

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

# خازن گذاری بهینه در سیستم توزیع در محیط هارمونیکی

دانشجو:

سید محمد راسخی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ماه ۱۳۹۳



تقدیم به

پدر بزرگوارم

او که ناتوان شد تا من به توانایی برسم و عاشقانه سوخت تا من به روشنایی برسم

و

مادر عزیزم

دربای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج است و وجودش برایم

همه مهر

## تقدیر و تشکر:

سپاس خدای را که منت نهاد، هستی بخشید و توفیق کسب علم و دانش داد. اکنون که به فضل خدا در این موقعیت قرار گرفته ام بر خود لازم می دانم تا از تمام عزیزانی که در این پروژه از راهنمایی ها و مساعدت های ایشان بهره برده ام، قدر دانی نمایم.

بدین وسیله از کلیه اساتید که اقدام کردند در تمام مراحل همواره پشتیبان و حامی بنده بودند، بی نهایت سپاسگزارم. بویژه از استاد ارزشمند جناب آقای دکتر بانژاد که درس های بزرگی را از ایشان فرا گرفته ام. لازم است از زحمات و راهنمایی های ایشان در انجام این پروژه حد اکثر تشکر را داشته باشم. در پایان از کلیه عزیزانی که تا بدین جا زحمات زیادی را برایم کشیده اند تشکر می کنم. از خانواده خوبم که از آغاز تا کنون با تمام وجود برایم زحمت کشیده و همواره مشوق و پشتیبانم بوده اند. امید که توانسته باشم در سایه لطف خداوند گامی هر چند کوچک در راستای توسعه و تعالی کشور بردارم.

سید محمد رانچی

۱۳۹۳



## چکیده

خازن‌های موازی معمولاً به منظور کاهش تلفات توان، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش ظرفیت خطوط و ترانسفورماتورها و بهبود ضریب توان در سیستم توزیع نصب می‌شوند. عناصر الکترونیک قدرت و الکترومغناطیسی باعث تولید و تزریق جریان‌های هارمونیکی قابل ملاحظه‌ای به سیستم قدرت می‌شوند. اگر خازن‌های موازی در سیستم قدرت به‌طور مناسب انتخاب و نصب نشوند، می‌توانند باعث تشدید این هارمونیک‌ها شده و منجر به رزونانس‌های هارمونیکی موازی شوند. بنابراین تحلیل، شبیه‌سازی و انتخاب بهینه بانک‌های خازنی در شرایط هارمونیکی باید در نظر گرفته شود.

هدف از این پایان‌نامه مکان یابی و مقدار یابی بهینه بانک‌های خازنی ثابت در شبکه‌های توزیع شعاعی در حضور جریان‌های هارمونیکی است. در این پایان‌نامه، تابع هدف شامل هزینه تلفات توان، هزینه تلفات انرژی و هزینه بانک‌های خازنی با در نظر گرفتن محدودیت‌های ولتاژ، تعداد، اندازه و مکان نصب خازن‌ها و محدودیت‌های کیفیت توان شامل مجموع اعوجاجات هارمونیکی و توان راکتیو تزریقی خازن‌ها می‌باشد. بعلاوه اثر مدل‌سازی بار در جایابی خازن در این پایان‌نامه مورد مطالعه قرار گرفته است. روش پیشنهادی الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات را برای جایابی بهینه خازن‌ها مورد استفاده قرار داده است.

الگوریتم‌های بیان‌شده بر روی دو سیستم تست ۳۳ و ۶۹ باسه شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی توانایی الگوریتم‌های ارائه‌شده را برای جایابی خازن‌ها در حضور بارهای خطی و غیرخطی نشان می‌دهد. از آنجایی که وابستگی بارها به ولتاژ در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است، نتایج نشان می‌دهد که مدل‌سازی بار بر جایابی خازن‌ها تأثیرگذار است.

**کلمات کلیدی:** جایابی خازن، سیستم توزیع، بارهای غیرخطی، مدل‌سازی بار، الگوریتم ژنتیک،

بهینه‌سازی اجتماع ذرات

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
فصل دوم: اهمیت استفاده از خازن در شبکه های توزیع و مروری بر روش های خازن گذاری در سیستم توزیع	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ تلفات در شبکه های توزیع و عوامل ایجاد کننده آن	۸
۳-۲ اثرات نامطلوب توان راکتیو	۱۰
۱-۳-۲ کاهش ظرفیت فیدر	۱۰
۲-۳-۲ کاهش بارگیری از ترانسفورماتور	۱۰
۳-۳-۲ افزایش تلفات توان و انرژی در خطوط	۱۰
۴-۳-۲ افزایش افت ولتاژ	۱۰
۵-۳-۲ افزایش بار شبکه انتقال	۱۱
۴-۲ دلایل اقتصادی خازن گذاری	۱۱
۵-۲ طبقه بندی روش های خازن گذاری	۱۵
۱-۵-۲ روش های تحلیلی در خازن گذاری	۱۶
۲-۵-۲ روش های برنامه ریزی عددی	۱۷
۳-۵-۲ روش های ابتکاری در خازن گذاری	۱۹
۴-۵-۲ روش های مبتنی بر هوش مصنوعی در خازن گذاری	۲۰
۱-۴-۵-۲ الگوریتم ژنتیک	۲۰
۲-۴-۵-۲ الگوریتم اجتماع ذرات	۲۲
۳-۴-۵-۲ شبیه سازی سرد شدن فلزات مذاب	۲۲
۴-۴-۵-۲ سیستم های خبره	۲۳
۵-۴-۵-۲ شبکه های عصبی مصنوعی	۲۴
۶-۴-۵-۲ نظریه منطق فازی	۲۴
۶-۲ پارامترهای موثر در انتخاب روش مناسب خازن گذاری	۲۵



۲۶	شرایط کلی مسئله ۱-۶-۲
۲۶	پارامترهای مورد نیاز برای حل مسئله ۲-۶-۲
۲۶	میزان دقت مورد نیاز برای حل مسئله ۳-۶-۲
۲۷	امکان پیاده سازی مسئله ۴-۶-۲
۲۷	مروری بر کارهای دیگران در زمینه خازن گذاری بهینه در محیط هارمونیک ۷-۲
۲۸	جمع بندی ۸-۲
۲۹	<b>فصل سوم: عوامل تأثیرگذار بر خازن گذاری سیستم توزیع</b>
۳۰	۱-مقدمه ۱-۳
۳۱	۲-منابع تولید هارمونیک ۲-۳
۳۱	۱-۲-۳ مبدل ها ۱-۲-۳
۳۲	۱-۱-۲-۳ مبدل های مدولاسیون پهنای پالس (PWM) ۱-۱-۲-۳
۳۳	۲-۱-۲-۳ سیکلو کانورترها ۲-۱-۲-۳
۳۴	۲-۲-۳ کوره قوس الکتریکی ۲-۲-۳
۳۴	۳-۲-۳ جبران ساز های استاتیکی توان راکتیو ۳-۲-۳
۳۵	۴-۲-۳ منابع تغذیه قابل کلید زنی ۴-۲-۳
۳۵	۳-۳ تشدید موازی ۳-۳
۳۷	۴-۳ اثرات نا مطلوب هارمونیک بر تجهیزات سیستم قدرت ۴-۳
۳۸	۱-۴-۳ اثر هارمونیک ها بر خازن ۱-۴-۳
۳۸	۲-۴-۳ اثر هارمونیک ها روی ترانسفورماتور ۲-۴-۳
۳۹	۳-۴-۳ اثر هارمونیک روی موتورها ۳-۴-۳
۳۹	۴-۴-۳ اثر هارمونیک روی رله های حفاظتی و وسایل اندازه گیری ۴-۴-۳
۴۰	۵-۴-۳ اثر هارمونیک ها روی کلیدهای قدرت و فیوزها ۵-۴-۳
۴۰	۵-۳ پخش بار در سیستم توزیع ۵-۳
۴۱	۱-۵-۳ ماهیت متفاوت پخش بار سیستم توزیع ۱-۵-۳
۴۲	۲-۵-۳ پخش بار مستقیم ۲-۵-۳
۴۴	۳-۵-۳ روش ساخت ماتریس های BIBC و BCBV ۳-۵-۳

۴۷	.....جمع‌بندی
<b>فصل چهارم: روش ارائه شده در جایابی خازن‌ها در محیط هارمونیکی با در نظر</b>	
۴۹	.....گرفتن مدل بار
۵۰	..... ۱-۴ مقدمه
۵۰	..... ۲-۴ فرمول بندی مسئله
۵۰	..... ۱-۲-۴ تابع هدف
۵۲	..... ۲-۲-۴ قیود به کار رفته
۵۲	..... ۱-۲-۲-۴ قید مقدار موثر ولتاژ باس‌ها
۵۳	..... ۲-۲-۲-۴ قید حداکثر اعوجاجات هارمونیکی
۵۳	..... ۳-۲-۲-۴ قید حداکثر توان راکتیو
۵۴	..... ۳-۴ مدل‌سازی سیستم در فرکانس‌های پایه و هارمونیکی
۵۷	..... ۴-۴ مدل‌سازی بارهای سیستم قدرت
۵۸	..... ۱-۴-۴ اهمیت مدل‌سازی بار
۵۸	..... ۲-۴-۴ مفاهیم اولیه مدل‌سازی بار
۵۹	..... ۳-۴-۴ مدل‌های استاتیکی بار
۶۱	..... ۵-۴ الگوریتم حل مسئله خازن‌گذاری
۶۲	..... ۱-۵-۴ حل مسئله جایابی خازن‌ها با الگوریتم ژنتیک
۶۶	..... ۲-۵-۴ حل مسئله جایابی خازن‌ها با الگوریتم اجتماع ذرات
۶۹	.....جمع‌بندی
<b>فصل پنجم: نتایج شبیه‌سازی</b>	
۷۱	..... ۱-۵ مقدمه
۷۳	..... ۲-۵ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE
۷۶	..... ۱-۲-۵ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE با بارهای خطی
۷۸	..... ۲-۲-۵ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE با بارهای غیر خطی
۸۸	..... ۳-۵ شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE
۹۱	..... ۱-۳-۵ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با بارهای خطی

۹۲	..... خطی
۲-۳-۵	نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با انواع بار های غیر خطی
۱۰۱	..... ZIP
۴-۵	شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با در نظر گرفتن مدل بار ZIP
۱-۴-۵	نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با در نظر گرفتن مدل بار ZIP با بارهای غیر
۱۰۳	..... خطی
۱۱۰	..... جمع‌بندی
۱۱۱	..... فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۲	..... ۱-۶ نتیجه گیری
۱۱۳	..... ۲-۶ پیشنهادات
۱۱۵	..... مراجع

## فهرست جداول

- جدول (۱-۳): محتویات هارمونیکی مبدل شش پالسه ..... ۳۲
- جدول (۲-۳): محتویات هارمونیکی یک مبدل مدولاسیون پهنای پالس مورد استفاده برای یک ماشین دوار ..... ۳۳
- جدول (۳-۳): محتویات هارمونیکی جریان کوره های قوس الکتریکی ..... ۳۴
- جدول (۴-۳): هارمونیک های تولید شده توسط جیران سازهای استاتیکی توان راکتیو ..... ۳۵
- جدول (۵-۳): مولفه های هارمونیکی تولید شد ناشی از عملکرد منابع تغذیه قابل کلید زنی ..... ۳۵
- جدول (۱-۴): پارامترهای الگوریتم ژنتیک ..... ۶۳
- جدول (۲-۴): پارامترهای الگوریتم اجتماع ذرات ..... ۶۶
- جدول (۱-۵): پارامترهای خطوط شبکه ۳۳ باسه نمونه ..... ۷۴
- جدول (۲-۵): پارامترهای بار شبکه ۳۳ باسه نمونه ..... ۷۵
- جدول (۳-۵): سطوح مختلف بار در نظر گرفته شده ..... ۷۵
- جدول (۴-۵): هزینه سالانه خازن های شبکه ..... ۷۶
- جدول (۵-۵): خلاصه پارامترهای استفاده شده ..... ۷۶
- جدول (۶-۵): مکان و مقدار خازن های بهینه شبکه ۳۳ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪ ..... ۷۷
- جدول (۷-۵): مقایسه نتایج شبیه سازی شبکه ۳۳ باسه بدون بارهای غیرخطی تحت بارگذاری ۵۰٪ ..... ۷۷
- جدول (۸-۵): مشخصات هارمونیک های تولیدی توسط کانورتر ۱۲ پالسه ..... ۸۰
- جدول (۹-۵): مکان و مقدار خازن های بهینه شبکه ۳۳ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۸۱
- جدول (۱۰-۵): مقایسه نتایج شبیه سازی شبکه ۳۳ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۸۲
- جدول (۱۱-۵): مقایسه نتایج شبیه سازی شبکه ۳۳ باسه در شرایط مختلف بارگذاری ..... ۸۸
- جدول (۱۲-۵): پارامترهای خطوط شبکه ۶۹ باسه نمونه ..... ۸۹
- جدول (۱۳-۵): پارامترهای بار شبکه ۶۹ باسه نمونه ..... ۹۰
- جدول (۱۴-۵): مکان و مقدار خازن های بهینه شبکه ۶۹ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪ ..... ۹۱
- جدول (۱۵-۵): مقایسه نتایج شبیه سازی شبکه ۶۹ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪ ..... ۹۱

- جدول (۵-۱۶): مشخصات هارمونیک بارهای غیرخطی شبکه ۶۹ باسه ..... ۹۳
- جدول (۵-۱۷): توان اکتیو راکتیو بارهای غیرخطی شبکه ۶۹ باسه ..... ۹۳
- جدول (۵-۱۸): محل قرارگیری بارهای غیرخطی در شبکه ۶۹ باسه ..... ۹۴
- جدول (۵-۱۹): مکان و مقدار خازن‌های بهینه شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۹۴
- جدول (۵-۲۰): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۹۶
- جدول (۵-۲۱): مکان و مقدار خازن‌های بهینه شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۱۰۳
- جدول (۵-۲۲): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۱۰۴
- جدول (۵-۲۳): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه در شرایط مختلف بارگذاری ..... ۱۱۰

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): تاثیر افزودن خازن‌های موازی به سیستم توزیع ..... ۱۳
- شکل (۱-۳): مبدل شش پالسه (شامل شش تریستور) ..... ۳۱
- شکل (۲-۳): مدار تشدید موازی و پاسخ فرکانسی ..... ۳۶
- شکل (۳-۳): مدار معادل تک فاز سیستم ..... ۳۶
- شکل (۴-۳): فلوچارت الگوریتم پخش بار مستقیم ..... ۴۴
- شکل (۵-۳): محاسبه جریان تزریقی بر اساس مدل شبکه های توزیع ..... ۴۵
- شکل (۱-۴): دیاگرام تک خطی از شبکه توزیع شعاعی ..... ۵۴
- شکل (۲-۴): ترکیب سیستم قدرت به صورت بار در نقطه عمده تحویل توان (شین A) ..... ۵۹
- شکل (۳-۴): شکل کلی کروموزوم مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک ..... ۶۲
- شکل (۴-۴): فلوچارت جایابی خازن بالگوریتم ژنتیک ..... ۶۵
- شکل (۵-۴): ساختار کلی ذرات در الگوریتم اجتماع ذرات ..... ۶۶
- شکل (۶-۴): فلوچارت جایابی خازن بالگوریتم اجتماع ذرات ..... ۶۸
- شکل (۱-۵): فلوچارت اجرای برنامه توسط الگوریتم‌های بهینه سازی ..... ۷۳
- شکل (۲-۵): دیاگرام تک خطی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE ..... ۷۴
- شکل (۳-۵): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪ ..... ۷۸
- شکل (۴-۵): شکل موج ولتاژهای سه فاز کانورتر ۱۲ پالسه ..... ۷۹
- شکل (۵-۵): شکل موج جریان‌های سه فاز کانورتر ۱۲ پالسه ..... ۷۹
- شکل (۶-۵): طیف هارمونیکی کانورتر ۱۲ پالسه در فرکانس ۵۰ هرتز ..... ۷۹
- شکل (۷-۵): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۸۵
- شکل (۸-۵): اعوجاج هارمونیکی باس‌های شبکه ۳۳ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۸۷
- شکل (۹-۵): دیاگرام تک خطی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE ..... ۸۹
- شکل (۱۰-۵): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۶۹ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪ ..... ۹۲

شکل (۵-۱۱): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۶۹ باس با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین..... ۹۸

شکل (۵-۱۲): اعوجاج هارمونیکی باس‌های شبکه ۶۹ باس با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۱۰۰

شکل (۵-۱۳): فلوچارت اجرای برنامه خازن‌گذاری با در نظر گرفتن مدل بار ZIP..... ۱۰۲

شکل (۵-۱۴): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۶۹ باس با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین ..... ۱۰۷

شکل (۵-۱۵): اعوجاج هارمونیکی باس‌های شبکه ۶۹ باس با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین..... ۱۰۹

فصل اول:

مقدمه



گسترش روزافزون شبکه‌های توزیع و سرمایه‌گذاری در زمینه توسعه آن از یکسو و بالا رفتن هزینه‌های تولید با توجه به اینکه کاهش تلفات بسیار کم‌هزینه‌تر از افزایش تولید است طراحان سیستم‌های قدرت را ملزم ساخت تا سیستم‌هایی با کمترین میزان تلفات طراحی کنند. به دلیل پایین‌تر بودن سطح ولتاژ در سیستم توزیع نسبت به سیستم انتقال، جریان در سیستم توزیع از سطح بالاتری نسبت به سیستم انتقال برخوردار است، لذا تلفات اهمی در سیستم توزیع بالاتر بوده و اهمیت کاهش تلفات در این بخش بیشتر نمود پیدا می‌کند. به‌منظور کاهش تلفات می‌توان اقداماتی همچون افزایش سطح ولتاژ، برای انتقال توان‌های بزرگ به فواصل دوردست اشاره نمود. اما به علت بالا رفتن سطح ایزولاسیون در اثر افزایش ولتاژ، هزینه‌های شبکه افزایش یافته و این عمل دارای محدودیت‌های خاص خود می‌باشد. محققین به این فکر افتادند که انتقال توان راکتیو را می‌توان به‌وسیله جبران‌کننده‌های توان راکتیو کاهش داد تا تلفات ناشی از انتقال این توان کمتر شود.

یکی از مناسب‌ترین راه‌های کاهش جریان‌های راکتیو عبوری خطوط استفاده از خازن‌های موازی در شبکه است. نصب خازن می‌تواند باعث کاهش تلفات انرژی، کاهش حداکثر تلفات توان و آزادسازی ظرفیت کیلوولت آمپر اضافی تجهیزات توزیع و اصلاح پروفیل ولتاژ<sup>۱</sup> گردد.

با نصب خازن، توان راکتیو مورد نیاز بار به‌جای اینکه از نیروگاه دور تأمین گردد، در محل نزدیک بار تولید شده و سبب اصلاح ضریب توان<sup>۲</sup> می‌شود. در حضور بارهایی که توان راکتیو مصرفی آن‌ها تغییر می‌کند تنظیم ولتاژ مسئله‌ای مهم و بحرانی می‌باشد. تغییر توان راکتیو منجر به تغییرات ولتاژ در نقطه تغذیه می‌گردد که این تغییرات ولتاژ بر عملکرد مفید و مؤثر کلیه وسایل تجهیزات متصل به نقطه تغذیه اثر سوء دارند. برای جلوگیری از این مسئله و نگه‌داشتن ولتاژ در یک حد مجاز و همچنین

---

<sup>۱</sup>. Voltage Profile

<sup>۲</sup>. Power Factor

بهبود پروفیل ولتاژ از خازن استفاده می‌کنند. با این وجود، این فواید تا حد زیادی به مکان قرارگیری و اندازه خازن‌ها بستگی دارد.

