



دانشکده برق و رباتیک  
گروه قدرت

عنوان:

## طراحی بهینه فیلتر پسیو در شبکه قدرت

دانشجو : مریم آقائی

استاد راهنما:

دکتر دستغان

استاد مشاور:

دکتر رحیمی شعرباف

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

پاییز ۹۰

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر ( عج ) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای ..... رشته ..... گرایش ..... تحت عنوان .....

که در تاریخ ..... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

<input type="checkbox"/> قبول ( با درجه : ..... امتیاز ..... )	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۹ )

۲- بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ - ۱۸ )

۳- خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۴- قابل قبول ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
			۱- استاد راهنما
			۲- استاد مشاور
			۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
			۴- استاد ممتحن
			۵- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده :

تقدیم به

همسر عزیزم، خانواده مهربانم

و تمامی خوانندگان این پایان نامه

در اینجا مجالی است که سپاس خود را به

همه دوستانی که در راه تهیه این پایان نامه، صمیمانه به من یاری رسانده اند، به ویژه استاد ارجمند

جناب دکتر علی دستفان

تقدیم نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..... دانشکده .....  
دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه .....  
..... تحت راهنمایی ..... متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

با افزایش بارهای غیرخطی در شبکه، سطوح هارمونیک در سیستم قدرت افزایش پیدا کرده است. منابع اصلی هارمونیک‌های سیستم قدرت شامل ادوات الکترونیک قدرت، عملکردهای سوئیچ‌زنی و بارهای غیرخطی دیگر می‌باشد. کاربرد این ادوات در سیستم‌های قدرت باعث اعوجاج جریان‌های موجود در شبکه می‌شود حتی در جاهایی که با منابع ولتاژ سینوسی تغذیه می‌شوند. جریان‌های اعوجاج یافته با جاری شدن در شبکه سبب اعوجاج ولتاژ باس‌ها می‌شوند و بنابراین کیفیت توان در سیستم‌های توزیع با خطر روبرو می‌شود. چندین روش برای حل این مشکل وجود دارد که از میان آنها فیلترهای پسیو به عنوان اقتصادی‌ترین و کارسازترین روش‌ها برای جبران هارمونیک‌ها استفاده می‌شود.

این گزارش روشی را در طرح‌ریزی فیلترهای پسیو با استفاده از الگوریتم گراف بیان می‌کند. الگوریتم پیشنهادی با جستجو در گراف‌هایی که برای شبکه تعریف می‌شود حالت بهینه را می‌یابد. در این روش به منظور تسریع در همگرایی از چهار نوع حرکت برای جستجوی فضای مسئله استفاده شده است.

هدف از طراحی فیلتر برای شبکه مینیمم کردن هزینه، تلفات شبکه، اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ و بهبود پروفایل ولتاژ می‌باشد. روش پیشنهادی بر روی سیستم تست ۳۰ باسه IEEE با بارهای هارمونیک که به صورت منابع جریان در نظر گرفته شده‌اند اعمال می‌شود. نتایجی که از این روش بدست می‌آید نشان از کارایی و قابلیت الگوریتم در طراحی فیلتر پسیو دارد.

کلمات کلیدی: اعوجاج هارمونیک، فیلتر پسیو، الگوریتم گراف



۱	فصل اول: مقدمه.....
۴	فصل دوم : هارمونیک‌ها، منابع تولید آن و تاثیرات.....
۵	۱.۲ معرفی.....
۷	۲.۲ علت ایجاد اعوجاج هارمونیکی.....
۷	۳.۲ منابع هارمونیک.....
۹	۴.۲ اثرات هارمونیک‌ها.....
۱۶	۵.۲ آنالیز فوریه و لایه های هارمونیکی.....
۱۷	۶.۲ استاندارد حدود هارمونیک‌ها.....
۱۸	۷.۲ تکنیک‌های جبران هارمونیکی.....
۲۱	۸.۲ آنالیز پخش بار هارمونیکی.....
۲۴	فصل سوم : فیلترهای پسیو.....
۲۵	۱.۳ معرفی.....
۲۶	۲.۳ ساختار انواع فیلترهای پسیو.....
۲۹	۳.۳ روش طراحی فیلتر پسیو.....
۳۱	۴.۳ روشهای تعیین بهینه پارامترهای فیلتر پسیو.....
۳۶	۵.۳ جاییابی و تعیین اندازه بهینه فیلترهای پسیو در یک شبکه قدرت.....
۳۶	۱.۵.۳ کاربرد الگوریتم ژنتیک برای جاییابی و مقداردهی فیلتر پسیو.....

۴۰	..... کاربرد شبکه‌های عصبی برای جایابی و سائز فیلترهای هارمونیکی پسیو
۴۳	..... روش PSO با ارزیابی تغییرات زمانی غیرخطی برای طراحی بهینه فیلترهای هارمونیکی
۴۶	..... طرح ریزی فیلتر هارمونیک پسیو در یک سیستم قدرت با در نظر گرفتن قیود احتمالی
۵۴	..... فصل چهارم : استفاده از الگوریتم گراف برای طراحی فیلترهای پسیو
۵۵	..... ۱.۴ الگوریتم گراف
۵۶	..... ۲.۴ تعریف گره و آرک در گراف
۵۹	..... ۳.۴ نحوه استفاده از الگوریتم گراف در خازن گذاری بهینه
۶۳	..... ۴.۴ نحوه بکارگیری الگوریتم گراف در طراحی بهینه فیلتر پسیو
۶۸	..... فصل پنجم : نتایج
۶۹	..... ۱.۵ شبکه مورد بررسی
۷۰	..... ۲.۵ نتایج مربوط به خازن گذاری
۷۶	..... ۳.۵ نتایج مربوط به فیلترگذاری
۸۳	..... فصل ششم
۸۴	..... ۱.۶ نتیجه گیری
۸۵	..... ۲.۶ پیشنهادات

## فهرست اشکال

- شکل ۱.۲ سیگنال اصلی، هارمونیک های مرتبه پنجم و هفتم ..... ۱۶
- شکل ۲.۲ سیگنال اصلی ترکیب شده با هارمونیک های مرتبه پنجم و هفتم ..... ۱۶
- شکل ۳.۲ آنالیز فوریه برای تفکیک هارمونیک ها ..... ۱۷
- شکل ۴.۲ پیکربندی های اصلی فیلتر اکتیو (الف) فیلتر اکتیو موازی (ب) فیلتر اکتیو سری ..... ۱۹
- شکل ۵.۲ ساختار فیلتر پسیو سری ..... ۲۰
- شکل ۶.۲ نمونه ای از فیلتر پسیو شنت ..... ۲۰
- شکل ۷.۲ پیکربندی های رایج فیلترهای اکتیو هیبرید: (الف) فیلتر اکتیو شنت و فیلتر پسیو شنت، (ب) فیلتر اکتیو سری و فیلتر پسیو شنت ..... ۲۱
- شکل ۸.۲ پیکربندی سیستم یکسوساز 12 پالسه ..... ۲۱
- شکل ۹.۲ دیاگرام تک خطی شبکه n باسه ..... ۲۳
- شکل ۱.۳ پهنای باند فیلتر تک تیون ..... ۲۶
- شکل ۲.۳ انواع رایج فیلترهای پسیو موازی ..... ۲۷
- شکل ۳.۳ نمایش مدل مداری ساختار فیلتر نوع c ..... ۲۸
- شکل ۴.۳ پاسخ فرکانسی فیلترهای پسیو موازی ..... ۲۸
- شکل ۵.۳ دیاگرام تک خطی شبکه ..... ۳۳
- شکل ۶.۳ دیاگرام مداری فیلتر پسیو خودتیون ..... ۳۶
- شکل ۷.۳ سیستم تست ۱۸ باسه ..... ۳۷
- شکل ۸.۳ IHD در هر باس ۱۲/۵KV قبل از نصب فیلتر ..... ۳۸
- شکل ۹.۳ THD ولتاژ در هر باس ۱۲/۵KV قبل از نصب فیلتر ..... ۳۸
- شکل ۱۰.۳ IHD ولتاژ در هر باس ۱۲/۵KV بعد از نصب فیلتر ..... ۳۹
- شکل ۱۱.۳ THD ولتاژ در هر باس ۱۲/۵KV بعد از نصب فیلتر ..... ۳۹
- شکل ۱۲.۳ سیستم تست ۳۶ باسه ..... ۴۱
- شکل ۱۳.۳ THD ولتاژ قبل از قراردادن فیلتر ..... ۴۲
- شکل ۱۴.۳ THD ولتاژ بعد از قراردادن فیلتر ..... ۴۲
- شکل ۱۵.۳ دیاگرام تک خطی سیستم ..... ۴۴

- شکل ۱۶.۳ اعمال حد به ولتاژ هارمونیک احتمالی ..... ۴۷
- شکل ۱۷.۳ تخمین ولتاژ هارمونیکی در محدوده دوره اطمینان ..... ۴۸
- شکل ۱۸.۳ سیستم تست ۱۸ باسه ..... ۴۹
- شکل ۱۸.۳ دوره اطمینان ۹۵٪ برای THD<sub>v</sub> در هر باس شبکه قبل از قراردادن فیلتر ..... ۵۱
- شکل ۱۹.۳ IHD<sub>v</sub> قبل از قرار دادن فیلتر ..... ۵۱
- شکل ۲۰.۳ THD<sub>v</sub> در هر باس ۱۲/۵kv بعد از قراردادن فیلتر پسیو ..... ۵۲
- شکل ۱.۴ انواع ممکن حرکت‌های نوع اول و دوم ..... ۵۷
- شکل ۲.۴ حرکت‌های ممکن نوع سوم ..... ۵۸
- شکل ۳.۴ حرکت‌های ممکن نوع چهارم ..... ۵۸
- شکل ۴.۴ حرکت‌های ممکن انواع اول و دوم ..... ۶۵
- شکل ۵.۴ انواع ممکن حرکت‌های نوع سوم ..... ۶۶
- شکل ۶.۴ انواع ممکن حرکت‌های نوع چهارم ..... ۶۶
- شکل ۱.۵ شبکه ۳۰ باسه IEEE ..... ۶۹
- شکل ۲.۵ وضعیت ولتاژها در باسهای شبکه ..... ۷۰
- شکل ۳.۵ وضعیت ولتاژ باسها در مرحله اول ..... ۷۱
- شکل ۴.۵ وضعیت ولتاژ باسها در مرحله دوم ..... ۷۲
- شکل ۵.۵ وضعیت ولتاژ باسها بعد از خازن‌گذاری ..... ۷۳
- شکل ۶.۵ مقادیر ولتاژ در باس ۳۰ در هر مرحله ..... ۷۴
- شکل ۷.۵ وضعیت ولتاژ باسها قبل از قراردادن فیلتر ..... ۷۸
- شکل ۸.۵ THD ولتاژ باسها قبل از قراردادن فیلتر ..... ۷۸
- شکل ۹.۵ وضعیت ولتاژها در مرحله اول فیلترگذاری ..... ۷۹
- شکل ۱۰.۵ وضعیت THD ولتاژها در مرحله اول فیلترگذاری ..... ۸۰
- شکل ۱۱.۵ ولتاژ باسها بعد از فیلترگذاری ..... ۸۰
- شکل ۱۲.۵ وضعیت THD ولتاژها ..... ۸۱

## لیست جداول

جدول ۱.۲ IEEE 519 حدود جریان هارمونیکی	۱۸
جدول ۲.۲ حدود اعوجاج ولتاژ	۱۸
جدول ۱.۳ محتوی هارمونیکی جریان و ولتاژ در باس TB4 برای شرایط بار مختلف	۳۴
جدول ۲.۳ پارامترهای فیلتر بهینه در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی خطی	۳۴
جدول ۳.۳ سطوح THD باس TB4 در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی خطی	۳۴
جدول ۴.۳ پارامترهای فیلتر بهینه در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی فازی	۳۵
جدول ۵.۳ سطوح THD باس TB4 در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی فازی	۳۵
جدول ۶.۳ باسهای کاندید فیلتر هارمونیکی و سائزهای اجزا	۳۹
جدول ۷.۳ جریان هارمونیکی یکسوکننده های شش پالسه	۴۲
جدول ۸.۳ سه منبع جریان هارمونیکی	۴۴
جدول ۹.۳ مشخصات احتمالی منابع جریان هارمونیکی	۵۰
جدول ۱۰.۳ باسهای کاندید فیلتر هارمونیکی و سائزهای اجزا	۵۲
جدول ۱۱.۳ ولتاژ rms خازن فیلتر در حد بالای دوره اطمینان ۹۵٪	۵۲
جدول ۱.۴ هزینه سالانه خازنهای ثابت	۶۰
جدول ۱.۵ نتایج خازن گذاری در مرحله اول	۷۱
جدول ۲.۵ نتایج خازن گذاری در مرحله دوم	۷۲
جدول ۳.۵ نتایج نهایی الگوریتم در خازن گذاری	۷۳
جدول ۴.۵ مقدار ولتاژ باسها در هر مرحله	۷۴
جدول ۵.۵ میزان تزریق هارمونیکی در باسهای مربوطه	۷۷
جدول ۶.۵ نتایج فیلتر گذاری در مرحله اول	۷۹
جدول ۷.۵ نتایج نهایی فیلتر گذاری	۸۱

# فصل اول

## مقدمه

کاربرد مبدل‌های الکترونیک قدرت که منجر به بهبود عملکرد، بازده و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت می‌شود در صنعت بسیار رایج است. با اختراع یکسوکننده‌های کنترل شده سیلیکونی SCR<sup>1</sup> در سال 1957، کاربرد صنعتی آنها تدریجاً افزایش یافت. استفاده وسیع از یکسوکننده‌های تریستوری/دیودی تکفاز و سه فاز، درایورهای تنظیم کننده سرعت ASD<sup>2</sup>، منابع تغذیه وقفه ناپذیر UPS<sup>3</sup> در کاربردهای خانگی و صنعتی در دو دهه اخیر اتفاق افتاده است [1]. یکسوکننده‌های دیودی و تریستوری مشخصات بار غیرخطی را نمایش می‌دهند و جریان غیر سینوسی را از منبع ولتاژ حتی موقعی که از منابع ولتاژ سینوسی تغذیه می‌کند می‌کشد. این جریان‌های غیر سینوسی به داخل سیستم قدرت تزریق می‌شود و مسائل کیفیت توان را بوجود می‌آورد. هارمونیک‌های جریان تزریق شده باعث اعوجاج ولتاژها می‌شود که مشکلات عمده‌ای را برای مؤسسات و مشتریان در سطح توزیع ایجاد می‌کند. این سطوح اغتشاش در صورتی که حدود خاصی را رعایت نکنند، مشکلاتی را برای بارهایی مانند موتورهای آسنکرون، ماشینهای سنکرون، ترانسفورمرها، خازنها و دستگانه‌های حساس الکترونیکی ایجاد می‌کنند [2]. فرکانس ولتاژ اعوجاج یافته، باعث بدعمل کردن به عبارتی تریپ بارهای خطی و غیرخطی دیگر متصل به PCC<sup>4</sup> می‌شود. جریان‌های هارمونیکی تزریقی می‌تواند بر روی رنج وسیعی از تجهیزات سیستم قدرت مانند ترانس‌ها و موتورها تاثیر بگذارند و باعث تلفات اضافی شوند. هارمونیک‌ها همچنین می‌توانند با خطوط ارتباطی تداخل کنند و باعث بروز خطا در اندازه‌گیری قدرت شوند [2]. با توجه به طیف گسترده‌ای از ادوات الکتریکی که از اغتشاش اثر می‌پذیرند اهمیت کاهش اعوجاج هارمونیکی در شبکه قدرت نمایان می‌شود.

---

<sup>1</sup>silicon controlled rectifiers

<sup>2</sup>Adjustable Speed Drives

<sup>3</sup>Uninterruptible Power Supplies

<sup>4</sup>Point of Common Coupling

بنابراین برای اینکه شبکه از خسارات محتمل و ممکنه در امان باشد، استانداردهای کیفیت توان در تعداد زیادی از شبکه‌های توزیع، اعمال می‌شود و حدودی برای اعوجاج کل هارمونیک‌ها ( $THD^{\circ}$ ) طراحی شده‌است.

یکی از راههای کاهش THD استفاده از فیلترها برای کنترل هارمونیک‌ها در شبکه می‌باشد. برای طراحی چنین فیلترهایی ضروری است تا ابتدا سطح اعوجاج هارمونیک در هر دو شکل موج ولتاژ و جریان ارزیابی شود و سپس روشی صحیح را برای تعیین پارامترهای فیلتر در نظر بگیریم. امروزه دو نوع فیلتر در شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد فیلترهای پسیو و فیلترهای اکتیو. در حال حاضر فیلترهای پسیو مرسوم‌ترین راه جبران هارمونیک-ها به حساب می‌آیند [1]. در این پایان نامه روشی برای جایابی بهینه این نوع فیلترها در شبکه پیشنهاد می‌شود. نتایج جایابی بهینه فیلترهای پسیو روی شبکه مورد مطالعه نشان از کارایی این روش دارد.

در این پایان نامه ابتدا در فصل دوم مسئله هارمونیکها در سیستم قدرت، منابع تولید هارمونیک و تاثیرات آنها در شبکه و سپس روشهای جبران (کاهش) هارمونیکها بیان می‌شود. در فصل بعدی فیلتر پسیو و انواع آن به عنوان رایج‌ترین روش جبران هارمونیک مطرح می‌شود و در ادامه روشهای تعیین بهینه المانهای فیلتر پسیو و جایابی بهینه فیلتر در شبکه بیان می‌شود. در فصل چهارم ضمن معرفی الگوریتم گراف، جزئیات استفاده از این روش ابتدا در خازن گذاری بهینه مطرح می‌شود. سپس الگوریتم را در مکان‌یابی بهینه و مقدار المانهای فیلتر پسیو به کار می‌بریم. شبکه مورد مطالعه در اینجا شبکه ۳۰ باسه IEEE می‌باشد که در فصل پنجم آورده شده- است. نتایج شبیه سازی نیز بدون حضور خازن‌ها و فیلترها و سپس با جایابی بهینه خازن‌ها و سپس فیلترها نشان داده شده‌است. در نهایت در فصل آخر نتیجه گیری و پیشنهادات ارائه شده‌است.

---

<sup>5</sup> Total Harmonic Distortion



## فصل دوم

# هارمونیک‌ها، منابع تولید آن و تاثیرات

## ۱.۲ معرفی

بروز هارمونیک در سیستم‌های قدرت اولین پیامد عناصر غیرخطی در شبکه است. به خاطر گسترش فزاینده استفاده از عناصر غیرخطی، مانند راه‌اندازها (درایورهای تنظیم سرعت) و مبدل‌های الکترونیک قدرت، مقدار هارمونیک‌های جریان و ولتاژ به‌طور چشمگیری افزایش یافته‌است و بنابراین اهمیت موضوع کاملاً مشخص است. [1]

به نظر برخی از محققین، اعوجاج هارمونیک هنوز مهمترین مسئله کیفیت برق می‌باشد. مسائل هارمونیک با بسیاری از قوانین معمولی طراحی سیستم‌های قدرت و عملکرد آن، تحت فرکانس اصلی مغایر است. بنابراین مهندس برق با پدیده‌های ناآشنایی روبرو می‌شود که نیاز به ابزار پیچیده و تجهیزات پیشرفته برای حل مشکلات و تجزیه و تحلیل آنها دارد. گرچه تحلیل مسائل هارمونیک می‌تواند دشوار باشد، ولی خوشبختانه همه سیستم قدرت دارای مشکل هارمونیک نیست و فقط درصد کمی از فیدرهای مربوط به سیستم‌های توزیع تحت تأثیر عوامل ناشی از هارمونیک‌ها قرار می‌گیرند. مشترکین برق در صورت وجود هارمونیک‌ها مشکلات زیادتری را تحمل می‌کنند. مشترکین صنعتی که از محرکه‌های موتور با قابلیت تنظیم سرعت، کوره‌های قوس الکتریکی، کوره‌های القایی، یکسوکننده‌ها، اینورترها، دستگاه‌های جوش و نظایر آن استفاده می‌کنند، نسبت به مسائل ناشی از اعوجاج هارمونیک ضربه‌پذیرتر از بقیه مشترکین می‌باشند.

اعوجاج هارمونیک یک پدیده جدید در سیستم‌های قدرت به شمار نمی‌رود. جستجوی منابع و تحقیقات دهه‌های قبل نشان می‌دهد که مقالات مختلفی در رابطه با این موضوع انتشار یافته‌است. اولین منابع هارمونیک شناخته‌شده، ترانسفورماتورها بودند و اولین مشکل نیز در سیستم‌های تلفن پدید آمد [1]. استفاده گروهی از لامپ‌های قوس الکتریک به دلیل مؤلفه‌های هارمونیک توجهات خاصی را برانگیخت ولی این مسائل به اندازه اهمیت مسئله مبدل‌های الکترونیک قدرت در سال‌های اخیر نبوده است.

خوشبختانه در طی این سال‌ها پژوهشگران متوجه شده‌اند که اگر سیستم انتقال به نحو مناسبی طراحی گردد، به‌گونه‌ای که بتواند مقدار توان مورد نیاز بارها را به راحتی تأمین نماید، احتمال ایجاد مشکل ناشی از هارمونیک‌های جریان برای سیستم قدرت بسیار کم خواهد بود، گرچه این هارمونیک‌ها می‌توانند موجب مسائلی در سیستم‌های مخابراتی شوند. اغلب در سیستم‌های قدرت مشکلات زمانی بروز می‌کنند که خازن‌های موجود در سیستم باعث ایجاد تشدید در یک فرکانس هارمونیکی گردند [2]. در این شرایط اغتشاشات و اعوجاجات، بسیار بیش از مقادیر معمول می‌گردند. امکان ایجاد این مشکلات در مورد مراکز کوچک وجود دارد ولی شرایط بدتر در سیستم‌های صنعتی به دلیل احتمال زیاد تشدید رخ می‌دهد.

سطوح هارمونیک‌های جریان و ولتاژ در سیستم توزیع دائم در حال افزایش است، یک دلیل مهم گسترش وسائلی است که تولید هارمونیک می‌نمایند. وسایل کنترل کننده تریستوری مثال نمونه ایست که در سطوح قدرت صنعتی، تجاری و خانگی در حد وسیعی مورد استفاده قرار گرفته است، این وسایل برای کنترل ولتاژ، تغییر فرکانس و مبدل قدرت بکار برده می‌شوند و عموماً به سبب قیمت پائین تر، بازده بیشتر و نگهداری ساده تر جایگزین دیگر وسایل شده اند. دلیل دیگر افزایش هارمونیک‌ها، ازدیاد تحریک ترانسفورماتورهای توزیع است که کاربردپذیری آنها عملاً بیشتر و بیشتر می‌شود. دلیل سوم استفاده از خازن‌های موازی را می‌توان نام برد، خازن‌ها در هیچ شرایطی تولید هارمونیک نمی‌نمایند. اما نصب خازن‌های تصحیح کننده ضریب قدرت مسائل پتانسیلی را افزایش و حضور آنها در مدار القائی اساساً امکان حلقه‌های شبکه را برای تشدید محلی، عمومی یا بزرگ سازی هارمونیک مهیا می‌سازد [1].

تمایل بسوی ظرفیت بیشتر و ولتاژ بالاتر سیستم‌های توزیع، در سطوح هارمونیک اثر خواهد گذاشت. آمیختن بارهای مسکونی، تجاری و صنعتی با درجه زیاد روی همان فیدرها امکان تداخل القائی را مطرح خواهد نمود.

بانک‌های خازن تصحیح کننده ضریب قدرت به تعداد زیادتر یا در اندازه بزرگتر احتمال تولید حلقه‌های تشدید را افزایش می‌دهند، ایستگاه‌های قدرت (مانند مترو، تراموا) برای انتقال سریع از سیستم‌های توزیع تغذیه شده،

بعلت آمیختن با بارهای تجاری و مسکونی عموماً سطوح هارمونیک محیطی را افزایش می‌دهند.

بیشتر صنایع آلومینیوم و کلر در فرآیند تولیدات خود از سیستم های dc استفاده می‌نمایند. این تأسیسات هارمونیک بالا را تولید می‌کنند. خلاصه آنکه کوچکترین تردیدی باقی نمی‌گذارد که هارمونیک‌ها بدون کنترل در سیستم قدرت در حال افزایش می‌باشند. [1]

## ۲.۲ علت ایجاد اعوجاج هارمونیکی

یکی از دلایل اعوجاج هارمونیکی در سیستم‌های قدرت ترانسفورماتورها می‌باشند که با به اشباع رفتن ترانس‌ها می‌توانند ایجاد شوند. اعوجاج هارمونیکی در سیستم‌های قدرت ناشی از عناصر غیرخطی نیز می‌باشد. عنصر غیرخطی عنصری است که جریان آن متناسب با ولتاژ اعمالی نمی‌باشد افزایش چند درصدی ولتاژ ممکن است باعث شود که جریان دو برابر شده و نیز موج جریان شکل دیگری به خود بگیرد. این مورد ساده ای از منبع تولید اعوجاج در سیستم قدرت می‌باشد.

هر شکل موج اعوجاجی پریودیک را می‌توان به صورت جمع موج‌های سینوسی بیان نمود. یعنی وقتی که شکل موج از یک سیکل به سیکل دیگر تغییر نکند، این موج را می‌توان به صورت جمع امواج سینوسی خالص که در آن فرکانس هر موج سینوسی، مضرب صحیحی از فرکانس اصلی موج اعوجاجی است نمایش داد. این موج‌های سینوسی را هارمونیک‌های مؤلفه اصلی می‌گویند. جمع این موج‌های سینوسی به سری فوریه معروف است این مفهوم ریاضی اولین بار توسط فوریه ریاضیدان فرانسوی مورد توجه قرار گرفت.

## ۳.۲ منابع تولید هارمونیک

پیدایش عناصر نیمه هادی و المان‌های غیرخطی نظیر دیود، تریستور و ... و استفاده فراوان از آنها در شبکه‌های قدرت عامل جدیدی برای ایجاد هارمونیک‌ها در سیستم‌های قدرت می‌باشد. کاربرد این عناصر را می‌توان در تجهیزات و سیستم‌های قدرت زیر دید:

- کوره‌های قوس الکتریکی و القایی

- یکسوکننده‌ها و مبدل‌های الکترونیک قدرت

- تجهیزات مورد استفاده در کنترل‌کننده‌های سرعت ماشین‌های الکتریکی

- کاربرد SVC بعنوان ابزار مهمی در کنترل توان راکتیو

- بارهای غیرخطی شامل دستگاه‌های جوشکاری

- جریان مغناطیسی ترانسفورماتور

- و ...

از سوی دیگر عوامل زیر را نیز می‌توان به عنوان تولیدکننده هارمونیک در نظر گرفت:

- تولید شکل موج غیر سینوسی توسط ماشین‌های سنکرون ناشی از وجود شیارها و عدم توزیع یکنواخت سیم‌پیچی‌های استاتور

- توزیع غیر سینوسی فوران مغناطیسی در ماشین‌های سنکرون

همچنین صنایع زیر را می‌توان از جمله عوامل تولید هارمونیک در شبکه‌های الکتریکی محسوب نمود:

- صنایع شامل مجتمع‌های شیمیایی و پتروشیمی و نیز صنایع ذوب آلومینیم که از یکسوکننده‌های پر قدرت برای تولید برق DC مورد نیاز انجام فرآیندهای شیمیایی و ذوب آلومینیم استفاده می‌کنند. با توجه به قدرت بالا، این یکسوکننده‌ها هارمونیک قابل ملاحظه‌ای در شبکه قدرت به وجود می‌آورند.

