقتصادی قابل استفاده عملی در شبکه‌های توزیع به نظر نمی‌رسند.

## ۱-۳ - مکانیزم الکترومغناطیسی انتقال منبع ولتاژ ضربه به ثانویه

مدارمعادل معمولی ترانسفورماتور مانند (شکل ۱-۳) دارای دو سلف سری و یک سلف موازی است. سلف‌های سری که$L_{11}$ و $L_{12}$ نامیده می‌شوند بیانگر پراکندگی فوران مغناطیسی در فضای سیم‌پیچ‌ها و کانال عایق بین آن‌ها هستند. سلف موازی که $L_m$ نام دارد، نشان دهندهٔ فوران مغناطیسی اصلی عبوری از هستهٔ ترانسفورماتور است.

در (شکل ۱-۳) $Z_{C1}$ و$Z_{C2}$ امپدانس‌های موجی شبکهٔ طرف اولیه و ثانویهٔ ترانسفورماتور هستند.




شکل ۱-۳ مدار معادل ترانسفورماتور همراه با امپدانس موجی خطوط دو طرف

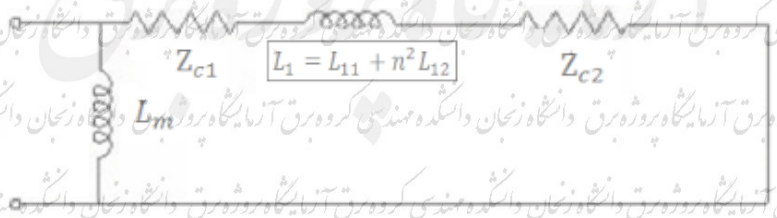
همان گونه که ذکر شد در اولین لحظهٔ ورود موج ضربه به ترانسفورماتور، توزیع ولتاژ و انتقال آن به ثانویه تنها تابع ظرفیت‌های خازنی ترانسفورماتور است. اما پس از گذشت لحظهٔ کوتاهی، به تدریج سلف‌های مربوط به پراکندگی و هستهٔ ترانسفورماتور نیز وارد عمل می‌شوند و موج ضربه‌ای به طریق الکترومغناطیسی نیز به ثانویه منتقل می‌گردد. در این مکانیزم، علاوه بر سلف‌های مربوط به ترانسفورماتور، امپدانس‌های موجی خطوط متصل به اولیه و ثانویه نیز دخالت می‌نمایند. در این حالت از خازن‌های ذاتی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور صرف‌نظر می‌شود. زیرا فرکانس غالب موج ضربه‌ای به حدود کیلوهرتز رسیده است. امپدانس موجی خطوط (Surge Impedance) طبق رابطهٔ (۱-۱) تعریف می‌شود که در آن L, C به ترتیب اندوکتانس سری و خازن موازی خط در واحد طول آن هستند.

$$Z_c = \sqrt{\frac{1}{c}} \qquad (۱-۱)$$

همان‌گونه که از تئوری انتشار امواج ضربه‌ای [۱] می‌دانیم، امپدانس‌های موجی خطوط، اثر خود مشابه مقاومت‌های اهمی ظاهر نموده، در ثابت‌های زمانی مربوط به انتشار امواج نقش بازی می‌کنند. ولتاژ دو سر یک سلف L که موج ولتاژ ضربه‌ای با دامنهٔ V به ترمینال‌های آن می‌رسد، طبق رابطهٔ (۱-۲) تغییر خواهد نمود. $Z_c$: امپدانس موجی خطوط

$$V_L = -V(1 - 2e^{-\frac{Z_c}{L}t}) \qquad (2-1)$$

با فرض نسبت تبدیل دورها برابر با n=N1/N2 مدار معادل (شکل ۱-۳) را می توان با تقریب به صورت (شکل ۱-۴) فرض نمود:




شکل ۱-۴ مدار معادل تقریبی ترانسفورماتور

**دانشجویان محترم:**

**جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.**

## مراجع :


[۱] محمد مرادی (دانشگاه علم وصنعت ایران)، احمد غلامی (موسسه تحقیقات ترانسفورماتور ایران)، بررسی پدیده فرورزونانس و تاثیر پارامترهای موثر آن در ترانسفورماتورهای توزیع

[۲] مهدی محمدی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر ایران) تحلیل پدیده فرورزونانس در سیستم‌های قدرت با در نظر گرفتن اثر هیسترزیس

[۳] شاهرخ شاهی و طهماسب قلی- رزونانس و فرورزونانس در شبکه توزیع و انتقال انرژی

[۴] حسین کاظمی کارگر- سید رسول حسینی فرورزونانس در نیروگاه‌های بادی و اثر آن در تخریب برقگیرها

[5] Haili Ma and Adly Girgis, "Identification and tracking of Harmonics Source in a Power System using Kalman filter" IEEE trans.on power Delivery vol.11, No.3, July 1996

[6] Irene Gu, math Bollen, "Time frequency and Timescale domain analysis of voltage Disturbances" IEEE trans.on power Delivery vol.15, No.4, October2000

[7] Surya Santoso, Jeff Lamoree, Mack Grady, Edward powers and Siddharth.Bhatt." A Scalable PQ Event Identification System" IEEE trans.on power Delivery vol.15, No.2, April 2000

[8] A.Gaouda M.salama, M.Sultan and A.Chikhani, "Power Quality Detection and Classification using Wavelet Multuresolution Signal Decomposition", IEEE trans.on power Delivery vol.14, No.4, October 1999

[9] Masoud karami, hossein Mokhtari and Reza Irvani,"Wavelet Based on Line Disturbance Detection for Power Quality Application ", IEEE trans.on power Delivery vol.15, No.4, October 2000

[10] J.Chung, E.J. Powers, W.M.G rady, and S.C.Bhatt, "Electric Power Transient Disturbance Classification Using wavelet Based Hidden Markov Models" Proceeding of 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol.6, 2000

[11] B.Perunicic, M.Mallini, Z.Wang, Y.Liu, and G.T. Heydt, "Power Quality Disturbance Detection and Classification Using Wavelets and Artificial Neural Networks, "The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1998

[12] C.L.Huang, H.Y.Chu and M.T.Chen,"Algorithm comparison for High Impedance fault based on Staged Fault Test", IEEE trans.on power Delivery vol.3, October 1988