انتخاب ظرفیت خازن و مسائل عمده خازن گذاری شامل انتخاب محل نصب (جایابی خازن)<sup>۱</sup>، انتخاب پله‌های ظرفیت خازنی (در خازن‌های متغیر سوئیچ شونده) می‌باشد. عدم فرهنگ‌سازی استفاده از خازن در شبکه توزیع، نصب در محل نامناسب و عدم توانایی انتخاب مقدار خازن، ناتوانی در سرویس و نگهداری و در اولویت نبودن موضوع خازن گذاری از مهم‌ترین دلایل خارج شدن خازن‌ها و یا عدم ورود یا سرمایه‌گذاری در این بخش به شمار می‌رود.

امروزه به علت گسترش وسیع بارهای غیرخطی همچون لامپ‌های فلورسنت<sup>۲</sup>، عناصر الکترونیک قدرت و الکترومغناطیسی باعث تولید و تزریق جریان‌های هارمونیک قابل ملاحظه‌ای به سیستم قدرت می‌شوند. با توجه به امپدانس شبکه، این جریان‌ها هارمونیک به صورت ولتاژهای هارمونیک به تجهیزات اعمال می‌شوند. گرچه خازن‌ها تجهیزاتی هستند که خود تولید هارمونیک نمی‌کنند ولی بر روی هارمونیک‌های تولیدی توسط بارهای غیرخطی تأثیرات خاصی بر جای می‌گذارند که باید اثرات آن مورد مطالعه قرار گیرند. از جمله این آثار تقویت هارمونیک یا به عبارتی پدیده تشدید یا رزونانس<sup>۳</sup> در شبکه است. در واقع مهم‌ترین تأثیری که هارمونیک‌ها بر خازن می‌گذارند احتمال ایجاد رزونانس خازن با یکی از هارمونیک‌ها است. خازن‌ها ممکن است در یک کارخانه صنعتی یا نزدیک کارخانه با بارهایی که محتوای هارمونیک زیادی دارند، نصب شده باشند. از آنجایی که احتمال ایجاد رزونانس در چنین محل‌هایی زیاد است، لذا یا باید از نصب خازن در این محل‌ها خودداری کرد یا از فیلترهای قابل تنظیم استفاده کرد. در یک سیستم فوق توزیع که در آن خازن‌ها در محل‌هایی دور از بارهای هارمونیک‌زا قرار دارند، باید پخش هارمونیک‌ها در شبکه بررسی شود. بارهای خطی که از یک فیدر مشترک با بارهای غیرخطی هارمونیک‌زا تأمین می‌شوند، ممکن است نسبت به اغتشاشات هارمونیک

---

<sup>۱</sup>.Capacitor Placement

<sup>۲</sup>. Fluorescent

<sup>۳</sup>. Resonance

حساسیت نشان دهند. در محاسبات خازن‌گذاری دو نوع استراتژی وجود دارد: در یک استراتژی خازن‌ها بر اساس نیازمندی‌های توان راکتیو جایابی می‌شوند و سپس اثرات هارمونیک بازبینی می‌شوند، در روش دیگر ولتاژ در فرکانس شبکه، توان راکتیو و اثرات هارمونیک باهم دیده می‌شوند [۱].

با این تفاسیر جایابی خازن باید با در نظر گرفتن اثرات هارمونیک صورت گیرد تا حتی‌الامکان رزونانس به فرکانس غیر مخرب انتقال یابد. این در حالی است که تحقیقات محدودی با در نظر گرفتن هارمونیک و اثرات آن روی تلفات سیستم توزیع صورت گرفته است [۲-۳].

هدف از این پایان‌نامه فرمول‌بندی و مدل‌سازی سیستم توزیع به‌گونه‌ای است که شرایط واقعی همچون حضور بارهای غیرخطی هارمونیک زا و مدل بار در نظر گرفته شود. استفاده از دو الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک<sup>۱</sup> و اجتماع ذرات<sup>۲</sup> و مقایسه نتایج آن‌ها باهم صحت نتایج حاصله را تقویت می‌کند. الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات هر دو از الگوریتم‌های قدرتمند در مسائل بهینه‌سازی هستند. به‌کارگیری روش‌های هوش مصنوعی<sup>۳</sup> امکان تحلیل مسائل در شرایط واقعی را فراهم می‌کند. بهینه‌سازی مکان و مقدار بانک‌های خازنی توسط این دو الگوریتم بهینه‌سازی با در نظر گرفتن فاکتورهای اقتصادی همچون هزینه تلفات انرژی، هزینه تلفات توان و هزینه‌های مربوط به خرید، نصب و نگهداری بانک‌های خازنی انجام شده است. خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع مستلزم رعایت قیود و استانداردهای خاصی همچون حداقل و حداکثر پروفیل ولتاژ باس‌ها و محدودیت‌های مربوط به اعوجاجات هارمونیک<sup>۴</sup> می‌باشد. همچنین با توجه به یکسان نبودن مدل بار<sup>۵</sup> در واقعیت در نظر گرفتن مدل دقیق، اجرای بهینه‌سازی و نتایج آن را واقعی‌تر می‌کند. اجرای بهینه‌سازی در سطوح

---

<sup>۱</sup>. Genetics Algorithm

<sup>۲</sup>. Particle Swarm

<sup>۳</sup>. Artificial Intelligence

<sup>۴</sup>. Harmonic Distortion

<sup>۵</sup>. Load Model

مختلف بار بسته به شرایط مسئله شامل بار سبک، بار پایه و پرباری نیز از قابلیت‌های مناسب این تحقیق می‌باشد.

## روند ارائه مطالب

**فصل دوم** این پایان‌نامه مربوط به پایه‌های نظری جایابی خازن در شبکه‌های توزیع و همچنین مروری بر کار دیگران در این زمینه می‌باشد. مروری بر مفاهیم و روش‌های جایابی خازن در سیستم‌های توزیع، دلایل اقتصادی خازن‌گذاری و نقش خازن در بهبود پارامترهای مختلف شبکه در این فصل مورد بحث قرار گرفته است. پیشینه پژوهش و آخرین مقالات و کارهای انجام‌شده در زمینه خازن‌گذاری در سیستم توزیع در این فصل آمده است.

در **فصل سوم** به معرفی و بررسی انواع بارهای غیرخطی و منابع تولید هارمونیک در شبکه و همچنین تأثیر خازن بر هارمونیک‌های تولیدی این بارها پرداخته شده است. همچنین اهمیت در نظر گرفتن هارمونیک‌ها در مسئله خازن‌گذاری به منظور جلوگیری از پیامدهای نامطلوب شبکه از جمله رزونانس مورد بحث قرار گرفته است.

در **فصل چهارم** فرمول‌بندی مسئله خازن‌گذاری به همراه قیود حاکم بر آن ارائه شده است. تابع هدف به منظور حداقل سازی هزینه‌ها فرمول‌بندی شده و الگوریتم حل مسئله بیان شده است.

**فصل پنجم** به جایابی و مقدار یابی بهینه بانک‌های خازنی در محیط هارمونیکی اختصاص دارد. در این فصل الگوریتم‌های ژنتیک و اجتماع ذرات بر روی دو شبکه تست ۳۳ و ۶۹ باسه استاندارد IEEE به منظور حل مسئله خازن‌گذاری اعمال شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه گردیده است.

در **فصل ششم** نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات در زمینه خازن‌گذاری سیستم توزیع ارائه شده است.



## فصل دوم:

اهمیت استفاده از خازن در شبکه های  
توزیع و مروری بر روش های خازن گذاری  
در سیستم توزیع

## ۲-۱ مقدمه

وجود مصرف‌کنندگان متعدد در سیستم‌های توزیع و تلفات قابل‌توجه در این بخش با توجه به پیدایش مباحث مربوط به بازارهای رقابتی برق، بهره‌برداران سیستم‌های قدرت را ملزم به استفاده از روش‌های مختلف در جهت کاهش تلفات و کاهش هزینه‌ها در سیستم‌های توزیع نموده است.

از آنجایی که در سیستم‌های توزیع مصرف‌کنندگان صنعتی<sup>۱</sup>، خانگی<sup>۲</sup>، تجاری<sup>۳</sup> و روستایی<sup>۴</sup> از یک فیدر مشترک در زمان‌های مختلف با پیک‌های بار مختلف تغذیه می‌شوند، شرکت‌های توزیع به منظور تعدیل بار آن‌ها در فصول مختلف و مانور خطوط، از کلیدهای قابل قطع زیر بار و تجهیزات کنترلی مختلف استفاده می‌کنند. یکی از عوامل ایجاد تلفات در سیستم‌های توزیع شارش توان راکتیو در خطوط است که برای جبران آن می‌توان از نصب خازن به منظور تأمین تقاضای بار به صورت محلی استفاده کرد. انتخاب مکان و مقدار مناسب خازن از مهم‌ترین مسائل در زمینه خازن‌گذاری می‌باشد، به نحوی که می‌توان با بهینه‌سازی مناسب کاهش چشمگیری در هزینه‌های اقتصادی شبکه داشت. در این فصل به تأثیر خازن در کاهش تلفات و بررسی روش‌های مختلف جایابی و مقدار یابی خازن‌ها در سیستم توزیع می‌پردازیم.

## ۲-۲ تلفات در شبکه‌های توزیع و عوامل ایجادکننده آن

با توجه به اینکه در سیستم‌های توزیع مقاومت خطوط نسبت به سیستم‌های انتقال بیشتر است، کاهش تلفات در این سیستم‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. عوامل عمده ایجاد تلفات عبارت‌اند از:

الف - بارگذاری زیاد تجهیزات موجود در شبکه

ب - مسیرهای طولانی تغذیه هم در بخش فشار متوسط و هم در بخش فشار ضعیف

ج - پایین بودن سطح مقطع هادی‌ها هم در بخش فشار متوسط و هم در بخش فشار ضعیف

---

<sup>۱</sup>. Industrial Consumers  
<sup>۲</sup>. Domestic Consumers  
<sup>۳</sup>. Commercial Consumers  
<sup>۴</sup>. Rural Consumers

د- وجود بارهای راکتیو زیاد در شبکه

ه- تقسیم نامناسب بار بین ترانسفورماتورها و خطوط شبکه

و- فرسودگی و قدیمی بودن بخش‌های مختلف سیستم توزیع

همان‌طور که بیان شد زیاد بودن بار راکتیو یکی از عوامل مهم در ایجاد تلفات سیستم‌های توزیع می‌باشد. عوامل ایجاد بار راکتیو در شبکه‌های فشار ضعیف که بارهای خانگی، تجاری و صنعتی کوچک را با جریان کمتر از ۵۰ آمپر سه فاز تغذیه می‌نماید به شرح زیر است:

الف - وجود دستگاه‌های موتوری در منازل از قبیل یخچال، فریزر، موتورهای تأسیسات گرمایی

و غیره

ب - وجود لامپ‌های فلورسنت و کامپکت فلورسنت (کم‌مصرف) در منازل

ج - وجود وسایل فوق‌الذکر در مصارف تجاری

د- وجود دستگاه‌های موتوری، ترانسفورماتورهای صنعتی و ... در مصارف صنعتی کوچک

ه- وجود اندوکتانس شبکه فشار ضعیف

به دلیل تغذیه انشعاب‌های سه فاز ۵۰ آمپر و بالاتر از طریق خطوط فشار متوسط با ولتاژ اولیه یا ثانویه، این خطوط بار راکتیو خود را به ترانسفورماتورهای توزیع و شبکه فشار متوسط تحمیل می‌کنند. وجود بار راکتیو در شبکه فشار متوسط و اندوکتانس سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور توزیع، باعث می‌شوند که بار راکتیو موجود در پست‌های توزیع بسیار بیشتر از بار راکتیو شبکه فشار ضعیف باشد. اندوکتانس خطوط فشار متوسط، بار راکتیو مصارف سنگین با ولتاژ اولیه بدون جبران ساز<sup>۱</sup> که مستقیماً به خطوط فشار متوسط وصل می‌شوند و بار راکتیو پست‌های توزیع، مجموع بار راکتیو فشار متوسط را تشکیل می‌دهند.

---

<sup>۱</sup>. Compensator



## ۲-۳ اثرات نامطلوب توان راکتیو

با توجه به اینکه در سیستم‌های توزیع اکثر بارها از نوع القایی هستند و نیاز به توان راکتیو دارند، فراهم کردن این توان راکتیو مشکلات زیر را به دنبال دارد.

### ۲-۳-۱ کاهش ظرفیت فیدر

به علت قیود حرارتی در خطوط الکتریکی جریان قابل انتقال در این خطوط محدود می‌باشد. به عبارت دیگر برای هر فیدر متناسب با سطح مقطع هادی مربوطه، مقدار جریان مجاز تعریف می‌گردد. در صورتی که توان راکتیو مصارف عمومی بالا باشد، جریان عبوری فیدر افزایش می‌یابد که در حقیقت بخشی از ظرفیت این فیدر ها توسط جریان‌های راکتیو اشغال می‌شود، بدون آن که در استفاده از ظرفیت اکتیو آن افزایشی حاصل گردد.

### ۲-۳-۲ کاهش بارگیری از ترانسفورماتور

اگر فیدرهای خروجی ترانسفورماتور توان راکتیو مصرفی بالایی داشته باشند، ظرفیت ترانسفورماتور به‌طور غیرمفید اشغال می‌گردد. در حالتی که توان راکتیو شبکه که به ترانسفورماتور منتقل می‌شود کم باشد، ضریب توان در ثانویه ترانسفورماتور نزدیک به عدد یک خواهد بود.

### ۲-۳-۳ افزایش تلفات توان و انرژی در خطوط

میزان جریان عبوری از خطوط به ضریب قدرت بارهای مصرفی متصل به آن‌ها بستگی دارد. هرچقدر ضریب قدرت این بارها کمتر باشد، در واقع توان راکتیو مصرفی آن‌ها بیشتر بوده و جریان عبوری از خط بیشتر می‌شود. این جریان‌های عبوری باعث ایجاد تلفات در خطوط می‌شوند. به بیان ساده، زیاد بودن توان راکتیو موجب زیاد شدن تلفات در خطوط می‌گردد.

### ۲-۳-۴ افزایش افت ولتاژ

هنگامی که بارهای راکتیو در سیستم توزیع زیاد باشند، برای تأمین توان راکتیو این بارها، جریان‌های راکتیو عبوری خطوط زیاد می‌شوند که این امر موجب افزایش افت ولتاژ خط می‌گردد. در

حقیقت مؤلفه راکتیو جریان افزایش پیدا کرده و اندازه جریان را افزایش می‌دهد و در نتیجه افت ولتاژ افزایش می‌یابد

## ۲-۳-۵ افزایش بار شبکه انتقال

در صورتی که ضریب توان بارهای سیستم توزیع پایین باشد، توان راکتیو فیدر مربوطه در پست توزیع و فوق توزیع برای تأمین تقاضای بار، افزایش می‌یابد. این عامل باعث شارش جریان‌های راکتیو در خطوط انتقال می‌شود. از آنجایی که راکتانس خطوط انتقال، به دلیل فاصله زیاد فازهای آن از یکدیگر از راکتانس خطوط توزیع بیشتر است، افزایش جریان در خطوط انتقال اثر بسیار زیادی در افزایش توان راکتیو آن دارد.

## ۲-۴ دلایل اقتصادی خازن گذاری

از مهم‌ترین دلایل اقتصادی خازن گذاری می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. آزادسازی ظرفیت خطوط (توزیع، فوق توزیع و انتقال)، ترانسفورماتورها و ژنراتورها و تصحیح ضریب توان پست‌های توزیع

خازن‌های اصلاح ضریب توان، توان راکتیو لازم را در محل بار تأمین کرده و جریان خط را کاهش می‌دهند. کاهش جریان خط، توان ترانسفورماتور و فیدر را آزاد می‌کند؛ بنابراین می‌توان با جبران سازی از گرم شدن اضافی ترانسفورماتور، خطوط انتقال، ژنراتور و کابل‌ها جلوگیری کرد. ژنراتورهای سنکرون<sup>۱</sup> علاوه بر محدودیت توان اکتیو، دارای محدودیت‌های توان ظاهری نیز هستند. توان ظاهری مجاز ژنراتور با ضریب توان واحد حساب شده است. چنانچه بارهای شبکه در ضریب توان پایین کار کنند، ژنراتورها هم باید توان اکتیو را در ضریب توان پایین‌تر تحویل دهند. این در حالی است که خروجی ژنراتور نمی‌تواند از توان ظاهری مجاز بیشتر شود. برای جلوگیری از این مشکل باید ضریب توان را در محل ژنراتور تصحیح کرد.

---

<sup>۱</sup>. Synchronous Generator

رابطه (۱-۲) ضریب توان بهینه یک سیستم توزیع را پس از آزادسازی ظرفیت خط نشان می‌دهد

[۴].

$$PF = \sqrt{1 - \left(\frac{C_i}{S_i}\right)^2} \quad (1-2)$$

که در آن داریم:

$C_i$ : هزینه بر کیلووار بانک خازنی

$S_i$ : هزینه بر کیلوولت آمپر تجهیزات سیستم

PF: ضریب توان بهینه سیستم

توسط این رابطه می‌توان مقایسه‌ای بین هزینه بانک‌های خازنی و هزینه ترانسفورماتورها، تنظیم‌کننده‌ها و نظایر آن‌ها به‌عنوان وسایلی که ظرفیت سیستم را افزایش می‌دهند، انجام داد. رابطه (۲-۲) بیان می‌کند که برای آزادسازی میزان مطلوبی از کیلوولت آمپر سیستم چه ضریب توانی موردنیاز است [۴]:

$$PF_{new} = \frac{PF_{old}}{1 - Q_c} \quad (2-2)$$

که در آن داریم:

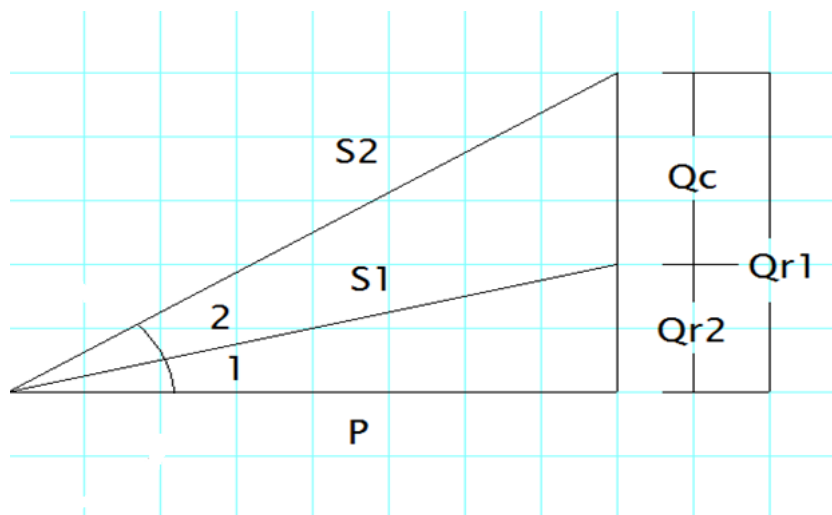
$PF_{new}$ : ضریب توان پس از اصلاح

$PF_{old}$ : ضریب توان قبل از اصلاح

$Q_c$ : میزان کیلووار اضافه‌شده پس از نصب خازن

شکل (۱-۲) کاربرد خازن‌های موازی با هدف کاهش جریان راکتیو عبوری از شبکه را نشان

می‌دهد که در آن بار راکتیو سیستم با افزایش کیلووار خازنی افزایش یافته است.