استفاده از سیستم‌های الکترونیک قدرت در سیستم حمل و نقل برقی مانند اتوبوس برقی و متروها باعث می‌شود سطوح زیادی از هارمونیک به سیستم توزیع تزریق شود.

بارهای غیرخطی مانند کوره‌های قوس الکتریکی که در صنایع ذوب‌آهن استفاده می‌شود از عوامل تولید هارمونیک در مقیاس بزرگ می‌باشند. [1]

## ۴.۲ اثرات هارمونیک ها

اثرات هارمونیک‌ها در دو سطح قابل بررسی است، نخست دستگاهها و تأسیسات، سپس در کنترل، حفاظت و اندازه‌گیری. در حالت نخست نتایج نسبتاً بالای هارمونیک‌های ولتاژ و جریان موجب زیان، خسارت و معیوب شدن دستگاه‌ها یا تلفات بالای غیر قابل قبول می‌گردد، حالت دوم شامل تداخل سیستم‌های حفاظتی و کنترل، و تنزل در دقت سیستم‌های اندازه‌گیری می‌شود.

### ۱.۴.۲ دستگاه‌ها و تأسیسات [1]

۱.۱.۴.۲ بانک‌های خازن:

از مهمترین تجهیزاتی که تحت تاثیر هارمونیک ولتاژ قرار می‌گیرند، خازنهای مورد استفاده در شبکه به منظور تصحیح ضریب قدرت می‌باشند. یکی از مواردی که باعث آسیب دیدن به خازن‌ها می‌گردد، گرم شدن خازن ناشی از اضافه جریان آن می‌باشد. این مشکل بدلیل وجود مقاومت داخلی یک خازن واقعی می‌باشد. وجود مقاومت موازی معادل در ساختار یک خازن سبب ایجاد تلفات حرارتی و در نتیجه گرم شدن آن می‌شود. افزایش حرارت در خازن‌ها سبب ضعف قدرت عایقی و کاهش عمر خازن می‌گردد. بالا بودن جریان هارمونیکی ورودی به خازن حتی در صورت کم بودن هارمونیک ولتاژ نیز امکان‌پذیر است، زیرا امپدانس خازن با عکس فرکانس در ارتباط می‌باشد.

مشکل دیگری که در عملکرد خازنها می‌تواند پدید آید مشکل عایقی است که ممکن است در اثر اضافه ولتاژ ناشی از هارمونیک‌ها ایجاد شود. معمولاً در سیستم‌های قدرت اغتشاشات ولتاژ در حالت دائمی به اندازه‌ای نیست که سبب آسیب رساندن به خازنها گردد، مگر اینکه شرایط تشدید در سیستم پدید آید که این امر در سیستم‌های برق‌رسانی دور از انتظار نیست.

#### ۲.۱.۴.۲ موتورهای آسنکرون (القایی):

از آنجایی که بسیاری از مصرف‌کننده‌های موجود در صنایع را موتورهای القایی تشکیل می‌دهند مطالعه تاثیر هارمونیک‌ها در سیستم‌های توزیع بر عملکرد این تجهیزات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

اغتشاش هارمونیک ولتاژ در ترمینال‌های موتور باعث ایجاد شار هارمونیک در داخل آن می‌شود که اگرچه ممکن است تاثیر مهمی بر روی گشتاور موتور نداشته باشد، اما باعث می‌شود که موتور در فرکانسی متفاوت با فرکانس سنکرون روتور گردش نماید، که اساساً سبب تولید جریان‌هایی با فرکانس بالا در آن می‌شود. این اثر در موتورها شبیه به اثر جریان ترادف صفر در فرکانس اصلی است. فوران اضافی باعث افزایش تلفات، کاهش راندمان، ایجاد حرارت، لرزش و سروصدا می‌شود.

وجود هارمونیک‌های جریان در استاتور یک ماشین سبب ایجاد mmf با سرعت هارمونیک در فاصله هوایی می‌گردد. این mmf در صورتی که هارمونیک جریان، مؤلفه مثبت باشد هم جهت با mmf مؤلفه اصلی جریان و در صورتی که مؤلفه منفی باشد در خلاف جهت mmf مؤلفه اصلی جریان می‌باشد.

#### ۳.۱.۴.۲ ماشینهای سنکرون:

هنوز مطالب زیادی در خصوص مسیرهای هارمونیک جریان در ماشینهای سنکرون و در نتیجه مقدار گرم شدن اضافی ناشی از آن منتشر نشده است، ولی می‌توان در مورد موتورهای سنکرونی که به روش آسنکرون راه‌اندازی می‌شوند و روتور آنها نیز مانند موتور آسنکرون است از مطالب مربوط به موتور آسنکرون استفاده نمود.

مشکل دیگری که هارمونیک جریان ایجاد می‌نماید، تاثیر مکانیکی بر توربین و ژنراتور می‌باشد. در این حالت نوسانات مکانیکی به دلیل گشتاور پالسی ناشی از تداخل بین جریان‌های هارمونیکی و مؤلفه میدان اصلی، ایجاد می‌گردد که می‌تواند باعث آسیب رسیدن به محورها شود. از طرف دیگر در صورتی که فرکانس این نوسانات با فرکانسهای طبیعی مکانیکی ترکیب ژنراتور - توربین برابر شود، آگاه شرایط تشدید فراهم می‌آید و باعث اشکالات عمده‌ای بر محور توربین - ژنراتور می‌گردد.

۴.۱.۴.۲ ترانسفورماتورها:

تاثیر هارمونیک‌ها بر ترانسفورماتورها از دو جنبه مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱- تاثیر جریان‌های هارمونیک بر تلفات مسی و تلفات هسته ترانسفورماتور

۲- تاثیر هارمونیک بر کاهش ظرفیت و طول عمر ترانسفورماتور

۵.۱.۴.۲ کلیدها:

کلیدها وسایلی هستند که در صورت لزوم، جریان مدار را قطع می‌کنند. عملکرد صحیح آنها بسته به شکل موج جریانی دارد که قرار است توسط کلید قطع شود. در نتیجه در صورت وجود هارمونیک در جریان، امکان دارد شکل موج آن بگونه‌ای باشد که در حوالی جریان صفر، تغییرات جریان (مشتق آن) مقدار بزرگی شود، که در نتیجه سبب بروز اشکال در قطع شدن جریان می‌گردد.

در بعضی از دژنکتورهایی که دارای سیم‌پیچ طولانی کننده قوس می‌باشند، علت خرابی ناشی از عدم عملکرد موفق در شرایط هارمونیک است، زیرا در هنگام عمل قطع، سیم‌پیچ مزبور سبب حرکت قوس به مجرای خارجی می‌شود که در صورت وجود هارمونیک، امیدانس آنها افزایش می‌یابد، در نتیجه قوس دیرتر خاموش می‌شود که این امر سبب آسیب رسیدن به دژنکتور می‌گردد.



در حال حاضر استاندارد دی در خصوص سطح هارمونیک‌های مجاز در مورد کلیدها وجود ندارد، ولی بنظر می‌رسد وجود حدود ۵ درصد هارمونیک، اثری در عملکرد کلیدها نداشته باشد. موضوع مهم در کلیدها، شکل موج در زمان صفر شدن جریان و همچنین میزان تغییرات آن (مقدار مشتق آن) در این زمان است.

۶.۱.۴.۲ فیوزها:

وجود هارمونیک در شبکه، باعث تغییر منحنی مشخصه جریان-زمان فیوز و در نتیجه افزایش دمای آن می‌شود. این امر بخصوص در جریانهای اتصال کوتاه پایین، بیشتر نمایان می‌گردد. وجود هارمونیک‌ها در این شرایط می‌تواند سبب عملکرد سریعتر فیوز شده، که این امر می‌تواند سبب بروز خطا در شبکه شود.

۷.۱.۴.۲ لامپ‌های روشنایی و المان‌های حرارتی

با افزایش اعوجاجات ولتاژ اعمالی، توان مصرفی و در نتیجه دمای المانهای حرارتی افزایش می‌یابد، که این امر موجب کاهش طول عمر مفید لامپ‌های رشته‌ای و المانهای حرارتی می‌گردد.

#### ۲.۴.۲ کنترل، حفاظت و اندازه‌گیری [1]

هارمونیک‌ها عواملی هستند که بر میزان دقت وسایل اندازه‌گیری تاثیر می‌گذارند. زمانی که موج ولتاژ یا جریان غیر سینوسی باشد، مفاهیم و تعاریفی که وسایل اندازه‌گیری براساس آنها کار می‌نمایند، تغییر می‌کند. به همین دلیل عملکرد تجهیزات اندازه‌گیری توانهای اکتیو، راکتیو، ظاهری و ضریب قدرت و ... می‌تواند به دلیل وجود هارمونیک‌ها دچار خطا شود.

۱.۲.۴.۲ رله‌های حفاظتی:

همانطور که میدانیم، رله‌ها وسایل حفاظتی هستند که بخشی از سیستم که خطا در آن رخ داده‌است را از بقیه شبکه ایزوله می‌نماید، بطوریکه بقیه سیستم بطور عادی کار خود را دنبال نماید. در چنین عملکردی سیستم

حفاظتی باید قادر به تشخیص حالت عادی و وجود خطا در سیستم باشد و بنحوی طراحی شده باشد که فقط در مقابل بروز خطا عکس‌العمل نشان دهد.

با چنین دیدی از عملکرد رله‌ها هر عاملی که سبب تاخیر و تسریع بی‌مورد در عملکرد آنها گردد، مشکلات زیادی را برای شبکه‌های انتقال و توزیع به همراه خواهد داشت. از مهمترین عواملی که سبب عملکرد نامناسب رله‌ها می‌شوند، میتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- تنظیم نامناسب رله

- تنظیم نامناسب رله در ارتباط با دیگر رله‌ها

- تاثیر هارمونیک‌ها بر روی رله‌ها

رله‌ها با توجه به ساختار و سیستم عملکردشان به یک یا هر دو نوع هارمونیک ولتاژ یا جریان می‌توانند حساس باشند. بطور کلی عکس‌العمل رله‌ها در مقابل هارمونیک بصورت زیر می‌باشد:

- رله‌های استاتیکی که بایستی به مقدار موثر جریان حساس باشند، معمولاً براساس اندازه‌گیری پیک موج جریان کار می‌کنند. یعنی باتوجه به سینوسی بودن موج، مقدار موثر آنرا محاسبه می‌نمایند. در نتیجه اگر شکل موج جریان دارای هارمونیک باشد، مقدار مؤثری که محاسبه می‌نمایند، صحیح نبوده و دارای خطای عملکرد خواهند بود. ولی این امر در مورد رله‌های الکترومکانیکی که در گذشته به جای رله‌های استاتیکی مورد استفاده قرار می‌گرفتند، صادق نیست. علت این امر وجود عناصر مکانیکی در ساختار رله می‌باشد که بعنوان یک فیلتر بالاگذر عمل نموده و عملاً هارمونیک‌های فرکانس بالا را نمی‌بینند. در رله‌های نسل جدید میکروپروسسوری نیز به علت استفاده از فیلترهای مختلف، اثر هارمونیک‌های دائمی بر روی رله‌ها تا حدی کاسته شده‌است.

- در برخی رله‌های اضافه جریان، عملکرد رله بستگی به شکل موج جریان دارد و نمی‌توان با استفاده از درصد میزان هارمونیک‌ها، عملکرد آن را مورد بررسی قرارداد. بدین ترتیب اگر چند موج با شکلی متفاوت ولی میزان

هارمونیک یکسان به رله اعمال شود، بدلیل وجود اختلاف فاز متفاوتی که هارمونیک‌ها با شکل موج اصلی دارند، پاسخهای آن متفاوت خواهد بود.

- رله‌هایی که دارای تاخیر زمانی هستند، زمان عملکردشان شدیداً تحت تاثیر هارمونیکها قراردارند.

- در رله‌ها بسته به توالی هارمونیک‌ها ممکن است، گشتاور عمل‌کننده آن معکوس شود.

- رله‌های استاتیکی فرکانس، بشدت تحت تاثیر هارمونیک ولتاژ قراردارند، بگونه‌ای که وجود ۱۰ درصد هارمونیک ولتاژ ممکن است زمان عملکرد آنها را به دو برابر افزایش دهد.

- هارمونیک‌ها باعث ایجاد تاخیر در عملکرد سریع رله‌های دیفرانسیل می‌شوند.

- وجود توالی صفر جریان ناشی از هارمونیکهای مرتبه ۳ بر رله‌های جریان زمین تاثیر گذاشته، باعث دادن فرمان قطع اشتباه می‌گردد.

با توجه به مطالب مزبور، میتوان نتیجه گرفت که پیدا کردن تاثیر هارمونیکها و تعیین دقیق آنها بدون انجام آزمایش بر روی رله‌ها و نیز بدون اطلاع از ساختمان و سیستم عملکرد آنها بسیار مشکل و یا تقریباً غیرممکن است. اما بطور کلی در صورتی که سطح هارمونیک‌های دائمی ولتاژ در حد معمول کمتر از ۵ درصد قرارگیرد، عملکرد رله‌ها چندان تغییر نمی‌نماید.

- وجود هارمونیکهای گذرا در شبکه‌های قدرت ناشی از عواملی نظیر کلیدزنی بار، کلیدزنی بانک‌های خازنی، کلیدزنی ترانسفورمرها و ... می‌تواند بر عملکرد انواع رله‌های حفاظتی تاثیر گذارد.

۲.۲.۴.۲ وات مترها و وارمترها

واتمترهای القایی تحت تاثیر فرکانس قرار می‌گیرند، زیرا گشتاور وارد شده به دیسک آنها متناسب است با شار و جریان گردابی که در آنها القا می‌شود. با افزایش مرتبه هارمونیک، فرکانس افزایش می‌یابد که این امر بطور

غیرمستقیم سبب کاهش شار و جریان گردابی می‌شود. به عبارت دیگر مقادیری که وات‌مترها نشان می‌دهند، کمتر از مقدار واقعی است. میزان تقریبی خطا برای هارمونیک دوم حدود ۵ درصد و برای هارمونیک دهم برابر با ۵۶ درصد می‌باشد. از سوی دیگر اثر هارمونیکها بر روی وسایل اندازه‌گیری بستگی به جهت عبور جریان هارمونیک نیز دارد.

#### ۳.۴.۲ اثر هارمونیک‌ها بر سیستمهای مخابراتی [1]

از مهمترین مسائلی که هارمونیک جریان ایجاد می‌نماید، تداخلات مخابراتی است. جریانهای هارمونیکی بصورت القا و یا هدایت مستقیم، وارد سیستمهای مخابراتی می‌شوند. این نوع تداخل زمانی در سیستمهای مخابراتی ای که از سیمهای معمولی استفاده می‌شد، بسیار شایع بود. اما با توجه به اینکه در حال حاضر از سیستمهای تلفی که دارای حفاظ هستند و یا بصورت زوج به هم پیچیده شده‌اند، استفاده می‌شود، اثر کوپلاژ القایی کمتر شده- است. با این وجود اگر میزان جریان هارمونیکی زیاد باشد، کوپلاژ القایی در حفاظ، افزایش خواهد یافت و در این حالت نیز مشکل کماکان وجود دارد. در چنین شرایطی افت ولتاژ IR در حفاظ ایجاد خواهد شد.

#### ۴.۴.۲ تاثیرات دیگر هارمونیکها [1]

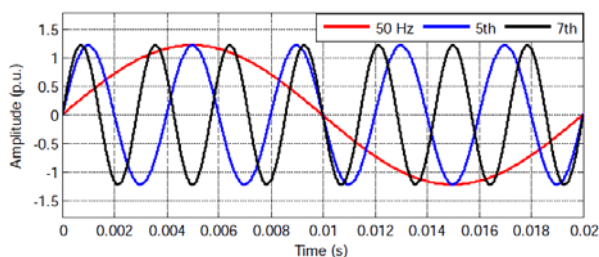
هارمونیکها علاوه بر موارد ذکر شده اثرات دیگری نیز به همراه دارند، که بصورت زیر می‌باشند:

- تاثیر هارمونیکها بر سیستمهایی که وظیفه انتقال فرمان سیستمهای کنترل از راه دور را بر عهده دارند. چنین تاثیری عملکرد نامناسبی را برای دستگاه اصلی باقی می‌گذارد.
- هارمونیکها سبب اشباع هسته ترانسفورماتورهای ولتاژ گردیده و باعث افزایش خطای اندازه‌گیری می‌شود. در ترانسفورماتورهای جریان این تاثیر کمتر است، ولی انرژی و توان و زاویه فاز ترانسفورماتور جریان تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

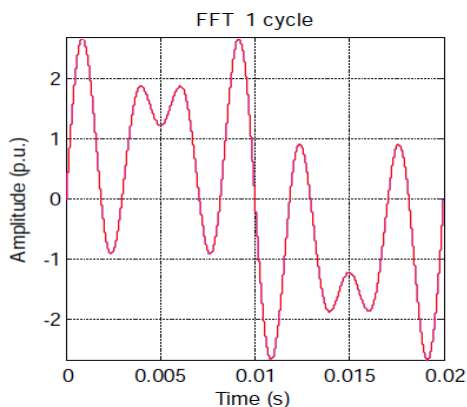
- هارمونیک توالی صفر بر سیستم زمین تاثیر می‌گذارد و لازم است در انتخاب شرایط نامی چنین تجهیزاتی این امر مورد توجه قرار گیرد.
- هارمونیکها بر عملکرد سیستمهای کنترل تاثیر می‌گذارند.

## ۵.۲ آنالیز فوریه و لایه های هارمونیک

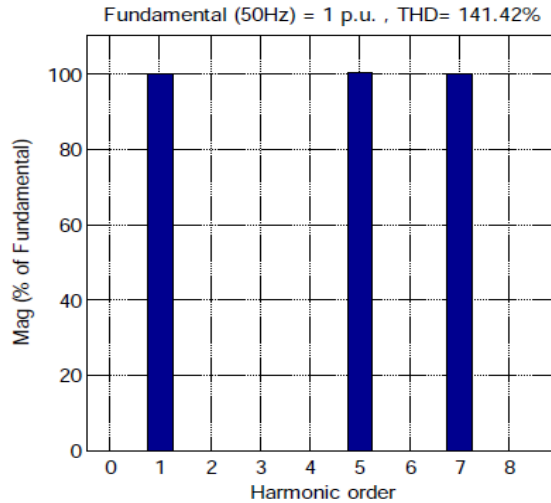
یک تابع پیروی یک را می‌توان با استفاده از بسط فوریه بصورت مجموعه ای از سیگنالها با فرکانسهایی که مضرب صحیحی از فرکانس موج اصلی هستند تجزیه نمود. برای یک سیستم ترکیب هارمونیکها با فرکانس موج اصلی، در شکل های ۱.۲ و ۲.۲ نشان داده شده‌است. تبدیل فوریه برای تفکیک هارمونیکها در سیگنال ترکیبی انجام می‌شود همانطور که در شکل ۳.۲ آورده شده‌است. طیف هارمونیکی با استفاده از محاسبه ضرایب فوریه بدست می‌آید. بنابراین آنالیز فوریه امکان تجزیه و تحلیل سیگنال هارمونیک را فراهم می‌کند.



شکل ۱.۲ سیگنال اصلی، هارمونیک های مرتبه پنجم و هفتم [4]



شکل ۲.۲ سیگنال اصلی ترکیب شده با هارمونیک های مرتبه پنجم و هفتم [4]



شکل ۳.۲ آنالیز فوریه برای تفکیک هارمونیک ها [4]

## ۶.۲ استاندارد حدود هارمونیک ها

برای تعیین حدود مجاز هارمونیک‌ها تعدادی استاندارد هارمونیکی وجود دارد. این حدود به مشخصات سیستم از قبیل سطح ولتاژ و سطح توان بستگی دارد.

THD<sup>۶</sup> برای اندازه گیری مقدار هارمونیک یک شکل موج که ممکن است ولتاژ یا جریان باشد استفاده می‌شود.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \quad (۱.۲)$$

استاندارد هارمونیکی پیشنهادی IEEE 519 به عنوان یک راهنما در سال ۱۹۸۱ معرفی شد و در سال ۱۹۹۲ تجدیدنظر گردید. این استاندارد حدود جریان‌های هارمونیکی را به گونه‌ای بیان می‌کند که سطوح ولتاژ هارمونیکی در سرتاسر شبکه قدرت قابل قبول باشد.

<sup>۶</sup>Total harmonic distortion

جدول ۱.۲ IEEE 519 حدود جریان هارمونیکی [2]

$I_{sc}/I_L$	$<11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
$<20$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$>1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

جدول ۲.۲ حدود اعوجاج ولتاژ [2]

Bus Voltage at PCC	Maximum Individual Harmonic Component %	Maximum THD%
69kV and Below	3.0	5.0
69.001kV Through 161kV	1.5	2.5
161.001kV and Above	1.0	1.5

## ۷.۲ تکنیک های جبران هارمونیکی

تکنیک های مختلفی برای کاهش هارمونیکی ها به منظور برآوردن استانداردهای هارمونیکی ارائه شده است. اما در حالت کلی این تکنیک ها را می توان به دو دسته تقسیم بندی کرد:

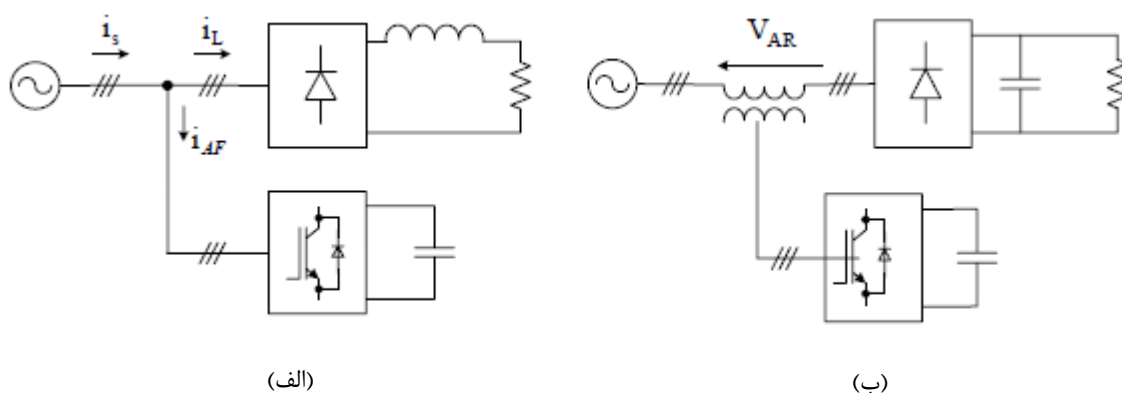
(۱) فیلترهای اکتیو قدرت

(۲) فیلترهای پسیو قدرت

هدف از این تکنیک ها رساندن شکل موج جریان ورودی به فرم سینوسی خالص به صورتی که THD جریان کاهش یابد.

## ۱.۷.۲ فیلترهای اکتیو قدرت

روش جبران هارمونیک اکتیو تقریباً روش جدیدی برای حذف هارمونیک‌ها می‌باشد. ایده اصلی در فیلترهای اکتیو بدین گونه می‌باشد که با تزریق دامنه معادل هارمونیک‌های ولتاژ/جریان تولید شده توسط بار غیرخطی و با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز، اثر هارمونیک‌ها را اینگونه خنثی کنیم. فیلترهای اکتیو می‌توانند براساس نوع مبدل، توپولوژی و تعداد فازها دسته‌بندی شوند.



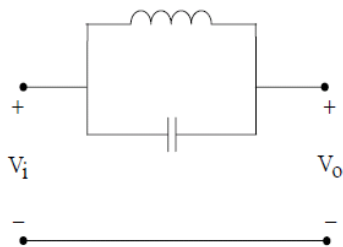
شکل ۴.۲ پیکربندی های اصلی فیلتر اکتیو (الف) فیلتر اکتیو موازی (ب) فیلتر اکتیو سری [2]

## ۲.۷.۲ فیلترهای پسیو قدرت

در فیلترهای پسیو از جاری شدن جریان‌های هارمونیک ناخواسته به داخل سیستم قدرت می‌توان بوسیله یک امپدانس سری بالا برای بلوک هارمونیک‌ها، یا منحرف کردن آنها به یک مسیر موازی امپدانس پایین جلوگیری کرد.

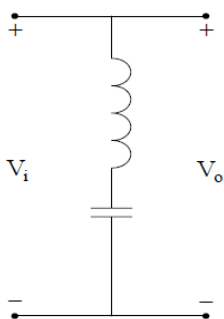
فیلتر پسیو سری شامل سلف و خازن موازی هم که طوری تیون می‌شوند که امپدانس بالایی را در فرکانس هارمونیک انتخابی و امپدانس پایینی را در فرکانس اصلی ایجاد کند. برای بلوک چند هارمونیک چند فیلتر سری نیاز می‌باشد. در شکل ۵.۲ ساختار فیلتر پسیو سری آورده شده‌است.





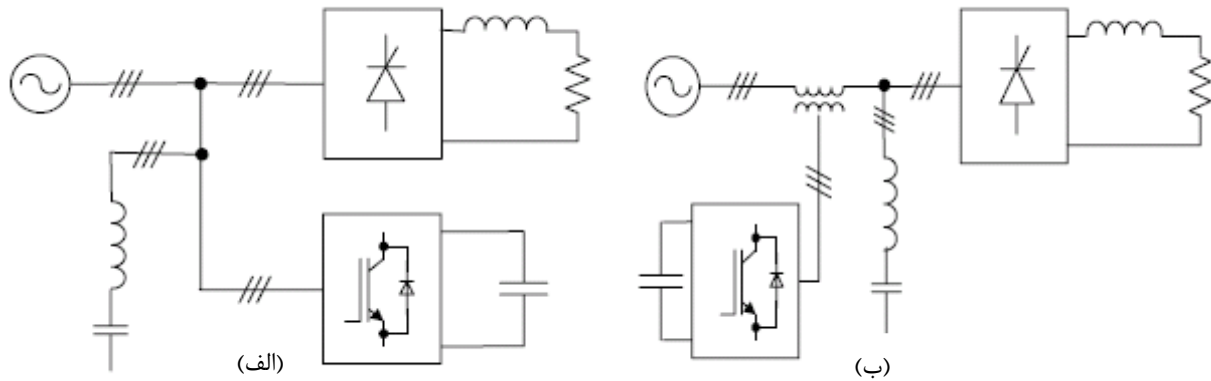
شکل ۵.۲ ساختار فیلتر پسیو سری [2]

فیلترهای موازی مسیری با امپدانس بسیار پایین را در فرکانس تیون ایجاد می‌کند و بیشتر جریان هارمونیکی در آن فرکانس از این مسیر عبور می‌کند. در شکل ۶.۲ ساختار فیلتر پسیو موازی آورده شده است. رایج‌ترین انواع فیلتر موازی فیلترهای تک تنظیمه و بالاگذر می‌باشد. این دو فیلتر طراحی ساده و کاربرد آسان میان انواع دیگر این نوع فیلتر دارند. از آنجایی که فیلترهای سری باید توانایی عبور جریان را در حالت بار کامل داشته باشند بنابراین تلفات قابل توجهی را ایجاد می‌کنند. در مقابل فیلترهای موازی تنها کسری از این جریان را از خود عبور می‌دهند بنابراین بدلیل هزینه بالاتر فیلترهای سری و این حقیقت که فیلترهای موازی می‌توانند توان راکتیو را در فرکانس اصلی تامین کنند در بیشتر روش‌های عملی معمولاً از فیلترهای موازی استفاده می‌کنند. در ادامه ساختار انواع فیلترهای موازی آورده شده است.



