



دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی

گروه برق

## پایان نامه کارشناسی

گرایش: قدرت

عنوان: طراحی فیلتر هارمونیک برای شبکه‌های یکسو شده صنعتی

استاد راهنما: جناب آقای دکتر منصور اوجاقی

نگارش: جلال محمدی

بهار ۹۴

ب

تقدیر و شکر

ن والقلم وما یسطرون

حمد و سپاس مرخدای راجل جلاله که سخنوران، در ستودن او معطل بمانند و شمارندگان، شمارش نغاش هرگز نتوانند نمود. آثار قدرت او بر

چهره‌ی روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، در فشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر

روی ما کشود.

سلام و درود پروردگار بر فخر عالم امکان، محمد مصطفی و خاندان پاک او، طاهران معصوم، آنان که وجودمان و مدار وجودشان است؛ و

نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

ستایش خدای یگانه را که به نور آشنایان کرد، شاید از نجات یافتگان باشیم.

در اینجا لازم می‌دانم از زحمات تمام عزیزانی که در این مدت مرا راهنمایی و حمایت کردند؛ اساتید محترم، دوستان و خانواده‌ام

تقدیر و شکر نمایم.

تبارک اسم ربک ذی الجلال و الاکرام.

فهرست:	۱
فصل اول - مقدمه	۱
فصل دوم - تعاریف	۳
۱-۲ تعریف هارمونیک	۳
۲-۲ شکل موج سینوسی پایه	۲
۳-۲ هارمونیک‌های مضرب سه	۴
۴-۲ جمع دو هارمونیک	۵
۵-۲ اعوجاج هارمونیکی کل (THD)	۶
۶-۲ توان و ضریب توان	۶
۷-۲ اساس هارمونیک‌ها	۷
۸-۲ میان هارمونیک	۸
۹-۲ هارمونیک‌های حالت گذرا	۸
۱۰-۲ اعوجاج ولتاژ و جریان	۸
۱۱-۲ مفهوم تشدید	۹
۱-۱۱-۲ تشدید سری	۱۰
۴	۴







۳۶	۸-۶- ترکیب فیلترهای پسیو اکتیو (فیلترهای هیبرید).....
۳۷	۱-۸-۶- فیلتر اکتیو پسیو بار هر سه باهم موازی.....
۳۷	۲-۸-۶- فیلتر پسیو موازی و اکتیو سری با بار.....
۳۷	۳-۸-۶- فیلتر اکتیو پسیو سری باهم و موازی با بار.....
۳۸	۴-۸-۶- فیلتر اکتیو پسیو سری باهم و موازی با بار دارای سلف موازی با ترانس کوپلینگ.....
۳۹	۵-۸-۶- فیلتر اکتیو پسیو سری باهم و موازی با بار به همراه فیلتر پسیو کنترل شده.....
۴۰	۹-۶- طراحی فیلترهای هارمونیکی.....
۴۴	۱۰-۶- اثرات جانبی اضافه کردن فیلتر.....
۴۵	<b>فصل هفتم - طراحی فیلتر یکسو کنندگی ترانسفورماتوری.....</b>
۴۵	۱-۷- ترانسفورماتورهای یکسوساز.....
۴۷	۲-۷- تجزیه و تحلیل تئوری.....
۴۷	۱-۲-۷- قواعد حذف هارمونیک جریان.....
۵۰	۲-۲-۷- قواعد جبران کننده توان راکتیو.....
۵۲	۳-۷- آزمایش و شبیه سازی.....
۵۴	۴-۷- تجزیه و تحلیل هارمونیک های جریان سمت شبکه.....
۵۷	۵-۷- تجزیه و تحلیل جبران کنندگی توان راکتیو.....





## چکیده:

با توسعه صنعت، اعوجاج هارمونیکی در سیستم‌های برق صنعتی با توجه به رشد بارهای غیرخطی نظیر یکسو کننده‌ها، اینورترها و سایکلو کانورترها رو به افزایش است. این دستگاه‌ها در ورود آلودگی‌های هارمونیکی به سیستم توان، نقش قابل توجهی ایفا می‌کنند؛ که ممکن است باعث سوء عملکرد و خرابی زودرس تجهیزات، نقص در عملکرد دستگاه‌های حافظت کننده و یا حتی تداخلات ارتباطی شود. علاوه بر این، اعوجاج‌های هارمونیکی، با کاهش شدید مقدار ضریب توان در شبکه‌های صنعتی بزرگ، آن‌ها را با جریمه‌های شدید مالی مواجه می‌کنند.