شکل (۲-۱): تأثیر افزودن خازن‌های موازی به سیستم توزیع [۴]

در این شکل داریم:

$P$ : توان اکتیو شبکه

$S_1, S_2$ : به ترتیب توان ظاهری شبکه قبل و بعد از نصب خازن

$Q_{r1}, Q_{r2}$ : به ترتیب توان راکتیو شبکه قبل و بعد از نصب خازن

$Q_c$ : توان راکتیو تولیدی توسط خازن

رابطه (۲-۳) مقدار کیلوواری خازنی موردنیاز برای اصلاح ضریب توان را نشان می‌دهد [۴]:

$$Q_c = P \left[ \tan(\cos^{-1}PF_{old}) - \tan(\cos^{-1}PF_{new}) \right] \quad (3-2)$$

۲. کاهش تلفات در خطوط (توزیع، فوق توزیع و انتقال)، ترانسفورماتورها و ژنراتورها

در کارخانه‌های صنعتی، تلفات اهمی حدود ۲ تا ۷ درصد بار را بسته به اینکه در کم‌باری یا پیک

بار باشد در برمی‌گیرد. نصب خازن می‌تواند گردش جریان در سیستم توزیع را کاهش دهد.

از آنجایی که تلفات مستقیماً متناسب با مجذور جریان است، با کاهش گردش جریان تلفات نیز کاهش

می‌یابد. رابطه (۲-۴) نسبت تلفات با خازن و بدون خازن را نشان می‌دهد. در این رابطه توان و ولتاژ

دو سر بار ثابت فرض می‌شود [۴]:

$$loss \propto \left( \frac{Pf_{before}}{Pf_{after}} \right)^2 \quad (۴-۲)$$

$$\Delta loss = 1 - \left( \frac{Pf_{before}}{Pf_{after}} \right)^2 \quad (۵-۲)$$

که در این روابط داریم:

$loss$ : تلفات شبکه

$Pf_{before}$ : ضریب توان قبل از نصب خازن

$Pf_{after}$ : ضریب توان بعد از نصب خازن

$\Delta loss$ : تغییرات تلفات شبکه

۳. افزایش ولتاژ در محل نصب و همچنین بهبود پروفیل ولتاژ تغذیه‌کننده و کاهش افت ولتاژ در

نواحی بار در خلال اغتشاشات شدید<sup>۱</sup>

کاهش جریان راکتیو عبوری از خطوط به علت نصب خازن، باعث کاهش افت ولتاژ روی مقاومت و القاگرهای مدار می‌شود و باعث افزایش سطح ولتاژ مدار در مسیر منبع تغذیه تا بار می‌شود. در سیستم‌های توزیع و انتقال، خطای مجاز ولتاژ حدود ۵٪ است. افت ولتاژ در موتورهای القایی سبب می‌شود که جریان آن‌ها از جریان نامی بیشتر شود. بنابراین، نگهداشتن ولتاژ در سطوح مجاز از اهداف مهم در شبکه است.

در مرجع [۴] رابطه  $\Delta V$  برای تخمین افزایش ولتاژ ناشی از نصب خازن به صورت معادله

(۶-۲) آورده شده است:

$$\Delta V = \frac{(kVar)(X_L)}{10(kV)^2} \quad (۶-۲)$$

که در آن داریم:

$\Delta V$ : افزایش ولتاژ در محل نصب خازن برحسب درصد

---

<sup>۱</sup>. Severe Disturbances

kV: ولتاژ خط به خط سیستم

kVAR: مقدار کیلووار نامی بانک خازنی سه فاز

$X_L$ : راکتانس سلفی سیستم در نقطه نصب خازن، برحسب اهم

هنگامی که خازن در سیستم توزیع نصب می‌شود، همه ترانسفورماتورهای مسیر تا منبع دچار افزایش ولتاژ می‌شوند. از آنجاکه امپدانس ترانسفورماتور قابل توجه است، افت ولتاژ به دلیل راکتانس ترانسفورماتور در صورت حضور خازن به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{trans} = \frac{Q_{Bank}}{S_{trans}} X_{trans} \quad (7-2)$$

در اینجا  $X_{trans}$  و  $S_{trans}$  به ترتیب راکتانس و توان نامی ترانسفورماتور،  $V_{trans}$  ولتاژ ترانسفورماتور و

$Q_{Bank}$  توان راکتیو بانک خازنی در واحد پیرونیته می‌باشد. اگر ولتاژ از حد مجاز بالاتر برود توسط

تپ‌های ترانسفورماتور ولتاژ را تنظیم می‌کنند.

۴. به تعویق انداختن یا حذف هزینه احداث پست‌های فوق توزیع به دلیل آزادسازی ظرفیت و

افزایش ولتاژ تغذیه‌کننده

به‌کارگیری خازن در خطوط توزیع و فوق توزیع و تولید توان راکتیو توسط آن باعث کاهش

هزینه‌های مربوط به تأمین این توان از منابع بالادست سیستم مانند ژنراتورهای نیروگاهی می‌گردد و

به دنبال آن هزینه‌های مربوط به طرح توسعه به تعویق می‌افتد.

## ۲-۵ طبقه‌بندی روش‌های خازن‌گذاری

خازن‌گذاری در سیستم توزیع الکتریکی به‌منظور کاهش تلفات مسئله ایست که تحقیقات زیادی

پیرامون آن انجام‌شده و همچنین مقالات متعددی پیرامون آن منتشر گردیده است. هدف این بخش

مروری کلی بر کارهای گذشته‌ی انجام‌شده در مسئله خازن‌گذاری بهینه و نشان دادن سیر تکامل و

پیشرفت تحقیقات انجام‌شده در این زمینه و طبقه‌بندی الگوریتم‌های موجود است.

به‌طور کلی روش‌های حل مسئله خازن‌گذاری را می‌توان به ۴ دسته طبقه‌بندی کرد که عبارت‌اند

از:

- روش‌های تحلیلی<sup>۱</sup>
- روش‌های برنامه‌ریزی عددی<sup>۲</sup>
- روش‌های ابتکاری<sup>۳</sup>
- روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی<sup>۴</sup>

در ادامه به بررسی هریک از این روش‌ها و مزایا و معایب آن‌ها می‌پردازیم.

## ۲-۵-۱ روش‌های تحلیلی در خازن‌گذاری

روش‌های تحلیلی زمانی ایجاد شد که ابزارهای محاسباتی قوی موجود نبودند یا بسیار گران‌قیمت بودند. در این روش‌ها از حساب دیفرانسیل و انتگرال برای تعیین حداکثر مقدار تابع صرفه‌جویی<sup>۵</sup> استفاده شده است. این روش‌ها مبتنی بر فرضیات غیرواقعی از یک فیدر شامل بارگذاری یکسان و اندازه هادی‌ها می‌باشند. از تحقیقات اولیه قانون معروف "دوسوم" ایجاد شد. قانون "دوسوم" بیان می‌داشت که برای حداکثر کاهش تلفات، خازن نامی در دوسوم پیک بار راکتیو، باید در دوسوم فاصله از فیدر نصب شود.

روش‌های تحلیلی اولیه خازن‌گذاری دارای فهم آسان می‌باشند و با وجود فرضیات غیر واقعی اعمال‌شده در قانون "دوسوم" هنوز برخی صنایع پیاده‌سازی برنامه خازن‌گذاری خود را بر اساس این قانون انجام می‌دهند [۵-۶].

---

<sup>۱</sup> . Analytical Methods

<sup>۲</sup> . Numerical Programming Methods

<sup>۳</sup> . Heuristic Methods

<sup>۴</sup> . Artificial Intelligence-Based Methods (AI)

<sup>۵</sup> . Saving Function

با گذشت زمان و دستیابی به نتایج دقیق‌تر، مدل‌های قبلی اصلاح یافتند. گرینجر<sup>۱</sup> در مرجع [۷] و سالاما<sup>۲</sup> در مرجع [۹] فیدرهای معادل را با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف هادی در طول فیدر و بار توزیع شده غیریکنواخت فرمول‌بندی کردند. روش‌های تحلیلی اخیر قابلیت مدل‌سازی دقیق فیدرهای شعاعی را فراهم کرده و تغییرات بار شبکه‌های توزیع را در نظر می‌گیرد. برای نشان دادن اهمیت مدل‌سازی مناسب فیدرهای توزیع و در نظر گرفتن تغییرات بار، گرینجر با یک مثال در مرجع [۸] نشان داد که قانون "دوسوم" به‌طور کلی نادرست است و در بسیاری از موارد موجب صرفه‌جویی اقتصادی منفی می‌گردد.

اشکال عمده روش‌های تحلیلی مدل‌سازی محل‌های خازن‌گذاری و اندازه‌های خازن به‌صورت متغیرهای پیوسته است. یعنی اندازه خازن‌های بهینه تعیین شده ممکن است با اندازه واقعی خازن‌های موجود در بازار تطابق نداشته باشد و حتی مکان‌های بهینه یابی شده خازن‌ها با گره‌های فیدرهای توزیع هم‌خوانی نداشته باشد. لذا ضروری است که مقدار خازن‌ها به نزدیک‌ترین مقادیر واقعی موجود گرد شده و محل آن‌ها نیز به نزدیک‌ترین فیدر توزیع منتقل شود که این امر ممکن است پیامدهایی همچون اضافه ولتاژ یا کاهش کمتر تلفات از مقادیر برنامه‌ریزی شده را در پی داشته باشد [۱۰].

## ۲-۵-۲ روش‌های برنامه‌ریزی عددی

روش‌های محاسباتی جهت حل مسائل بهینه‌سازی به دنبال بالا رفتن قدرت محاسباتی حافظه‌های کامپیوتری گسترش پیدا کردند. روش‌های برنامه‌ریزی عددی تکنیک‌های تکراری مورد استفاده برای بهینه‌سازی یک تابع هدف از متغیرهای تصمیم هستند. این متغیرهای تصمیم وظیفه ارضای یک مجموعه قیود را بر عهده دارند. تابع هدف در مسئله خازن‌گذاری بهینه همان تابع صرفه‌جویی بوده و محل‌ها، اندازه‌ها، تعداد خازن‌ها، ولتاژها و جریان‌های باس‌ها متغیرهای تصمیم خواهند بود که درعین حال باید تمام قیود عملکردی مسئله را برآورده کنند. مزیت روش‌های

---

<sup>۱</sup>. Grainger

<sup>۲</sup>. Salama



برنامه‌ریزی عددی نسبت به روش‌های تحلیلی امکان استفاده از تابع هزینه با جزییات بیشتر برای مسئله خازن‌گذاری بهینه هستند. تابع هدف می‌تواند همه ولتاژها و قيود بارگذاری خط، اندازه خازن‌ها و محل‌های گره‌ها را در نظر بگیرد. مسئله تخصیص خازن با استفاده از روش‌های عددی به صورت رابطه (۸-۲) فرمول‌بندی می‌شود که عبارت سمت چپ تساوی (MAXS) بیانگر حداکثر میزان صرفه جویی بعد از نصب خازن است [۱۰]:

$$MAXS = K_L \cdot \Delta L - K_C \cdot C \quad \text{و} \quad \Delta V \leq \Delta V_{MAX} \quad (8-2)$$

در این رابطه  $K_L \cdot \Delta L$  صرفه‌جویی در هزینه است که شامل کاهش تلفات انرژی و تلفات پیک توان و آزادسازی ظرفیت خط می‌باشد و  $K_C \cdot C$  هزینه نصب خازن است و  $\Delta V$  تغییرات ولتاژ به علت نصب خازن است که نباید از مقدار ماکزیمم خود تجاوز کند،  $\Delta V_{MAX}$  نیز ماکزیمم تغییرات ولتاژ است. دوران<sup>۱</sup> در مرجع [۱۱] به‌عنوان نخستین شخصی بود که از رویکرد برنامه‌ریزی دینامیکی در حل مسئله خازن‌گذاری استفاده کرد. وی تنها کاهش تلفات انرژی را در نظر گرفت و اندازه خازن‌ها دارای مقادیر مجزا بودند. فاووزی<sup>۲</sup> در مرجع [۱۲] کارهای دوران در مرجع [۱۱] را دنبال کرده و بعلاوه ظرفیت KVA آزادشده در خطوط را در محاسبات و توابع خود اضافه نمود. باران<sup>۳</sup> و وو<sup>۴</sup> در مرجع [۱۳] مسئله خازن‌گذاری موازی را توسط برنامه‌ریزی عددی مختلط بررسی کردند. بالدیک<sup>۵</sup> و وو در مرجع [۱۴] با کمک برنامه‌ریزی عددی درجه‌دو عملکرد بهتر مسئله خازن‌گذاری موازی را نشان دادند.

ازجمله کارهای اخیری که در زمینه خازن‌گذاری موازی انجام گرفته می‌توان به بررسی خازن‌گذاری بهینه در شرایط هارمونیک اشاره کرد که توسط یو<sup>۶</sup> در مرجع [۱۵] صورت گرفته است.

---

<sup>۱</sup>. Duran  
<sup>۲</sup>. Fawzi  
<sup>۳</sup>. Baran  
<sup>۴</sup>. Wu  
<sup>۵</sup>. Baldick  
<sup>۶</sup>. Yu

در این تحقیق یک الگوریتم تکراری غیرخطی برای جابجایی بهینه بانک‌های خازنی در سیستم توزیع با وجود بارهای خطی و غیرخطی استفاده شده است. همچنین از الگوریتم پخش بار هارمونیک برای به دست آوردن المان‌های شبکه استفاده شده و قیود مسئله شامل محدودیت ولتاژ و محدودیت اعوجاج هارمونیک در نظر گرفته شده است. تابع هدف شامل حداقل تلفات انرژی و تلفات پیک توان و هزینه خازن می‌باشد. نتایج روی سیستم ۹ باسه IEEE تست شده است.

روش‌های خازن‌گذاری از ابتدای پیدایش تاکنون با گذشت زمان تکامل پیدا کردند و در هر مرحله نواقص و کاستی‌های قبل مرتفع گردیدند. پیشرفت در این زمینه مدیون گسترش و پیشرفت برنامه‌های عددی محاسباتی کامپیوتری می‌باشد که نرم‌افزارهای بهینه‌سازی قدرتمند با الگوریتم‌های پیشرفته را در خود جای داده‌اند. برنامه‌ریزی‌های عددی نسبت به روش‌های تحلیلی مزیت در نظر گرفتن محل گره‌ها و فیدرها به‌طور گسسته را دارند.

## ۲-۵-۳ روش‌های ابتکاری در خازن‌گذاری

قوانین ابتکاری، استراتژی و راهبردهای کاربردی و سریعی ایجاد می‌کنند که فضای جستجوی جامع را کاهش داده و می‌توانند به راه‌حل بهینه منجر شوند. روش‌های مبتنی بر جستجوی ابتکاری برای کاهش تلفات سیستم توزیع از طریق بازآرایی معرفی شده‌اند [۱۶-۱۷]. عبدالسلام<sup>۱</sup> در مرجع [۱۸] یک تکنیک ابتکاری بر اساس ایده‌هایی از مراجع [۱۶-۱۷] برای شناسایی یک بخش در سیستم توزیع با بالاترین تلفات در اثر عبور جریان‌های راکتیو پیشنهاد داده و سپس حساس‌ترین گره در این بخش را که بیشترین تأثیر را در کاهش تلفات سیستم دارد انتخاب نموده، سپس بعد از حداکثر سازی کاهش تلفات توان برای جبران سازی، اندازه خازن‌های موردنظر برای قرار گرفتن در گره‌های حساس تعیین می‌شود. مرجع [۱۹] عملکرد مرجع [۱۸] را از طریق تعیین گره‌های حساس که بیشترین تأثیر را در کاهش تلفات به‌طور مستقیم برای کل سیستم توزیع دارند و با بهینه کردن اندازه‌های خازنی بر مبنای حداکثر صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش تلفات انرژی و تلفات توان پیک به‌طور همزمان ادامه داده

---

<sup>۱</sup>. Abdel-salam

است. روش‌های ابتکاری اشاره شده به صورت شهودی قابل درک بوده و در مقایسه با روش‌های تحلیلی و برنامه‌نویسی از سادگی بیشتری برخوردارند اما تضمینی برای صحت عملکرد این روش‌ها وجود ندارد.

## ۲-۵-۴ روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در خازن‌گذاری

محبوبیت هوش مصنوعی و قابلیت‌های آن محققان را بر آن داشته تا از آن در موارد کاربردی مهندسی قدرت استفاده کنند. مسئله خازن‌گذاری از این امر مستثناء نبوده و از این روش‌ها در حل آن استفاده شده است. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی شامل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم اجتماع ذرات، شبیه‌سازی سرد شدن فلزات مذاب<sup>۱</sup>، سیستم‌های خبره<sup>۲</sup>، شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۳</sup> و نظریه مجموعه فازی<sup>۴</sup> هستند که در ادامه به شرح مختصری در زمینه این روش‌ها می‌پردازیم.

## ۲-۵-۴-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با الهام از نظریه داروین در مورد حیات بهترین‌ها شکل گرفته است. بر اساس این الگوریتم همواره افرادی حق بقا و تولید مثل دارند که از شایستگی بالاتری برخوردار هستند. الگوریتم ژنتیک فرضیات محدود کننده مانند پیوسته بودن فضای جستجو یا استفاده از مشتقات برای رسیدن به تابع هدف بهینه را در نظر نمی‌گیرد.

ژنتیک کار خود را با مجموعه‌ای از جواب‌های اولیه که کروموزوم نامیده می‌شوند و دارای تعدادی ژن هستند آغاز می‌کند. سپس از این جواب‌ها برای ساختن جمعیت بعدی استفاده می‌کند به امید آنکه جمعیت جدید بهتر از جمعیت قبلی باشند. زیرا روش‌هایی که برای انتخاب جمعیت جدید در نظر گرفته شده با توجه به مناسب بودن آن‌ها شکل گرفته است. بنابراین بهترین کروموزوم‌ها شانس ادامه بقا و تولید مثل را پیدا می‌کنند.

در بهینه‌یابی از طریق الگوریتم ژنتیک چهار مرحله اساسی انجام می‌پذیرد:

- 
- <sup>۱</sup>. Simulated Annealing (SA)
  - <sup>۲</sup>. Expert Systems (ES's)
  - <sup>۳</sup>. Artificial Neural Networks (ANN's)
  - <sup>۴</sup>. Fuzzy Set Theory (FST)

۱. تولید تصادفی مجموعه‌ای از طرح‌ها، که به آن جمعیت اولیه گفته می‌شود. هر عضو این جمعیت یک کروموزوم می‌باشد که به صورت کد<sup>۱</sup> بوده و رشته<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

هر رشته متناسب با تعداد متغیرهای طراحی، به چندین زیررشته<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. زیررشته مجموعه‌ای از بیت<sup>۴</sup> ها می‌باشد که به صورت زنجیر در کنار هم چیده شده‌اند.

هر بیت هم‌ارز با یک ژن در الفبای ژنتیک می‌باشد. تعداد بیت‌های هر زیررشته به نحوی تعیین می‌شوند تا بتوان کلیه اطلاعات متغیر طراحی را بین حدود بالا و پایین در مرحله رمزگشایی به دست آورد.