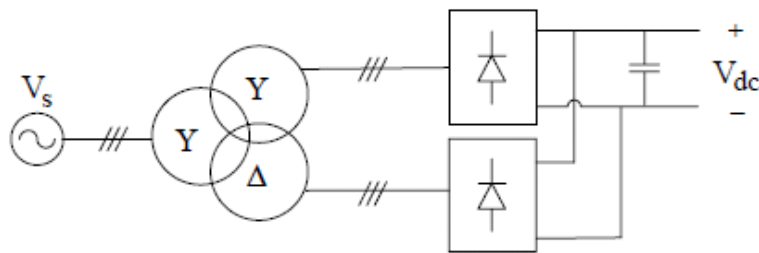
شکل ۶.۲ نمونه ای از فیلتر پسیو شنت [2]

روش دیگر استفاده از فیلترهای هیبرید می‌باشد که ترکیبی از فیلترهای پسیو و اکتیو می‌باشد و با ساختارهای مختلفی ترکیب می‌شوند. هدف اصلی استفاده از فیلترهای هیبرید کاهش هزینه‌های اولیه و بهبود بازده می‌باشد.



شکل ۷.۲ پیکربندی‌های رایج فیلترهای اکتیو هیبرید: (الف) فیلتر اکتیو شنت و فیلتر پسیو شنت، (ب) فیلتر اکتیو سری و فیلتر پسیو شنت [2]

تکنیک‌های دیگری از جمله سیستم‌های افزایش فاز و یکسوکندده‌های PWM<sup>۷</sup> نیز برای جبران هارمونیک‌ها استفاده می‌شوند. در شکل ۸.۲ ساختار یکسوکندده ۱۲ پالسه آورده شده است.



شکل ۸.۲ پیکربندی سیستم یکسوساز 12 پالسه [2]

## ۸.۲ آنالیز پخش بار هارمونیکی

مطالعه پخش بار هارمونیکی برای تعیین جریان‌ها و ولتاژهای هارمونیکی در هر نقطه استفاده می‌شود. توضیحات این کار در ذیل آورده شده است:

### ۱.۸.۲ تشکیل ماتریس امپدانس هارمونیکی [3]

<sup>7</sup> Pulse Width Modulation

با در نظر گرفتن یک شبکه  $n$  باسه قبل از اضافه کردن یک فیلتر در باس  $m$  همانطور که در شکل ۱۰.۲ نشان داده شده است ماتریس ادمیتانس هارمونیکی برابر است با:

$$Y_{bus}(h) = \begin{bmatrix} Y_{11}(h) & Y_{12}(h) & \dots & Y_{1m}(h) & \dots & Y_{1n}(h) \\ Y_{21}(h) & Y_{22}(h) & \dots & Y_{2m}(h) & \dots & Y_{2n}(h) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{m1}(h) & Y_{m2}(h) & \dots & Y_{mm}(h) & \dots & Y_{mn}(h) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1}(h) & Y_{n2}(h) & \dots & Y_{nm}(h) & \dots & Y_{nn}(h) \end{bmatrix} \quad (۲.۲)$$

ماتریس Z-bus برابر است با:

$$Z_{bus}(h) = \frac{1}{Y_{bus}(h)} \quad (۳.۲)$$

اگر امپدانس نقطه کار باس  $m$  را بتوان بصورت زیر بیان کرد:

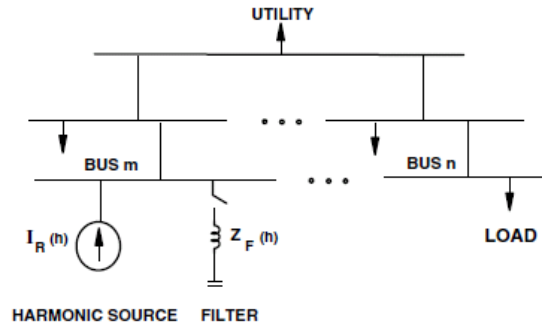
$$Z_{mm}(h) = R_{mm} + jX_{mm} \quad (۴.۲)$$

بعد از اضافه کردن یک فیلتر در باس  $m$  ماتریس Z-bus جدید برابر می شود با :

$$Z^{(F)}_{bus}(h) = \begin{bmatrix} Z^{(F)}_{11}(h) & Z^{(F)}_{12}(h) & \dots & Z^{(F)}_{1m}(h) & \dots & Z^{(F)}_{1n}(h) \\ Z^{(F)}_{21}(h) & Z^{(F)}_{22}(h) & \dots & Z^{(F)}_{2m}(h) & \dots & Z^{(F)}_{2n}(h) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z^{(F)}_{m1}(h) & Z^{(F)}_{m2}(h) & \dots & Z^{(F)}_{mm}(h) & \dots & Z^{(F)}_{mn}(h) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z^{(F)}_{n1}(h) & Z^{(F)}_{n2}(h) & \dots & Z^{(F)}_{nm}(h) & \dots & Z^{(F)}_{nn}(h) \end{bmatrix} \quad (۵.۲)$$

که  $Z^{(F)}_{mm}$  امپدانس نقطه کار باس  $m$  بعد از اضافه کردن فیلتر می باشد.

$$Z^{(F)}_{mm} = \frac{Z_{mm}(h)Z_F(h)}{Z_{mm}(h)+Z_F(h)} \quad (۶.۲)$$



شکل ۹.۲ دیاگرام تک خطی شبکه  $n$  باسه [3]

### ۲.۸.۲ تشکیل ماتریس منبع هارمونیکی

در اینجا روش جریان تزریقی استفاده می شود و یکسوکونده ها به صورت بردار منبع هارمونیکی ثابت معادل می شوند.

$$[I_R(h)] = \begin{bmatrix} I_{h1}(h) \\ I_{h2}(h) \\ \vdots \\ I_{hn}(h) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

### ۳.۸.۲ محاسبه ولتاژ هارمونیکی

قبل از قرار دادن فیلتر ولتاژ باس هارمونیکی برابر است با:

$$[V(h)] = [Z_{bus}(h)][I_R(h)] \quad (8.2)$$

اگر یک بانک فیلتری اضافه شود ولتاژهای هارمونیکی از رابطه زیر بدست می آیند:

$$[V(h)] = [Z_{bus}^{(F)}(h)][I_R(h)] \quad (9.2)$$

اگر یک منبع هارمونیکی تک در باس  $m$  متصل شود. سپس با فیلتر ولتاژ هارمونیکی در باس  $m$  برابر است با:

$$V_m(h) = Z_{mm}^{(F)}(h)I_R(h) \quad (10.2)$$

## فصل سوم

### فیلترهای پسیو

### ۱.۳ معرفی

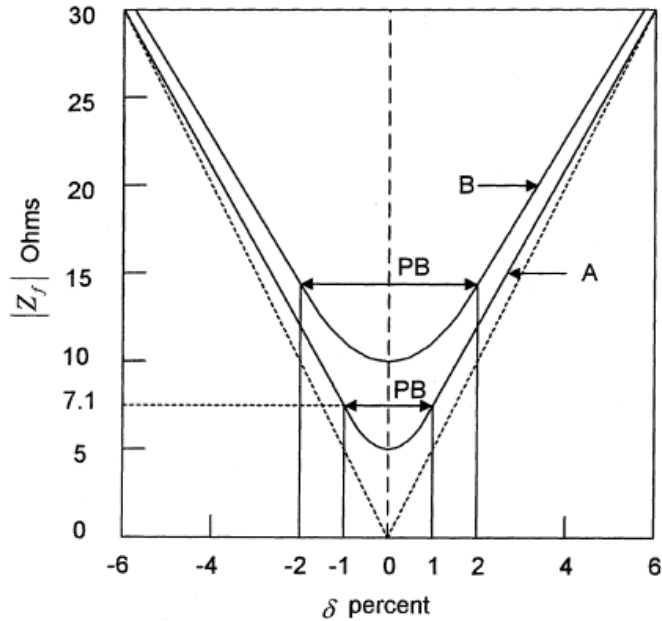
فیلترهای هارمونیک پسیو از عناصر پسیو سلف، مقاومت و خازن تشکیل شده‌اند. این نوع فیلتر از نظر نوع اتصال به دو دسته سری و موازی دسته بندی می‌شود. در قسمت قبل ساختار این دو دسته نشان داده شد. در فیلتر سری هارمونیک‌هایی با جهت عکس تولید می‌شود که با جمع ولتاژ دو سر بار، ولتاژ سینوسی را در ورودی خواهیم داشت. در مقابل فیلتر شنت یک مسیر کم امپدانس را برای هارمونیک خاص ایجاد می‌کند در نتیجه جریان هارمونیک در شبکه جاری نمی‌شود. رایج ترین انواع فیلترهای پسیو، فیلترهای تیون شده و فیلترهای بالاگذر می‌باشد. در فیلتر تنظیم شده به ازای هر هارمونیک یک فیلتر طراحی می‌شود که فرکانس تشدید آن برابر فرکانس هارمونیک مورد نظر می‌باشد تا یک مسیر کم مقاومت برای جاری شدن جریان هارمونیک را در خود ایجاد کند. امپدانس فیلتر تیون برابر است با:

$$Z = R + j\omega_n L + \frac{1}{j\omega_n C} \quad (1.3)$$

در فرکانس تشدید مقدار راکتانس سلف و خازن یکی خواهد شد. در شکل ۱.۳ پهنای باند فیلتر نشان داده شده است.

پارامتری که در طراحی فیلتر مطرح است ضریب کیفیت آن می‌باشد. ضریب کیفیت فیلتر نشان دهنده تیزی فیلتر است. ضریب کیفیت بالا، پهنای باند کمتر و فیلتر تیزتری را نتیجه می‌دهد. ضریب کیفیت  $Q$  بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad (2.3)$$



شکل ۱.۳ پهنای باند فیلتر تک تیون [5]

که  $X_0$  راکتانس خازن یا سلف (در فرکانس تیون) و  $R$  مقاومت میرایی می‌باشد. (ترکیبی از مقاومت فیلتر و مقاومت اضافه شده به فیلتر). چون هدف طراحی برای تک هارمونیک می‌باشد نیازی به پهنای باند وسیع نداریم بنابراین معمولاً  $Q$  را ۲۵ در نظر می‌گیرند.

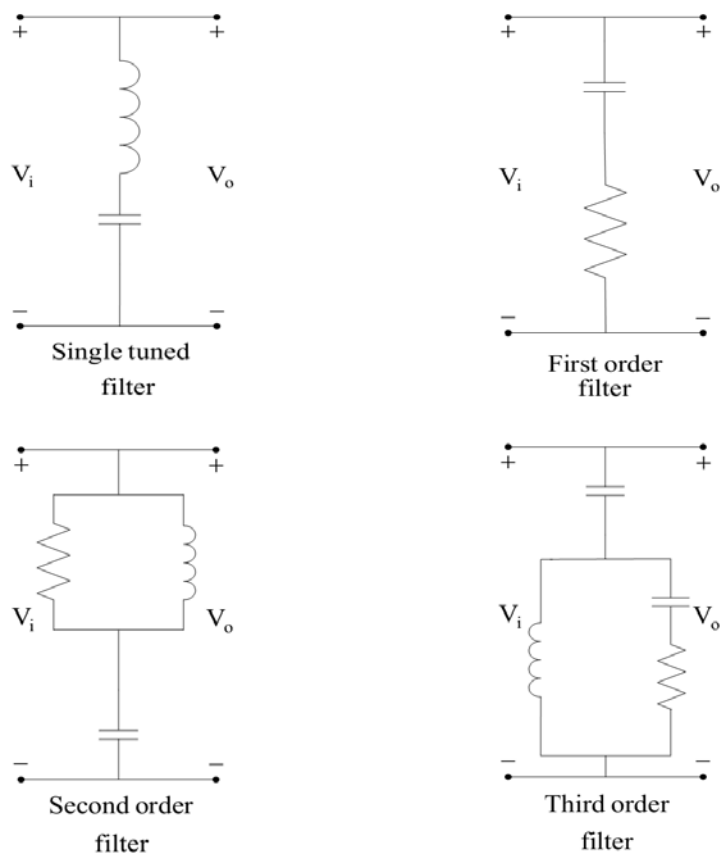
پارامتر دیگر در مبحث طراحی فیلتر  $\delta$  می‌باشد که تغییرات بوجود آمده فرکانس نسبت به مقدار نامی را بیان می‌کند.

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} \quad (۳.۳)$$

### ۲.۳ ساختار انواع فیلترهای پسیو

فیلترهای هارمونیکی پسیو از سه عنصر مقاومت، سلف و خازن تشکیل می‌شوند. این نوع فیلترها نوعاً شامل فیلترهای تک تیون و دو تیون و فیلترهای تضعیف کننده مرتبه دوم و سوم و نوع  $C$  می‌باشد. فیلتر دو تیون معادل دو فیلتر تک تیون که بطور موازی نصب شده‌اند می‌باشد. فیلتر تک تیون معمولاً بر روی یک فرکانس

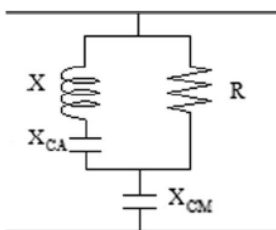
خاص تنظیم گردیده و مقاومت در نظر گرفته شده همان مقاومت سلف می باشد. این نوع فیلتر میرایی زیادی را روی هارمونیک های فرکانس تنظیم ایجاد می کنند اما باعث تشدید موازی می شوند. فیلتر تضعیف کننده مرتبه دوم دارای عملکرد خوبی است ولی در مقایسه با فیلتر مرتبه سوم تلفات آن در فرکانس اصلی زیاد می باشد. در فیلتر نوع C برای کاهش تلفات در فرکانس اصلی از تشدید بین L و C استفاده می شود. از فیلترهای تک تنظیمه برای حذف چند مؤلفه هارمونیک مرتبه پایین که دامنه بزرگتری نسبت به مؤلفه های هارمونیک مرتبه بالا دارند استفاده شده و سپس برای کاهش هارمونیکهای مراتب بالاتر از فیلتر بالاگذر استفاده می شود. فیلترهای بالاگذر جریان های هارمونیک مرتبه بالا را جبران می کنند اما بدلیل تلفات زیادشان در فرکانسهای مرتبه پایین تنظیم نمی شوند [2].



شکل ۲.۳ انواع رایج فیلترهای پسیو موازی [2]

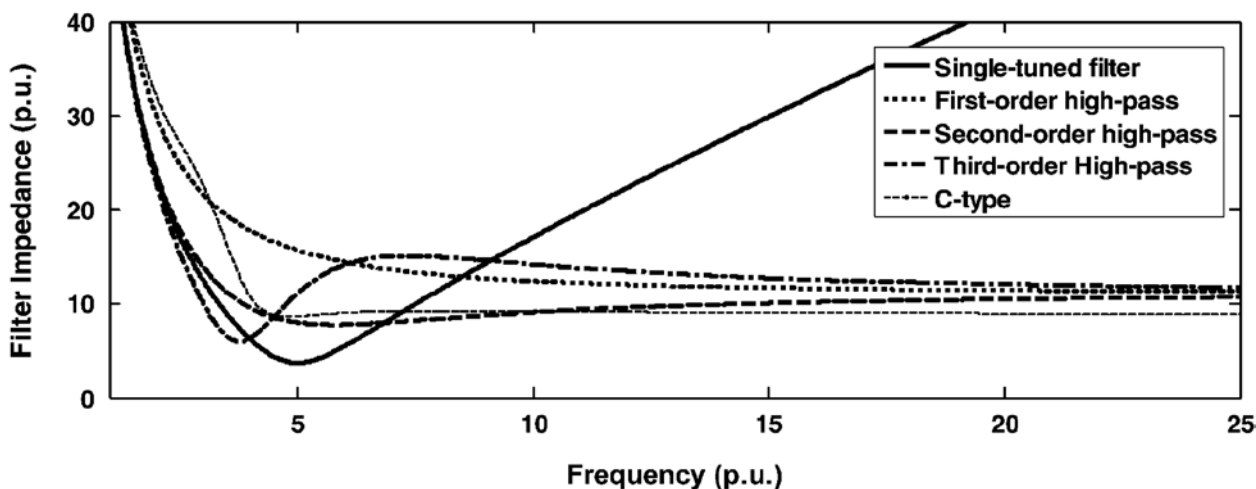


در مرجع [6] از فیلترهای نوع C برای مهار هارمونیک‌ها استفاده شده است. شکل ۳.۳ مدل مداری یک فیلتر نوع C را نمایش می‌دهد. مؤلفه های L و  $C_A$  در فرکانس اصلی به تشدید می‌روند بنابراین تلفات توان روی مقاومت میرایی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر دامنه راکتانس خازنی در  $C_A$  معادل دامنه راکتانس سلفی در فرکانس اصلی می‌باشد. با افزایش فرکانس، سلف با  $C_A + C_M$  به تشدید می‌رود که باعث می‌شود فیلتر به صورت یک فیلتر تک‌تیون با مقاومت میرایی R عمل کند. در فرکانسهای بالا دامنه راکتانس سلفی بزرگ می‌شود و بنابراین بیشتر جریان هارمونیک از شاخه مقاومتی عبور می‌کند. ملاحظه می‌شود که در فرکانسهای مختلف ساختار فیلتر پسیو نوع C ترکیبی از توپولوژی های مختلف فیلتر پسیو می‌باشد [6].



شکل ۳.۳ نمایش مدل مداری ساختار فیلتر نوع C [6]

در شکل ۴.۳ پاسخ های فرکانسی انواع مختلف فیلتر پسیو نشان داده شده است.



شکل ۴.۳ پاسخ فرکانسی فیلترهای پسیو موازی [7]

### ۳.۳ روش طراحی فیلتر پسیو

اگرچه تکنولوژی فیلترینگ اکتیو و ویژگیهای عملکرد آن کارساز می‌باشد، تکنیک فیلتر پسیو هنوز رایج‌ترین روش برای محدود کردن هارمونیک‌های جریان می‌باشد، بدین دلیل که همهی مؤلفه‌های فیلتر، پسیو می‌باشند. پروسه طراحی و پیاده سازی فیلتر نسبتاً آسان است و مهمتر اینکه هزینه فیلتر پایین می‌باشد و بدون هیچ الگوریتم کنترلی پیچیده‌ای طراحی و پیاده سازی می‌شوند.

از میان ساختارهای مختلف فیلتر پسیو، از آنجایی که فیلترهای تیون شده و بالاگذر رایج‌ترین نوع این فیلترها می‌باشند (که در این پایان نامه نیز به منظور طراحی از آنها استفاده شده است) در ادامه روال طراحی این دو نوع فیلتر آورده شده است.

#### روال طراحی فیلتر تیون شده:

- مقدار ظرفیت خازن (ها)ی فیلتر(ها) را برحسب مقدار توان راکتیو مورد نیاز بارها محاسبه می‌کنیم. مثلاً اگر هدف، طراحی چهار فیلتر تیون شده و یک فیلتر بالاگذر باشد میزان توان راکتیو تولیدی هر خازن می‌تواند ۱/۵ برابر توان راکتیو کلی بار باشد. بنابراین دیگر نیاز به استفاده از خازن‌های جبران ساز نیست.
- انتخاب Q و یا محاسبه Q اپتیمم (در عمل معمولاً Q=25 در نظر گرفته می‌شود).
- مقدار f را برابر فرکانس هارمونیک موردنظر در نظر می‌گیریم.
- در نهایت مقادیر R,L را از روابط زیر بدست می‌آوریم.

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{1}{2\pi fCR} \rightarrow R = ? \quad (۴.۳)$$

$$X_0 = 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow L = ? \quad (۵.۳)$$

$\omega_n$  فرکانس تیون برابر است با :

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (۶.۳)$$

اگر  $X_0$  راکتانس خازن یا راکتور سلف در فرکانس تیون باشد داریم:

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (۷.۳)$$

امپدانس رزونانس برابر است با:

$$Z_0 = j[\omega L - \frac{1}{\omega C}] \quad (۸.۳)$$

فرکانس رزونانس سری متناظر در جایی که فیلتر تیون شده است:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (۹.۳)$$

فرکانس رزونانس موازی که بین مؤلفه‌های فیلتر تک تیون و راکتور کلی خط اتفاق می‌افتد برابر است با:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_s+L)C}} \quad (۱۰.۳)$$

اصولاً فرکانس رزونانس سری را 3-8 درصد زیر فرکانس هارمونیک مورد نظر، بصورت زیر انتخاب می‌کنند.

$$df\% = \frac{f_h - f_s}{f_h} \times 100 \quad (۱۱.۳)$$

این کار به چند دلیل انجام می‌شود. یکی از آن دلایل اینست که در عمل مقدار خازن فیلتر به دلیل فرسودگی کاهش می‌یابد و در نتیجه فرکانس تیونینگ افزایش می‌یابد و طراحی در فرکانس تیونینگ یا بالای فرکانس تیونینگ باعث عملکرد نامناسب فیلتر می‌شود. دلیل دیگر اینست که در تیونینگ کامل، هارمونیک‌های غالب بارهای غیرخطی مجاور جذب می‌شوند و باعث اضافه جریان در فیلتر و شکست آن می‌شود. دلیل سوم که ممکن است ضروری باشد اینست که فرکانس تشدید موازی را دور از فرکانس هارمونیک قرار دهیم تا از تشدید موازی در فرکانس هارمونیک مورد نظر اجتناب کنیم.

## روال طراحی فیلتر بالاگذر:

از آنجایی که این نوع فیلتر برای حذف هارمونیک‌های مراتب بالا استفاده می‌شود ابتدا فرکانس  $f_0$  را به گونه‌ای تعیین می‌کنیم که هارمونیک‌های با فرکانس بالاتر از آن مقدار حذف شوند. پارامتر دیگر طراحی  $m$  ضریب میرایی فیلتر می‌باشد که معمولاً بین مقدار  $0/5$  تا  $2$  تغییر می‌کند. این دو پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شوند و با استفاده از آنها می‌توان مقادیر المان‌های فیلتر را بدست آورد. میزان خازن فیلتر بگونه‌ای تعیین می‌شود که میزان توان راکتیو مورد نیاز بار فراهم شود.

$$m = \frac{L}{R^2 C} \quad \longrightarrow \quad L=? \quad (12.3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad \longrightarrow \quad R=? \quad (13.3)$$

## ۴.۳ روشهای تعیین بهینه پارامترهای فیلتر پسیو

در این قسمت روشهایی برای انتخاب سائز فیلتر بهینه تحت شرایطی که هزینه پارامترهای فیلتر و تلفات آن مینیمم گردد بیان می‌شود. یکی از این روشها استفاده از تکنیک برنامه ریزی خطی می‌باشد [8]. با توجه به اینکه شرایط بار موجود در شبکه شرایطی قطعی نمی‌باشد و در نتیجه میزان هارمونیک در شبکه تغییر می‌کند بنابراین شرایط بار مختلف برای شبکه در نظر می‌گیریم. این شرایط را به سه سطح تقسیم می‌کنیم. یک پروسه بهینه سازی می‌تواند بصورت ماکزیمم کردن یا مینیمم کردن یک تابع هدف به صورتی که تعدادی قیود مسئله رعایت شود تعریف شود. این قیود حوزه مناسب را تعریف می‌کنند یعنی حوزه‌ای که حل‌های مناسب مسئله را شامل می‌شود. تابع هدف در اینجا مینیمم کردن هزینه کل فیلتر می‌باشد که به صورت زیر می‌توان فرموله کرد:

$$\min F = F(R, X_c, X_l) \quad (14.3)$$

قیود نیز به صورت زیر فرموله می شوند :

قید ضریب کیفیت:

$$Q^{min} \leq Q \leq Q^{max} \quad (13.3)$$

قید تشدید:

$$X_0^{min} \leq X_0 \leq X_0^{max} \quad (14.3)$$

قیود پارامترهای فیلتر:

$$X_c^{min} \leq X_c \leq X_c^{max} \quad (15.3)$$

$$X_l^{min} \leq X_l \leq X_l^{max} \quad (16.3)$$

$$R^{min} \leq R \leq R^{max} \quad (17.3)$$

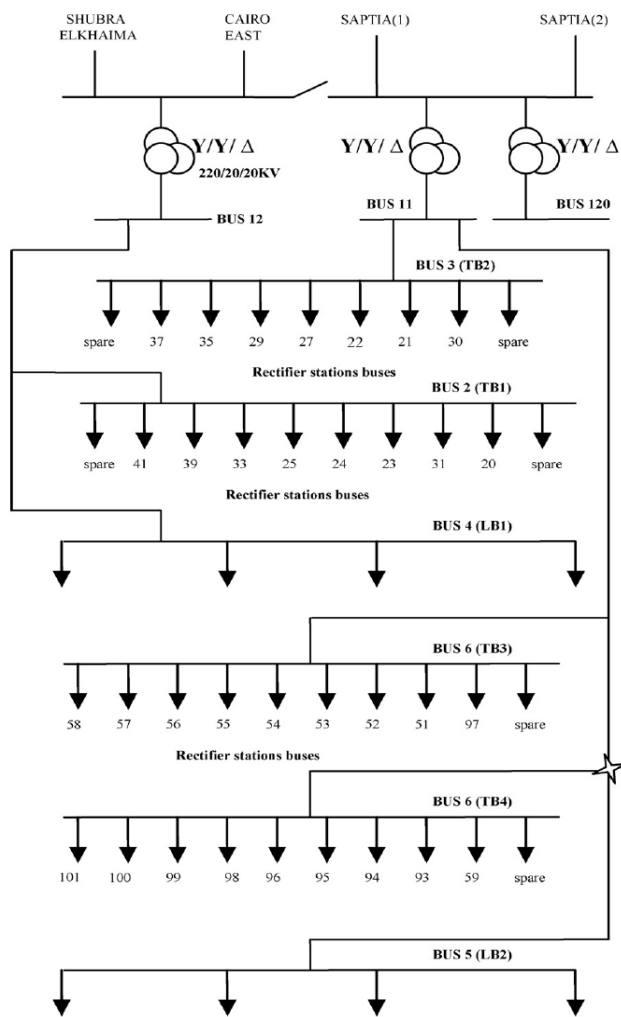
که  $F$  هزینه کل فیلتر،  $R$  مقاومت فیلتر،  $X_c$  راکتانس خازنی در فرکانس اصلی،  $X_l$  راکتانس سلفی در فرکانس اصلی،  $Q$  ضریب کیفیت و  $X_0$  راکتانس تشدید می باشد.

با تعریف تابع هدف و قیود، مسئله را به فرم مسئله برنامه ریزی خطی در می آوریم و با استفاده از این تکنیک حل می توان مقدار پارامترهای فیلتر را بدست آورد.