بنابراین، کنترل هارمونیک و جبران توان راکتیو در حال تبدیل شدن به یکی از مهم‌ترین مباحث روز، در میان

مهندسان برق می‌شود. برای مقابله با این‌گونه مشکلات، استفاده از روش‌هایی نظیر نصب فیلتر پسیو متشکل از

سلف و خازن تنظیم‌شده، فیلتر بالا گذر و یا فیلتر توان اکتیو از جمله راه‌حل‌های موجود است. با این حال، در این فن‌آوری‌ها تلاش بر این است که از ورود جریان‌های بار دارای هارمونیک، به جریان شبکه جلوگیری شود. بنابراین خطرات هارمونیک، هنوز در سیستم‌های یکسو کننده صنعتی بسیار جدی است؛ مخصوصاً که

یکسوسازهای ترانسفورماتوری به‌طور مستقیم به دستگاه‌های غیرخطی متصل می‌شوند؛ به‌طوری که این امر

مضر می‌تواند توسط هارمونیک و توان راکتیو تحت تأثیر قرار گیرد و باعث بروز مشکلاتی مانند: افزایش تلفات،

حرارت، ارتعاش و سروصدا در ترانسفورماتور گردد. بدیهی است که باید حاشیه‌ی امن بالاتری در طول طراحی

یکسوساز ترانسفورماتوری در نظر گرفت.

پیدا کردن یک روش کنترل هارمونیکی و جبران توان راکتیو نزدیک به منابع هارمونیک از ضروری است.

از این‌رو، نمونه‌ای از فیلترهای یکسو کننده‌ی ترانسفورماتوری در این پروژه ارائه شده است. گذشته از این در

مبحث انتقال انرژی الکتریکی، فیلتر یکسو کننده‌ی ترانسفورماتوری می‌تواند در حذف جریان‌های هارمونیکی

نیز نقش مهمی را ایفا کند.

بسیاری از روش‌های مرسوم در سیستم‌های یکسو کننده صنعتی بر روی کاهش اثرات منفی کیفیت پایین توان

متمرکزند، اما آن‌ها مشکلات هارمونیک شبکه برق را بیشتر از یکسو کننده ترانسفورماتوری هدف قرار

داده‌اند. بنابراین یک‌سوسازهای ترانسفورماتور هنوز هم تحت تأثیر آلودگی‌های هارمونیک قرار می‌گیرند.

به‌منظور حل این مشکل، فیلتر یکسو کننده‌ای پیشنهاد شده است که با جریان‌های هارمونیک سیستم هماهنگ

بوده و دارای فیلتر تنظیم‌کننده‌ی هارمونیک در سیم‌پیچی سوم ترانس است. امپدانس سیم‌پیچی سوم طوری

تنظیم‌شده است که جریان‌های هارمونیک را کاهش داده و عملکرد خوبی را برای جبران توان راکتیو، در

نزدیکی منابع هارمونیک زایفا کند. اصول کنترل هارمونیک و جبران توان راکتیو در این روش با به دست

آوردن روابط جریان بین سیم‌پیچی‌ها در فیلتر یکسو کننده‌ی ترانسفورماتوری، طراحی شده است. تجزیه و تحلیل

نظری نشان می‌دهد که اگر سیستم کنترل جریان‌های هارمونیک در مدار موجود باشد، مشخصه‌های عملیاتی

مدار نظیر امپدانس آن، تفاوت چندان با حالت عدم حضور آن، نخواهد کرد. این در حالی است که با اعمال این

سیستم کنترل هارمونیک به شبکه، فیلتر یکسو کننده‌ی ترانسفورماتور می‌تواند اعوجاج هارمونیک کل شبکه را

بهبود بخشیده، جریان کشیده شده از شبکه را کاهش داده، از توان مصرفی شبکه به کاهد و ضریب توان را

بهبود بخشد.

در منبع [۱] ذکر شده است که:

نمونه‌ای واقعی از فیلتر یکسو کننده‌ی ترانسفورماتور در کارخانه ذوب آلومینیوم ساخته و نصب شد. هم

شبیه‌سازی و هم آزمایش واقعی درستی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نظری را تأیید می‌کنند، امید است فیلتر

یکسو کننده‌ی ترانسفورماتور پیشنهادی، چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای در برنامه‌های مختلف برق صنعتی ایفا کند.

## فصل اول - مقدمه

استفاده از میدل‌های الکترونیک قدرت در اواخر دهه ۱۹۷۰ معمول گردید. بسیاری از مهندسان برق در مورد توانایی تولید اعوجاج‌های هارمونیک توسط سیستم‌های قدرت به بحث و تبادل نظر پرداخته‌اند.