۲. با رمزگشایی، مقدار متغیرهای طراحی در هر رشته ارزیابی و مقادیر تابع هدف تعیین می‌گردد.

۳. مسئله بهینه یابی مقید با تعریف تابع پنالتی<sup>۵</sup> و ترکیب آن با تابع هدف و ایجاد تابع هدف اصلاح‌شده<sup>۶</sup>، به یک مسئله بهینه یابی نامقید تبدیل می‌شود. در ادامه با تعریف تابع شایستگی، به هر کروموزوم، یک مقدار شایستگی اختصاص داده می‌شود. سپس با الهام از قوانین تکامل طبیعی، بهترین کروموزوم‌ها بر مبنای میزان شایستگی انتخاب می‌شوند.

۴. در این مرحله، جمعیت جدید بر مبنای عملگرهای الگوریتم ژنتیک تشکیل می‌شود. پس از آن جمعیت فرزندان<sup>۷</sup> برای نسل<sup>۸</sup> بعد به کار گرفته می‌شود. این مراحل تا ارضای شرط خاتمه و یا به تعداد نسل‌های پیش‌بینی‌شده برای کسب بهینه عمومی تکرار می‌شود. برای اطلاعات بیشتر می‌توانید به مراجع [۲۰-۲۱] مراجعه کنید.

---

<sup>۱</sup>. Code

<sup>۲</sup>. String

<sup>۳</sup>. Substring

<sup>۴</sup>. Bite

<sup>۵</sup>. Penalty Function

<sup>۶</sup>. Modified Objective Function

<sup>۷</sup>. Offspring

<sup>۸</sup>. Generation

## ۲-۵-۴ الگوریتم اجتماع ذرات

این الگوریتم یک تکنیک بهینه‌سازی تصادفی قوی بر اساس حرکت و هوش گروه‌ها می‌باشد که از رفتار دسته‌جمعی دسته‌ای از پرندگان یا گروهی از ماهی‌ها الهام گرفته است. در سال ۱۹۹۵ جیمز کندی<sup>۱</sup> و راسل ابرهارت<sup>۲</sup> این الگوریتم را توسعه دادند. در این الگوریتم تعدادی ذره تشکیل یک گروه را می‌دهند که باهدف یافتن بهترین جواب در فضای جستجو به‌طور مداوم در حرکت هستند. با هر ذره به‌عنوان یک نقطه در فضای  $n$  بعدی رفتار می‌شود که پروازش را بر طبق تجربیات پرواز خود به‌علاوه تجربیات پرواز دیگر ذره‌ها تنظیم می‌کند. هر ذره مسیرش را در مختصات خود در فضای حل ادامه می‌دهد که مرتبط با بهترین حلی است که تاکنون به‌وسیله آن ذره به‌دست‌آمده است. این مقدار بهترین ذره<sup>۳</sup> (pbest) نامیده می‌شود. بهترین مقدار دیگر نیز برای ذره همسایه وجود دارد که الگوریتم اجتماع ذرات آن را دنبال می‌کند. بهترین مقدار به‌دست‌آمده تاکنون به‌وسیله هر ذره، در همسایگی آن ذره می‌باشد. این مقدار  $gbest$ <sup>۴</sup> نامیده می‌شود و درواقع بهترین تجربه سراسری به‌حساب می‌آید. مفهوم اصلی در الگوریتم اجتماع ذرات شتاب گرفتن هر ذره نسبت به مکان‌های pbest و gbest خود با یک شتاب‌دهنده وزن داده‌شده به‌طور تصادفی در هر مرحله زمانی می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر می‌توانید به مرجع [۲۲] مراجعه کنید.

## ۲-۵-۳ شبیه‌سازی سرد شدن فلزات مذاب

در فرآیند شبیه‌سازی سرد شدن فلزات، ابتدا یک ماده تا دمایی بالاتر از دمای ذوب خود گرم می‌شود و سپس به‌آرامی دمای آن پایین آورده می‌شود. با توجه به کند بودن کاهش دما، ماده موردنظر در تعادل ترمودینامیکی<sup>۵</sup> قرار می‌گیرد. این یعنی ماده آن‌قدر در آن دما باقی می‌ماند تا بهترین ساختار بلوری با کمترین انرژی در آن دما را تشکیل دهد. اگر ساختار بلوری جسمی، در

---

<sup>۱</sup>. James Kennedy

<sup>۲</sup>. Russell Eberhart

<sup>۳</sup>. Best Particle

<sup>۴</sup>. Global Best

<sup>۵</sup>. Thermodynamic Equilibrium

انرژی‌های کمتر تشکیل شده باشد، از مقاومت فیزیکی بالایی برخوردار خواهد بود اما اگر ساختار بلوری جسمی در انرژی‌های بالاتر شکل گرفته باشد، شکننده می‌باشد. [۲۳-۲۵]

در الگوریتم شبیه‌سازی سرد کردن فلزات، جواب‌های پیشنهادی برای حل مسئله، در دمای بالا شکل گرفته و اغلب جواب‌های مناسبی نیستند. نامناسب بودن جواب را به شکننده بودن ماده‌ای که پس از ذوب سرد شده است تشبیه می‌کنند. سپس متغیری که نقش دما را بر عهده دارد به مرور زمان کاهش داده می‌شود تا به این ترتیب جواب‌های بهتری در دماهای پایین تشکیل شوند. الگوریتم، جواب‌های بعدی را با استفاده از جواب‌هایی که در حال حاضر به دست آمده است، محاسبه می‌کند. در این الگوریتم، گرم کردن با اعمال تغییرات تصادفی بیشتر بر روی متغیرها مترادف است. در دماهای بالاتر، متغیرها دارای تغییرات زیادتری هستند و با کاهش دما دامنه تغییرات متغیرها کمتر می‌شود. تغییراتی پذیرفته می‌شوند که منجر به بهتر شدن نتیجه کلی شوند. مرجع [۲۶] از این روش برای حداقل سازی تابع هزینه کلی استفاده کرده است.

تابع هزینه آن مطابق رابطه (۹-۲) است:

$$T_{loss} = K_P \cdot P_{loss} + K_E \cdot E_{loss} + K_C \cdot C \quad (9-2)$$

که در آن  $K_P \cdot P_{loss}$  هزینه تلفات توان،  $K_E \cdot E_{loss}$  هزینه تلفات انرژی و  $K_C \cdot C$  هزینه‌های نصب خازن می‌باشد. در این رابطه کلیه هزینه‌ها برحسب دلار هستند.

## ۴-۴-۵-۲ سیستم‌های خبره<sup>۱</sup>

سیستم‌های خبره یا سیستم‌های شامل پایگاه معرفت<sup>۲</sup>، عبارت‌اند از مجموعه‌ای از قوانین و حقایق که به منظور انجام یک سری استدلال‌های منطقی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های خبره در مهندسی قدرت، به منظور استفاده در مسائلی که نیاز به تصمیم‌گیری و قضاوت تجربی دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشتر سیستم‌های خبره استفاده شده در کاربردهای مهندسی سیستم قدرت

<sup>۱</sup>. Expert Systems

<sup>۲</sup>. Knowledge-Based System(KBS)

به منظور تشخیص خطا، برنامه ریزی و زمان بندی می باشد [۲۷]. سالما در مراجع [۲۸-۲۹] از یک سیستم خبره بر مبنای تاریخچه مهارت های تخصصی و تخصص انسانی<sup>۱</sup> به منظور کنترل توان راکتیو استفاده کرده است. در مرجع [۳۰-۳۱] از این روش به منظور حداکثر سازی تابع صرفه جویی در بحث خازن گذاری استفاده شده است.

## ۲-۵-۴-۵ شبکه های عصبی مصنوعی

شبکه های عصبی مصنوعی با الهام از سیستم عصبی مغز انسان شبیه سازی شده اند. در شبکه های عصبی مصنوعی به منظور ایجاد ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی از یک نگاشت غیرخطی استفاده می شود؛ مثلاً یک شبکه عصبی دارای سه لایه می باشد: یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی. ارتباط بین ورودی ها و خروجی ها در لایه پنهان قرار دارد. شبکه های عصبی مصنوعی قادر به تولید الگوهای خروجی مناسب هستند به شرطی که لایه های پنهان به منظور کدگذاری و ارتباط بین لایه های ورودی و خروجی به اندازه کافی موجود بوده و آموزش صحیح ببینند. شبکه های عصبی مصنوعی به منظور جایابی خازن ها در سیستم توزیع استفاده می شوند. مثلاً می توان برای پیش بینی بار از اندازه گیری مستقیم روی باس های بار استفاده کرد و شبکه عصبی اول را تشکیل داد. سپس برای انتخاب مکان بهینه خازن ها، شبکه عصبی دوم را بر اساس پیش بینی بار در شبکه عصبی اول تشکیل داد. شبکه اول با مجموعه ای از پیش بینی های بار آموزش داده می شود و شبکه دوم برای حداکثر سازی کاهش تلفات انرژی برای یک وضعیت بار معلوم آموزش داده می شود. این الگوریتم در مرجع [۳۲] مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲-۵-۴-۶ نظریه منطق فازی

این نظریه در شرایط عدم اطمینان<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار می گیرد و قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم هایی را که نادقیق و مبهم هستند، به صورت ریاضی فرمول بندی کرده و بر روی

---

<sup>۱</sup>. Human Expertise

<sup>۲</sup>. Unreliability

آن‌ها تصمیم‌گیری کند. این تئوری یک قالب جدید از کاربرد ریاضیات به‌منظور تجزیه و تحلیل مفاهیم زبانی است که تا قبل از پیدایش آن، در نظریه مجموعه‌های کلاسیک جایی نداشته است. هر متغیر فازی توسط تابع عضویتی<sup>۱</sup> که یک درجه عضویت به یک مجموعه اختصاص می‌دهد، مدل‌سازی می‌شود. تغییرات این درجه عضویت به‌طور معمول از صفر به یک است. برای استفاده از این نظریه در جایابی خازن می‌توان به هر پارامتر مسئله یک تابع عضویت اختصاص داد. مثلاً می‌توان برای انحراف ولتاژ باس‌ها، اعوجاج هارمونیکی باس‌ها و تلفات توان هرکدام یک تابع عضویت در نظر گرفت. برای تعیین گره‌هایی که باید خازن در آن نصب شود باید یک متغیر تصمیم‌گیری با اشتراک توابع عضویت بیان‌شده برای تمام گره‌های موجود در سیستم مورد نظر تعریف نمود. درنهایت گره‌هایی که دارای بیشترین مقادیر تصمیم‌گیری باشند به‌عنوان گره‌های موردنظر برای نصب خازن انتخاب می‌شوند [۳۳].

معصوم<sup>۲</sup> و همکارانش در مرجع [۳۳] روشی مبتنی بر تئوری فازی برای جایابی و مقدار یابی بهینه بانک‌های خازنی ثابت در شبکه‌های توزیع شعاعی در حضور هارمونیک‌های ولتاژ و جریان ارائه کرده‌اند. تابع هدف در نظر گرفته شده، شامل هزینه تلفات توان و تلفات انرژی بانک‌های خازنی می‌باشد. قیود شامل حدود ولتاژ، اندازه و تعداد خازن‌های نصب شده و حدود کیفیت توان با استفاده از استاندارد IEEE-۵۱۹ می‌باشد. جهت تعیین باس‌های مناسب برای نصب خازن، از متغیر تصمیم‌گیری با در نظر گرفتن توابع عضویت برای قیود مسئله استفاده کرده است. در این مرجع نتایج شبیه‌سازی برای شبکه ۱۸ باسه IEEE با وجود هارمونیک‌ها آورده شده است.

## ۲-۶ پارامترهای مؤثر در انتخاب روش مناسب خازن‌گذاری

در بخش‌های قبل، روش‌های تحلیلی، برنامه‌ریزی عددی، ابتکاری و هوش مصنوعی برای جایابی بهینه خازن‌ها تشریح شد. قطعاً امکان پیاده‌سازی تمام این روش‌ها و مقایسه آن‌ها مقدور

---

<sup>۱</sup>. Membership Function

<sup>۲</sup>. Masoum



نمی‌باشد. هر یک از این روش‌ها، مزایای خاص خود را دارد. انتخاب روش مناسب بستگی به موارد زیر دارد:

## ۲-۶-۱ شرایط کلی مسئله

مسئله جایابی خازن می‌تواند به سه زیر مسئله طراحی، توسعه و کنترل تقسیم شود. بسیاری از تکنیک‌های جایابی خازن به زیر مسئله طراحی می‌پردازند. البته تعداد زیادی از این تکنیک‌ها در صورت مشخص بودن میزان رشد بار و مشخصات سیستم توزیع توسعه‌یافته، می‌توانند برای حل مسئله توسعه نیز بکار روند. زیر مسئله کنترل، نحوه عملکرد خازن‌های قابل کلید زنی برای صرفه اقتصادی بیشتر را در برمی‌گیرد، به‌گونه‌ای که از وقوع اضافه ولتاژ جلوگیری شود.

## ۲-۶-۲ پارامترهای موردنیاز برای حل مسئله

برای حل مسئله جایابی خازن باید تعیین شود که چه پارامترهایی می‌بایست در روند بهینه‌سازی لحاظ شوند. تابع سود می‌تواند شامل صرفه‌جویی اقتصادی حاصل از کاهش تلفات انرژی و پیک توان، میزان ظرفیت (KVA) آزاد شده و بهبود پروفیل ولتاژ باشد. در صورت لحاظ کردن بارهای متغیر، باید تصمیم گرفت که از چه مدل باری استفاده شود.

## ۲-۶-۳ میزان دقت موردنیاز برای حل مسئله

دقت نتایج به نحوه مدل‌سازی و روش بهینه‌سازی موردنظر وابسته است. روش‌های تحلیلی جدید که از مدل‌های معادل فیدر استفاده کرده و تغییرات بارها را نیز در نظر می‌گیرند، پاسخ‌های بهتری را نسبت به روش‌های قدیمی‌تر فراهم می‌آورند. علاوه بر موارد فوق، برخی روش‌های برنامه‌ریزی عددی، ابتکاری و هوش مصنوعی، با گسسته در نظر گرفتن اندازه خازن‌ها و مکان‌های نصب و غیرخطی در نظر گرفتن قیمت خازن‌ها، پاسخ‌های دقیق‌تری را ارائه می‌دهند. از طرفی دقت جواب‌ها کاملاً به میزان در دسترس بودن داده‌ها وابسته است.

## ۲-۶-۴ امکان پیاده‌سازی مسئله

میزان عملی بودن یک روش جایابی خازن متناظر با سهولت درک و به‌کارگیری آن روش است. این معیار معقول‌ترین و مهم‌ترین معیاری است که برای انتخاب روش جایابی خازن بکار می‌رود. برخی از روش‌ها ممکن است آن‌قدر اطلاعات زیادی از سیستم نیاز داشته باشند که این اطلاعات عملاً در دسترس نباشند، و در مقابل برخی روش‌ها آن‌قدر مسئله را ساده‌سازی می‌کنند که دقت لازم را از دست می‌دهند.

## ۲-۷ مروری بر کارهای دیگران در زمینه خازن‌گذاری بهینه در محیط

### هارمونیک

در مراجع [۳۴-۳۵] مسئله خازن‌گذاری در محیط هارمونیک توسط الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات بررسی شده و قیود حداکثر انحراف ولتاژ، حداکثر اعوجاج هارمونیک و محدودیت‌های بانک خازنی را در نظر گرفته است.

در مراجع [۳۶-۳۷] از روش فازی برای جایابی و مقدار یابی خازن‌های موازی در شبکه آلوده به هارمونیک استفاده شده است. اعمال این روش روی شبکه‌های ۱۸ و ۶۹ باسه استاندارد IEEE و نتایج حاصله، نشان از کارایی مناسب آن دارد.

مرجع [۳۸] مسئله خازن‌گذاری را توسط ترکیب الگوریتم ژنتیک و روش فازی با قیود پروفیل ولتاژ، اعوجاجات هارمونیک و محدودیت‌های توان راکتیو تزریقی به شبکه بررسی کرده است. در مرجع [۳۹] از الگوریتم زنبورعسل جهت جایابی خازن‌ها استفاده کرده است. در مرجع [۴۰] انواع روش‌های خازن‌گذاری را با یکدیگر مقایسه کرده ویژگی‌های هر یک را برشمرده است.

مرجع [۴۱] از روش ترکیبی ابتکاری فازی به‌منظور خازن‌گذاری استفاده کرده و توابع عضویتی برای ولتاژ و تلفات در نظر می‌گیرد. به‌نحوی که تابع هدف را از دو ترم هزینه تلفات توان اکتیو و هزینه نصب خازن تشکیل می‌دهد. مرجع [۴۲] جایابی خازن‌های شبکه را توسط الگوریتم تکاملی تفاضلی

انجام داده است. در مراجع [۴۳-۴۴] خازن‌گذاری در شبکه‌های واقعی توسط منطق فازی صورت گرفته است. در مرجع [۴۵] ضمن ارائه روش جایابی خازن توسط الگوریتم آبکاری فلزات، نتایج را بر روی شبکه ۶۹ باسه بررسی نموده است. در مرجع [۴۶] استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور مکان‌یابی و مقدار یابی خازن بهینه صورت گرفته و تابع هدفی متشکل از هزینه خازن و تلفات تشکیل داده اما قیود بهره‌برداری لحاظ نشده است. مرجع [۴۷] از روش ضرایب حساسیت برای تعیین باس‌های کاندید شبکه استفاده کرده و در نهایت توسط الگوریتم زنبور عسل خازن‌گذاری بهینه را در شبکه انجام داده است. در مرجع [۴۸] روشی ابتکاری در جایابی و مقدار یابی خازن در سیستم توزیع شعاعی انجام داده که دو بخش اصلی دارد: در بخش اول برای تشخیص مکان‌های کاندید یا همان باس‌های حساس از ضرایب حساسیت استفاده کرده و در بخش بعدی از الگوریتم رشد گیاهان<sup>۱</sup> برای تعیین مقدار ظرفیت خازنی استفاده نموده است.

## ۲-۸ جمع‌بندی

در این فصل به اثرات نامطلوب توان راکتیو در سیستم‌های توزیع و نقش خازن در کاهش این اثرات اشاره شد. همچنین انواع روش‌های خازن‌گذاری و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای جایابی خازن در سیستم‌های توزیع مورد بحث قرار گرفت. در فصل بعد به معرفی انواع بارهای غیرخطی و نقش مخرب هارمونیک در سیستم‌های توزیع می‌پردازیم.