راه دیگر استفاده از روش برنامه ریزی فازی خطی برای مینیمم کردن تابع هدف و تعیین پارامترهای فیلتر که به عنوان قیود در نظر گرفته شده، می باشد. در این تکنیک مقادیر و عملگرها، مشخصات فازی شده هستند. به صورتی که مدل فازی شده قیود و تابع هدف را باید در نظر بگیریم. محاسبه پارامترهای فیلتر بهینه در طراحی فیلتر پسیو تک تیون به کار گرفته می شود به این منظور که هارمونیکها مینیمم شوند و هزینه کل فیلتر در ضریب

توان بهینه مینم شود [8]. این دو تکنیک در شبکه زیر به کار گرفته شده‌اند و نتایج برای هر کدام از روش‌های

حل آورده شده‌است.



شکل ۵.۳ دیاگرام تک خطی شبکه [8]

جدول ۱.۳ محتوی هارمونیک جریانی و ولتاژ در باس TB4 برای شرایط بار مختلف [8]

Loading conditions	Harmonic order	Voltage $V_h$ (V)	Current $I_n$ (A)
Light load	1st	10585∠-10	130∠6.5
	11th	560∠47.3	23∠-203
	13th	673∠-26	22∠-272
Half load	1st	10417∠-12	259∠-16
	11th	1047∠-12.3	43∠-264
	13th	1221∠-96.5	41.7∠-6.5
Full load	1st	10259∠-13	392∠-20
	11th	1466∠-31	61∠-284
	13th	1658∠-119	57.4∠-7.3

جدول ۲.۳ پارامترهای فیلتر بهینه در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی خطی [8]

Loading conditions	Harmonic order	$R$ ( $\Omega$ )	$C$ ( $\mu$ F)	$L$ (mH)
Light load	11th	2.5	2.89	28.96
	13th	2.1	2.98	20.7
Half load	11th	2.5	2.98	28.96
	13th	2.1	2.98	20.7
Full load	11th	2.5	2.98	28.96
	13th	2.1	2.98	20.7

جدول ۳.۳ سطوح THD باس TB4 در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی خطی [8]

Loading conditions	THD of voltage		THD of current	
	Without filter	With filter	Without filter	With filter
Light load	8.3	1.268	24.8	2.18
Half load	15.5	1.23	23.3	2.21
Full load	21.6	1.312	21.5	2.23

جدول ۴.۳ پارامترهای فیلتر بهینه در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی فازی [8]

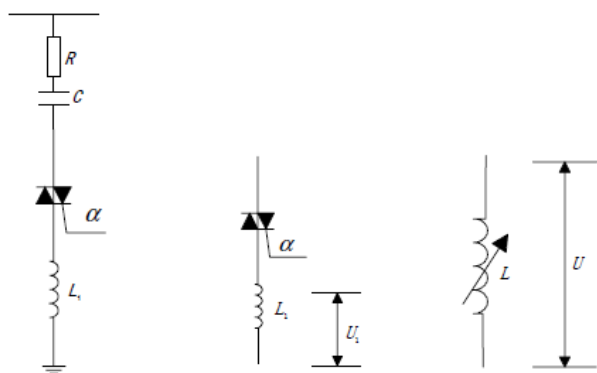
Loading conditions	Harmonic order	$R (\Omega)$	$C (\mu F)$	$L (mH)$
Light load	11th	2.2	2.82	29.6
	13th	1.8	2.82	21.32
Half load	11th	2.3	2.84	29.6
	13th	1.9	2.84	21
Full load	11th	2.4	2.857	29.28
	13th	2	2.857	21

جدول ۵.۳ سطوح THD باس TB4 در شرایط بار مختلف با استفاده از تکنیک برنامه ریزی فازی [8]

Loading conditions	THD of voltage		THD of current	
	Without filter	With filter	Without filter	With filter
Light load	8.3	1.18	24.8	2.04
Half load	15.5	1.2	23.3	2.14
Full load	21.6	1.22	21.5	2.2

از آنجایی که با گذشت زمان مقادیر پارامترهای فیلتر دچار تغییر می‌شوند و بنابراین نقطه تیون فیلترهای پسیو تک تیون جابجا می‌شود یکی از روشهای حل این مشکل استفاده از فیلتر پسیو خودتیون به صورتی که از یک راکتور کنترل شده تریستوری به عنوان یک راکتور متغیر استفاده می‌کند. اندوکتانس معادل راکتور متغیر به طور اتوماتیک با تنظیم زاویه آتش تریستور تغییر می‌کند تا باعث شود که فیلتر همیشه در حالت رزونانس سلف و خازن باقی بماند. زاویه آتش تریستور را می‌توان از اختلاف اندوکتانس و کاپاسیتانس بدست آورد [9]. نتایج شبیه سازی نشان از کارایی این روش دارد. در ذیل مدل مداری این فیلتر آورده شده است.





(a) Self-tuning passive filter (b) Actual circuit (c) Equivalent circuit

شکل ۶.۳ دیاگرام مداری فیلتر پسیو خودتیبون [9]

### ۵.۳ جایابی و تعیین اندازه بهینه فیلترهای پسیو در یک شبکه قدرت

مساله ای که اخیرا نیز مورد توجه قرار گرفته است مسئله طراحی بهینه فیلتر پسیو می باشد که از نظر تعداد فیلترهای به کار رفته در شبکه و اندازه و محل آنها مورد بررسی قرار می گیرند. این کار به منظور مینیمم کردن هزینه فیلتر، تلفات فیلتر و برآوردن حدود مجاز هارمونیک ها در شبکه انجام می شود. روش های مختلفی برای رسیدن به این منظور استفاده شده است و مقالاتی نیز در این زمینه منتشر شده اند تعدادی از این روش ها را در اینجا بیان می کنیم.

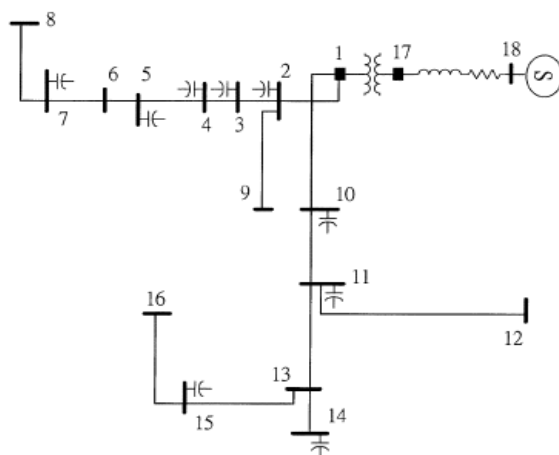
#### ۱.۵.۳ کاربرد الگوریتم ژنتیک برای جایابی و مقداردهی فیلتر پسیو

از آنجایی که مسئله طراحی فیلتر پسیو از درجه بالای غیرخطی برخوردار می باشد از روش های معمول غیرخطی نمی توان برای حل مسئله استفاده کرد. قدم اصلی پروسه حل پیدا کردن بهترین باس از میان باسهای خازنی موجود به منظور جایابی فیلتر هارمونیک پسیو می باشد. براساس آنالیز حساسیت، بهترین باس فیلتر با شاخص نصب زیر تعیین می شود:

$$S_V = \frac{\partial M}{\partial v_i^h} \quad (21.3)$$

که برابر است با مشتق جزئی تابع هدف نسبت به ولتاژ هارمونیک باس. اولویت بالای نصب فیلتر در باس‌های خازنی موجود، باسی می‌باشد که دارای کمترین مقدار در محاسبه شاخص نصب فیلتر می‌باشد. [10]

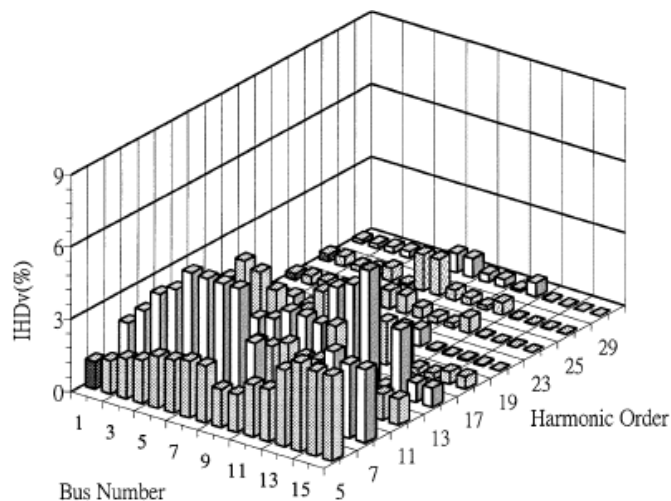
سپس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی در toolbox متلب مسئله غیرخطی طراحی فیلتر برای بدست آوردن مقادیر فیلتر استفاده می‌شود [11]. به منظور آشنایی بیشتر با این روش سیستم ۱۸ باسه IEEE در شکل ۷.۳ آورده شده است. توان ظاهری فیلتر ۱۰ MVA و همگی باسها بجز باسهای ۱۷، ۱۸ دارای ولتاژ ۱۲.۵ kv می‌باشند. منابع هارمونیک، مبدل‌های شش پالسه هستند که در باسهای ۵، ۱۲، ۱۱ و ۱۴ وجود دارند. شکل‌های ۸.۳ و ۹.۳ IHD و THD ولتاژ در باسهای ۱۲.۵ KV را نشان می‌دهد. با مشاهده آنها متوجه می‌شویم که حدود استاندارد هارمونیک در شبکه رعایت نمی‌شود بنابراین به طراحی فیلتر می‌پردازیم.



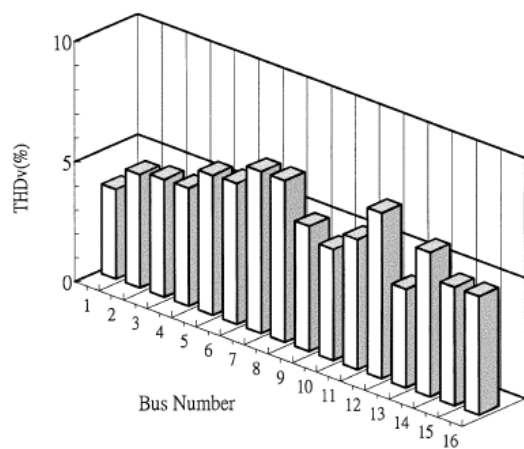
شکل ۷.۳ سیستم تست ۱۸ باسه [11]

IHD و THD قبل از نصب فیلتر:

<sup>8</sup> Individual Harmonic Distortion



شکل ۸.۳ IHD در هر باس ۱۲.۵ KV قبل از نصب فیلتر [11]



شکل ۹.۳ THD ولتاژ در هر باس ۱۲.۵KV قبل از نصب فیلتر [11]

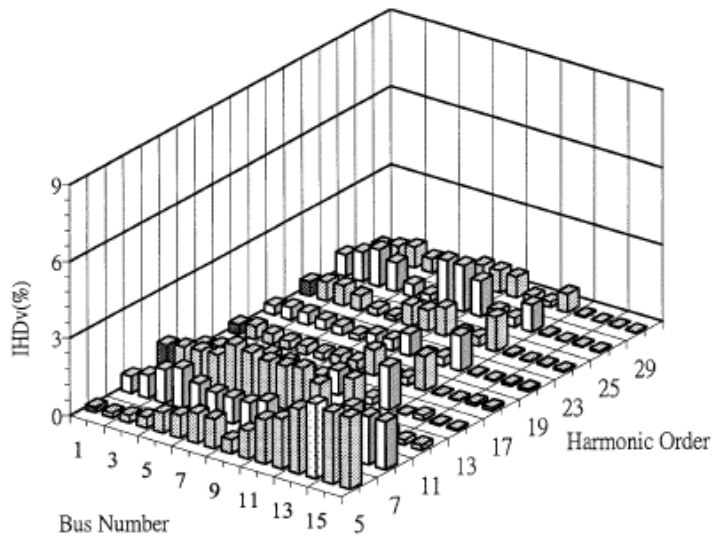
جدول ۶.۳ نتایج باسهای کاندید فیلتر تک تیون و مقادیر اجزا متناظرشان را نشان می دهد. شکل های ۱۰.۳

و ۱۱.۳ THD و IHD ولتاژ بعد از نصب فیلتر در هر باس ۱۲.۵KV را نشان می دهد. ملاحظه می شود که حدود

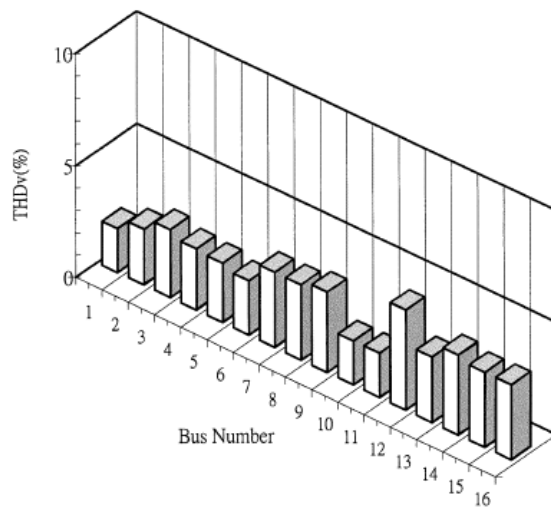
هارمونیکی با نصب بهینه فیلتر برآورده شده است.

جدول ۶.۳ باسهای کاندید فیلتر هارمونیک و سایزهای اجزا [11]

Filter No.	Filter Bus	Harmonic Order	Capacitor Size (%)	Inductor Size (%)
1	2	5	9.524	0.376
2	4	7	16.667	0.309
3	11	11	8.333	0.076
4	10	13	16.667	0.108



شکل ۱۰.۳ IHD ولتاژ در هر باس ۱۲.۵KV بعد از نصب فیلتر [11]



شکل ۱۱.۳ THD ولتاژ در هر باس ۱۲.۵KV بعد از نصب فیلتر [11]

به منظور افزایش سرعت همگرایی و اجتناب از دام های بهینه محلی یک روش ترکیبی شامل روش مسیریابی مناسب و الگوریتم ژنتیک [12] (FDM<sup>9</sup>+GA<sup>10</sup>) برای مسائل طراحی فیلتر هارمونیک پسیو در مقیاس بالا بکار گرفته شده است. استراتژی اصلی (FDM+GA) اینست که FDM نقاط سرچ را سریعاً به سمت بهینه های محلی راهنمایی می کند و GA از بهینه های محلی به منظور رسیدن به بهینه سراسری فرار می کند. بنابراین سرعت همگرایی روش (FDM+GA) سریعتر از روش GA به تنهایی می باشد. در مرجع [12] از این روش برای طراحی فیلترهای هارمونیک پسیو در یک کارخانه شیمیایی به منظور تعیین سائزهای بهینه فیلتر با برآورده شدن قیود استفاده شده است.

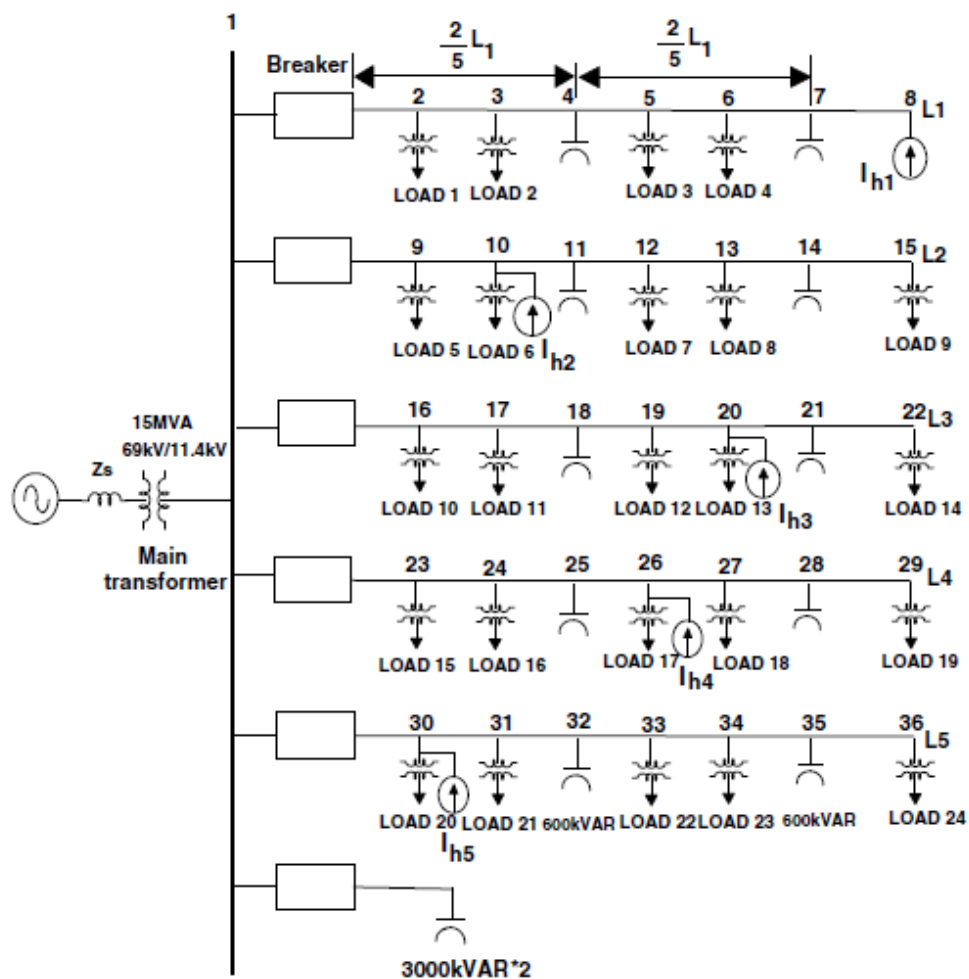
### ۲.۵.۳ کاربرد شبکه های عصبی برای نصب و سائز فیلترهای هارمونیک پسیو

در سالهای اخیر تکنیک های محاسبه عصبی برای حل مسائل بهینه سازی غیرخطی پیشنهاد شده است. برای روشن شدن عملکرد روش طراحی، مسئله طراحی فیلتر برای یک سیستم توزیع شعاعی با ۳۶ باس بیان شده است. شکل ۱۲.۳ دیاگرام تک خطی سیستم تست نشان داده شده است. ولتاژ در همه باس ها ۱۱.۴kV می باشد. به علاوه باس های بار ۸ ، ۱۰ ، ۲۰ ، ۲۶ و ۳۰ مبدل یکسوکننده شش پالسه دارند. مقادیر مبنا ۱۵MVA و ۱۱.۴kV می باشد. حد IHD ولتاژ ۳% و حد THD ۵% است. شرایط هارمونیک در جدول ۷.۳ بیان شده است. همه ی شاخه ها با استفاده از رکدر گذرای چند کاناله اندازه گیری شده سپس FFT برای بدست آوردن مقادیر هارمونیک استفاده شده است. [13]

<sup>9</sup>Feasible Direction Method

<sup>10</sup>Genetic Algorithm

به منظور بدست آوردن یک حل بهینه برای مسئله طراحی فیلتر یک الگوریتم سرچ براساس تقریب شبکه های عصبی ، آرایه های متعامد، و منطق فازی انجام شده و به یک سیستم توزیع شعاعی اعمال می شود. ایده اصلی روش تقریب شبکه های عصبی استفاده از یک زیرمسئله ساده شده به منظور تقریب مسئله اصلی می باشد ابتدا با استفاده از آرایه های متعامد ماتریس آزمایش را کوچکتر می کنیم بدون اینکه اطلاعات مهم از دست برود. سپس از تکنیک شبکه های عصبی برای جستجوی طراحی بهینه فیلتر پسیو استفاده می شود. [14]



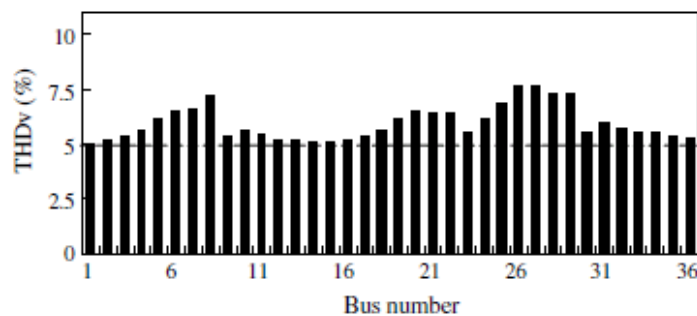
شکل ۱۲.۳ سیستم تست ۳۶ باسه [13]

## نتایج طراحی

THD ولتاژ هر باس در شکل ۱۳.۳ آورده شده است. مشاهده می شود که THD از حدود مجاز تجاوز کرده است. توجه کنید که در باس ۲۸ بار غیرخطی نداریم ولی اعوجاج هارمونیکی ولتاژ کل آن جدی است. دلیل اصلی آن اینست که خازن قرار گرفته روی این باس تشدید موازی القا می کند.

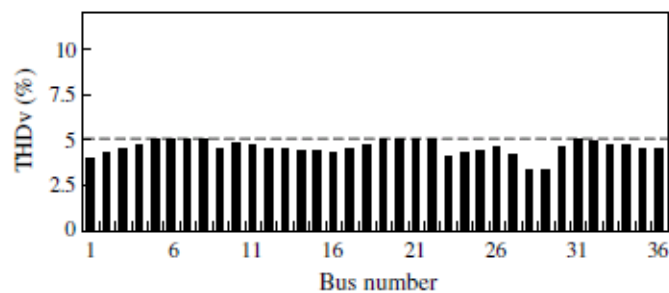
جدول ۷.۳ جریان هارمونیکی یکسوکنده های شش پالسه [13]

Bus no.	Harmonic current (%)						
	Order	5	7	11	13	17	19
8		3.14	2.25	1.38	0.84	0.43	0.35
10		4.14	3.11	1.23	0.87	0.45	0.47
20		3.18	2.20	1.45	0.94	0.45	0.35
26		4.56	4.57	1.99	0.93	0.47	0.35
30		3.06	3.05	1.35	0.86	0.35	0.34



شکل ۱۳.۳ THD ولتاژ قبل از قراردادن فیلتر [13]

شکل ۱۴.۳ نتایج را بعد از قراردادن فیلتر پسیو نشان می دهد.



شکل ۱۴.۳ THD ولتاژ بعد از قراردادن فیلتر [13]

## ۳.۵.۳ روش PSO<sup>۱۱</sup> با ارزیابی تغییرات زمانی غیرخطی برای طراحی بهینه فیلترهای

### هارمونیکی

۱.۳.۵.۳ معرفی

روش الگوریتم پرندگان با ارزیابی تغییرات زمانی غیرخطی (PSO-NTVE)<sup>۱۲</sup> در طرح ریزی فیلترهای هارمونیکی پسیو مقیاس بالا، برای یک سیستم چند باسه تحت منابع جریان هارمونیکی بسیار بکار برده می‌شود. این الگوریتم اخیراً به عنوان یک شاخه مهم تکنیک های آماری برای کشف فضای جستجوی بهینه استفاده می‌شود. در اینجا هدف مینیمایز کردن هزینه فیلتر، تلفات فیلتر، اعوجاج هارمونیک کل جریان ها و ولتاژها در هر باس بطور همزمان می‌باشد. از این متد برای طراحی فیلترهای هارمونیکی در یک کارخانه فولاد که کوره های قوس الکتریک dc و ac و جبران کننده توان راکتیو استاتیک دارد استفاده شده است [15].

در الگوریتم PSO، هر جزء مسیر حرکت و سرعتش را در فضای مسئله حفظ می‌کند. موقعیت و سرعت اولیه یک جزء بصورت رندوم ایجاد می‌شود. سپس در هر تکرار موقعیت و سرعت جدید اجزا بدست می‌آید.

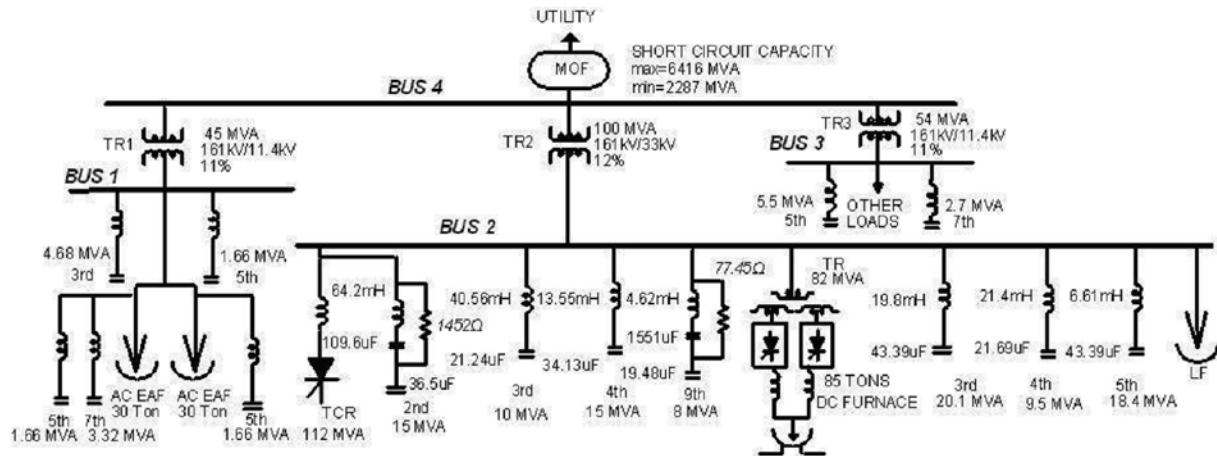
شکل ۱۵.۳ دیاگرام تک خطی سیستم تحت مطالعه را نشان می‌دهد. کارخانه فولاد از یک خط ۱۶۱-kv متصل به سه ترانس اصلی تغذیه می‌کند. فرکانس اصلی سیستم ۶۰ Hz می‌باشد. ترانس شماره یک (TR1) ولتاژ ۱۱.۴ را به دو کوره قوس الکتریکی ac و بارهای دیگر می‌دهد. پنج فیلتر تک تیون برای محدود کردن جریان های هارمونیکی نصب شده است. ترانس شماره دو (TR2) ۳۳kv به یکسوکننده های ۱۲ پالسه برای کوره قوس DC، و یک کوره ladle. در اصل با داشتن چهار دسته فیلتر هارمونیکی، دو تک تیون و دو تضعیف شده نوع C، سپس یک راکتور کنترل شده تریستوری جدید برای جبران نوسان توان راکتیو نصب شده است. سه دسته جدید

<sup>11</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>12</sup> Nonlinear time-varying evolution



فیلترهای تک تیون برای جذب جریان های هارمونیک TCR استفاده شده است. ترانس شماره سه (TR3) چندین بار جایی که فیلترهای تک تیون پنجم و هفتم نصب شده است را تغذیه می کند.



شکل ۱۵.۳ دیاگرام تک خطی سیستم [15]

هارمونیک های تولید شده توسط کوره های قوس الکتریکی بطور پیوسته به خاطر تغییرات مصرف توان تغییر می کنند. بنابراین مصرف توان یک پروسه نامشخص می باشد. در این مورد شرایط هارمونیک بصورت سه سطح بار نرمال، سنگین و سبک که در جدول ۸.۳ آورده شده است بیان شده اند. منابع جریان هارمونیک کوره های قوس، یکسو کننده ها، بارهای دیگر و TCR هستند.