اولین مورد مشکلات اعوجاج هارمونیک در سال ۱۸۹۳ در شهر هارت فورد آمریکا رخ داد، به این صورت که یک موتور الکتریکی به علت گرم شدن بیش از حد، باعث خرابی عایق‌بندی خود شد. پس از آزمایش معلوم گشت که دلیل این امر تشدید ایجادشده در خط انتقال، ناشی از وجود هارمونیک‌ها بوده است. مشکل بعدی، یک ژنراتور سه فاز ۱۲۵ هرتز با ولتاژ  $3/8$  کیلوولت ساخت شرکت جنرال الکتریک آمریکا بود. در این مورد همه محاسبات با تقریب‌های خوبی انجام‌شده بود، ولی بازهم تشدید در خط انتقال یافت شد. با محاسبه اندوکتانس

و ظرفیت خازنی خط انتقال و احتمالاً اندوکتانس بار، مشاهده شد که در فرکانس حدود ۱۶۰۰ هرتز (هارمونیک سیزدهم) در خط، تشدید رخ می‌دهد. شکل موج‌های ولتاژ ژنراتور نیروگاه و موتور سنکرون دارای مؤلفه‌های هارمونیک قابل توجهی بودند.

در ژانویه ۱۹۹۲ یک سیستم رایانه‌ای جدید در یک شرکت بیمه در پاریس نصب شد، اما مدت کمی بعد از وصل سیستم به برق، کلید اصلی عمل کرد و برق کل سیستم را قطع کرد. پس از صرف زمان و پول زیادی معلوم شد که این اتفاق به خاطر اضافه‌بار بیش از حد سیم نول سیستم بوده است.

باینکه بار سیستم، یک‌بار سه فاز متقارن بوده، اما جریان عبوری از سیم نول به مقدار شگفت‌آور ۶۵ درصد جریان عبوری از سیم فاز رسیده است. درحالی‌که مقدار جریان مجاز رله‌ی محافظ سیم نول، ۵۰ درصد مقدار جریان مجاز رله‌ی محافظ سیم فاز بود (در سیستم سه فاز متقارن، جریان سیم نول باید صفر باشد و بنابراین مقدار ۶۵ درصد جریان فاز برای سیم نول یک اتفاق غیرمنتظره بود که سیستم را غافل‌گیر کرده است). در یک مورد دیگر یک ترانسفورماتور ۳۰۰ KVA ای خراب شد، درحالی‌که دستگاه‌های اندازه‌گیری، هیچ‌گونه اضافه‌باری

را نشان ندادند، اما هنگامی که ترانسفورماتور جایگزین شده نیز، خیلی زود بعد از نصب خراب شد، با کمک دستگاه‌های اندازه‌گیری خاص معلوم شد که به خاطر جریان‌های هارمونیک، ترانسفورماتور دچار اضافه بار شدیدی گشته است.

تمام این مشکلات ریشه در یک عامل دارد و آن اعوجاج (خرابی) بیش از حد جریان یا ولتاژ تحویلی به مصرف‌کننده است. این اعوجاج چندین اثر مخرب دارد، از جمله: افزایش گرمای اجزای سیستم توزیع، نوسانات مکانیکی ژنراتورها و موتورها، خرابی عایق‌ها یا خازن‌ها به خاطر پدیده تشدید الکتریکی و گذشته از افزایش نویز صوتی، باعث خراب شدن عملکرد سیستم‌های مخابراتی PLC و رفتار غیرقابل پیش‌بینی سیستم‌های حفاظت

نصب شده، می‌شود.

در سیستم‌های قدرت پیشرفته انرژی الکتریکی توسط ژنراتورهای سه فاز تولید می‌شود. به دلایل اقتصادی از منبع تا مصرف‌کننده ولتاژ چندین بار افزایش و کاهش می‌یابد. بدین جهت در سیستم‌های قدرت سه فاز از

تعداد زیادی ترانسفورماتور سه فاز استفاده می‌شود. برای هر تبدیل ولتاژ از مقداری به مقدار دیگر ممکن است

از سه واحد ترانسفورماتور تک فاز یا یک واحد ترانسفورماتور سه فاز استفاده شود. در ترانسفورماتورهای قدرت،

توزیع جریان تحریک تنها درصد کوچکی (۲ تا ۰.۶٪) از جریان نامی است. پدیده هارمونیک در

ترانسفورماتورهای قدرت بسیار مهم است. زیرا تحت شرایط معینی، هارمونیک‌های جریان تحریک باعث

عملکرد تجهیزات حفاظتی می‌گردند که ممکن است باعث تداخل در مدارهای مخابراتی شوند. با توجه به این