---

<sup>۱</sup>. Plant Growth Simulation Algorithm

فصل سوم:

عوامل تأثیرگذار بر خازن گذاری

سیستم توزیع

### ۳-۱ مقدمه

هارمونیک‌های تزریقی از بارهای غیرخطی موجود در شبکه به‌عنوان مهم‌ترین مسئله در خازن‌گذاری مطرح است. کوره‌های قوس الکتریکی<sup>۱</sup> و تعداد محدودی از مبدل‌ها به‌عنوان تنها منابع تولید هارمونیک تا دهه ۱۹۶۰ شناخته شده بودند. با پیدایش ترستور ها و منابع تغذیه استاتیک<sup>۲</sup> در دهه ۱۹۷۰، استفاده صنعتی از ماشین‌های دوار رایج شد. گسترش و استفاده روزافزون از مبدل‌ها در سیستم‌های قدرت باعث به وجود آمدن مشکلات مختلفی شد که نمونه‌هایی از این مشکلات را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۴۹]:

- تولید و تزریق هارمونیک‌های جریان از مبدل‌ها به سمت سیستم قدرت
- ایجاد ضریب توان ضعیف در سمت سیستم قدرت
- تنظیم ولتاژ ضعیف در سمت سیستم قدرت به علت ضریب توان پایین
- ایجاد تداخل در تجهیزات مخابراتی به دلیل تزویج متقابل
- به وجود آمدن خطا در دستگاه‌های اندازه‌گیری

بنابراین درک رفتار سیستم قدرت در حضور مبدل‌ها و سایر منابع تولید هارمونیک دارای اهمیت بالایی است. پیدایش تجهیزات فیلترینگ به‌منظور بهبود همزمان ضریب توان و کنترل هارمونیک‌ها در صنایع، خود باعث بروز مشکلات جدیدی در سیستم‌های قدرت شده است. در ادامه برخی از مهم‌ترین منابع تولید هارمونیک در سیستم‌های قدرت، تأثیر هارمونیک‌ها بر تجهیزات شبکه و ملاحظات لازم در خازن‌گذاری سیستم‌های توزیع در حضور هارمونیک‌ها به‌منظور جلوگیری از اثرات نامطلوب هارمونیک‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

---

<sup>۱</sup>. Electric Arc Furnaces

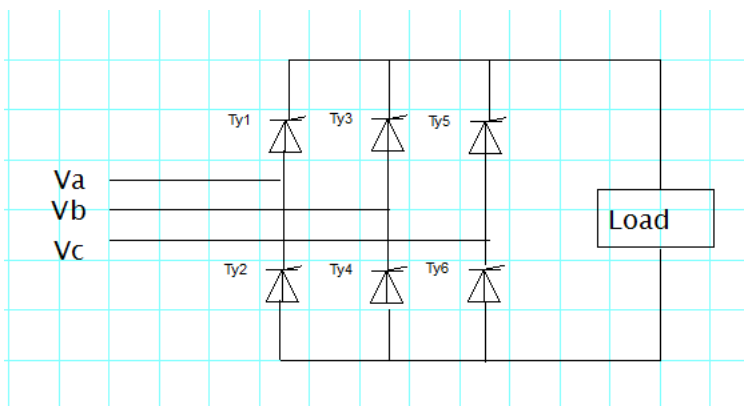
<sup>۲</sup>. Static Power Sources

### ۲-۳ منابع تولید هارمونیک

مبدل‌ها، مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس<sup>۱</sup>، سیکلوکانورترها، کوره‌های قوس الکتریکی، جبران سازهای استاتیک توان راکتیو<sup>۲</sup> و منابع تغذیه قابل کلید زنی از مهم‌ترین منابع تولید هارمونیک در سیستم‌های توزیع هستند که در ادامه به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

#### ۱-۲-۳ مبدل‌ها

در شکل (۱-۳) یک نمونه مبدل نشان داده شده است. این مبدل که به‌عنوان یک بار غیرخطی هارمونیک زا شناخته می‌شود، در حقیقت یک مبدل ac به dc است که در ماشین‌های دوار، سیستم‌های شارژ باتری و مدارهای HVDC مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۱-۳): مبدل شش پالس (شامل شش تریستور) [۴۹]

هارمونیک‌های تولیدی این مبدل به‌صورت رابطه (۱-۳) می‌باشد:

$$h = kq \pm 1 \quad (۱-۳)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (۲-۳)$$

که در این فرمول‌ها داریم:

$h$ : مرتبه هارمونیک

$k$ : عدد صحیح

<sup>۱</sup>. Pulse Width Modulation  
<sup>۲</sup>. Static Var Compensator

$q$ : تعداد پالس‌های مدار

$I_h$ : مؤلفه جریان در هارمونیک  $h$  ام

$I_1$ : مؤلفه جریان در فرکانس اصلی

اندازه و زاویه فاز هارمونیک‌های تولیدی توسط این مبدل در جدول (۱-۳) آمده است:

جدول (۱-۳): محتویات هارمونیکی مبدل شش پالس [۴۹]

مرتبه	اندازه	زاویه
۱	۱۰۰	-۷۵
۵	۳۳/۶	-۱۵۶
۷	۱/۶	-۱۵۱
۱۱	۸/۷	-۱۳۱
۱۳	۱/۲	۵۴
۱۷	۴/۵	-۵۷
۱۸	۱/۳	-۲۲۶
۲۳	۲/۷	۱۷
۲۵	۱/۲	۱۴۹

### ۳-۲-۱-۱ مبدل‌های مدولاسیون پهنای پالس (PWM)

یکی از ادوات الکترونیک قدرت مبدل‌های پهنای پالس هستند که می‌توانند روشن و خاموش گردند. با کلید زنی تریستورها می‌توان به شکل موج ولتاژ خروجی دست پیدا کرد. در حقیقت همین کلید زنی ماهیت اصلی تولید هارمونیک توسط این مبدل‌ها می‌باشد. بارهای متصل به این نوع مبدل‌ها معمولاً موتورهای ac می‌باشند که به شکل ماشین‌های دوار با سرعت‌های مختلف هستند. جدول (۲-۳) اندازه و زاویه هارمونیک‌های تولیدی توسط این مبدل‌ها را برای ماشین‌های دوار در بارگذاری‌های مختلف نشان می‌دهد:

جدول (۳-۲): محتویات هارمونیک یک مبدل مدولاسیون پهنای پالس [۴۹]

بارگذاری ۵۰ درصد		بارگذاری ۷۵ درصد		بارگذاری ۱۰۰ درصد		مرتبه
زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	زاویه	اندازه	
۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	۱
-۹۶	۰/۵۴	-۴۴	۰/۵۹	-۱۵۹	۰/۳۵	۳
-۱۷۴	۷۵/۰۹	-۱۷۴	۶۹/۷۵	-۱۷۵	۶۰/۸۲	۵
-۱۷۱	۵۴/۶۱	-۱۷۱	۴۷/۰۳	-۱۷۲	۳۳/۴۲	۷
-۱۰۲	۰/۲۴	-۹۶	۰/۳۲	۱۵۸	۰/۵	۹
۱۶	۱۴/۶۵	۱۷	۶/۸۶	۱۶۶	۳/۸۴	۱۱
۷۱	۱/۹۵	-۱۷۸	۴/۵۲	-۱۷۷	۷/۷۴	۱۳
۲۸	۰/۳۲	-۱۲۴	۰/۳۷	۱۳۵	۰/۴۱	۱۵
۱۰	۹/۶۱	۹	۷/۵۶	۳۲	۱/۲۷	۱۷
۱۶	۷/۶۶	۹	۳/۸۱	۱۷۹	۱/۵۴	۱۹
۹۵	۰/۴۳	-۱۶۳	۰/۴۳	۱۱۰	۰/۳۲	۲۱
-۸	۰/۹۴	۱۱	۲/۵۹	۳۸	۱/۰۸	۲۳
۷	۳/۷۸	۱۰	۳/۷	۴۹	۰/۱۶	۲۵

### ۳-۲-۱-۲ سیکلوکانورترها

سیکلوکانورترها نوع دیگری منابع تولید هارمونیک در شبکه هستند که وظیفه تبدیل توان ac از یک فرکانس به توان ac در فرکانس پایین تر را بر عهده دارند. کاربرد این مبدلها در موتورهای ac بزرگ با سرعت کم می باشد و مقدار قابل ملاحظه ای هارمونیک به سیستم قدرت تزریق می کنند. هارمونیک های تولیدی این مبدلها در رابطه (۳-۳) نشان داده شده است:

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6nf_0 \quad (3-3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2}$$

که در این روابط داریم:

$f_h$ : فرکانس هارمونیک

$n$  و  $K$ : اعداد صحیح

$f_0$ : فرکانس خروجی سیکلوکانورتر

$f_1$ : فرکانس اصلی



### ۳-۲-۲ کوره قوس الکتریکی

به دلیل تغییر امپدانس قوس الکتریکی در هر سیکل کاری، پیش‌بینی مقدار هارمونیک تولیدی توسط کوره‌های قوس الکتریکی بسیار مشکل می‌باشد. بنابراین جریان‌های هارمونیکی تزریقی توسط این کوره‌ها از فرمول خاصی تبعیت نمی‌کند. اما تحقیقات نشان می‌دهد هارمونیک‌هایی با مراتب صحیح و غیر صحیح در جریان‌های تولیدی خود دارند. مقادیر هارمونیک‌ها برای دوره‌های تصفیه<sup>۱</sup> و ذوب<sup>۲</sup> متفاوت می‌باشد. در جدول (۳-۳) مرتبه هارمونیک‌ها به درصد برای دوره‌های ذوب و تصفیه نشان داده شده است [۴۹].

جدول (۳-۳): محتویات هارمونیکی جریان کوره‌های قوس الکتریکی [۴۹]

مرتبه هارمونیک‌ها به درصد						شرایط کوره الکتریکی
۷	۵	۴	۳	۲	۱	
۳/۱	۴/۲	۲/۵	۵/۸	۷/۷	۱۰۰	ذوب اولیه
-	۲/۱	-	۲	-	۱۰۰	دوره تصفیه

### ۳-۲-۳ جبران سازهای استاتیکی توان راکتیو

این جبران سازها راکتورهای قابل کنترل با شش خازن هستند که به منظور کنترل ضریب توان کوره‌های قوس الکتریکی و همچنین کاهش نوسانات ولتاژ مورد استفاده قرار می‌گیرند. به دلیل آن که جریان راکتور کنترل شونده با تریستور در جهت تصحیح ضریب توان تنظیم می‌شود این عمل موجب تولید و تزریق هارمونیک به سیستم قدرت می‌شود. جدول (۴-۳) هارمونیک‌های تولیدی توسط این جبران کننده‌ها را نشان می‌دهد:

<sup>۱</sup>. Treatment Period  
<sup>۲</sup>. Melting Period

جدول (۳-۴): هارمونیک‌های تولیدشده توسط جبران سازه‌های استاتیکی توان راکتیو [۴۹]

مرتبه هارمونیک	دامنه برحسب درصد	مرتبه هارمونیک	دامنه برحسب درصد
۱	۱۰۰	۳	۱۳/۷۸
۵	۵/۰۵	۷	۲/۵۹
۹	۱/۵۷	۱۱	۱/۰۵
۱۳	۰/۷۵	۱۵	۰/۵۷
۱۷	۰/۴۴	۱۹	۰/۳۵
۲۱	۰/۲۹	۲۳	۰/۲۴
۲۵	۰/۲	-	-

### ۳-۲-۴ منابع تغذیه قابل کلید زنی<sup>۱</sup>

منابع تغذیه قابل کلید زنی به صورت گسترده در کامپیوترهای شخصی مورد استفاده قرار گرفته است. وظیفه این منابع ذخیره انرژی الکتریکی در خازن‌ها و دشارژ شدن آن‌ها به منظور تولید ولتاژ ac توسط مدارات الکترونیکی می‌باشد. به دلیل آن که شارژ جریان به صورت متوالی و پیوسته در شبکه صورت نمی‌گیرد استفاده از این منابع موجب تولید هارمونیک خواهد شد. جدول (۳-۵) هارمونیک‌های تولید شده توسط منابع تغذیه قابل کلید زنی را نشان می‌دهد:

جدول (۳-۵): هارمونیک‌های تولیدشده توسط منابع تغذیه قابل کلید زنی [۴۹]

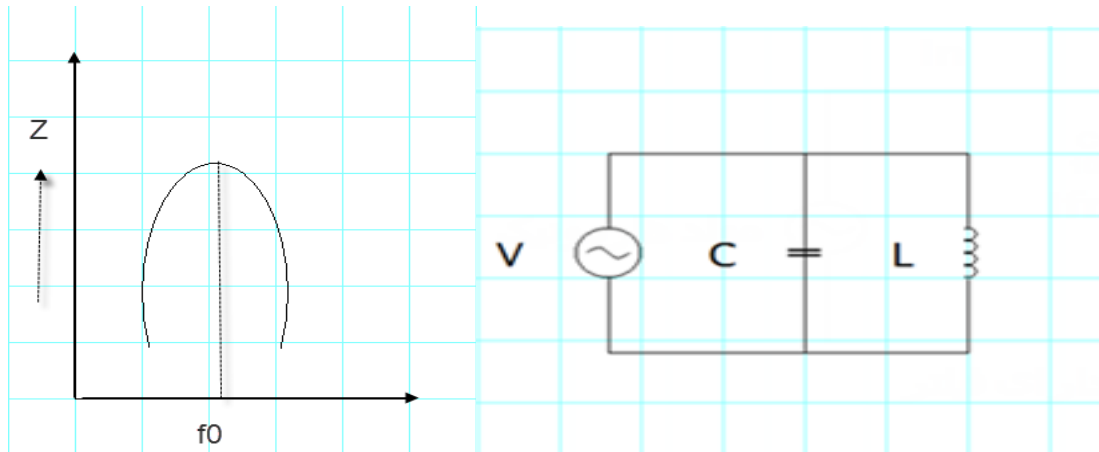
مرتبه هارمونیک	دامنه برحسب درصد	مرتبه هارمونیک	دامنه برحسب درصد
۱	۱۰۰	۳	۸۱
۵	۶۰/۶	۷	۳۷
۹	۱۵/۷	۱۱	۲/۴
۱۳	۶/۳	۱۵	۷/۹

### ۳-۳ تشدید موازی

وقتی خازن‌های موازی به منظور جبران توان راکتیو در شبکه نصب می‌شوند، در یک یا چند فرکانس این خازن‌ها با اندوکتانس‌های موجود در سیستم در رزونانس موازی قرار می‌گیرند. یعنی

<sup>۱</sup>. Switched Mode Power Supplies

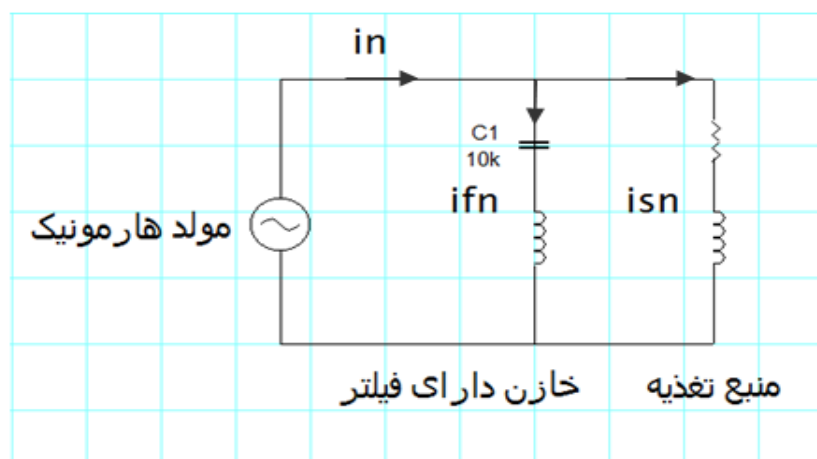
راکتانس سلفی و خازنی در آن فرکانس با یکدیگر برابر می‌شود. حال اگر فرکانس تشدید با فرکانس هارمونیک برابر باشد هارمونیک‌های تزریقی به سیستم در فرکانس‌های تطابق تقویت می‌گردند. شکل (۲-۳) یک نمونه مدار تشدید موازی را نشان می‌دهد که در آن فرکانس تشدید برابر با  $f_0$  می‌باشد:



شکل (۲-۳): مدار تشدید موازی و پاسخ فرکانسی برای هارمونیک n ام [۴۹]

به‌منظور درک بهتر تقویت هارمونیک‌ها در شرایط رزونانس شکل (۳-۳) را در نظر می‌گیریم.

مبدل هارمونیک را منبع جریان ثابت  $i_n$  در نظر می‌گیریم:



شکل (۳-۳): مدار معادل تک فاز سیستم برای هارمونیک n ام [۵۰]

جریان هارمونیک  $i_n$  بر طبق معادله (۴-۳) بین خازن و سیستم تغذیه تقسیم می‌گردد:

$$i_n = i_{sn} + i_{fn} \quad (۴-۳)$$

امپدانس شاخه خازن در هر فرکانس مطابق رابطه (۵-۳) محاسبه می‌شود:

$$Z_f = Z_{fc} + Z_{fl} \quad (۵-۳)$$

که در آن  $Z_{fc}$  نشان‌دهنده امپدانس خازن و  $Z_{fl}$  امپدانس سلف می‌باشد. اندیس  $f$  بیان می‌کند شاخه خازنی نقش فیلتری دارد. جریان‌های هارمونیک  $i_n$  تولیدی توسط منبع به نسبت ادمیتانس شاخه‌های موازی بین خازن و سیستم تغذیه تقسیم می‌شود. با فرض اینکه امپدانس معادل تغذیه برابر  $Z_s$  باشد داریم:

$$i_{fn} = \frac{Z_s}{Z_f + Z_s} i_n = \rho_f \times i_n \quad (6-3)$$

$$i_{sn} = \frac{Z_f}{Z_f + Z_s} i_n = \rho_s \times i_n \quad (7-3)$$

در صورتی که مقدار ضریب توزیع<sup>۱</sup>  $\rho_s$  در فرکانسی افزایش یابد جریان‌های هارمونیک شبکه نیز افزایش می‌یابد. چنانچه در یک فرکانس هارمونیک  $Z_f + Z_s \rightarrow 0$ ، در این صورت سیستم در این فرکانس دچار رزونانس می‌شود و جریان‌های هارمونیک به شدت تقویت می‌گردد. با توجه به موارد بیان شده باید تدابیری اندیشید تا از ایجاد چنین شرایطی در فرکانس‌های هارمونیک نزدیک به فرکانس‌هایی که توسط منبع هارمونیک تحریک می‌شوند، جلوگیری کرد. این کار را می‌توان با پایین نگه داشتن مقدار  $\rho_s$  در این فرکانس‌ها انجام داد.

سلف سری شده با خازن در حقیقت مانند یک فیلتر عمل می‌کند طوری که در فرکانس رزونانس،  $Z_f \rightarrow 0$  گردد. در نتیجه  $\rho_s \rightarrow 0$  و جریان‌های هارمونیک مربوط به شاخه تغذیه کاهش می‌یابد در حالی که  $\rho_f \rightarrow 1$  به نحوی که  $i_{fn} = i_n$ ، در این شرایط تمام جریان‌های هارمونیک تولید شده وارد فیلتر می‌شود [۵۰].

### ۳-۴ اثرات نامطلوب هارمونیک بر تجهیزات سیستم قدرت

تولید و تزریق هارمونیک‌ها توسط بارهای غیرخطی به سیستم‌های قدرت اثرات مخربی بر تجهیزات نصب شده در این سیستم‌ها داشته و علاوه بر تأثیر بر کیفیت عملکرد آن‌ها می‌تواند منجر به

<sup>۱</sup>. Distribution Factor

کاهش عمر مفید این تجهیزات شود. در ادامه به نقش مخرب هارمونیک‌ها روی مهم‌ترین تجهیزات سیستم قدرت می‌پردازیم.

### ۳-۴-۱ اثر هارمونیک بر خازن

افزایش سطح هارمونیک‌ها در سیستم قدرت موجب سوختن یا از کار افتادن فیوز خازن‌ها در بانک‌های خازنی می‌شود. اگر خازن‌ها به‌طور مداوم با جریان‌های اضافی که توسط هارمونیک‌ها به شبکه تزریق می‌شود در ارتباط باشند، تنش ولتاژ<sup>۱</sup> و حرارت در آن‌ها افزایش یافته و طول عمر آن‌ها کاهش می‌یابد. مثلاً افزایش ۱۰ درصد در تنش ولتاژ باعث افزایش ۷ درصد در درجه حرارت خازن‌ها شده و عمر مفید آن‌ها را ۳۰ درصد کاهش می‌دهد [۵۱].