جدول ۸.۳ سه منبع جریان هارمونیک [15]

Order	Harmonic currents (%)														
	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13	14	15	17	19	
Normal load	Bus 1	0.33	1.52	0.27	1.69	0.21	0.54	0.06	0.02	1.0	0.67	0.06	0.03	0.33	0.36
	Bus 2	0.59	3.62	1.87	5.44	0.28	2.41	0.62	1.32	3.97	2.85	0.29	0.73	2.20	2.25
	Bus 3	0.25	1.55	0.51	1.62	0.30	0.26	0.01	0.02	0.81	0.73	0.04	0.02	0.34	0.32
Heavy load	Bus 1	0.84	3.53	0.78	4.69	0.52	0.94	0.06	0.02	2.0	0.77	0.07	0.04	0.44	0.46
	Bus 2	0.69	4.63	2.87	6.45	0.39	2.41	0.62	1.32	4.98	3.86	0.39	0.83	3.20	3.25
	Bus 3	0.35	2.56	0.62	2.62	0.40	0.36	0.02	0.02	0.91	0.83	0.05	0.02	0.44	0.43
Light load	Bus 1	0.25	1.44	0.14	1.54	0.18	0.51	0.03	0.03	0.75	0.61	0.01	0.03	0.29	0.30
	Bus 2	0.74	3.57	1.79	4.77	0.27	2.38	0.55	1.22	3.80	2.77	0.16	0.68	2.12	2.11
	Bus 3	0.24	1.47	0.48	1.62	0.30	0.26	0.01	0.02	0.81	0.73	0.04	0.02	0.34	0.32

طراحی بهینه فیلتر

در طراحی بهینه فیلتر هدف مینیمایز کردن هزینه فیلتر، اعوجاج کل جریان ها و ولتاژهای هارمونیک، بطور همزمان می باشد.

قیود:

الف) میزان مجاز هارمونیک ها بطوریکه استاندارد IEEE 519 را رعایت کند.

ب) جبران توان راکتیو: توان راکتیو هر فیلتر توسط قید زیر محدود می شود:

$$Q_{Fi}^{max} > Q_{Fi} > Q_{Fi}^{min} \quad (22.3)$$

که  $Q_{Fi}^{min}$  و  $Q_{Fi}^{max}$  حدود توان راکتیو در فرکانس اصلی بالا و پایین فیلتر  $i$ ام می باشد. جبران کل در باس  $k$  با بانک خازنی می باشد:

$$Q_F^k = \sum_{i=1}^m Q_{Fi}^k \quad (23.3)$$

ج) قیود روی نقطه تیون، مرتبه هارمونیک و نسبت ثابت زمانی میرایی:

$$ah^* \leq h_0 \leq bh^* \quad (24.3)$$

برای فیلتر high pass:

$$1 < h_0 \leq h^* \sqrt{m - m^2}, \quad 0 < m < 1 \quad (25.3)$$

برای فیلترهای نوع c:

$$h_0 < \frac{1}{h^*} \sqrt{m(h^{*2} - 1)[h^{*2} - m(h^{*2} - 1)]} \quad (26.3)$$

$$0 < m < \frac{h^{*2}}{h^{*2}-1} \quad (36.3)$$

در مرجع [15] از الگوریتم پرندگان برای بدست آوردن مقادیر بهینه فیلترهای تیون شده، بالاگذر و نوع C استفاده شده است.

## ۴.۵.۳ طرح ریزی فیلتر هارمونیک پسیو در یک سیستم قدرت با در نظر گرفتن قیود

### احتمالی

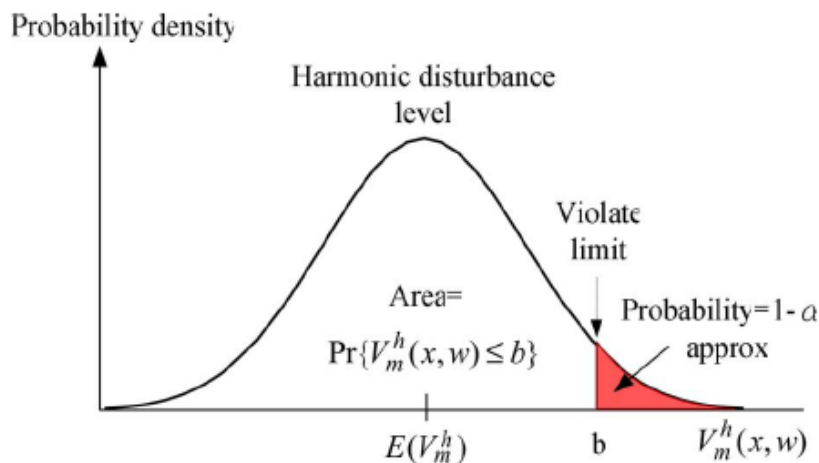
هنگام طرح ریزی فیلتر هارمونیک پسیو بیشتر روش ها براساس روش های قطعی برای امپدانس هارمونیک شبکه و بارهای تولید هارمونیک می باشد. به هر حال روش های قطعی برای مطالعات هارمونیک ممکن است برای مدلسازی رفتار واقعی بارهای غیرخطی و امپدانس های هارمونیک شبکه به شکست برخورد کند. در تعداد زیادی موارد جریان های هارمونیک تولید شده توسط بارهای غیر خطی ممکن است مشخصات احتمالی به خاطر تغییر در سطوح بار در طی زمان داشته باشند. در این روش مشخصات احتمالی جریان های منبع هارمونیک و امپدانس های هارمونیک شبکه در طرح ریزی سیستم به حساب آورده می شود. به منظور بدست آوردن سائز بهینه هر مولفه فیلتر ابتدا در پروسه طراحی با استفاده از آنالیز حساسیت بهترین باس کاندید انتخاب می شود. سپس مسئله قیود-احتمالی فرموله شده به مسئله برنامه نویسی غیرخطی قطعی تبدیل شده و با استفاده از بهینه ساز الگوریتم ژنتیک مسئله حل می شود. سپس پروسه حل پیشنهادی با یک سیستم توزیع واقعی تست شده و با روش های قطعی مرسوم دیگر مقایسه شده است. [16]

در سالهای اخیر استانداردهایی برای کنترل هارمونیک های سیستم قدرت برای تزریق جریان های هارمونیک براساس روش های احتمالی ارائه شده است. برای مثال IEC std.61000.3.6 تاثیر جریان های هارمونیک تولید

شده با تجهیزات الکتریکی را در نظر می‌گیرد و نیاز است که تجهیزات الکتریکی بطور نرمال با ۹۵٪ مقدار احتمال ماکزیمم روزانه و هفتگی مجاز جریان های هارمونیکی کار کنند. بنابراین جریان های هارمونیکی نمی-توانند از حد مجاز ۹۵٪ از زمان مدت اندازه گیری تجاوز کنند.[17]

قیود احتمالی برای ولتاژ هارمونیکی در هر باس

شکل ۱۶.۳ مصونیت الودگی های هارمونیکی در هر باس شبکه را نشان می‌دهد که  $b$  حد ولتاژ هارمونیکی می باشد و ولتاژ هارمونیکی واقعی را بیان می‌کند.  $x$  بردار پارامترهای شناخته شده با مشخصات احتمالی برای فیلتر هارمونیکی پسیو و  $w$  بردار متغیرهای ناشناخته می باشد.



شکل ۱۶.۳ اعمال حد به ولتاژ هارمونیکی احتمالی [10]

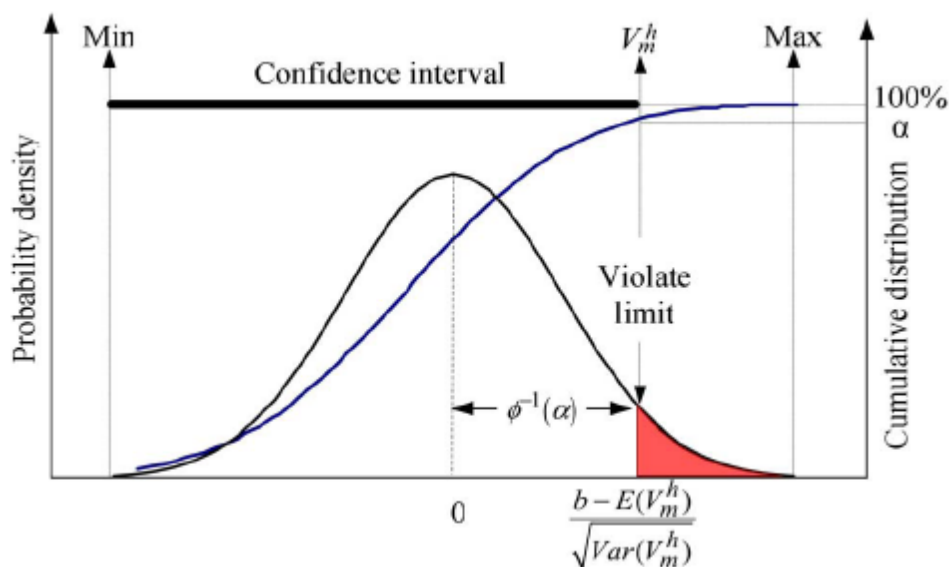
اجازه دهید  $\Pr\{.\}$  را احتمال رخداد  $\{.\}$  در نظر بگیریم. با مشاهده شکل ۱۶.۳ قید احتمال ولتاژ هارمونیکی ضمانت می‌کند که ولتاژ باس با سطح احتمال مورد نیاز مورد قبول می‌باشد [17].

$$\Pr\{V_m^h(x, w) \leq b\} \geq \alpha \quad (28.3)$$

که  $\alpha$  حد سطح احتمال می‌باشد.

به منظور راحتی، شکل ۱۶.۳ می تواند بصورت یک دوره اطمینان، همانطور که در شکل ۱۷.۳ نشان داده شده بیان شود که شامل سطح اطمینان از قبل تعیین شده می باشد. مقدار هارمونیک ولتاژ در pcc تخمین زده می شود. بنابراین قید احتمالی ولتاژ هارمونیک بیان شده در ۲۸.۳ بصورت ۲۹.۳ بیان می شود. در این حالت مسئله بهینه سازی احتمالی به عنوان یک مسئله برنامه ریزی غیر خطی قطعی رفتار می شود.

$$E(V_m^h) + \varphi^{-1}(\alpha)\sqrt{\text{Var}(V_m^h)} \leq b \quad (29.3)$$



شکل ۱۷.۳ تخمین ولتاژ هارمونیک در محدوده دوره اطمینان [17]

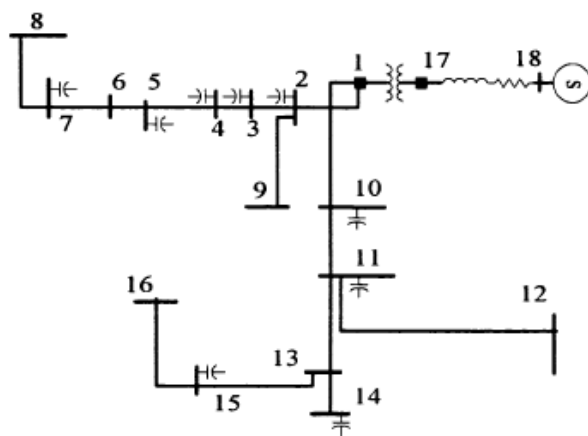
در معادله (۲۹.۳)  $E(V_m^h)$  و  $\text{Var}(V_m^h)$  مقدار میانگین و واریانس ولتاژ هارمونیک احتمالی را بیان می کند.  $\varphi^{-1}(\alpha)$  معکوس تابع تجمعی توزیع نرمال استاندارد می باشد.

فرمول بندی مسئله

در مسئله طرح ریزی فیلتر هارمونیک پسو احتمالی، تابع هدف مینیمم کردن هزینه نصب فیلتر می باشد. قیود مسئله شامل حدود ولتاژ هارمونیک کل و ولتاژ هارمونیک اختصاصی در هر باس IEEE 519، حدود انحراف

فرکانس تیون فیلترهای پسیو به خاطر خطاهای کارخانه و تغییرات محیطی، حد rms جریان عبوری از فیلتر، حد rms ولتاژ دو سر خازن فیلتر می باشد. [16]

الگوریتم حل پیشنهادی برای طرح ریزی فیلتر پسیو با استفاده از یک شبکه توزیع ۱۸ باسه واقعی همان طور که در شکل ۱۸.۳ نشان داده شده تست شده است. مبنای توان سیستم نمونه MVA ۱۰ و تمام باس ها بجز باس های ۱۷ و ۱۸، باسهای KV ۱۲/۵ هستند. در سیستم منابع جریان هارمونیک، امپدانس های سیستم و بار در هر باس مشخصات احتمالی دارند.



شکل ۱۸.۳ سیستم تست ۱۸ باسه [10]

فرض می شود که مؤلفه های واقعی و موهومی برای هر مرتبه از جریان هارمونیک بار غیرخطی بطور نرمال توزیع یافته اند. مقادیر میانگین و انحراف معیار متناظر در جدول ۹.۳ نشان داده شده اند.

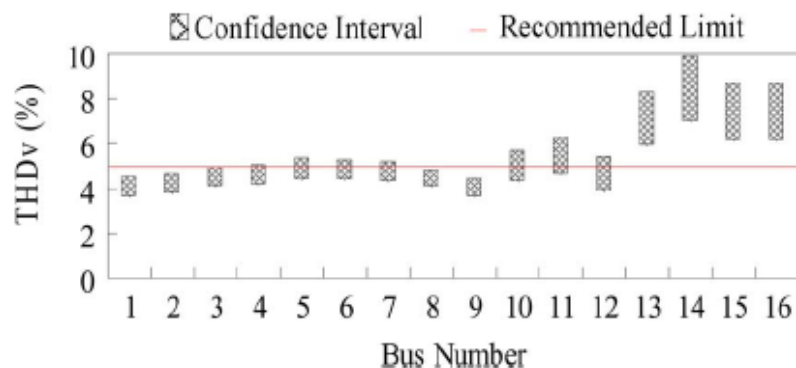
نتایج

دوره اطمینان ۹۵% ولتاژ هارمونیک کل و حدود بالا و پایین ۹۵% دوره اطمینان ولتاژ هارمونیک اختصاصی در باسهای kv- ۱۲/۵ قبل از قرار دادن فیلتر در شکل های ۲۳.۳ و ۲۴.۳ نشان داده شده است. مشاهده می شود

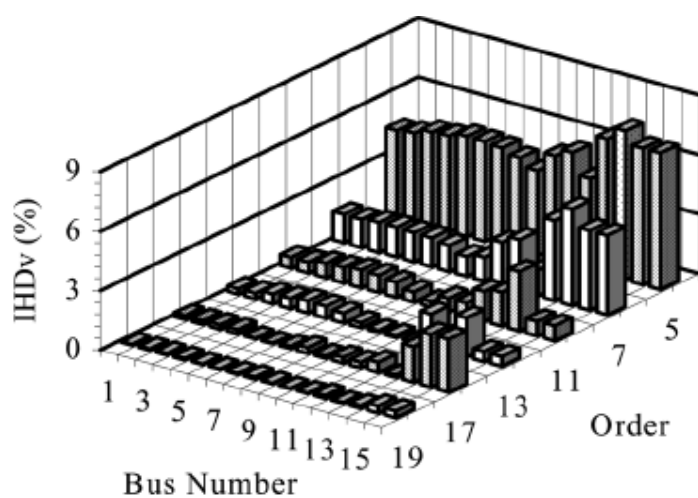
حدود بالای بالاترین مقدار دوره اطمینان ۹۵٪ ولتاژهای هارمونیک اختصاصی، برای هارمونیک های مرتبه ۵، ۱۱، ۱۳، ۱۷ و ۱۹، ۷/۵٪ و ۴/۹٪ و ۳/۱۱٪، ۰/۲٪، ۲/۷٪ و ۰/۳٪ به ترتیب می باشد. بالاترین دوره اطمینان ۹۵٪ THD و ولتاژ، ۹/۹۲٪ است که در باس ۱۴ اتفاق می افتد. بنابراین THD و IHD ولتاژ در چندین باس شبکه از حدود استاندارد IEEE 519 تجاوز می کند.

جدول ۹.۳ مشخصات احتمالی منابع جریان هارمونیکی [17]

Harmonic Current Sources Bus		Harmonic Order					
		5	7	11	13	17	19
8	$\mu(i_k^{h,r})$	2.39	1.77	1.14	0.84	0.12	0.04
	$\mu(i_k^{h,i})$	1.79	1.32	0.85	0.63	0.11	0.03
	$\sigma(i_k^{h,r})$	0.17	0.18	0.17	0.14	0.03	0.01
	$\sigma(i_k^{h,i})$	0.13	0.14	0.13	0.11	0.02	0.01
9	$\mu(i_k^{h,r})$	2.71	2.23	1.87	1.04	0.20	0.07
	$\mu(i_k^{h,i})$	2.03	1.67	1.40	0.78	0.15	0.05
	$\sigma(i_k^{h,r})$	0.26	0.16	0.14	0.11	0.06	0.01
	$\sigma(i_k^{h,i})$	0.19	0.10	0.11	0.08	0.05	0.01
12	$\mu(i_k^{h,r})$	2.48	2.01	1.78	1.10	0.26	0.03
	$\mu(i_k^{h,i})$	1.86	1.51	1.78	0.82	0.19	0.02
	$\sigma(i_k^{h,r})$	0.19	0.18	0.13	0.10	0.06	0.01
	$\sigma(i_k^{h,i})$	0.14	0.13	0.09	0.08	0.04	0.01
15	$\mu(i_k^{h,r})$	2.87	2.43	2.06	1.04	0.62	0.16
	$\mu(i_k^{h,i})$	2.15	1.82	1.54	0.78	0.46	0.12
	$\sigma(i_k^{h,r})$	0.22	0.15	0.12	0.13	0.06	0.01
	$\sigma(i_k^{h,i})$	0.17	0.11	0.09	0.09	0.04	0.01



شکل ۱۸.۳ دوره اطمینان ۹۵٪ برای THDv در هر باس شبکه قبل از قراردادن فیلتر [17]



شکل ۱۹.۳ IHDv قبل از قرار دادن فیلتر [17]

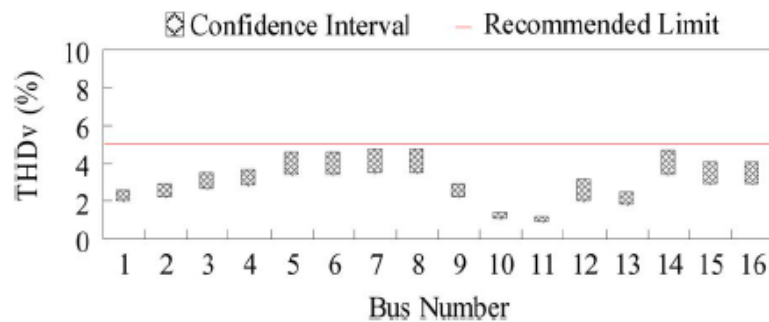
با اعمال پروسه حل پیشنهادی برای طرح ریزی فیلتر مقادیر مؤلفه و فیلترهای هارمونیک تیون در جدول ۱۹.۳ نشان داده شده است. شکل ۲۵.۳ و ۲۶.۳ دوره اطمینان ۹۵٪، IHD و THD ولتاژ در هر باس ۱۲/۵ KV بعد از نصب فیلتر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که THD و IHD در هر باس شبکه، بخوبی تحت استاندارد IEEE 519 کنترل شده است. بعد از نصب فیلتر هارمونیک در سیستم، میانگین مقادیر مورد انتظار THD در همه باسهای ۱۲/۵ KV به مقدار ۲/۳۶٪ کاهش می‌یابد. و بیشترین مقدار آن ۴/۴۷٪ می‌باشد که در باس ۸ رخ



می‌دهد. بعلاوه همانطوریکه در جدول ۲۰.۳ آمده است مقدار مؤثر ولتاژ خازن و جریان سلف برای هر فیلتر حدود IEEE-1531 را رعایت می‌کند، که حدود مقدار مؤثر ولتاژ خازن و جریان سلف به ترتیب ۱۱۰٪ و ۱۳۵٪ تنظیم شده‌است.

جدول ۱۰.۳ باسهای کاندید فیلتر هارمونیکی و سائزهای اجزا [17]

Filter No.	Filter Bus	Harmonic Order	Capacitor Size (%)	Inductor Size (%)
1	11	5	8.333	0.325
2	13	7	33.333	0.679
3	4	11	8.333	0.069



شکل ۲۰.۳ THDv در هر باس ۱۲/۵ kv بعد از قراردادن فیلتر پسیو [17]

جدول ۱۱.۳ ولتاژ rms خازن فیلتر در حد بالای دوره اطمینان ۹۵٪ [17]

Harmonic Order	Capacitor Voltage	Inductor Current
5	108.0	121.7
7	103.4	108.0
11	103.2	114.7

## فصل چهارم

استفاده از الگوریتم گراف برای طراحی  
فیلترهای پسیو

## ۱.۴ الگوریتم گراف

همان طور که در فصل قبل بیان شد روشهای زیادی برای حل مسئله جایابی و مقدار بهینه المانهای فیلتر مطرح شده است. تعداد زیادی از این روشها به یک تابع هدف پیوسته که دارای ضرایب متغیر می باشد نیاز دارند. تابع هدف را می توان با چندین فرض، ساده سازی کرد. این فرضها به مقدار المانها و هزینه فیلتر، تعداد و انواع آنها بستگی دارد [18]. حتی با انجام این فرضها معادلات باقیمانده در بسیاری موارد پیچیده می باشد. اشکال اصلی این روشها این است که جواب بدست آمده به مکانهای شروع بستگی دارد. تکنیکهای بهینه سازی برای بهبود کیفیت حل مسئله پیشنهاد شده است که به تعدادی از آنها در فصل قبل اشاره شد. در این پایان نامه یک تکنیک حل کاربردی و آسان برای مسئله جایابی فیلتر بر اساس روش search graph بیان می شود. الگوریتم پیشنهادی تعداد، مقدار المانها و مکان فیلترها در شبکه را به منظور کاهش هزینه، تلفات، THD ولتاژها و بهبود پروفایل ولتاژ تعیین می کند. الگوریتم حل، با ظرفیت خازن ها به صورت متغییرهای گسسته رفتار می کند و از ظرفیتهای استاندارد استفاده می کند.

یک گراف در اینجا بصورت یک دسته node (گره) که با آرکها به هم مرتبط شده اند تعریف می شود. هر گره، متناظر با یک ترکیب ممکن از ظرفیت خازن فیلتر و مکان آن برای تعداد فیلتری که در شبکه قرار می گیرد می باشد. یک گراف مجزا برای هر تعداد ممکن فیلتر قرار گرفته در شبکه استفاده می شود. تکنیک پیشنهادی، گره های یک گراف را برای تعیین حل بهینه جستجو می کند. شروع جستجو با تعداد مینیمم فیلتری که در شبکه قرار می گیرد (توسط کاربر تعریف می شود) انجام می شود تا گرهی را در گرافی پیدا کند که مقدار مینیمم تابع هدف با آن بدست می آید. اگر به تعداد ماکزیمم فیلترها در شبکه (پارامتر تعریف شده توسط کاربر) نرسیده باشیم تعداد فیلترها افزایش می یابد و گراف بعدی جستجو می شود. تا به جایی می رسیم که افزایش تعداد فیلتر باعث افزایش تابع هدف می شود و بهبودی حاصل نمی شود بنابراین پروسه به پایان می رسد.

## ۲.۴ تعریف گره و آرک در گراف [18]

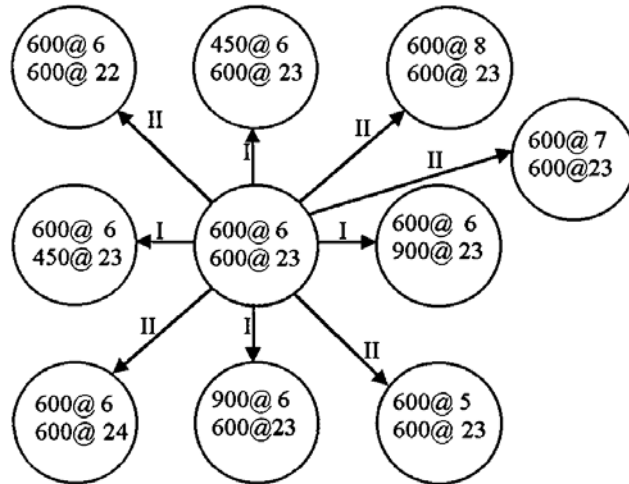
یک گراف کامل برای یک تعداد معینی از فیلترها شامل گره‌هایی برای هر ترکیب ممکن از ظرفیت خازن فیلتر می‌باشد. به خاطر اینکه تعداد گره‌ها ممکن است بسیار زیاد باشد یک پروسه مؤثر و کارا به کار گرفته می‌شود تا تنها درصد کوچکی از گره‌های مرتبط برای تعیین حل بهینه محلی ارزیابی شود. آرک‌ها در هر گراف به گونه‌ای تعریف می‌شود که الگوریتم بتواند از هر گره به گره دیگر در جستجو حل بهینه حرکت کند. در زیر چهار نوع مختلف از آرک‌ها تعریف شده‌است:

۱- آرک نوع اول: در این نوع آرک، فقط ظرفیت خازن فیلتر تغییر می‌کند و مکان فیلتر بدون تغییر می‌ماند. حرکت از یک گره به گره دیگر با استفاده از این نوع آرک به عنوان حرکت "نوع اول" اطلاق می‌شود.

۲- آرک نوع دوم: یک آرک از این نوع تنها تغییر در مکان فیلتر را بیان می‌کند. این آرک‌ها نیاز به گره‌هایی برای بیان ترکیب ظرفیتهای یکسان خازن دارند. به علاوه باسهای مشخص شده بوسیله مکانهای باقیمانده بصورت الکتریکی باسهای مجاور یکدیگر می‌باشند. حرکت از یک گره به گره دیگر با استفاده از این نوع آرک به عنوان حرکت نوع دوم تعریف می‌شود.

هر دو انواع حرکات نوع اول و دوم می‌تواند به عنوان تغییرات محلی در نظر گرفته شود به این خاطر که تنها یک تغییر در یکی از متغیرهای تصمیم‌گیری وجود دارد. به عنوان مثال فرض کنید دو فیلتر روی یک فیدر قرار گرفته‌اند، فرض کنید گره اولیه متناظر با حلی می‌باشد که ظرفیت خازن فیلتر را  $600\text{KVAR}$  در باس ۶ و همین مقدار را در باس ۲۳ قرار می‌دهد. ظرفیتهای خازن استاندارد در عمل در جدول ۱.۴ آورده شده‌است.

حرکات نوع اول و دوم ممکن است از این گره در شکل ۱.۴ نشان داده شده‌است. این حرکتهای مجاور در یک حالت سیستماتیک ارزیابی می‌شود تا زمانی که کاهشی در تابع هدف بدست آید. در گرهی که مقدار تابع هدف کوچکتری بدست آید آن گره بلافاصله جایگزین گره قبل می‌شود.