مسئله، مهندسان مخابرات و سیستم انرژی، باید قادر به بررسی و حذف چنین شرایطی باشند. از این رو

هارمونیک در ترانسفورماتور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

دانشجویان محترم:

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

## نتیجه گیری:

فیلتر یکسو کننده‌ی ترانسفورماتوری یک تکنولوژی ساده و مؤثر را برای مقابله با مشکلات هارمونیک و بهبود

کیفیت توان در کاربردهای یکسو کننده‌ی صنعتی فراهم می‌کند و به‌ویژه تعدادی زیادی از مزایای یک‌سوساز ترانسفورماتور را نیز در خود ارائه می‌کند.

هم شبیه‌سازی و هم نتایج تجربی انجام‌شده در مرجع [۱] صحت تجزیه و تحلیل نظری را تأیید کرده‌اند. به‌عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از فیلترهای یکسو کننده ترانسفورماتور، فیلترهای هارمونیک برای بهبود پارامترهای

عملیاتی در سیم‌پیچی سوم ترانسفورماتور ضروری است. هرچند که این کار طراحی، نصب و ساخت

ترانسفورماتور را پیچیده‌تر خواهد کرد. با این حال، مزایای استفاده از فیلترهای یکسو کننده ترانسفورماتور آشکار

است: از یک‌سو، استفاده از سیستم کنترلی هارمونیک جریان، فیلتر یکسو کننده ترانسفورماتوری، که

به‌خودی‌خود جریان‌های هارمونیک در سیم‌پیچ اولیه را حذف می‌کند و به‌صورت بالقوه برای کاهش برخی از

عواقب نامطلوب تولیدی هارمونیک‌های جریان، مانند حرارت، ارتعاش و سروصدا در ترانسفورماتور به کار می‌رود،

از سوی دیگر، فیلتر یکسو کننده ترانسفورماتوری می‌تواند برای جبران توان راکتیو به دنبال آن، پارامترهای

عملیاتی در سمت اولیه، مانند کاهش جریان اولیه، افزایش ضریب توان سیستم و کاهش تلفات توان الکتریکی

در ترانسفورماتور استفاده شود و این به‌نوبه‌ی خود، بازده را در استفاده از تجهیزات قدرت، افزایش می‌دهد.

این مطالعه ممکن است یک مبنای نظری برای تحقیقات فیلتر یکسو کننده‌ی ترانسفورماتوری در بخش حفاظت

انرژی، کاهش سروصدا و غیره... ارائه کند، فیلتر یکسو کننده‌ی ترانسفورماتوری پیشنهادشده در بالا می‌تواند در

کاربردهای مختلف یکسو کننده‌ی توان، مانند کارخانه ذوب آلومینیوم، تولید فولاد، جداسازی الکتریکی مس و

سیستم‌های کوره قوس الکتریکی به کار رود.

## مراجع

[۱] ZhiYu ZHAO, LongFu LUO, JiaZhu XU, ThanhNgoc TRAN, ZhiWen ZHANG, دانشگاه زنجان

Operational characteristics of a filtering rectifier transformer for industrial power systems, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, ۲۰۱۳.

[۲] Jianying Li, Longfu Luo, Jiazhu Xu, Jinhui Zeng, Jianying Li, Research on Application of Novel Harmonic Suppression Rectifier Transformer and Its Filter System in the Electrolysis Rectifier System, International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, ۲۰۱۰.

[۳] A N Arvandan and V.Muthukumarasamy, PSCAD Validation of Delta-Wye Transformer as aharmonic Filter for THD Mitigation of Line Currents in Three-Phase Bridge Rectifier, IEEE ICSET, ۲۰۱۲, Nepal.

[۴] Babak Badrzadeh, Kenneth S. Smith, Roddy C. Wilson, Designing Passive Harmonic Filters for an Aluminum Smelting Plant, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. ۴۷, NO. ۲, MARCH/APRIL ۲۰۱۱.

[۵] ZUBAIR AHMED MEMON\*, MOHAMMAD ASLAM UQUAILI, AND MUKHTIAR ALI UNAR, Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters, Mehran University Research Journal of Engineering & Technology, Volume ۳۱, No. ۲, April, ۲۰۱۲ [ISSN ۰۲۵۴-۷۸۲۱].

[۶] کلاته، امیر هزار، شناخت و بررسی هارمونیک‌ها، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، بهار ۸۸.

[۷] حسینی، سید حسین، دوره آموزشی کیفیت توان، دانشگاه تبریز، شهریور ماه ۱۳۸۵.