### ۳-۴-۲ اثر هارمونیک‌ها روی ترانسفورماتور

هارمونیک‌ها باعث تولید گرمای اضافی زیادی در ترانسفورماتورها می‌شوند. به‌طور کلی اگر اغتشاش هارمونیکی در ترانسفورماتوری از مقدار معینی بیشتر باشد مسئله کاهش هارمونیک در این ترانسفورماتور باید لحاظ شود چراکه وجود این مقدار هارمونیک به‌شدت بر کیفیت عملکرد ترانسفورماتور تأثیر می‌گذارد.

گفته شد هارمونیک‌ها باعث افزایش درجه حرارت ترانسفورماتور می‌شوند. به‌طور کلی اگر در جریان بار شبکه، هارمونیک وجود داشته باشد سه عامل باعث افزایش حرارت سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور می‌شود:

#### ۱. جریان مؤثر

اگر ترانسفورماتور فقط به‌اندازه KVA نامی بارگذاری شده باشد هارمونیک‌ها باعث افزایش جریان مؤثر ترانسفورماتور از مقدار نامی خود شده و درجه حرارت سیم‌پیچ‌ها و تلفات را افزایش می‌دهند.

---

<sup>۱</sup>. Voltage Stress

## ۲. تلفات جریان سرگردان

فوران‌های مغناطیسی القاشده باعث ایجاد جریان‌های سرگردان در ترانسفورماتور می‌شود. عبور این جریان‌ها از بخش‌های مختلف ترانسفورماتور از جمله سیم‌پیچی‌ها، هسته و دیگر هادی‌های بدنه باعث افزایش حرارت ترانسفورماتور می‌شوند. این بخش از تلفات ترانسفورماتور با مربع فرکانس جریان که سبب جریان‌های گردشی شده افزایش می‌یابد، بنابراین وجود جریان‌های هارمونیک در این بخش به شدت تلفات را در ترانسفورماتور افزایش می‌دهد [۵۱].

## ۳. تلفات هسته

میزان افزایشی که در تلفات هسته ترانسفورماتورها در اثر وجود هارمونیک‌ها رخ می‌دهد بستگی به طراحی هسته ترانسفورماتور دارد. میزان افزایش در تلفات هسته ناشی از هارمونیک‌ها به اندازه دو عامل قبل نیست.

## ۳-۴-۳ اثر هارمونیک بر روی موتورها

وجود هارمونیک در ترمینال موتورها، فوران‌های هارمونیک در سیم‌پیچی‌های رتور را به دنبال دارد. این فوران‌های هارمونیک تأثیر نامطلوبی روی گشتاور موتورها ندارند ولی منجر به گردش موتور در فرکانسی متفاوت با فرکانس سنکرون رتور شده که نتیجه آن تولید جریان‌های فرکانس بالا در رتور است. به‌طور کلی وجود هارمونیک‌ها باعث کاهش راندمان، افزایش درجه حرارت، لرزش و سروصدای اضافی در موتورها می‌شوند [۵۲].

## ۳-۴-۴ اثر هارمونیک‌ها روی رله‌های حفاظتی وسایل اندازه‌گیری

هارمونیک‌ها اثرات نامطلوبی روی عملکرد رله‌ها دارند. برخی از این اثرات عبارت‌اند از:

۱. آستانه تحریک رله‌ها در حضور هارمونیک‌ها بالا رفته و موجب عملکرد کندتر آن‌ها نسبت به موقعی که هارمونیک وجود ندارد می‌شود که این عامل می‌تواند باعث ایجاد صدمات به تجهیزات شبکه شود.

۲. تغییر در فرکانس شبکه ناشی از حضور هارمونیک‌ها، عملکرد رله‌های تشخیص فرکانس پایین را با مشکل مواجه می‌کند.

۳. رله‌های اضافه ولتاژ و اضافه جریان با تغییر شرایط کاری ناشی از حضور هارمونیک‌ها در شبکه رفتارهای نادرستی از خود نشان می‌دهند.

### ۳-۴-۵ کلیدهای قدرت و فیوزها

به‌طور کلی اثرات نامطلوب هارمونیک‌ها بر روی کلیدهای قدرت و فیوزها را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود [۱]:

۱. هارمونیک‌ها ظرفیت قطع جریان کلیدها را کاهش می‌دهند.

۲. هارمونیک‌ها ظرفیت حمل جریان فیوزها را کاهش داده و زمان ذوب شدن فلز فیوز را تغییر می‌دهند.

۳. مقادیر زیاد  $\frac{di}{dt}$  به دلیل وجود جریان‌های هارمونیکی بالا، عمل قطع را بسیار مشکل می‌کند.

### ۳-۵ پخش بار در سیستم توزیع

به دلیل آن‌که خازن‌گذاری در سیستم توزیع در حالت ماندگار انجام می‌شود پخش بار از بخش‌های مهم در این فرآیند می‌باشد. به‌طوری‌که تلفات سیستم قبل و بعد از خازن‌گذاری و همچنین ولتاژ باس‌ها قبل و بعد از خازن‌گذاری باید در هر مرحله محاسبه شود. در این بخش به بررسی اجمالی پخش بار و تجزیه و تحلیل فیدرهای توزیع در حالت ماندگار می‌پردازیم. همان‌طور که قبلاً گفته شد وجود بارهای غیرخطی در شبکه مقدار قابل‌توجهی انحراف هارمونیکی در شکل موج‌های ولتاژ و جریان ایجاد می‌کند. در نتیجه این نگرانی وجود دارد که اگر خازن‌ها به‌طور مناسب جایابی و مقدار یابی نشوند، منجر به تقویت هارمونیکی شده و رزونانس‌های موازی در یک یا چند فرکانس هارمونیکی ایجاد می‌کنند. با تغییر اندازه و محل خازن‌ها می‌توانیم رزونانس را به فرکانس‌های غیر هارمونیکی منتقل کرده و باعث کاهش تلفات و هزینه‌های سیستم توزیع شویم [۵۳-۵۴]. تمامی

این موارد باید در برنامه پخش باری مناسب لحاظ گردد به طوری که قادر به تجزیه و تحلیل شبکه در حضور هارمونیک‌ها باشد.

پخش بار سیستم توزیع در حضور بارهای غیرخطی شامل دو مرحله می‌باشد:

۱. پخش بار در فرکانس اصلی<sup>۱</sup>

۲. پخش بار در فرکانس هارمونیکی

ابتدا پخش بار در فرکانس اصلی سیستم انجام شده و ولتاژ تمام باس‌ها در این فرکانس محاسبه می‌شود. در مرحله دوم کلیه المان‌های سیستم را در فرکانس هارمونیکی مدل‌سازی می‌کنیم و پخش بار هارمونیکی را در فرکانس هارمونیکی انجام می‌دهیم. در نهایت توسط جمع آثار ولتاژ کلیه باس‌ها در فرکانس اصلی و فرکانس‌های هارمونیکی به دست می‌آید.

### ۳-۵-۱ ماهیت متفاوت پخش بار سیستم توزیع

پخش بارهای مورد استفاده در سیستم‌های انتقال برای سیستم‌های توزیع مناسب نیستند. در سیستم‌های توزیع، به علت زیاد بودن تعداد گره‌های سیستم، ابعاد سیستم معمولاً بزرگ بوده و در روش‌های تکرار معمول بکار رفته در حل مسئله پخش توان انتقال نظیر نیوتن رافسون<sup>۲</sup>، باید ماتریس‌های با بعد زیاد را معکوس کرد. یکی از موارد مهم در مسائل بهینه‌سازی سرعت بالای پخش بار مورد استفاده می‌باشد، چرا که پخش بار باید برای تعداد زیادی تکرار جهت یافتن بهینه‌ترین حالت تکرار شود.

همچنین پخش بارهای نیوتن رافسون و گوس سایدل بیشتر برای شبکه‌های انتقال ولتاژ بالا کاربرد دارند. در این روش‌ها با کاهش نسبت  $X/R$  خطوط، سرعت همگرایی به شدت کم می‌شود و حتی ممکن است قادر به حل شبکه‌هایی که در آن‌ها مقادیر  $X$  و  $R$  خطوط نزدیک به هم هستند، نباشند [۵۳].

---

<sup>۱</sup>. Fundamental

<sup>۲</sup>. Newton-Raphson



### ۳-۵-۲ پخش بار مستقیم<sup>۱</sup>

روش پخش بار مستقیم بر مبنای دو ماتریس به نام‌های ماتریس تبدیل جریان تزریقی به باس‌ها به جریان شاخه‌ها<sup>۲</sup> (BIBC) و ماتریس تبدیل جریان شاخه‌ها به ولتاژ باس‌ها<sup>۳</sup> (BCBV) و جریان تزریقی معادل باس‌ها استوار است.

جریان تزریقی معادل به باس‌ها توسط فرمول زیر به دست می‌آید:

$$I_i^k = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i^k} \right)^* \quad (۹-۳)$$

در این رابطه  $P_i$  و  $Q_i$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو باس  $i$  ام،  $V_i^k$  و  $I_i^k$  به ترتیب ولتاژ و جریان تزریقی معادل باس  $i$  در تکرار  $k$  ام است.

بر اساس قوانین کیر شهف می‌توان رابطه میان جریان‌های تزریقی به باس‌ها و جریان شاخه‌ها را به صورت معادله (۱۰-۳) نوشت:

$$[B] = [BIBC] \cdot [I] \quad (۱۰-۳)$$

در رابطه فوق  $[B]$  و  $[I]$  به ترتیب بردار جریان شاخه‌ها و بردار جریان‌های تزریقی به باس‌ها هستند. ماتریس BIBC یک ماتریس ثابت بالا مثلثی است و تمام درایه‌های آن صفر و یک هستند. ماتریس BCBV بیانگر رابطه میان جریان شاخه‌ها و ولتاژ باس‌ها می‌باشد. تغییرات ولتاژ باس‌ها در اثر تغییر در جریان شاخه‌ها مستقیماً از ماتریس BCBV محاسبه می‌گردد [۵۵-۵۶].

معادله (۱۱-۳) رابطه میان جریان شاخه‌ها و ولتاژ باس‌ها را نشان می‌دهد:

$$[V_0] - [V] = [BCBV] \cdot [B] \quad (۱۱-۳)$$

در رابطه فوق،  $[V]$  بردار ولتاژ باس‌ها و  $[V_0]$  بردار ولتاژ باس‌ها در حالت اولیه می‌باشد. معادله فوق را می‌توان به صورت معادله (۱۲-۳) نیز نوشت:

---

<sup>۱</sup>. Distribution Load Flow  
<sup>۲</sup>. Bus-Injection to Branch-Current matrix  
<sup>۳</sup>. Branch Current to Bus-Voltage matrix

$$[\Delta V] = [BCBV].[B] \quad (12-3)$$

که در آن  $\Delta V$  به صورت زیر می باشد:

$$\Delta V = [V_0] - [V] \quad (13-3)$$

با ترکیب روابط فوق، رابطه میان جریان های تزریقی به باس ها و ولتاژ باس ها به صورت معادله

(14-3) محاسبه می شود:

$$[\Delta V] = [BCBV].[BIBC].[I] = [DLF].[I] \quad (14-3)$$

که در آن رابطه ماتریس DLF به صورت زیر تعریف می شود:

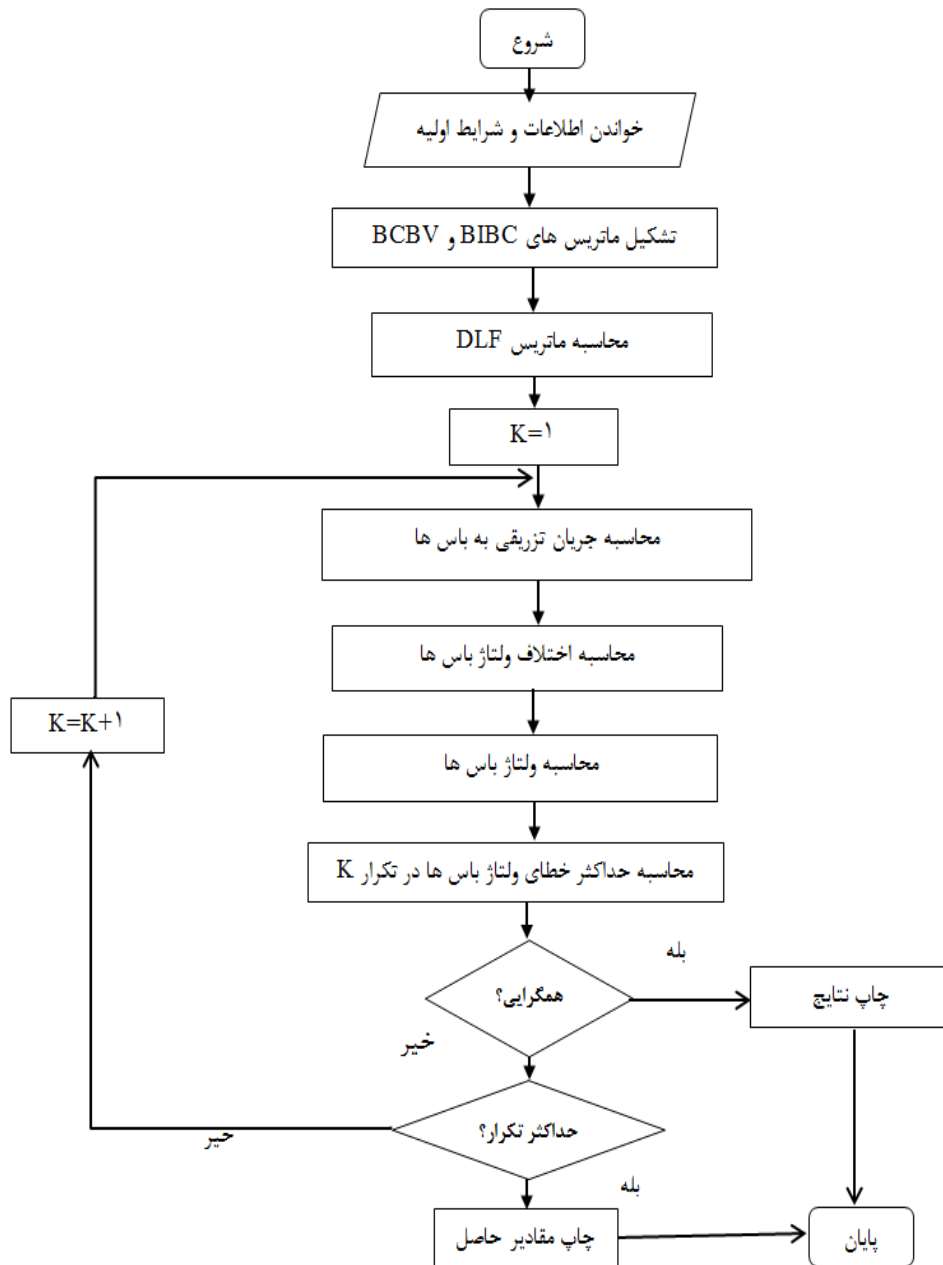
$$[DLF] = [BCBV].[BIBC] \quad (15-3)$$

در نهایت پخش بار مستقیم برای سیستم های توزیع به دست می آید:

$$[\Delta V^{k+1}] = [DLF].[I^k] \quad (16-3)$$

$$[V^{k+1}] = [V_0] + [\Delta V^{k+1}] \quad (17-3)$$

فلوچارت الگوریتم پخش بار مستقیم در شکل (3-4) آمده است:



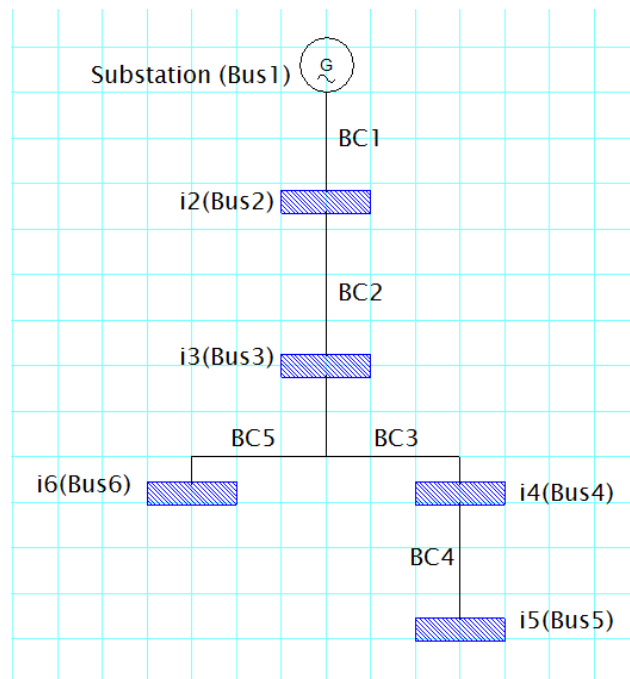
شکل (۳-۴): فلوچارت الگوریتم پخش بار مستقیم

### ۳-۵-۳ روش ساخت ماتریس های BIBC و BCBV

در شکل (۳-۵) یک سیستم توزیع نمونه نشان داده شده است. رابطه (۳-۱۸) جریان های

تزریقی به شبکه و جریان های شاخه ها را توسط قانون جریان کیر شیف به یکدیگر تبدیل می کند. در

این روابط به طور مثال  $B_1$  جریان تزریقی به شاخه اول می باشد:



شکل (۳-۵): محاسبه جریان تزریقی بر اساس مدل شبکه‌های توزیع [۵۵]

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \quad (۱۸-۳)$$

$$B_3 = I_4 + I_5$$

$$B_5 = I_6$$

در روابط فوق I جریان تزریقی باس‌ها می‌باشد که اندیس آن بیانگر شماره باس است.

این روابط به شکل ماتریسی در معادله (۱۹-۳) نشان داده شده است:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (۱۹-۳)$$

با اعمال قانون ولتاژ کیرشهف به شبکه شکل (۳-۵) داریم:

$$V_2 = V_1 - B_1 Z_{12} \quad (۲۰-۳)$$

$$V_3 = V_2 - B_2 Z_{23}$$

$$V_4 = V_3 - B_3 Z_{34}$$

در روابط فوق V ولتاژ باس و اندیس آن بیانگر شماره باس است. با استفاده از رابطه (۲۰-۳)

می‌توان ولتاژ باس ۴ را به صورت زیر به دست آورد:

ولتاژ باس‌ها به صورت معادله (۲۲-۳) به دست می‌آید:

$$V_4 = V_1 - B_1 Z_{12} - B_2 Z_{23} - B_3 Z_{34} \quad (۲۱-۳)$$

اگر روابط (۲۰-۳) و (۲۱-۳) را به صورت ماتریسی بنویسیم خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} \quad (۲۲-۳)$$

به جای ماتریس ستونی سمت راست رابطه (۲۲-۳) از رابطه (۱۹-۳) مقدار قرار می‌دهیم. لذا

خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (۲۳-۳)$$

با مقایسه رابطه (۲۳-۳) با عبارت وسط رابطه (۱۴-۳) ماتریس‌های BIBC و BCBV به صورت

زیر به دست می‌آیند:

$$BIBC = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲۴-۳)$$

$$BCBV = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \quad (۲۵-۳)$$

### ۳-۶ جمع‌بندی

در این فصل به معرفی بارهای غیرخطی متداول در سیستم‌های توزیع و اثرات هارمونیک‌ها روی تجهیزات شبکه اشاره کردیم. همچنین به شرح پخش بار هارمونیکی و پخش بار مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شد. در فصل بعدی به بیان روش ارائه‌شده در جاییابی خازن‌ها در محیط هارمونیکی با در نظر گرفتن مدل بار می‌پردازیم.