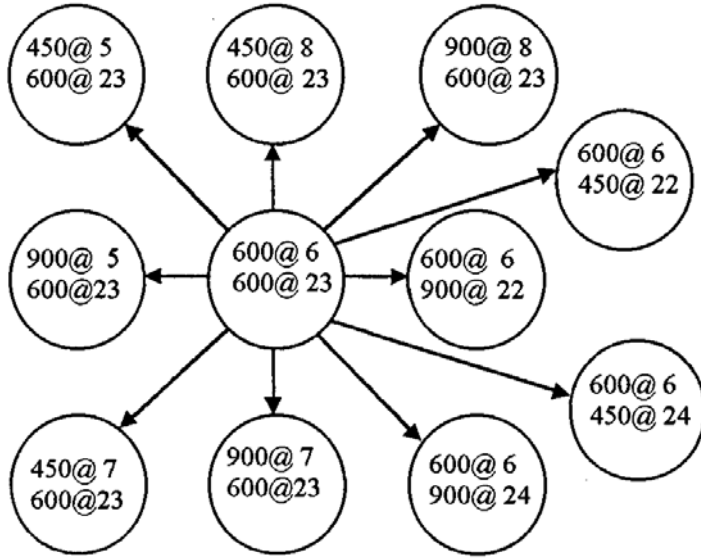


شکل ۱.۴ انواع ممکن حرکت های نوع اول و دوم [18]

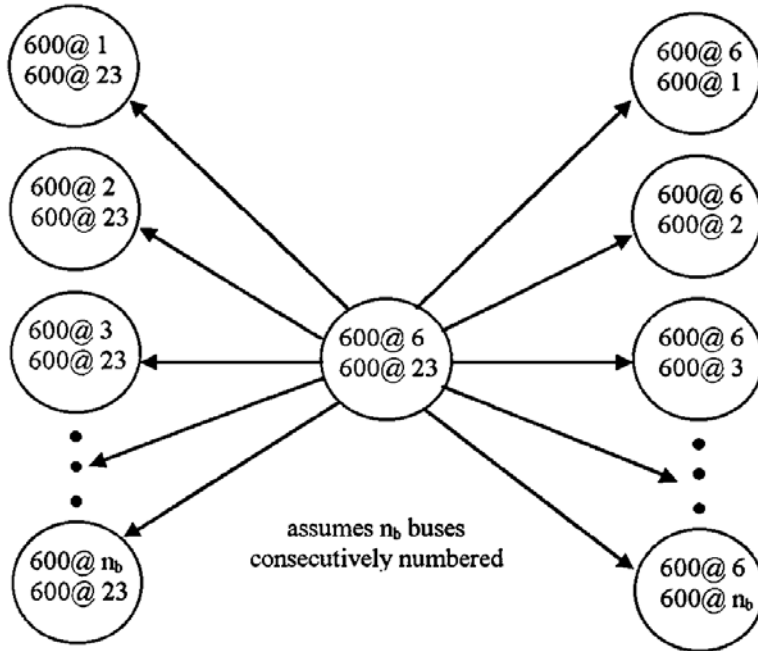
۳ - آرک‌های نوع سوم : این نوع آرک تغییر همزمان در سایز و مکان فیلتر را بیان می‌کند. تنها تغییرات در سایز به یک سایز مجاور و تغییرات در مکان به یک باس مجاور مجاز می‌باشد. این نوع حرکت به عنوان حرکت نوع سوم اطلاق می‌شود. برای مثال حرکت های نوع سوم ممکن از گره اولیه در شکل ۲.۴ نشان داده شده‌است.

۴ - آرک‌های نوع چهارم : این نوع آرک مبین حرکت یک فیلتر به باس دیگری که ضرورتاً مجاور با مکان موجود نمی‌باشد. آرک‌های این نوع همه گره‌هایی که تنها در موقعیت تک فیلتر با هم تفاوت دارند به هم متصل می‌کند به طوریکه همه‌ی سایزها و همه‌ی مکان‌های دیگر بدون تغییر بماند. حرکت های این نوع به صورت حرکت‌های نوع چهارم اطلاق می‌شود. برای مثال همه‌ی حرکت‌های ممکن از این نوع از گره اولیه در شکل ۳.۴ نشان داده شده‌است.

هدف از حرکت های نوع سوم و چهارم اینست که الگوریتم را به فرار از بهینه های محلی که ممکن است در طی برنامه گرفتار آن شویم رهنمون کند. در این نوع حرکت‌ها معمولاً نتایج خوبی بدست می‌آید.



شکل ۲.۴ حرکت های ممکن نوع سوم



شکل ۳.۴ حرکت های ممکن نوع چهارم

پروسه کلی حل:

مرحله اول : در نظر گرفتن تعداد مینیمم فیلتر قرار گرفته در شبکه که توسط کاربر تعیین می شود.

مرحله دوم : انتخاب یک حل اولیه برای فیلترها یا اجازه دهیم کامپیوتر به صورت رندوم حلی را انتخاب نماید.

مرحله سوم : ارزیابی حرکت های نوع اول و دوم در یک حالت سیمتاتیک. هر حرکتی که باعث کاهش در تابع هدف شود بلافاصله مورد قبول واقع می شود بدون در نظر گرفتن بقیه آرک هایی که از این گره خارج شده اند. این پروسه تا جایی ادامه می یابد که دیگر هیچ نتیجه بهتری بدست نیاید. در این حالت یک حل بهینه محلی بدست آمده است.

مرحله چهارم : ارزیابی حرکت نوع سوم بعد از اینکه هیچ نتیجه بهتری را از حرکت های نوع اول و دوم بدست نیاوردیم. اگر هر حرکت نوع سوم مورد قبول قرار گیرد به مرحله سوم برای ارزیابی حرکت های نوع اول و دوم برمی گردیم. اگر همهی حرکت های نوع سوم به نتیجه ای نرسد به مرحله بعد می رویم.

مرحله پنجم : ارزیابی حرکت نوع چهارم. هر حرکت نوع چهارم که پذیرفته شود باید به مرحله سوم برای انجام حرکت های نوع اول و دوم برگردیم. بعد از آن اگر دیگر هیچ حرکتی از نوع چهارم مورد قبول نبود، حل بهینه ای برای تعداد فیلتر مشخص شده بدست آمده است. به مرحله بعد می رویم.

مرحله ششم : نتایج تابع هدف از این حل با نتایج تابع هدف از حل قبلی مقایسه می شود. اگر نتایج جدید بهتر باشد تعداد فیلتر را افزایش می دهیم و به مرحله دوم برای انجام پروسه برمی گردیم در غیراینصورت الگوریتم پایان می یابد. حل بدست آمده از تعداد فیلتر مرحله قبل حل بهینه سراسری می باشد.

#### ۳.۴ نحوه استفاده از الگوریتم گراف در خازن گذاری بهینه

الگوریتم گراف به تفصیل در قسمت قبل بیان شد. در این قسمت نحوه استفاده از این الگوریتم را در خازن گذاری بهینه شبکه بیان می کنیم. سیستم مورد مطالعه در اینجا، سیستم تست ۳۰ باسه IEEE می باشد. اطلاعات مربوط به این شبکه در پیوست آورده شده است. هدف از خازن گذاری در شبکه بهبود پروفایل ولتاژ،

کاهش تلفات شبکه و مینیمم هزینه خازن‌های به کار رفته می‌باشد. بنابراین تابع هدف از سه قسمت ولتاژهای باس‌ها، تلفات شبکه و هزینه خازن‌ها تشکیل می‌شود. تابع هدف مربوطه در ذیل نشان داده شده‌است:

$$F = (KA * Ploss) + (kv * profv) + (k_{cfp} * Q) \quad (1.4)$$

که  $Ploss$  تلفات شبکه،  $profv$  جمع انحراف ولتاژهای باس‌ها از مقدار ۱pu و  $Q$  مقدار خازن‌ها برحسب kvar می‌باشد. ضرایب  $KA$  و  $kv$  و  $k_{cfp}$  برای تبدیل به ترتیب تلفات شبکه و پروفایل ولتاژ و kvar خازن‌ها به هزینه استفاده شده‌است. جدول سائز خازن‌ها در عمل و ضرایب متناظرشان برای بدست آوردن هزینه سالانه در ذیل آورده شده‌است.

جدول ۱.۴ هزینه سالانه خازن‌های ثابت [19]

$Q_p [kVAr]$	150	300	450	600	750	900
$K_{cfp} [$/kVAr]$	0.500	0.350	0.253	0.220	0.276	0.183
$Q_p [kVAr]$	1,050	1,200	1,350	1,500	1,650	1,800
$K_{cfp} [$/kVAr]$	0.228	0.170	0.207	0.201	0.193	0.187
$Q_p [kVAr]$	1,950	2,100	2,250	2,400	2,550	2,700
$K_{cfp} [$/kVAr]$	0.211	0.176	0.197	0.170	0.189	0.187
$Q_p [kVAr]$	2,850	3,000	3,150	3,300	3,450	3,600
$K_{cfp} [$/kVAr]$	0.183	0.180	0.195	0.174	0.188	0.170

با تعریف تابع هدف، نحوه بکارگیری الگوریتم پیشنهادی به این صورت می‌باشد که ابتدا مینیمم تعداد بانک‌های خازنی را خود تعیین می‌کنیم و برای هر کدام مقداری در نظر می‌گیریم. در اینجا دو بانک خازنی با مقدار ۶۰۰ KVAR فرض شده است. این دو خازن را در باس‌های ۱ و ۷ قرار می‌دهیم. با این شرایط از شبکه پخش



بار گرفته می‌شود و مقدار تابع هدف بدست می‌آید. سپس مطابق با الگوریتم جستجوی گراف توضیح داده شده در قسمت قبل، ابتدا حرکت‌های نوع اول و دوم انجام می‌شود. در حرکت نوع اول تنها، سایز خازن‌ها با سایزهای مجاورشان تغییر می‌کند در هر حالت تنها یک خازن به سایز مجاورش تغییر مقدار می‌دهد بنابراین مقدار تابع هدف متناظر با کلیه سایزهای مجاور برای تک تک خازن‌ها را بدست می‌آوریم در اینجا گره شروع ۶۰۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۷ می‌باشد. حرکت‌های ممکن نوع اول برای این گره شروع (۴۵۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۷)، (۹۰۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۷)، (۶۰۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۷)، (۴۵۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۷)، (۶۰۰ در باس ۱ و ۹۰۰ در باس ۷) می‌باشد. برای هر حالت، تابع هدف بدست می‌آید هرکدام که مورد قبول قرار گرفت (مقدار تابع هدف کمتری داشت) نقطه شروع دوباره می‌باشد. این کار تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر نتیجه بهتری دست ندهد.

بعد از آن جستجوی نوع دوم شروع می‌شود. در این حرکت تنها مکان خازن با باس‌های مجاورش تغییر می‌کند در هر حالت تنها یک خازن به موقعیت مجاورش منتقل می‌شود. اگر فرض کنیم که گره شروع در این حالت همان ۶۰۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۷ باشد حرکت‌های نوع دوم ممکن در این مرحله برابر (۶۰۰ در باس ۲ و ۶۰۰ در باس ۷)، (۶۰۰ در باس ۳ و ۶۰۰ در باس ۷) می‌باشد. بعد از آن نوبت به باس‌های مجاور باس ۷ می‌رسد. (۶۰۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۵)، (۶۰۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۶). این جستجو نیز تا جایی پیش می‌رود که دیگر بهبودی حاصل نشود. در اینجا است که به یک گره بهینه محلی دست یافته‌ایم. سپس الگوریتم وارد مرحله بعد می‌شود.

در جستجوی نوع سوم هم سایز و هم مکان خازن همزمان تغییر می‌کند. اگر گره شروع را همان گره حالت‌های قبل در نظر بگیریم فضای جستجو در این حالت برابر است با (خازن ۴۵۰ در تک تک باس‌های مجاور باس ۱ و خازن ۶۰۰ در باس ۷)، (خازن ۹۰۰ در تک تک باس‌های مجاور باس ۱ و خازن ۶۰۰ در باس ۷)، (خازن ۶۰۰ در باس ۱ و خازن ۴۵۰ در تک تک باس‌های مجاور باس ۷)، (خازن ۶۰۰ در باس ۱ و خازن ۹۰۰ در تک تک باس‌های مجاور باس ۷). هر گره‌ای که در این حالت مورد قبول واقع شود گره شروع برای حرکت‌های نوع اول

و دوم می‌باشد. یعنی الگوریتم به اول جستجو برای پیدا کردن بهینه محلی برمی‌گردد. الگوریتم در این نوع جستجو در جایی پایان می‌یابد که دیگر هیچ نتیجه بهتری از حرکت نوع سوم بدست نیاید. الگوریتم به حرکت نوع چهارم می‌رود.

جستجوی نوع چهارم الگوریتم را به فرار از بهینه‌های محلی که ممکن است در طی برنامه گرفتار آنها شده باشیم راهنمایی می‌کند. حالت‌های ممکن از گره شروع ۶۰۰ در باس ۱ و ۶۰۰ در باس ۷، (خازن ۶۰۰ به ترتیب در تک تک باسهای شبکه و خازن ۶۰۰ در باس ۷)، (خازن ۶۰۰ در باس یک و خازن ۶۰۰ قرار گرفته در تک تک باسهای شبکه) می‌باشد. هر نتیجه بهتری که در این حالت بدست آید به جستجوی نوع اول و دوم برمی‌گرددیم تا جایی که دیگر نتیجه بهتری بدست نیاید. نتیجه‌ای که در پایان این مرحله بدست می‌آید گره بهینه سراسری برای تعداد خازن مورد نظر می‌باشد. گرهی که برای تعداد دو خازن بدست آورده‌ایم خازن ۳۶۰۰ KVAR در باس ۲۱ و خازن ۳۶۰۰ KVAR در باس ۲۴ می‌باشد.

حال تعداد خازن را به سه افزایش می‌یابد و برای هر کدام ظرفیتی معادل  $MVAR \frac{3}{6}$  در نظر می‌گیریم. این خازن‌ها در شروع الگوریتم در باس‌های ۱۰ و ۱۶ و ۲۶ قرار می‌گیرند. الگوریتم گراف برای این تعداد خازن نیز انجام می‌شود و در نهایت نتیجه‌ای که در این بخش بدست می‌آید با نتیجه قسمت قبل مقایسه می‌شود. الگوریتم مقدار تابع هدف در این مرحله را با مقدار بدست آمده در مرحله قبل مقایسه می‌کند از آنجایی که مقدار تابع هدف کاهش یافته است بنابراین تعداد خازن به ۴ افزایش پیدا می‌کند. تمامی انواع حرکت‌ها بار دیگر انجام می‌شود و نتیجه‌ی هر مرحله با مرحله قبل مقایسه می‌شود این کار در یک حالت سیستماتیک انجام می‌شود اگر نتیجه بهتر بود تعداد خازن افزایش می‌یابد در غیراینصورت یعنی اگر تابع هدف افزایش بیابد نتایج مربوط به مرحله قبل حل بهینه سراسری برای شبکه موردنظر خواهد بود.

#### ۴.۴ نحوه بکارگیری الگوریتم گراف در طراحی بهینه فیلتر پسیو

در این قسمت جزئیات استفاده از الگوریتم گراف را برای طراحی بهینه فیلترهای پسیو در شبکه بیان می‌کنیم. شبکه مورد مطالعه، سیستم تست ۳۰ باسه IEEE می‌باشد. بارهای غیرخطی موجود در شبکه چهار یکسوکونده دیودی شش پالسه هستند که در باسهای ۵ و ۱۴ و ۲۱ و ۳۰ قرار دارند. استفاده از فیلترهای پسیو رایج‌ترین راههای کاهش هارمونیک در شبکه، در نتیجه پایین آوردن THD و کم کردن تلفات می‌باشد. خازن‌های موجود در فیلترهای پسیو در فرکانس اصلی نقش تامین توان راکتیو مورد نیاز باس‌ها و در نتیجه بهبود پروفایل ولتاژ را برعهده دارند.

در اینجا تابع هدف به گونه‌ای تعریف می‌شود که پروفایل ولتاژ باس‌ها بهبود یابد، تلفات شبکه کاهش یابد، THD ولتاژ به حدود استاندارد مجاز برسد و هزینه فیلتر می‌نیمم گردد. تلفات شبکه را شامل تلفات در فرکانس اصلی و تلفات هارمونیک‌ها در نظر می‌گیریم. تابع هدف مربوطه در ذیل نشان داده شده‌است:

$$F = (K * VTHD) + (KA * Ploss) + (kv * profv) + (k_{cfp} * Q) \quad (۲.۴)$$

که  $VTHD$  جمع انحراف THD های ولتاژ از حدود استاندارد مجاز (حد مجاز در اینجا ۴٪ انتخاب شده است)،  $Ploss$  تلفات شبکه،  $profv$  جمع انحراف ولتاژهای باس‌ها از مقدار ۱ pu و  $Q$  مقدار خازن فیلتر برحسب kvar می‌باشد. ضرایب  $K$  و  $KA$  و  $kv$  و  $k_{cfp}$  برای تبدیل به ترتیب THD ولتاژ، تلفات شبکه و پروفایل ولتاژ و مقدار خازن به هزینه استفاده شده‌است.

نحوه استفاده از الگوریتم پیشنهادی بدین صورت می‌باشد که ابتدا تعداد مینیمم فیلتر قرار گرفته در شبکه و KVAR خازن آن را خود تعیین می‌کنیم. این تعداد را برابر با ۲ و KVAR خازن فیلترها را برابر ۶۰۰ در نظر می‌گیریم. از آنجایی که در شبکه هارمونیک‌های ۵، ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۳ و ۲۵ ... وجود دارد چهار فیلتر تک تیون برای هارمونیک‌های مراتب ۵، ۷، ۱۱، ۱۳ و یک فیلتر بالاگذر برای هارمونیک‌های مراتب بالاتر

در نظر می‌گیریم. بنابراین ۵ شاخه فیلتری داریم. با داشتن مقدار خازن فیلترها و  $Q$  (ضریب کیفیت فیلتر) می‌توان مقدار  $R, L$  فیلتر را همانطور که در فصل سوم بیان شد و در ذیل نیز بار دیگر آورده شده‌است تعیین کرد.

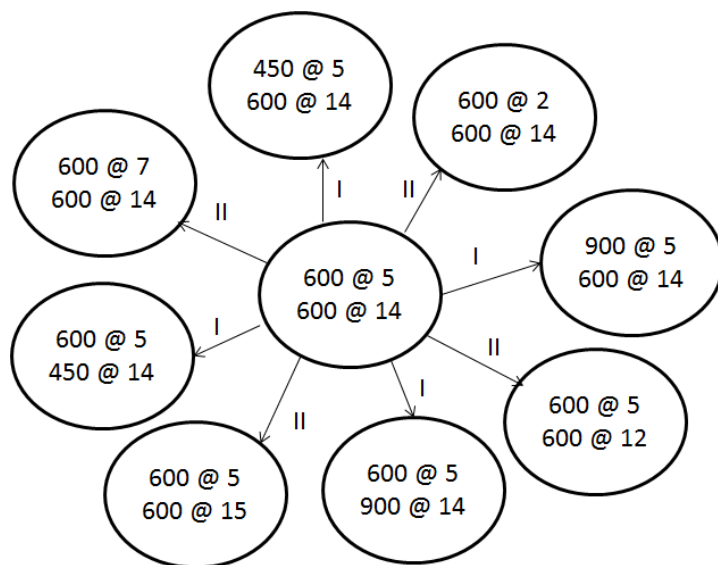
$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{1}{2\pi fCR} \rightarrow R = ? \quad (۳.۴)$$

$$X_0 = 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow L = ? \quad (۴.۴)$$

$Q$  را در این طراحی ۲۵ در نظر می‌گیریم.

گره اولیه، دو فیلتر با مقادیر خازن  $600 \text{ KVAR}$  در باس های ۵ و ۱۴ (که خود تعیین کرده ایم) می‌باشد. با بدست آوردن مقادیر پارامترهای فیلتر و قراردادن آنها در باس‌ها ۵ و ۱۴ از شبکه پخش بار در فرکانس اصلی و پخش بار هارمونیکی می‌گیریم تا بدین صورت مقدار تابع هدف متناظر با این گره را بدست آوریم. سپس الگوریتم وارد جستجوی نوع اول می‌شود. در این حرکت سائز خازن فیلتر به مقادیر مجاورش از بالا و پایین تغییر می‌کند. مقادیر هدف هر حالت محاسبه می‌شود در هر گره‌ی که مقدار تابع هدف کاهش یافت بلافاصله آن گره، گره مرکزی برای انجام جستجو می‌شود بدون آنکه بقیه حالت‌هایی که ممکن است از گره قبلی باقیمانده باشد در نظر بگیریم. بعد از آنکه دیگر نتیجه بهتری دست نداد وارد حرکت نوع دوم می‌شویم.

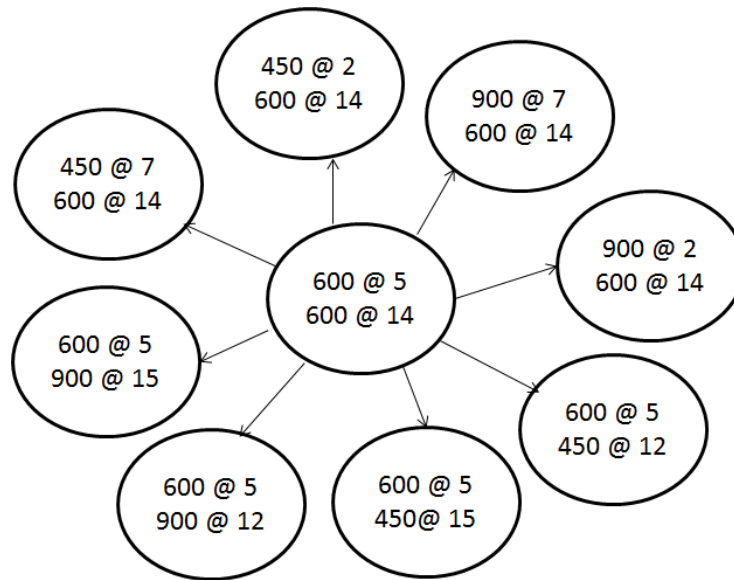
در حرکت نوع دوم تنها مکان فیلترها تک به تک به باس های مجاورشان تغییر می‌یابد یعنی مقدار المان های فیلتر طبق نتیجه ای که از قسمت قبل بدست آمده‌است بدون تغییر می‌ماند و جستجو تنها در مکان بهینه محلی می‌باشد. در پایان این مرحله به یک نقطه بهینه محلی دست یافته‌ایم. برای روشن تر شدن روش جستجو در ذیل انواع حرکت های ممکن نوع اول و دوم آورده شده‌است.



شکل ۴.۴ حرکت های ممکن انواع اول و دوم

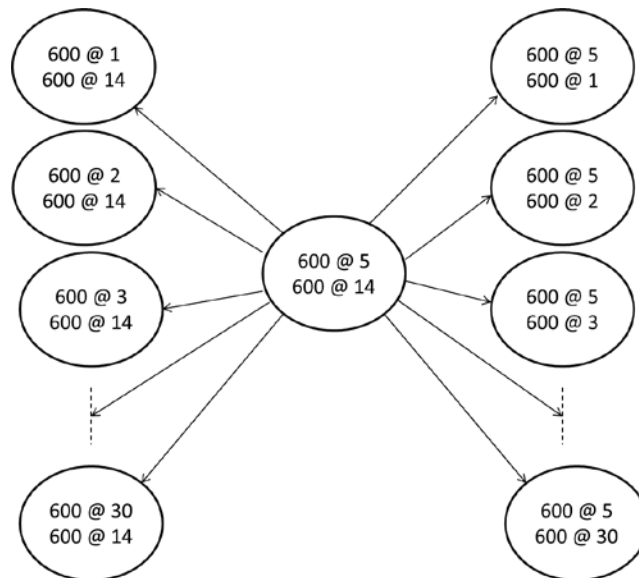
بعد از آن الگوریتم وارد جستجوی نوع سوم می‌شود. در این نوع حرکت، سایز خازن و مکان فیلتر باهم تغییر می‌کند. تغییر در سایز بصورت تغییر به یک سایز مجاور و تغییر در مکان به یک باس مجاور همزمان برای تک تک فیلترها می‌باشد. هر نتیجه بهتری که حاصل شود بلافاصله الگوریتم به جستجوی نوع اول و دوم بر می‌گردد. در اینجا نیز برای روشن تر شدن جستجوی نوع سوم، انواع ممکن این حرکتها در شکل ۵.۴ آورده شده‌است. در این مرحله الگوریتم در جایی پایان می‌یابد که گرهی با وضعیت بهتری دست ندهد. در اینجا است که الگوریتم وارد جستجوی نوع چهارم می‌شود.

در جستجوی نوع چهارم هر کدام از فیلترها به ترتیب در تمامی باس های شبکه قرار می‌گیرد. هر حرکتی که مورد قبول قرار گرفت بلافاصله به جستجوی نوع اول و دوم برمی‌گردیم بدون در نظر گرفتن بقیه حالت‌هایی که ممکن است باقی مانده باشد. این نوع جستجو بدین منظور انجام می‌شود که ممکن است در طی اجرای برنامه گرفتار بهینه‌های محلی شده باشیم بنابراین برای اینکه الگوریتم را به فرار از آنها راهنمایی کنیم این نوع جستجو را انجام می‌دهیم.



شکل ۵.۴ انواع ممکن حرکت های نوع سوم

نتیجه‌ای که در پایان این قسمت بدست می‌آید حالت بهینه سراسری برای تعداد فیلتر مورد نظر می‌باشد. در ذیل برای روشن‌تر شدن حرکت‌های نوع چهارم انواع ممکن این حرکت‌ها در شکل ۶.۴ آورده شده‌است.



شکل ۶.۴ انواع ممکن حرکت های نوع چهارم

حال تعداد فیلتر را به سه افزایش می‌دهیم. این سه فیلتر با مقادیر خازن  $3/6MVAR$  در باسهای ۴ و ۲۰ و ۲۷ قرار می‌دهیم. انتخاب باسهای اولیه و مقادیر خازن فیلترها کاملاً اختیاری است. کارایی الگوریتم در اینست که

همه حالت‌های اولیه در نهایت به یک جواب بهینه برسد. الگوریتم گراف بصورت روالی که در قبل توضیح داده شد برای این تعداد خازن نیز چهار پروسه جستجو را انجام می‌دهد و در نهایت سه باس را به عنوان باسهای انتخابی برای حالت بهینه سراسری تعیین می‌کند. بعد از آن الگوریتم، مقدار تابع هدفی که در پایان این مرحله بدست آمده را با مقدار تابع هدفی که در پایان مرحله قبل بدست آمده مقایسه می‌کند اگر این مقدار کاهش یافته باشد الگوریتم تعداد فیلتر را افزایش می‌دهد و حالت بهینه را برای تعداد فیلتر مورد نظر بدست می‌آورد. این کار به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا جایی که در مرحله ای، در نهایت مقدار تابع هدف بدست آمده افزایش داشته باشد و بهبودی مشاهده نشود در اینجا است که نتایج مربوط به تعداد فیلتر مرحله قبل جواب نهایی مسئله و در نتیجه گره بهینه سراسری ما می‌باشد.

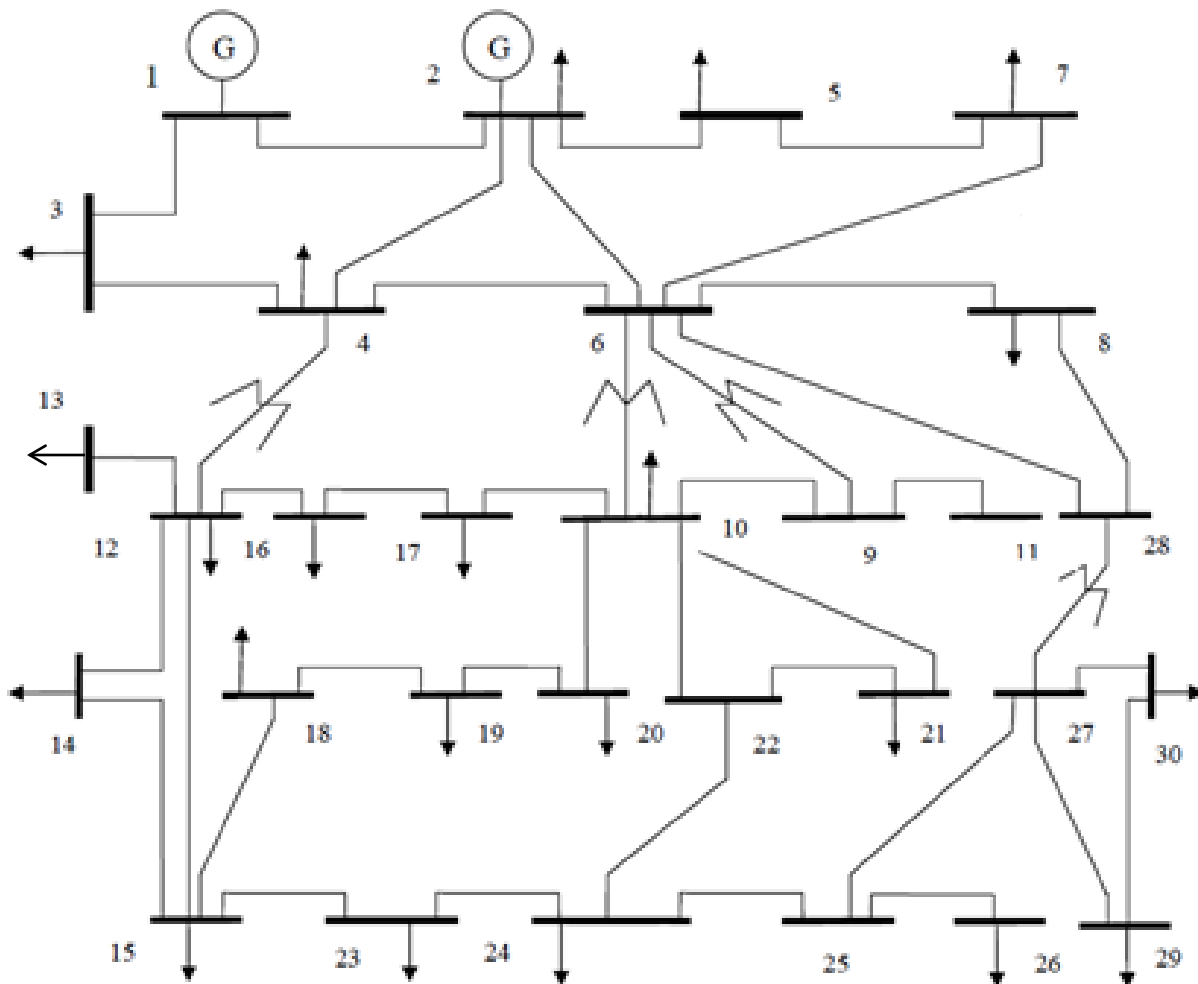
## فصل پنجم

# نتایج



## ۱.۵ شبکه مورد بررسی

شبکه مورد مطالعه، سیستم تست ۳۰ باسه IEEE می‌باشد که در ذیل نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به بارها و خطوط در پیوست آورده شده است.



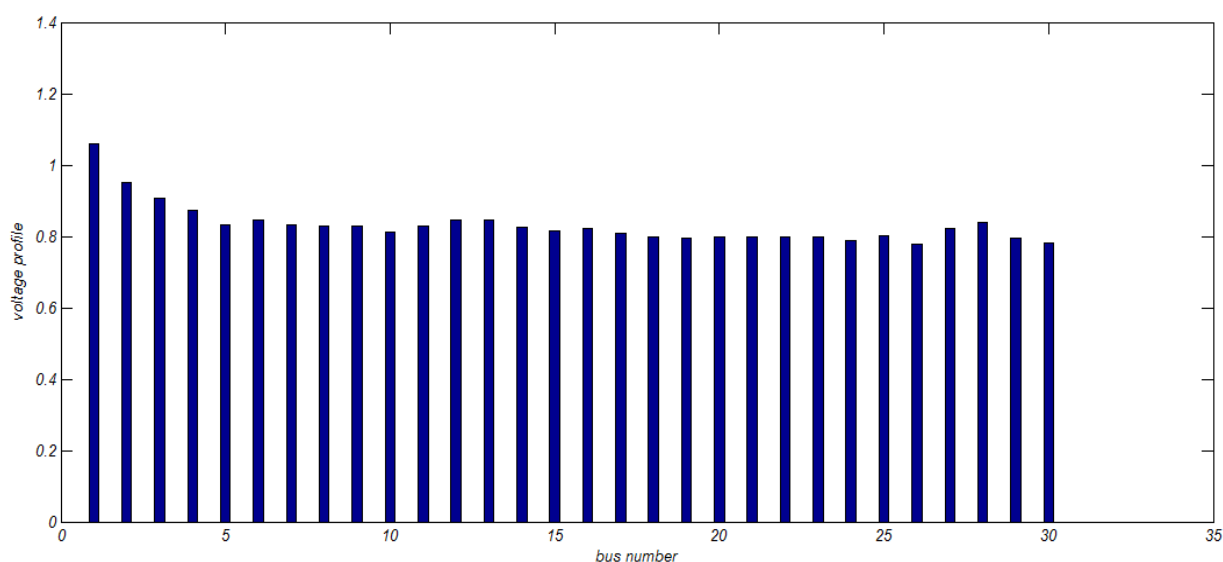
شکل ۱.۵ شبکه ۳۰ باسه IEEE

## ۲.۵ نتایج مربوط به خازن گذاری

در شبکه فوق، باس یک را به عنوان باس مرجع با مقدار  $< 0.1/0.6$  فرض می‌کنیم. شبکه را در حالتی جبرانسازی می‌کنیم که هیچ کندانسور سنکرون یا خازن جبرانسازی در آن به کار نرفته باشد. بارهای موجود در شبکه را تماماً خطی در نظر می‌گیریم.

ابتدا از الگوریتم گراف برای جبرانسازی خازنی شبکه استفاده می‌کنیم. قبل از خازن‌گذاری، از شبکه پخش بار گرفته می‌شود و وضعیت شبکه از لحاظ ولتاژ، جریان و تلفات مشخص می‌شود.

نتایج پخش بار از شبکه مورد بررسی بدون حضور خازن جبرانسازی:



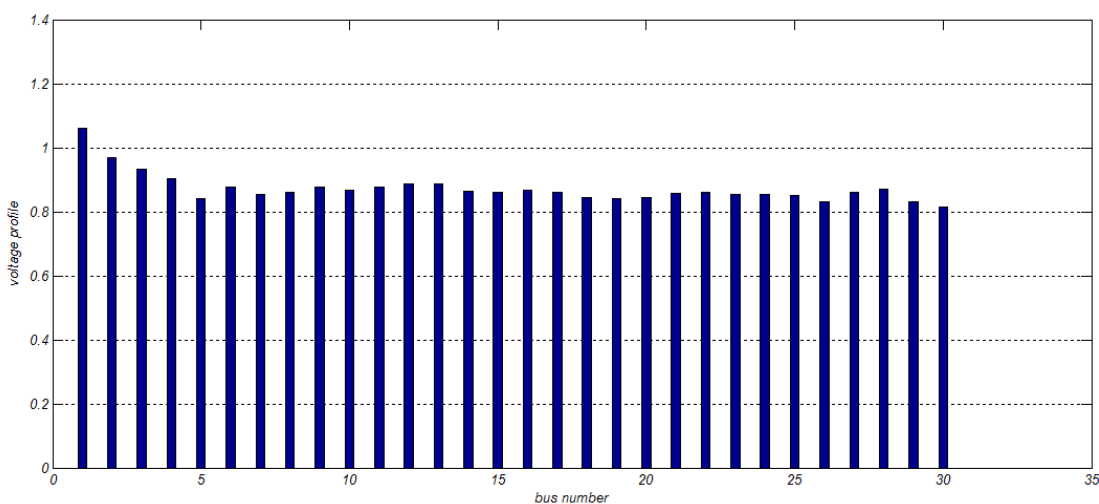
شکل ۲.۵ وضعیت ولتاژها در باسهای شبکه

همانطور که مشاهده می‌شود ولتاژ در باسها افت شدیدی دارد و مقادیر غیرقابل قبول می‌باشد. برای جبرانسازی شبکه با خازن و تعیین سایز و تعداد بهینه خازن‌های مورد نیاز در سیستم، از الگوریتم گراف استفاده می‌کنیم. تعداد اولیه خازن‌ها را دو در نظر می‌گیریم. الگوریتم ابتدا برای دو خازن حالت بهینه را پیشنهاد می‌دهد سپس تعداد خازن‌ها را افزایش می‌دهد تا به تعداد بهینه دست یابد. در اینجا نتایج مراحل الگوریتم آورده شده‌است.

مرحله اول: در این مرحله تعداد خازن برابر دو می‌باشد. الگوریتم اندازه و موقعیت بهینه را برای این تعداد خازن پیشنهاد می‌دهد. نتایج این مرحله در جدول ۱.۵ و شکل ۳.۵ آورده شده است.

جدول ۱.۵ نتایج خازن گذاری در مرحله اول

تعداد خازنها	سایز خازنها (MVAR)	موقعیت	تلفات شبکه (MWATT)
۱	۳/۶	۲۱	۲۴/۴۲۲۸
۲	۳/۶	۲۴	



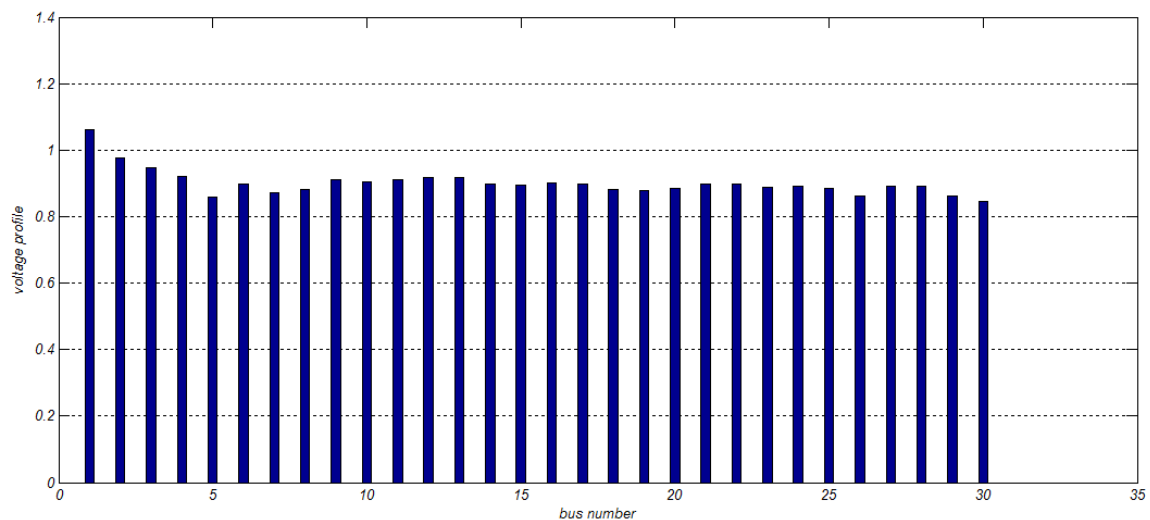
شکل ۳.۵ وضعیت ولتاژ باسها در مرحله اول

تلفات شبکه را بعد از گرفتن پخش بار و اختلاف بین توانهای تولیدی در شبکه و توانهای مصرفی بدست می‌آوریم. مشاهده می‌شود که وضعیت ولتاژها تا حدودی بهبود یافته است اما هنوز به مطلوب خود دست نیافته‌ایم. بنابراین الگوریتم به تعداد خازن قرار گرفته در شبکه می‌افزاید.

مرحله دوم: الگوریتم تعداد خازن را به ۳ افزایش می‌دهد. نتایج مربوط به موقعیت و سایز بهینه خازن‌ها در این مرحله را که با استفاده از الگوریتم گراف بدست آمده است در جدول ذیل و شکل ۴.۵ آورده‌ایم.

جدول ۲.۵ نتایج خازن‌گذاری در مرحله دوم

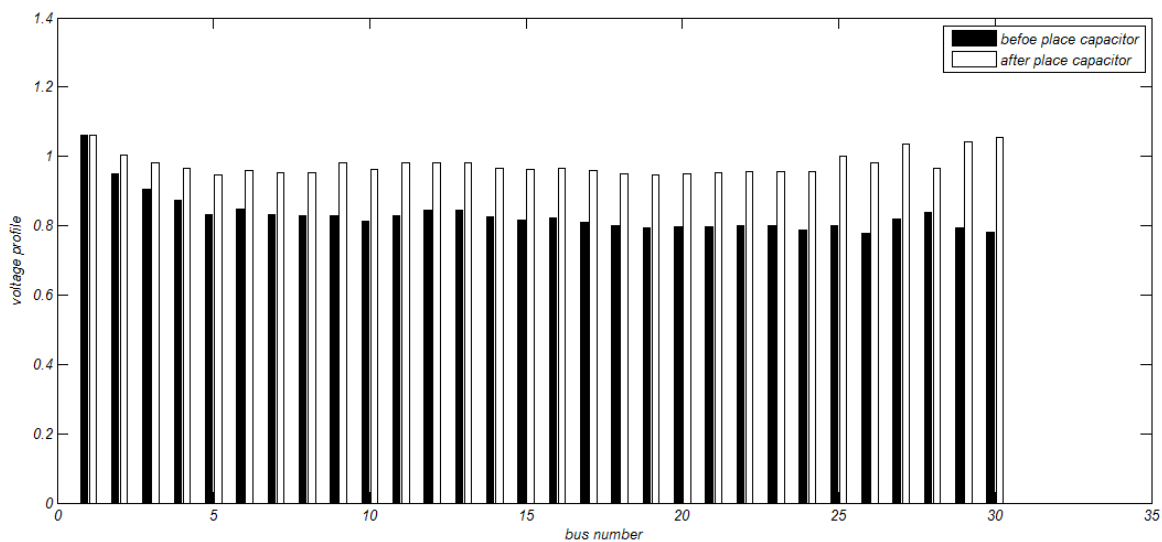
تعداد خازنها	سایز خازنها (MVAR)	موقعیت	تلفات شبکه (MWATT)
۱	۳/۶	۱۰	۲۲/۷۰۸۵
۲	۳/۶	۲۱	
۳	۳/۶	۲۴	



شکل ۴.۵ وضعیت ولتاژ باسها در مرحله دوم

مشاهده می‌شود از آنجایی که نتایج مرحله دوم نسبت به مرحله اول بهبود یافته‌است لذا الگوریتم تعداد خازن را به چهار افزایش می‌دهد و جستجو را برای تعیین سایز و موقعیت بهینه در این مرحله ادامه می‌دهد. این کار به همین ترتیب ادامه می‌یابد تا جایی که دیگر نتایج آن مرحله نسبت به مرحله قبل از آن بهبودی نداشته‌باشد. در اینجا الگوریتم به تعداد ۷ خازن که می‌رسد مقدار تابع هدف کاهش نمی‌یابد بنابراین جواب مربوط به تعداد ۶ خازن، بدست‌آمده در مرحله قبل از آن، جواب سراسری مسئله می‌باشد. نتایج نهایی در ادامه آورده شده‌است.

نتایج نهایی الگوریتم گراف در خازن‌گذاری شبکه ۳۰ باسه:

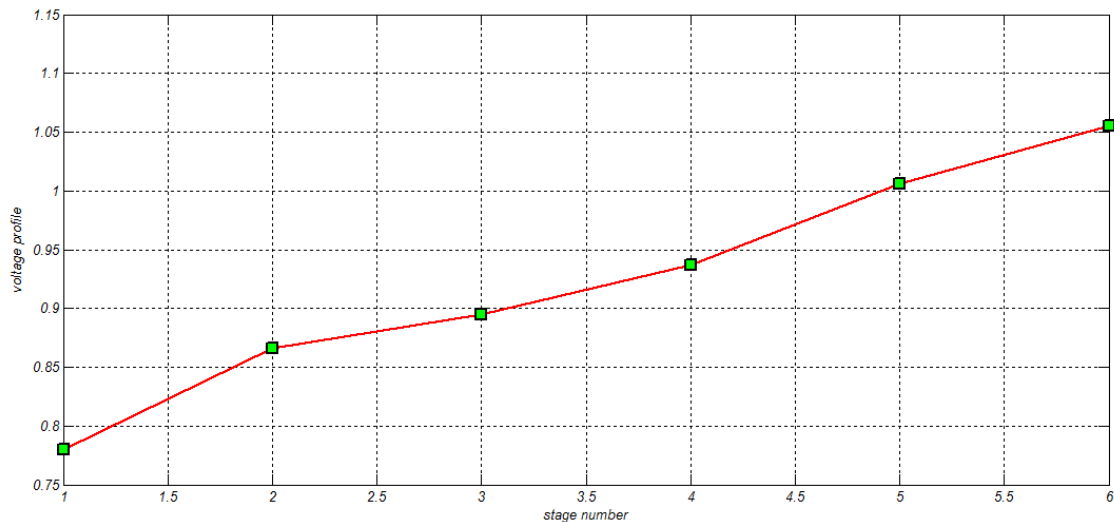


شکل ۵.۵ وضعیت ولتاژ باسها بعد از خازن گذاری

جدول ۳.۵ نتایج نهایی الگوریتم درخازن گذاری

تعداد خازن ها	MVAR هر خازن	موقعیت خازن	Min ولتاژ
۱	۳/۶	۵	۰/۹۵
۲	۳/۶	۷	Max ولتاژ
۳	۳/۶	۸	۱/۰۶
۴	۳/۶	۹	تلفات (MWATT)
۵	۳/۶	۲۷	۱۹/۷۵۹
۶	۳/۶	۳۰	

از میان باسهای شبکه یکی از باسها را به عنوان باس نمونه برای بررسی وضعیت ولتاژ در طی اجرای برنامه انتخاب می‌کنیم. در شکل ۶.۵ مقادیر ولتاژ در باس ۳۰ در طی مراحل اجرای برنامه آورده شده‌است.



شکل ۶.۵ مقادیر ولتاژ در باس ۳۰ در هر مرحله

مقادیر ولتاژ باس‌ها در هر مرحله از طراحی برای تمامی باس‌های شبکه در قالب جدول ۴.۵ آورده شده است.

جدول ۴.۵ مقدار ولتاژ باس‌ها در هر مرحله

شماره باس	وضعیت ولتاژ باس‌ها در هر مرحله					
	مرحله اول	مرحله دوم	مرحله سوم	مرحله چهارم	مرحله پنجم	مرحله ششم
۱	۱.۰۶۰۰	۱.۰۶۰۰	۱.۰۶۰۰	۱.۰۶۰۰	۱.۰۶۰۰	۱.۰۶۰۰
۲	۰.۹۵۰۹	۰.۹۷۲۲	۰.۹۸۰۷	۰.۹۸۹۱	۰.۹۹۶۳	۱.۰۰۳۱
۳	۰.۹۰۵۵	۰.۹۴۰۵	۰.۹۵۴۴	۰.۹۶۳۰	۰.۹۷۴۴	۰.۹۸۳۱
۴	۰.۸۷۲۶	۰.۹۱۴۹	۰.۹۳۱۷	۰.۹۴۲۱	۰.۹۵۵۹	۰.۹۶۶۵
۵	۰.۸۳۲۵	۰.۸۷۱۳	۰.۸۸۶۶	۰.۹۱۵۴	۰.۹۲۸۶	۰.۹۴۶۲
۶	۰.۸۴۷۰	۰.۸۹۵۶	۰.۹۱۵۱	۰.۹۲۹۲	۰.۹۴۶۷	۰.۹۶۰۷
۷	۰.۸۳۱۱	۰.۸۷۶۴	۰.۸۹۴۴	۰.۹۱۴۸	۰.۹۳۰۷	۰.۹۵۳۷
۸	۰.۸۲۹۸	۰.۸۸۰۲	۰.۹۰۰۲	۰.۹۱۵۱	۰.۹۳۸۵	۰.۹۵۳۳
۹	۰.۸۳۰۰	۰.۹۰۸۵	۰.۹۴۲۳	۰.۹۵۷۶	۰.۹۷۵۳	۰.۹۸۰۱

10	.1132	.9063	.9475	.9465	.9643	.9640
11	.1300	.9085	.9423	.9576	.9753	.9801
12	.1455	.9232	.9536	.9551	.9727	.9802
13	.1455	.9232	.9536	.9551	.9727	.9802
14	.1244	.9075	.9396	.9402	.9575	.9651
15	.1166	.9036	.9368	.9361	.9535	.9612
16	.1227	.9078	.9431	.9439	.9613	.9656
17	.1093	.9006	.9403	.9398	.9576	.9587
18	.1797	.8905	.9270	.9263	.9441	.9490
19	.1937	.8864	.9248	.9239	.9419	.9452
20	.1975	.8905	.9296	.9287	.9466	.9490
21	.1979	.9035	.9438	.9336	.9516	.9538
22	.1989	.9039	.9439	.9344	.9524	.9554
23	.1994	.8991	.9336	.9274	.9452	.9553
24	.1873	.9028	.9388	.9251	.9431	.9565
25	.1009	.8965	.9275	.9474	.9651	1.0008
26	.1781	.8763	.9080	.9284	.9465	.9828
27	.1204	.9023	.9299	.9706	.9879	1.0372
28	.1373	.8902	.9109	.9278	.9465	.9642
29	.1799	.8794	.9078	.9496	.9915	1.0408
30	.1802	.8662	.8950	.9374	1.0065	1.0551

## ۳.۵ نتایج مربوط به فیلتر گذاری

برای قرارداد فیلتر در شبکه، چهار بار غیرخطی را در باسهای ۵، ۱۴، ۲۱ و ۳۰ به شبکه اضافه می‌کنیم. بارهای غیرخطی را بصورت منابع جریان هارمونیک در نظر می‌گیریم. که این بارها چهار مبدل یکسوکننده دیودی شش پالسه می‌باشند. برای انتخاب نوع فیلتر قرار گرفته در شبکه، از میان ساختارهای مختلف فیلتر پسیو موازی مطالعات انجام شده در این زمینه [7] نشان می‌دهد که از آنجایی که معمولاً میزان هارمونیک‌های مراتب پایین نسبت به مراتب بالاتر بیشتر می‌باشد بنابراین نیاز به میرایی شدیدتری برای این هارمونیک‌ها داریم که با توجه به مشخصه فیلترهای تک تنظیمه می‌توان به این میزان میرایی دست یابیم در نتیجه برای جبران هارمونیک‌های مراتب پایین از فیلترهای تک تنظیمه استفاده می‌شود که برای هر مرتبه از هارمونیک‌ها یک فیلتر قرار می‌گیرد که فرکانس تشدید آن برابر فرکانس هارمونیک مورد نظر می‌باشد و از یک فیلتر بالاگذر برای جبران هارمونیک‌های مراتب بالاتر استفاده می‌شود. بنابراین هر شاخه فیلتری شامل پنج زیر شاخه، چهار شاخه مربوط به فیلترهای تک تنظیمه و یک شاخه مربوط به فیلتر بالاگذر می‌باشد. در جدول زیر میزان تزریق جریان هر هارمونیک برای هر کدام از بارهای غیر خطی آورده شده است.

با گرفتن پخش بار در فرکانس اصلی و پخش بار هارمونیک، مقدار ولتاژ در فرکانس اصلی و ولتاژهای هارمونیک و همچنین THD ولتاژ باس‌ها را بدست می‌آوریم. در شکل ۷.۵ و ۸.۵ وضعیت ولتاژ و THD باس‌ها قبل از قرارداد فیلتر آورده شده است.