## فصل چهارم:

روش ارائه‌شده در جایابی خازن‌ها در  
محیط هارمونیکی با در نظر گرفتن مدل بار



## ۴-۱ مقدمه

برای جایی بهینه خازن‌ها در سیستم توزیع، باید کلیه پارامترها و قیود لازم به‌منظور حل مسئله را توسط یک روش بهینه‌سازی مناسب متحد نمود. روش بهینه‌سازی مورد استفاده باید از سرعت و دقت بالایی برخوردار باشد. در این فصل ابتدا توابع هدف و قیود به‌کاررفته در فرآیند بهینه‌سازی شرح داده می‌شود. برای این منظور یک تابع هزینه مناسب پیشنهاد شده و در نهایت شبیه‌سازی بر روی سیستم تست نمونه به‌منظور بررسی صحت عملکرد، اجرا می‌شود.

در این پایان‌نامه تغییرات بار به‌صورت الگویی متشکل از سه سطح بار گسسته یعنی پرباری، بار پایه و کم‌باری تقریب زده شده و بانک‌های خازنی نیز به‌صورت گسسته در ظرفیت‌های استاندارد در نظر گرفته شده است. هدف کلی مسئله خازن‌گذاری در این پایان‌نامه مینیمم کردن تابع هدف در کنار رعایت کامل قیود حاکم بر مسئله می‌باشد.

## ۴-۲ فرمول‌بندی مسئله

خازن‌گذاری بهینه یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه<sup>۱</sup> است. این اهداف عبارت‌اند از: تعیین محل و مقدار مناسب بانک‌های خازنی در سیستم موردنظر به‌گونه‌ای که علاوه بر حداقل سازی هزینه‌های شبکه قادر به ارضای قیود موردنظر نیز باشد. در ادامه تابع هزینه مورد استفاده در مسئله خازن‌گذاری را معرفی می‌کنیم.

## ۴-۲-۱ تابع هدف

با توجه به اینکه هدف از خازن‌گذاری بهینه کاهش تلفات توان، کاهش تلفات انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به خرید، نصب و نگهداری بانک‌های خازنی در کنار ارضای قیود مسئله از جمله قیود مربوط به حدود بالا و پایین ولتاژ باس‌ها و همچنین محدودیت‌های مربوط به حداکثر اعوجاج هارمونیک می‌باشد، لذا تابع هدف معرفی شده باید کلیه المان‌های موردنظر را در بر بگیرد. همچنین

---

<sup>۱</sup>. Multi-Objective Optimization

وجود بارهای خطی و غیرخطی و ملاحظات مربوط به آنها نیز باید در فرمول‌بندی لحاظ گردد. چنانچه مسئله خازن‌گذاری در حضور بارهای غیرخطی اجرا می‌شود باید ولتاژهای هارمونیک در تابع هدف و محاسبات پخش بار محاسبه و منظور شود. بنابراین تابع هدف را می‌توان به صورت معادله (۴-۱) بیان نمود [۵۷]:

(۴-۱)

$$F = F_{loss} + F_{capacity} + F_{cost} = K_E \cdot T \cdot P_{loss}(V^{(1)}, \dots, V^{(L)}, C) + K_A \cdot P_{loss}(V^{(1)}, \dots, V^{(L)}, C) + \sum_{i \in SC} K_{c_{fp}} \cdot C_{fi}$$

که در آن:

$F_{loss}$ : هزینه تلفات توان

$F_{capacity}$ : هزینه خازن‌گذاری

$F_{cost}$ : هزینه تلفات انرژی سیستم

$P_{loss}$ : کل تلفات سیستم

$V^{(k)}$ : بردار ولتاژباز در هارمونیک  $k$  ام

$L$ : بالاترین مرتبه هارمونیک موردنظر

$C$ : اندازه خازن‌های نصب شده

$K_A$ : هزینه ناشی از هر مگاوات تلفات توان حقیقی سیستم ( $K_A = 120000\$/MW$ )

$K_E$ : هزینه ناشی از هر مگاوات ساعت تلفات انرژی سیستم ( $K_E = 50\$/MWh$ )

$T$ : مدت زمان بارگذاری بر حسب ساعت

$SC$ : مجموعه باس‌های خازن موازی موجود

$n$ : تعداد کل باس‌ها

$K_{c_{fp}}$ : هزینه خازن ثابت

کل تلفات سیستم در حضور هارمونیک‌ها به صورت معادله (۴-۲) می‌باشد:

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^L P_{loss}^{(k)} = \sum_{k=1}^L \left[ \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{m=1 \\ m > j}}^n V_j^{(k)} V_m^{(k)} Y_{jm}^{(k)} \cos(\theta_j^{(k)} - \theta_m^{(k)} - \delta_{jm}^{(k)}) \right] \quad (2-4)$$

که در آن:

n: تعداد کل باس ها

k: تعداد کل هارمونیک های در نظر گرفته شده

$V_j^{(k)}$ : اندازه ولتاژ هارمونیک k ام در باس j ام

$\theta_j^{(k)}$ : فاز ولتاژ هارمونیک k ام در باس j ام

$Y_{jm}^{(k)}$ : اندازه ادمیتانس خط بین باس j و m متناظر با هارمونیک k ام

$\delta_{jm}^{(k)}$ : زاویه ادمیتانس خط بین باس j و m متناظر با هارمونیک k ام

#### ۴-۲-۲ قیود به کاررفته

تابع هدف معرفی شده در معادله (۴-۱) در شرایط کلی بیان شده است. مسئله خازن گذاری در سیستم توزیع با در نظر گرفتن یک سری قیود و محدودیت ها انجام می شود که در ادامه به آن ها اشاره می کنیم:

#### ۴-۲-۱-۲ قید مقدار مؤثر ولتاژ باس ها

یکی از اهداف خازن گذاری بهبود پروفیل ولتاژ و تثبیت ولتاژ باس ها در محدوده مشخص می باشد.

$$V_{\min} \leq V_{irms} \leq V_{\max} \quad (3-4)$$

که در این رابطه:

$V_{\min}$  حداقل ولتاژ هر باس،  $V_{\max}$  حداکثر ولتاژ هر باس و  $V_{irms}$  ولتاژ مؤثر باس است و از طریق

فرمول (۴-۴) محاسبه می شود:

$$V_{irms} = \sqrt{\sum_{k=1} (V_i^{(k)})^2} \quad (4-4)$$

و در آن  $V_i^{(k)}$  ولتاژ باس  $i$  ام در هارمونیک  $k$  ام است.

در این پایان‌نامه برای ولتاژ باس‌ها از استاندارد IEEE-519 استفاده شده است که

$$V_{\min} = 0.9 pu \text{ و } V_{\max} = 1.1 pu \text{ می‌باشد [58].}$$

#### ۴-۲-۲-۲-۲ قید حداکثر اعوجاجات هارمونیکی

در مسئله خازن‌گذاری یکی از اهداف ما رساندن اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس‌ها به کمتر از مقدار

حداکثر ولتاژ هارمونیکی تعریف‌شده برای سیستم توزیع ( $THD_v^{\max}$ ) می‌باشد به‌نحوی که:

$$THD_v \leq THD_v^{\max} \quad (5-4)$$

مقدار اعوجاج هارمونیکی توسط معادله (۴-۶) محاسبه می‌شود:

$$THD_v = \left( \frac{\sqrt{\sum_{k \neq 1} (V_i^{(k)})^2}}{V_i^{(1)}} \right) \times 10 \quad (6-4)$$

در این پایان‌نامه، بر طبق استاندارد اعلام شده از سوی IEEE (IEEE-519 standard)،

$$THD_v^{\max} = 5\% \text{ در نظر گرفته شده است [58].}$$

#### ۴-۲-۲-۲-۳ قید حداکثر توان راکتیو

حداکثر توان راکتیوی که توسط خازن‌های موازی به شبکه تزریق می‌شود باید با توان راکتیو

درخواستی بارها برابر یا کمتر از آن باشد یعنی:

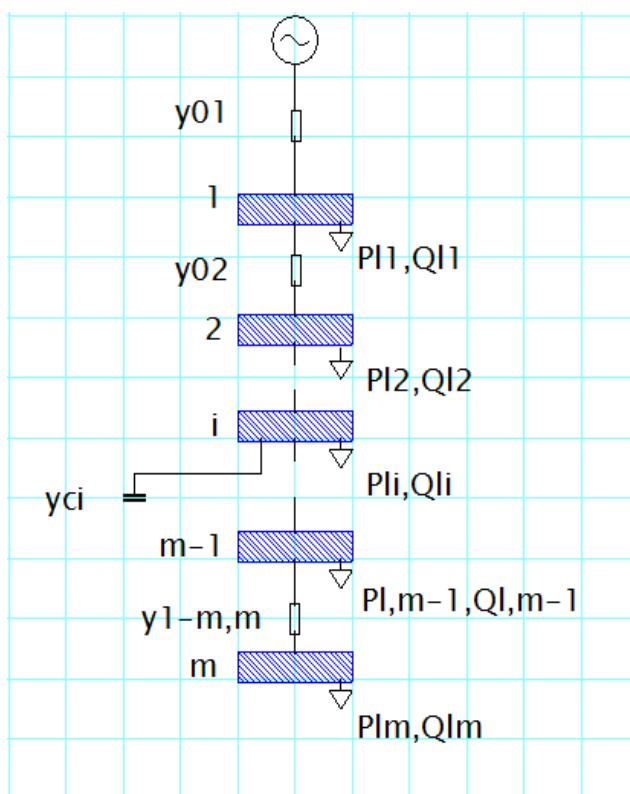
$$\sum_{i=1}^{ncap} Q_{ci} \leq Q_{tot} \quad (7-4)$$

که در رابطه فوق  $Q_{ci}$  اندازه توان راکتیو خازن‌های نصب‌شده در باس  $i$  و  $ncap$  تعداد باس‌های

انتخاب شده برای خازن‌گذاری و  $Q_{tot}$  کل توان راکتیو موردنیاز باس‌ها می‌باشد.

### ۳-۴ مدل سازی سیستم در فرکانس های اصلی و هارمونیک

چنانچه بخواهیم عناصر شبکه را در حالت خطی مدل کنیم می توانیم آن ها را به صورت یک مقاومت موازی با راکتانس در نظر بگیریم ولی مدل سازی این عناصر در حضور بارهای غیرخطی کمی متفاوت است. به نحوی که منابع هارمونیک را باید به صورت منابع تزریقی جریان به باس ها مدل نمود. برای مدل سازی عناصر سیستم در فرکانس های اصلی و هارمونیک شکل (۴-۱) را در نظر می گیریم:



شکل (۴-۱): فیدر شعاعی برای مدل سازی سیستم در فرکانس های اصلی و هارمونیک [۵۶]

مدل سازی پارامترهای شبکه در فرکانس های اصلی و هارمونیک به صورت موارد زیر می باشد:

۱. توان های اکتیو و راکتیو هر باس در فرکانس اصلی در معادلات (۴-۸) و (۴-۹) آمده است:

$$P_i = |V_i^1|^2 G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |V_i^1 V_j^1 Y_{ij}^1| \cos(\theta_{ij}^1 + \delta_j^1 - \delta_i^1) \quad (۴-۸)$$

$$Q_i = -|V_i^1|^2 B_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |V_i^1 V_j^1 Y_{ij}^1| \sin(\theta_{ij}^1 + \delta_j^1 - \delta_i^1) \quad (۴-۹)$$

که در این روابط داریم:

$$i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (10-4)$$

$$P_i = P_{ii} + P_{hi}$$

$$Q = Q_{ii} + Q_{hi}$$

n: تعداد کل باس‌ها

$V_i^1$ : ولتاژ باس i در فرکانس اصلی شبکه

$V_j^1$ : ولتاژ باس j در فرکانس اصلی شبکه

$Y_{ij}^1$ : ادمیتانس بین باس i و j در فرکانس اصلی

$\theta_{ij}$ : اندازه زاویه ادمیتانس بین باس i و j بر حسب رادیان

$\delta_i$  و  $\delta_j$ : به ترتیب زاویه ولتاژ مربوط به باس i و j بر حسب رادیان

$G_{ii}$  و  $B_{ii}$ : به ترتیب کندوکتانس و سوسپتانس مربوط به باس i

$G_{ij}$  و  $B_{ij}$ : به ترتیب کندوکتانس و سوسپتانس بین باس i و j

$Q_i$  و  $P_i$ : به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو بار در باس i

$Q_{ii}$  و  $P_{ii}$ : به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو بار در فرکانس اصلی مربوط به باس i

$Q_{hi}$  و  $P_{hi}$ : به ترتیب توان‌های اکتیو و راکتیو مربوط به هارمونیک h ام بار در باس i

۲. برای محاسبه ادمیتانس شبکه در فرکانس اصلی از معادلات (۱۱-۴) و (۱۲-۴) استفاده

می‌کنیم:

$$Y_{ij}^1 = |Y_{ij}^1| \angle \theta_{ij}^1 = \begin{cases} -y_{ij}^1 \\ y_{i-1,i}^1 + y_{i+1,i}^1 + y_{ci}^1 \end{cases} \quad (11-4)$$

که در این رابطه داریم:

$y_{ij}^1$ : عنصر سطر i و ستون j از ماتریس ادمیتانس شبکه در فرکانس اصلی

$y_{i-1,i}^1$  و  $y_{i+1,i}^1$ : ادمیتانس‌های متصل بین باس i و i+1 در فرکانس اصلی

$y_{ci}^1$ : ادمیتانس خازن متصل به باس i در فرکانس اصلی

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \quad (12-4)$$

اجرای پخش بار در فرکانس اصلی و هارمونیکی اندازه و ولتاژ مربوط به هر باس را ایجاد

می‌کند. تلفات توان در فرکانس اصلی از رابطه (۱۳-۴) به دست می‌آید:

$$P_{loss(i,i+1)}^1 = R_{i,i+1} \left[ \left| V_{i+1}^1 - V_i^1 \right| \left| y_{i,i+1}^1 \right| \right]^2 \quad (13-4)$$

که در این رابطه داریم:

$P_{loss(i,i+1)}^1$ : تلفات توان بین باس  $i$  و  $i+1$  در فرکانس اصلی

$R_{i,i+1}$  و  $X_{i,i+1}$ : به ترتیب مقاومت و راکتانس خط بین باس  $i$  و  $i+1$

$V_{i+1}^1$ : ولتاژ باس  $i+1$  در فرکانس اصلی

۳. معادله (۱۴-۴) ادمیتانس بارهای شبکه در فرکانس هارمونیکی را نشان می‌دهد:

$$y_{ii}^h = \frac{P_{ii}}{|V_i^1|^2} - j \frac{Q_{ii}}{h|V_i^1|^2} \quad (14-4)$$

که در این رابطه داریم:

$h$ : بیانگر مرتبه هارمونیکی موردنظر

$y_{ii}^h$ : ادمیتانس بارهای شبکه متصل به باس  $i$  در فرکانس هارمونیکی  $h$  ام

$P_{ii}$  و  $Q_{ii}$ : توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای متصل به باس  $i$

معادله (۱۵-۴) ادمیتانس خازنی شبکه را در فرکانس هارمونیکی بیان می‌کند:

$$y_{ci}^h = h y_{ci}^1 \quad (15-4)$$

که در این رابطه داریم:

$y_{ci}^h$ : ادمیتانس خازنی شبکه در فرکانس هارمونیکی

و در نهایت رابطه (۱۶-۴) مربوط به ادمیتانس خطوط در فرکانس هارمونیکی می‌باشد:

$$y_{i,i+1}^h = (R_{i,i+1} + jhX_{i,i+1})^{-1} \quad (16-4)$$

۴. روابط (۱۷-۴) و (۱۸-۴) جریان‌های هارمونیکی تزریقی توسط بارهای غیرخطی را نشان

می‌دهند. رابطه (۱۷-۴) کل جریان هارمونیکی تزریق‌شده به هر باس را نشان می‌دهد و رابطه (۱۸-۴)

جریان هارمونیک مربوط به هر هارمونیک در باس مورد نظر است که در این رابطه  $C(h)$  میزان

جریان هارمونیک بر حسب درصد نسبت به مؤلفه اصلی جریان می‌باشد [۶۱]:

$$I_i^1 = \left[ \frac{P_i + jQ_i}{V_i^1} \right]^* \quad (۱۷-۴)$$

$$(۱۸-۴)$$

$$C(h) = \frac{I_i^h}{I_i^1}$$

در این روابط داریم:

$I_i^1$ : جریان باس  $i$  در فرکانس اصلی

$I_i^h$ : جریان باس  $i$  در فرکانس هارمونیک  $h$  ام

۵. ولتاژهای هارمونیک کلیه باس‌ها با حل معادله ماتریس (۴-۱۹) به دست می‌آید. ادمیتانس

متقابل بین باس  $i$  و  $j$  در هارمونیک  $h$  ام از طریق معادله (۴-۲۰) محاسبه می‌شود:

$$(۱۹-۴)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11}^h & Y_{12}^h & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ Y_{21}^h & Y_{22}^h & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{m-1,m-1}^h & Y_{m-1,m}^h \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & Y_{m,m-1}^h & Y_{m,m}^h \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1^h \\ V_2^h \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{m-1}^h \\ V_m^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^h \\ I_2^h \\ \cdot \\ \cdot \\ I_{m-1}^h \\ I_m^h \end{bmatrix}$$

$$(۲۰-۴)$$

$$Y_{ij}^h = \begin{cases} -y_{ij}^h \\ y_{i-1,i}^h + y_{i+1,i}^h + y_{li}^h + y_{ci}^h \end{cases}$$

#### ۴-۴ مدل سازی بارهای سیستم قدرت

یک سیستم قدرت تا زمانی به صورت پایدار مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد که بین توان‌های

الکتریکی خروجی از نیروگاه‌ها و توان‌های الکتریکی موردنیاز بارها تعادل وجود داشته باشد. بنابراین

مشخصه‌های بار در پایداری سیستم‌های قدرت نقش اساسی دارند. از آنجایی که در سیستم‌های قدرت



مصرف‌کننده‌های متنوعی همچون لامپ‌های فلورسنت و معمولی، یخچال، گرم‌کننده، کمپرسور، موتور، کوره و غیره وجود دارند نمی‌توان مدل‌سازی دقیقی برای تک‌تک این عناصر انجام داد. علاوه بر این الگوی بارگذاری شبکه در شرایط مختلف از جمله ساعات مختلف شبانه‌روز، فصول مختلف سال و وضعیت‌های مختلف آب و هوایی تغییرات پیوسته دارد. با این مقدمه یافتن مدلی که بتواند تا حدود زیادی رفتار عناصر سیستم توزیع را بیان کند از اهمیت بالایی در مطالعات سیستم‌های قدرت برخوردار است [۵۹].