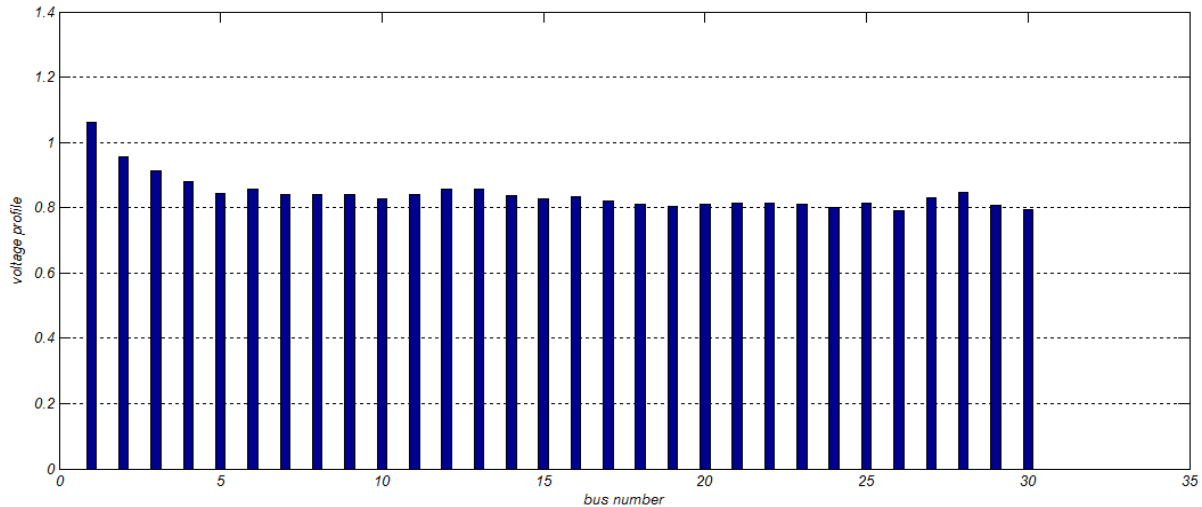
جدول ۵.۵ میزان تزریق هارمونیک در باسهای مربوطه

میزان هر هارمونیک در باس ۵	
۵	$0.0072 < -1/1960$
۷	$0.0051 < 0/2106$
۱۱	$0.0033 < -0/1179$
۱۳	$0.0028 < 1/2886$
۱۷	$0.0021 < 0/9601$
۱۹	$0.0019 < 2/3667$
۲۳	$0.0016 < 2/382$
۲۵	$0.0014 < 3/4448$

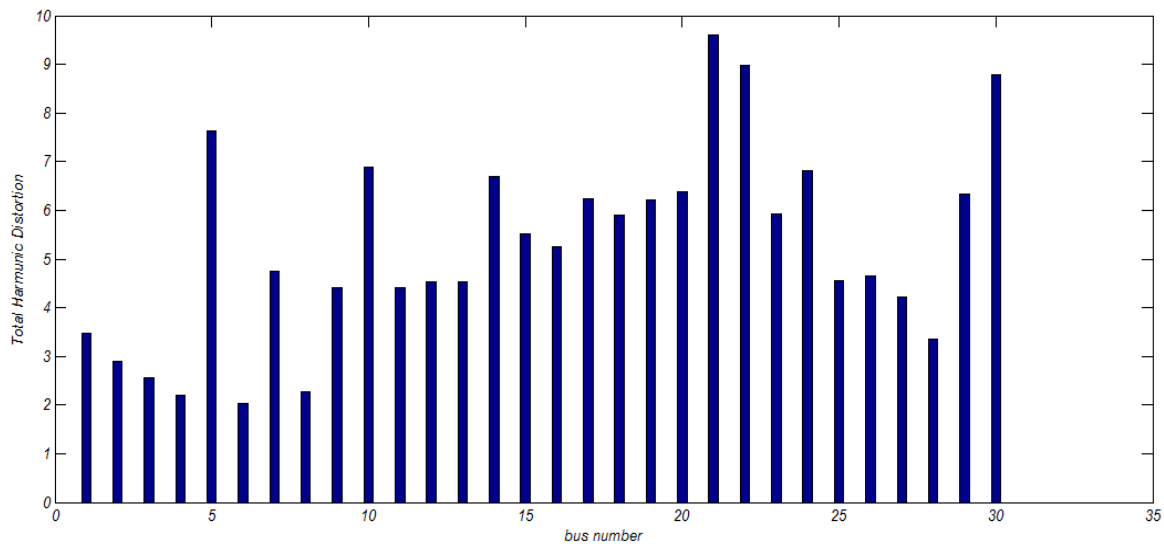
میزان هر هارمونیک در باس ۱۴	
۵	$0.0128 < -3.0482$
۷	$0.0091 < -2.3826$
۱۱	$0.0058 < -4.1928$
۱۳	$0.0049 < -3.5272$
۱۷	$0.0038 < -5.3374$
۱۹	$0.0034 < -4.6717$
۲۳	$0.0028 < -6.4820$
۲۵	$0.0026 < -5.8163$

میزان هر هارمونیک در باس ۲۱	
۵	$0.0416 < -0.2628$
۷	$0.0297 < -0.9963$
۱۱	$0.0189 < 0.6784$
۱۳	$0.0160 < -0.0550$
۱۷	$0.0122 < 1.6197$
۱۹	$0.0109 < 0.8862$
۲۳	$0.0090 < 2.5609$
۲۵	$0.0083 < 1.8275$

میزان هر هارمونیک در باس ۳۰	
۵	$0.0082 < 1.0650$
۷	$0.0059 < 0.8626$
۱۱	$0.0037 < 3.5996$
۱۳	$0.0032 < 3.3972$
۱۷	$0.0024 < 6.1341$
۱۹	$0.0022 < 5.9318$
۲۳	$0.0018 < 8.6687$
۲۵	$0.0016 < 8.4664$



شکل ۷.۵ وضعیت ولتاژ باس ها قبل از قراردادن فیلتر



شکل ۸.۵ THD ولتاژ باس ها قبل از قراردادن فیلتر

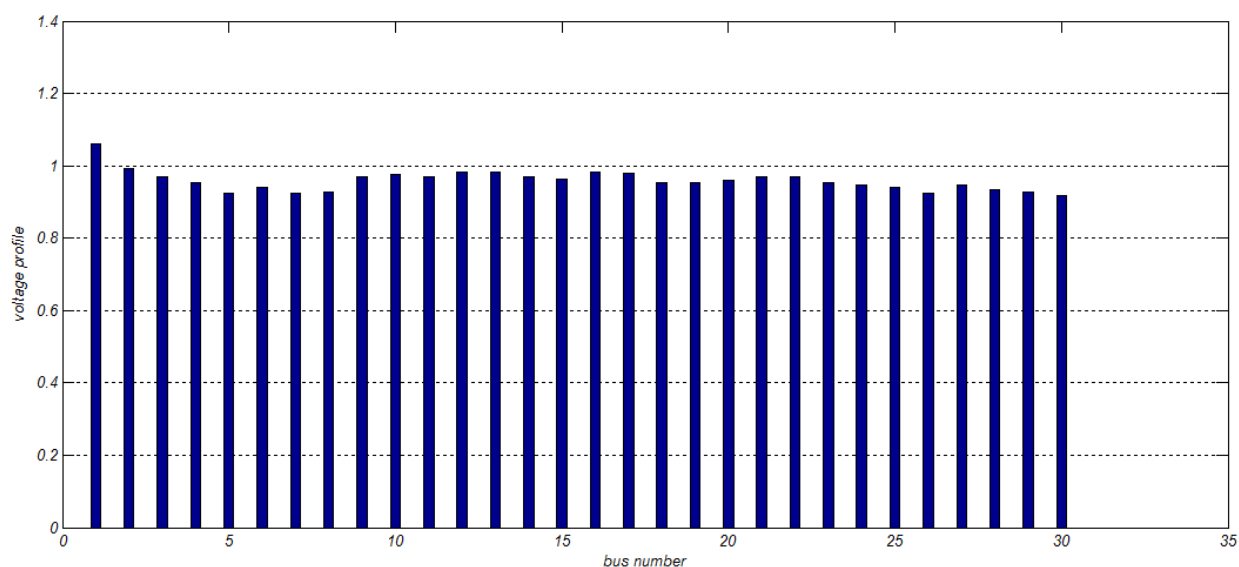
تلفات شبکه قبل از فیلتر گذاری ۲۳/۷۳۸۰ بدست آمده است، که این تلفات شامل تلفات در فرکانس اصلی و تلفات هارمونیک می باشد. همانطور که مشاهده می شود ولتاژها در باسها افت بسیار شدیدی دارند. THD ولتاژها نیز تا حدود ۱۰٪ می باشد که مجاز نمی باشد قصد داریم با طراحی فیلتر با استفاده از الگوریتم گراف این مقادیر را به مقدار مجازشان برسانیم. شروع الگوریتم را دو فیلتر در باسهای ۱ و ۲۱ قرار می دهیم تا حالت بهینه برای

این تعداد فیلتر را بدست آوریم. سپس الگوریتم تعداد فیلترها را افزایش می دهد تا به تعداد بهینه دست یابد. در اینجا نتایج در هر مرحله نشان داده شده است.

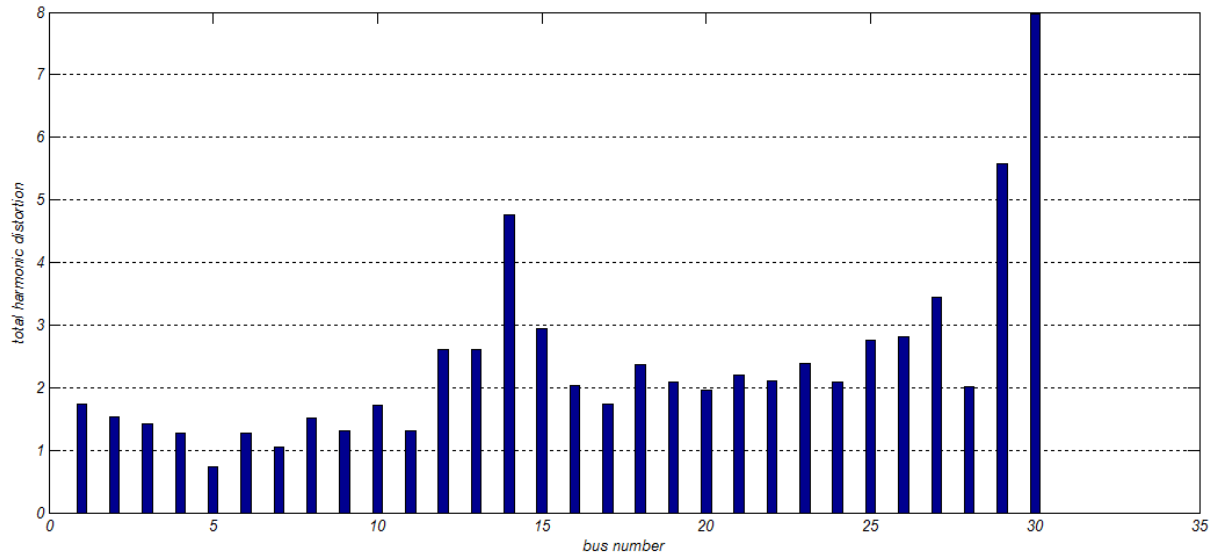
مرحله اول:

جدول ۶.۵ نتایج فیلترگذاری در مرحله اول

تعداد فیلترها	سایز خازن (MVAR)	موقعیت	تلفات شبکه (MWATT)
۱	۳/۶	۵	۲۱/۰۷۷۹
۲	۳/۶	۲۱	



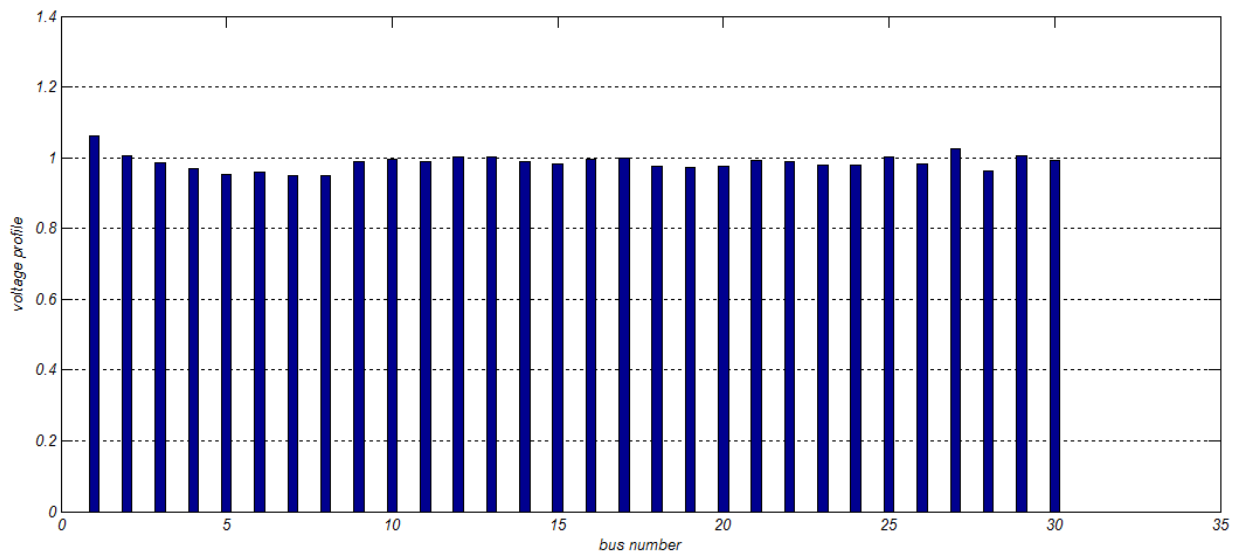
شکل ۹.۵ وضعیت ولتاژها در مرحله اول فیلترگذاری



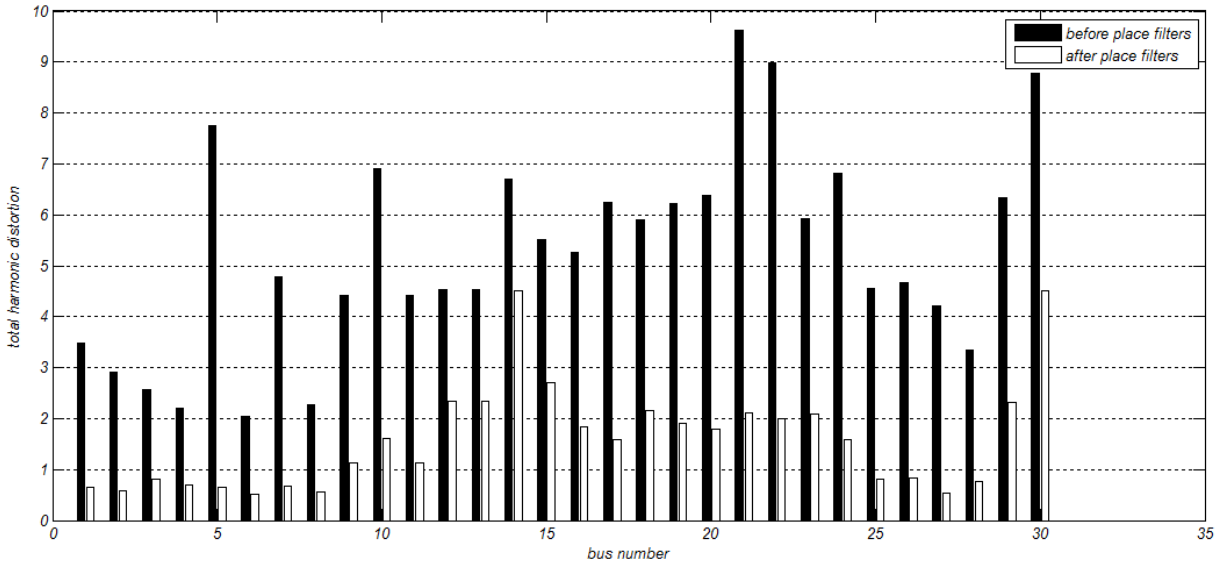
شکل ۱۰.۵ وضعیت THD ولتاژها در مرحله اول فیلترگذاری

همانطور که مشاهده می‌شود وضعیت شبکه بهبود یافته‌است تلفات شبکه کمتر شده‌است. مقدار ولتاژ باس ها به ۱ pu نزدیک شده‌است و THD ولتاژها کاهش یافته‌است. بنابراین الگوریتم با محاسبه تابع هدف و بهبود آن تعداد فیلتر را به ۳ افزایش می‌دهد و حالت بهینه را برای این تعداد بدست می‌آورد.

مرحله دوم:



شکل ۱۱.۵ ولتاژ باس ها بعد از فیلترگذاری



شکل ۱۲.۵ وضعیت THD ولتاژها

جدول ۷.۵ نتایج نهایی فیلتر گذاری

تعداد فیلترها	موقعیت فیلترها	Min ولتاژ	THD min
۱	۵	۰/۹۵	۰/۵۱۶۸
۲	۲۱	Max ولتاژ	THD max
۳	۲۷	۱/۰۶	۴/۳

میزان تلفات در این حالت  $20/2109$  MW بدست آمده است. مشاهده می شود که نتایج بسیار بهبود یافته است الگوریتم تعداد فیلتر را به ۴ افزایش می دهد و با قرار دادن این تعداد فیلتر در شبکه به انجام حرکت های ممکن برای پیدا کردن حالت بهینه در این مرحله می پردازد. با بررسی نتایج معلوم می شود که تابع هدف بهبودی نداشته و کاهش پیدا نکرده است. بنابراین جواب بهینه سراسری، تعداد فیلتر مرحله قبل یعنی سه فیلتر با حالت های بدست آمده در آن مرحله می باشد.

## مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر:

ملاحظه می‌شود که این الگوریتم، از لحاظ به کارگیری و اجرا بسیار آسان می‌باشد چرا که در این الگوریتم برخلاف بسیاری از روش‌ها نیازی به استفاده از تابع هدف پیچیده نمی‌باشد. از آنجایی که پروسه جستجو در این الگوریتم به چهار زیر گراف به‌گونه‌ای تقسیم می‌شود که نیاز به بررسی تمام حالت‌های ممکن نباشد و روال طراحی بصورت موثر انجام شود لذا زمان لازم برای رسیدن به حل در این روش در مقایسه با الگوریتم‌هایی نظیر الگوریتم ژنتیک بسیار کم می‌باشد و چون بیشترین زمان در الگوریتم گراف به انجام پخش بار در هر گره اختصاص می‌یابد لذا می‌توان با انجام روش‌هایی چون پخش بار سریع این زمان را به حداقل کاهش داد و نیز نتایج بدست آمده از این روش و برآورده شدن قیود مسئله نشان دهنده کارایی این روش حل می‌باشد.

## فصل دهم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۱.۶ نتیجه گیری

در شبکه های قدرت امروزی با وجود بارهای غیر خطی مسئله هارمونیکها در سیستم قدرت امری غیر قابل اجتناب می باشد و از آنجایی که فیلترهای پسیو به دلیل کم هزینه بودن و سادگی طراحی هنوز رایج ترین راه جبران هارمونیکها است در این پایان نامه از این نوع فیلتر استفاده شده است. در گام نخست اطلاعات کلی در خصوص مسئله هارمونیکهای ولتاژ و جریان آورده شده است و سپس روشهای رایج فیلترینگ هارمونیک و توپولوژی های مداری مرتبط با آنها نشان شده است. قوت و ضعف و مشخصات عملکرد هر کدام از روشها نیز بیان شد. در قدم بعد کلیاتی در خصوص فیلترهای پسیو و نحوه طراحی آنها آورده شده است. بیان شد که چگونه می توان طراحی بهینه ای برای المانهای فیلتر داشت و چگونه این فیلترها را در شبکه از لحاظ تعداد، اندازه و موقعیت بهینه سازی کرد. در این پایان نامه از الگوریتم گراف به عنوان روشی برای تعیین سائز و موقعیت بهینه فیلترهای پسیو در شبکه استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده کارایی این روش حل می باشد. چرا که در این الگوریتم برخلاف بسیاری از روشها نیازی به محاسبات پیچیده برای بدست آوردن تابع هدف نمی باشد. از سوی دیگر در این روش چهار نوع زیرگراف جستجو به گونه ای تعریف شده اند که کل فضای مسئله را جستجو کنند تا الگوریتم به گونه ای موثر پیش رود بطوریکه نیاز به تست تعداد زیادی از حالت های غیر ضروری نمی باشد و الگوریتم از دام بهینه های محلی که ممکن است در طی اجرای برنامه گرفتار آنها شده باشد نیز نجات یابد لذا سرعت همگرایی الگوریتم بالا است. از این روش برای طراحی فیلترهای پسیو شبکه ۳۰ باسه IEEE استفاده شده است. با اعمال این الگوریتم و مطالعه نتایج آن مشخص شد که قیدهای مسئله برآورده شده اند بطوریکه پروفایل ولتاژ باسها بسیار بهبود یافته است و تمام ولتاژهای باسها در رنج قابل قبول می باشند و THD ولتاژها نیز در محدوده ی مجاز قرار گرفته اند.



## ۲.۶ پیشنهادات

در اینجا تابع هدف را به گونه‌ای تعریف کرده‌ایم که مشخصات شبکه از جمله تلفات شبکه و THD ولتاژ باسها مینیمم گردد و همچنین پروفایل ولتاژ باسها بهبود یابد. کار دیگری که در این زمینه می‌توان انجام داد اینست که طراحی را به گونه‌ای انجام دهیم که پارامترهای فیلتر از نظر تلفات خود فیلتر و هزینه آن مینیمم گردد و بهینه سازی روی این قسمت از طراحی نیز انجام شود. به عبارت دیگر علاوه بر پارامترهای شبکه پارامترهای فیلتر را نیز بهبود داد. پیشنهاد دیگری که می‌توان ارائه داد اینست که برای بالا بردن کارایی این روش می‌توان ابتدا با استفاده از آنالیز حساسیت باسهای کاندید برای قرار دادن فیلتر را تعیین کرد سپس از الگوریتم گراف برای بهینه سازی استفاده کرد.

BUS DATA			
Bus	Type	Load MW	Load MVAR
1	PV	0	0
2	PV	21.7	12.7
3	PQ	2.4	1.2
4	PQ	7.6	1.6
5	PQ	94.2	19
6	PQ	0	0
7	PQ	22.8	10.9
8	PQ	30	30
9	PQ	0	0
10	PQ	5.8	2
11	PQ	0	0
12	PQ	11.2	7.5
13	PQ	0	0
14	PQ	6.2	1.6
15	PQ	8.2	2.5
16	PQ	3.5	1.8
17	PQ	9	5.8
18	PQ	3.2	0.9
19	PQ	9.5	3.4
20	PQ	2.2	0.7
21	PQ	17.5	11.2
22	PQ	0	0
23	PQ	3.2	1.6
24	PQ	8.7	6.7
25	PQ	0	0
26	PQ	3.5	2.3
27	PQ	0	0
28	PQ	0	0
29	PQ	2.4	0.9
30	PQ	10.6	1.9

Branch Data						
From	To	Type	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Tap
1	2	Transmission Line	0.0192	0.0575	0.0264	N/A
1	3	Transmission Line	0.0452	0.1852	0.0204	N/A
2	4	Transmission Line	0.057	0.1737	0.0184	N/A
3	4	Transmission Line	0.0132	0.0379	0.0042	N/A
2	5	Transmission Line	0.0472	0.1983	0.0209	N/A
2	6	Transmission Line	0.0581	0.1763	0.0187	N/A
4	6	Transmission Line	0.0119	0.0414	0.0045	N/A
5	7	Transmission Line	0.046	0.116	0.0102	N/A
6	7	Transmission Line	0.0267	0.082	0.0085	N/A
6	8	Transmission Line	0.012	0.042	0.0045	N/A
6	9	Transformer	0	0.208	0	1.078
6	10	Transformer	0	0.556	0	1.069
9	11	Transmission Line	0	0.208	0	N/A
9	10	Transmission Line	0	0.11	0	N/A
4	12	Transformer	0	0.256	0	1.032
12	13	Transmission Line	0	0.14	0	N/A
12	14	Transmission Line	0.1231	0.2559	0	N/A
12	15	Transmission Line	0.0662	0.1304	0	N/A
12	16	Transmission Line	0.0945	0.1987	0	N/A
14	15	Transmission Line	0.221	0.1997	0	N/A
16	17	Transmission Line	0.0824	0.1923	0	N/A
15	18	Transmission Line	0.107	0.2185	0	N/A
18	19	Transmission Line	0.0639	0.1292	0	N/A
19	20	Transmission Line	0.034	0.068	0	N/A
10	20	Transmission Line	0.0936	0.209	0	N/A
10	17	Transmission Line	0.0324	0.0845	0	N/A
10	21	Transmission Line	0.0348	0.0749	0	N/A
10	22	Transmission Line	0.0727	0.1499	0	N/A
21	22	Transmission Line	0.0116	0.0236	0	N/A
15	23	Transmission Line	0.1	0.202	0	N/A
22	24	Transmission Line	0.115	0.179	0	N/A
23	24	Transmission Line	0.132	0.27	0	N/A
24	25	Transmission Line	0.1885	0.3292	0	N/A
25	26	Transmission Line	0.2544	0.38	0	N/A
25	27	Transmission Line	0.1093	0.2087	0	N/A
28	27	Transformer	0	0.396	0	1.068
27	29	Transmission Line	0.2198	0.4153	0	N/A
27	30	Transmission Line	0.3202	0.6027	0	N/A
29	30	Transmission Line	0.2399	0.4533	0	N/A
8	28	Transmission Line	0.0636	0.2	0.0214	N/A
6	28	Transmission Line	0.0169	0.0599	0.0065	N/A

## References

- [۱] باقری م و مهروی ر، "کیفیت توان و اثرات آن بر تجهیزات فشار قوی" جلد اول، انتشارات ستاره کویر، تهران ۱۳۸۹
- [2] hazem Z., (2005), thesis, "low pass broadband harmonic filter design", The Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Middle East Technical University.
- [3] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electric Power Systems, IEEE Std. 519, 1992.
- [4] Qin N., (2009), thesis, "Optimization of harmonics filter design for wind turbine parks", Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark.
- [5] Das j. C., "passive filters—potentialities and limitations" **IEEE transactions on industry applications**, vol. 40, no. 1, January/February 2004.
- [6] abdel aleem sh., faheemzobaa a. and abdel aziz m. "optimal c-type passive filter based on minimization of the voltage harmonic distortion for nonlinear loads" **IEEE transactions on industrial electronics**, vol. 59, no. 1, January 2012
- [7] alexandre b. Nassif, wilsunxu, fellow and walmirfreitas "an investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications" **IEEE transactions on power delivery**, vol. 24, no. 3, July 2009
- [8] Abou el-ela a.a., Allam s., El-arwash h. "an optimal design of single tuned filter in distribution systems" **Electric Power Systems Research**, doi:10.1016/j.epsr.2007.07.004, November 2007
- [9] liu zhizhen, yang zhijian and zhang xin "principle and simulation of the self-tuning Passive filter" **Industry Application Conference**, 1884 – 1887, Fortieth IAS Annual Meeting, 2005
- [10] gary Chang, hung-lu wang, and shou-yung chu "strategic placement and sizing of passive filters in a power system for controlling voltage distortion" **IEEE transactions on power delivery**, vol. 19, no. 3, July 2004
- [11] garyw. Chang, shou-yung chu, and hung-lu wang "a new method of passive harmonic filter planning for controlling voltage distortion in a power system " **IEEE transactions on power delivery**, vol. 21, no. 1, January 2006
- [12] Chang, Y. -P. et al. "integrated feasible direction method and genetic algorithm for optimal planning of harmonic filters with uncertainty conditions" **Expert Systems with Applications**, doi:10.1016/j.eswa.2008.02.033, 2008.

- [13] Low, C. et al. "An application of sequential neural-network approximation for sitting and sizing passive harmonic filters" **Expert Systems with Applications**, doi:10.1016/j.eswa.2008.01.004, 2008
- [14] ying-pin chang, chinyao low, and chi-jui wu,"optimal design of discrete-value passive harmonic filters using sequential neural-network approximation and orthogonal array" **IEEE transactions on power delivery**, vol. 22, no. 3, July 2007
- [15] chia-nan ko, ying-pin chang, and chia-ju wu "a pso method with nonlinear time-varying evolution for optimal design of harmonic filters" **IEEE transactions on power systems**, vol. 24, no. 1, February 2009
- [16] gary w. Chang, hung-lu wang, and shou-yung chu, "a probabilistic approach for optimal passive harmonic filter planning" **IEEE transactions on power delivery**, vol. 22, no. 3, July 2007
- [17] gary w. Chang, hung-lu wang, gen-sheng chuang, and shou-yung chu "passive harmonic filter planning in a power system with considering probabilistic constraints " **IEEE transactions on power delivery**, vol. 24, no. 1, January 2009
- [18]j. C. Carlisle and a. A. El-keib'"a graph search algorithm for optimal placement of fixed and switched capacitors on radial distribution systems" **IEEE transactions on power delivery**, vol. 15, no. 1, January 2000
- [19] mohammad a., Masoum s., ladjevardi m., jafarian a., and ewald f.'"optimal placement, replacement and sizing of capacitor banks in distorted distribution networks by genetic algorithms" **IEEE transactions on power delivery**, vol. 19, no. 4, October 2004

## Abstract

Nowadays, nonlinear loads are vastly common in power networks. As a result, levels of harmonics are increased drastically. Power electric tools, switching devices and nonlinear loads can be considered as the main causes for this problem. The application of this equipment in power systems can be caused currents distortion existing in the network. These distorted currents can cause voltage distortion throughout the power system even when supplied with a purely sinusoidal voltage. Distorted currents and voltages cause degrading in power quality. There are several ways to ameliorate this condition. Among them, passive filters are known as economical and efficient ways.

In this thesis, for the first time we established a new method for devising passive filters by utilizing graph algorithm. The optimum positions for filters can be found by the purposed method. For fast convergence, four kinds of movements among the buses are devised.

The purposes of filter design in the network are decreasing cost of the filters, loss of the network and total harmonic distortion of voltage and improving voltage profile. We applied this method on 30-bus IEEE system. The results showed this method can be an outstanding method for devising filters for power networks.

Index Terms— harmonic distortion, passive filter, graph algorithm





**Shahrood University of Technology**

**Faculty: electrical & robotic engineering**

**“Optimal Design of Passive Filter in Power System”**

**Maryam Aghaie**

**Supervisor(s):  
Dr. Ali Dastfan**

**Winter,2011**