#### ۴-۴-۱ اهمیت مدل‌سازی بار

مدل‌سازی بار نقش مهمی در طراحی، اجرا و توسعه سیستم‌های قدرت دارد. به طور کلی اهمیت

مدل‌سازی را می‌توان به‌صورت خلاصه در موارد زیر بیان نمود:

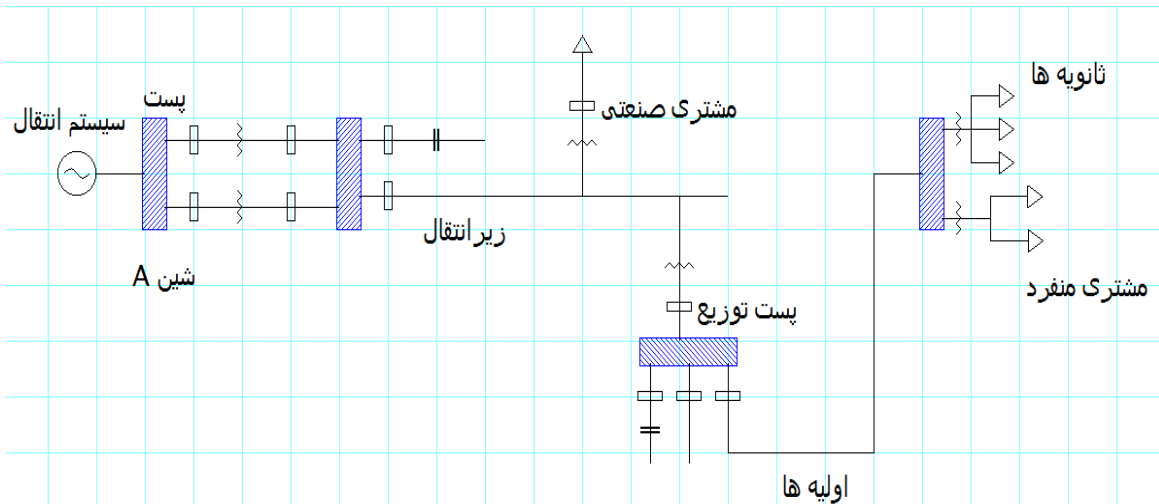
- افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت توان سیستم‌های قدرت
- افزایش پایداری ولتاژ
- کنترل بهتر ولتاژ
- تسلط و دقت بیشتر به‌منظور طراحی و توسعه سیستم‌های قدرت

در حقیقت مهم‌ترین اثر مدل‌سازی بار نقش مثبت آن در تحلیل پایداری شبکه و ایجاد تعادل بین توان‌های تولیدی و مصرفی است. مدل‌سازی بار همچنین به‌منظور آنالیز مشکلات و تجزیه و تحلیل در زمینه پایداری هرچه بیشتر سیستم قدرت مطرح می‌شود.

#### ۴-۴-۲ مفاهیم اولیه مدل‌سازی بار

شکل (۲-۴) بارهای سیستم قدرت را به‌صورت ترکیبی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود علاوه بر تجهیزات مصرفی متصل شده، ترانسفورماتورهای تغییر سطح ولتاژ، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ و جبران‌کننده‌های توان راکتیو نیز به شبکه متصل هستند. مدل‌سازی همه این عناصر با توجه

به مشخصه‌های خاص خود در عمل بسیار دشوار می‌باشد و نیازمند مدلی جامع برای توصیف رفتار عملکردی آن‌ها در شبکه هستیم.



شکل (۲-۴): ترکیب عناصر مختلف سیستم قدرت در نقطه تحویل توان (باس A) [۵۹]

### ۳-۴-۴ مدل‌های استاتیکی<sup>۱</sup> بار

مدل‌های استاتیکی، مشخصه‌های بار را در هر لحظه از زمان به صورت روابط ریاضی برحسب دامنه ولتاژ باس و فرکانس آن بیان می‌کند. وابستگی مشخصه‌های بار به ولتاژ معمولاً به صورت نمایی مطابق رابطه (۲۱-۴) و (۲۲-۴) نمایش داده می‌شود:

$$P = P_0 (\bar{V})^a \quad (21-4)$$

$$Q = Q_0 (\bar{V})^b \quad (22-4)$$

در این روابط داریم:

$$\bar{V} = \frac{V}{V_0} \quad (23-4)$$

که P و Q به ترتیب نشان‌دهنده توان‌های حقیقی و راکتیو بار است هنگامی که دامنه ولتاژ باس مساوی V باشد. اندیس صفر نشان‌دهنده متغیرهای مربوطه در شرایط کاری اولیه می‌باشد. نماهای a و b پارامترهای این مدل هستند. اگر این مؤلفه‌ها به ترتیب صفر یا یک یا دو باشد مدل نمایش

<sup>۱</sup>. Static Load Models

داده شده نشان دهنده مشخصه های بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت خواهد بود. بسته به مشخصه های اجزای تشکیل دهنده بار ترکیبی مقادیر آنها متفاوت است. نماهای  $a$  یا  $b$  تقریباً مساوی شیب  $dP/dV$  (یا  $dQ/dV$ ) در  $V = V_0$  است. در بارهای ترکیبی،  $a$  معمولاً بین  $0.5$  تا  $1/8$  و  $b$  بین  $1/5$  تا  $6$  است. معمولاً بار توان حقیقی را به صورت جریان ثابت ( $a=1$ ) و بار توان راکتیو را به صورت امپدانس ثابت ( $b=2$ ) مدل می کنند. یکی دیگر از روش های نمایش وابستگی بار به ولتاژ مدل چند جمله ای رابطه  $(24-4)$  و  $(25-4)$  است [50]:

$$P = P_0 \left[ p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3 \right] \quad (24-4)$$

$$Q = Q_0 \left[ q_1 \bar{V}^2 + q_2 \bar{V} + q_3 \right] \quad (25-4)$$

به دلیل اینکه این مدل از مؤلفه امپدانس ثابت ( $Z$ )، جریان ثابت ( $I$ ) و توان ثابت ( $P$ ) تشکیل شده است، به مدل ZIP موسوم است. پارامترهای مدل،  $p_1$  تا  $p_3$  و  $q_1$  تا  $q_3$  است که نشان دهنده سهم هر جزء در سیستم توزیع می باشد [60].

در این مدل داریم:

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1 \quad (26-4)$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 1$$

این مقادیر بسته به نوع توزیع بار شبکه قابل تغییر است. در واقع هر شبکه با توپولوژی خاص خود درصدی از بارهایش به صورت توان ثابت، درصدی به صورت امپدانس ثابت و درصدی هم به صورت جریان ثابت می باشد.

از جمله بارهای توان ثابت می توان به ماشین های چرخان و بارهای ولتاژ ثابت اشاره نمود. از جمله بارهای امپدانس ثابت می توان به لامپ های رشته ای و هیترهای الکتریکی اشاره نمود. برای بارهای جریان ثابت می توان از ماشین های سنکرون و بارهای یکسو سازی نام برد.

## ۴-۵ الگوریتم حل مسئله خازن گذاری

در مسئله خازن گذاری فرضیات زیر را در نظر می گیریم:

۱. در ابتدا تمام بارهای سیستم به صورت بارهای توان ثابت (PQ) در نظر گرفته می شوند و سپس بارهای شبکه تماماً وابسته به ولتاژ مدل می شوند.
۲. در شبکه مورد مطالعه هم بارهای خطی و هم بارهای غیرخطی وجود دارد.
۳. بارهای غیرخطی عامل ایجاد هارمونیک های جریان به شبکه هستند.
۴. درصد بارهای غیرخطی و درصد جریان در هر هارمونیک معلوم فرض می شود.
۵. بارهای غیرخطی به صورت منابع جریان هارمونیکی مدل می شوند.
۶. مسئله خازن گذاری را در سطوح مختلف بارگذاری انجام می دهیم و فرض می کنیم بارهای شبکه با همین الگو تغییر می کنند.

به منظور جایابی خازن در شرایط هارمونیکی ابتدا پخش بار در فرکانس اصلی اجرا می شود. سپس تا مرتبه هارمونیکی مشخصی را انتخاب نموده و از مراتب بالاتر صرف نظر می شود. پخش بار هارمونیکی بیان شده در فصل قبل باید برای تمام مراتب هارمونیکی موجود اجرا شود و در نهایت نتایج تمام مراحل به منظور محاسبه تلفات کل، اعوجاج هارمونیکی ولتاژ مؤثر تمام باس ها مورد استفاده قرار گیرد. اطلاعات ورودی در الگوریتم های بهینه یابی شامل ساختار سیستم و داده های شبکه، پارامترهای کنترل شامل حدود بالا و پایین ولتاژ باس و ماکزیمم مقدار اعوجاج هارمونیکی ولتاژ باس ها، واحدهای خازنی موجود و ضرایب هزینه، ماکزیمم تعداد خازن های مجاز مورد استفاده، مرتبه های هارمونیکی مورد استفاده و کل توان راکتیو مورد تقاضا از طرف شبکه می باشد.

حل مسئله خازن گذاری بهینه سیستم توزیع در حضور بارهای غیرخطی توسط دو الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و اجتماع ذرات در ادامه آورده شده است.

#### ۴-۵-۱ حل مسئله جایابی خازن‌ها با الگوریتم ژنتیک

در قسمت ۲-۵-۴-۱ در مورد الگوریتم ژنتیک توضیحات مختصری بیان شد. در این قسمت هدف این است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک جایابی خازن‌ها برای حالت‌های مختلف شبکه بیان شود. برای حل هر مسئله بهینه‌سازی با کمک الگوریتم ژنتیک ابتدا باید کروموزوم آن را با توجه به ماهیت مسئله طراحی نمود. در مسئله جایابی خازن‌ها، از یک رشته باینری که در حقیقت همان کروموزوم است و طولی برابر با تعداد باس‌های شبکه دارد، استفاده می‌کنیم. بنابراین در یک شبکه  $n$  باسه، کروموزوم‌ها دارای  $n$  ژن هستند. هر ژن در کروموزوم نشان‌دهنده مقدار ظرفیت خازن نصب‌شده در آن باس می‌باشد. اگر در باسی خازن نصب شود کد مربوط به آن خازن به صورت باینری در ژن قرار می‌گیرد که با عملیات دیکدینگ این مقدار باینری را به صورت دهدهی تبدیل می‌کنیم. کدهای مربوط به خازن‌های موجود در بازار در جدول (۵-۴) آورده شده است. هر کد نشان‌دهنده پله خازنی مربوط به آن است (مثلاً کد ۱ یعنی خازنی با ظرفیت ۱۵۰ کیلووار و کد ۳ یعنی خازنی با ظرفیت ۴۵۰ کیلووار). تعداد خازن‌هایی که باید در شبکه نصب شود از قبل توسط اپراتور تعیین می‌گردد. الگوریتم ژنتیک بهترین باس‌ها را با بهترین مقادیر خازن‌ها برای حداکثر بهینه‌سازی مسئله انتخاب می‌کند. یک نمونه کروموزوم برای حل مسئله جایابی خازن‌ها در شکل (۴-۳) نشان داده شده است:

Bus	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
Code	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۳	۰	۰	۷	۰	۰	۰

شکل (۴-۳): شکل کلی کروموزوم مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک

این شکل ساختار یک کروموزوم فرضی برای شبکه‌ای با ۱۳ باس است که کدهای مربوط به پله‌های خازنی پس از دیکدینگ از باینری به حالت دهدهی در آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم ۱۳ ژن برابر با تعداد باس‌ها داریم. در هر ژن کد خازن مربوطه جهت نصب قرار گرفته است. این شکل نشان می‌دهد در باس ۳ خازن با کد ۱، در باس ۷ خازن با کد ۳ و در باس ۱۰ خازن با کد ۷ باید نصب شود.

پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مسئله خازن‌گذاری در این تحقیق در جدول (۴-۱)

بیان شده است:

جدول (۴-۱): پارامترهای الگوریتم ژنتیک

اندازه جمعیت (N)	۵۰
ضریب جهش ( $P_m$ )	۰/۱
ضریب تقاطع ( $P_c$ )	۰/۵
تعداد تکرار ( $IT_{max}$ )	۲۰۰

در ادامه مراحل جایابی خازن‌ها در شبکه توسط الگوریتم ژنتیک به همراه فلوچارت آن آمده

است.

مرحله ۱. دریافت سطوح بار و مدت‌زمان هر سطح بار

مرحله ۲. دریافت اطلاعات لازم برای محاسبه تابع هزینه از قبیل پارامترهای  $K_A$  و  $K_E$  و  $K_{cjp}$

مرحله ۳. دریافت داده‌های سیستم توزیع برای سطح بار موردنظر از قبیل اطلاعات مربوط به

خطوط، بارها، طیف هارمونیکی بارهای غیرخطی، محدودیت‌های مربوط به حدود بالا و پایین ولتاژ

باس‌ها، واحدهای خازنی موجود، ماکزیمم تعداد خازن مجاز برای نصب در شبکه

مرحله ۴. دریافت پارامترهای الگوریتم ژنتیک شامل تعداد جمعیت اولیه، تعداد ژن‌های هر

کروموزوم، نرخ جهش<sup>۱</sup>، تعداد تکرار الگوریتم

مرحله ۵. تولید تصادفی یک کروموزوم

مرحله ۶. انجام پخش بار در فرکانس اصلی و فرکانس هارمونیکی

مرحله ۷. اضافه شدن کروموزوم موردبررسی به جمعیت اولیه در صورت برآورده کردن قیود

مسئله

مرحله ۸. اگر تعداد جمعیت اولیه با تعداد جمعیت موردنیاز برابر نباشد بازگشت به مرحله ۵

مرحله ۹. محاسبه تابع هزینه معرفی شده توسط رابطه (۴-۱)

<sup>۱</sup>. Mutation Rate

مرحله ۱۰. مرتب نمودن کروموزوم‌ها بر اساس تابع هزینه و حذف نیمی از آن‌ها با بیشترین

مقدار تابع هزینه

مرحله ۱۱. تولید جمعیت جدید توسط عمل تقاطع<sup>۱</sup> بین کروموزوم‌های باقی‌مانده و رساندن

جمعیت به تعداد اولیه

مرحله ۱۲. ایجاد عمل جهش بر اساس نرخ جهش تعریف شده روی جمعیت جدید

مرحله ۱۳. اجرای مجدد پخش بار هارمونیکی

مرحله ۱۴. بازگشت به مرحله ۹ اگر تعداد تکرار الگوریتم از حداکثر تعداد تکرار تعریف شده

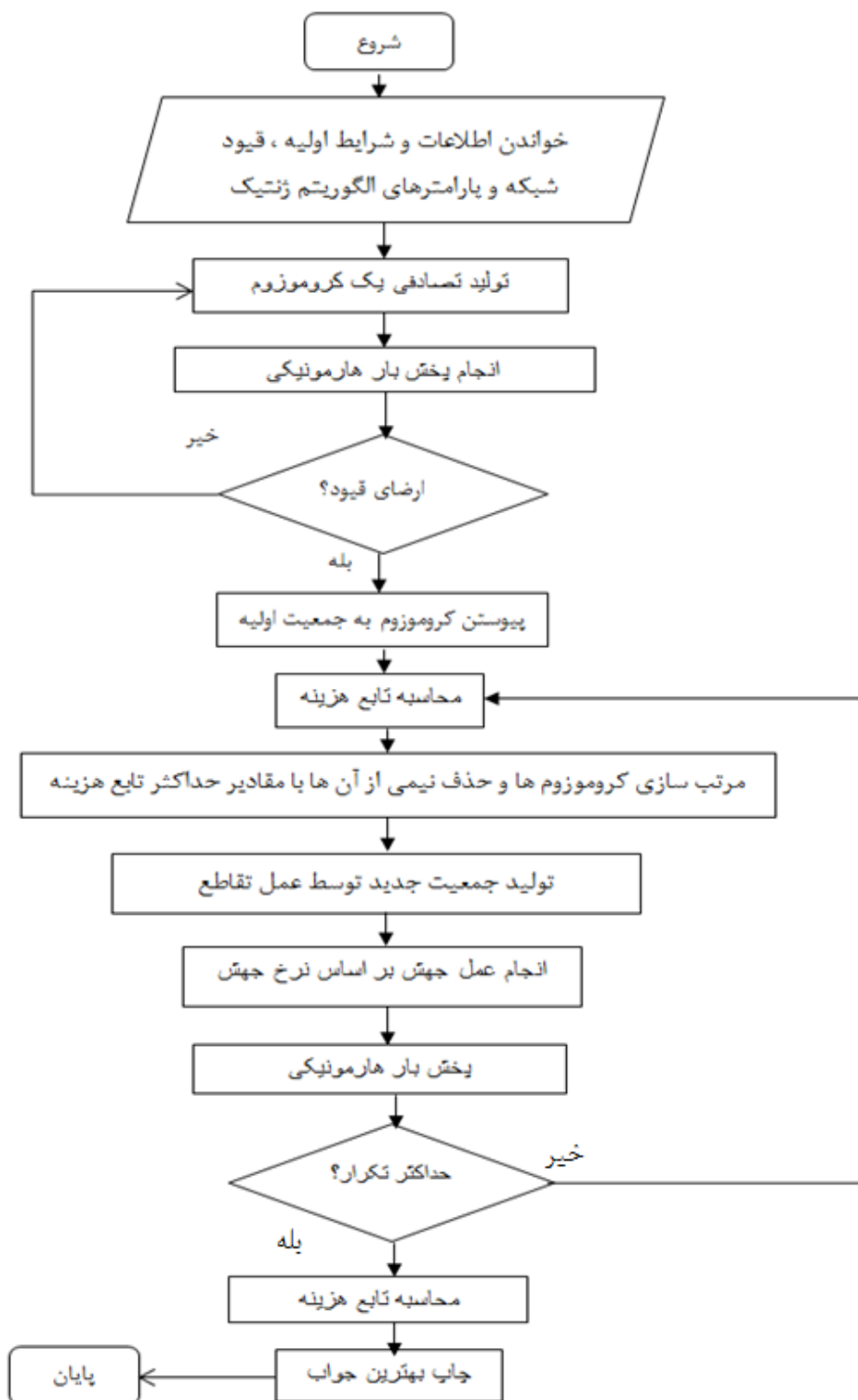
بیشتر نباشد

مرحله ۱۵. محاسبه تابع هزینه و انتخاب بهترین جواب

مرحله ۱۶. چاپ بهترین جواب

---

<sup>۱</sup>. Crossover



شکل (۴-۴): فلوچارت جایابی خازن با الگوریتم ژنتیک

در فصل بعدی از این الگوریتم برای جایابی خازن ها در حضور بارهای غیرخطی استفاده می کنیم.



#### ۴-۵-۲ حل مسئله جایابی خازن‌ها با الگوریتم اجتماع ذرات

در فصل دوم در قسمت ۲-۵-۶ در خصوص الگوریتم اجتماع ذرات به صورت خلاصه مطالبی بیان شد. در این قسمت می‌خواهیم توسط این الگوریتم به جایابی و مقدار یابی خازن‌ها برای حالت‌های مختلف شبکه پردازیم.

مهم‌ترین مرحله در حل مسئله خازن‌گذاری با الگوریتم اجتماع ذرات نحوه تعریف ذره می‌باشد. هر ذره در این الگوریتم بیانگر یک جواب بالقوه می‌باشد به نحوی که الگوریتم یک جمعیت تصادفی از این ذرات را به سمت ذره بهتر هدایت می‌کند. مشابه الگوریتم ژنتیک در اینجا نیز ابعاد ذرات برابر با تعداد باس‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۴-۵) یک ساختار کلی از ذرات در مسئله جایابی خازن‌ها نشان داده شده است:

<b>Bus</b>	۱	۲	۳	.....	n
<b>Code</b>	۰	۴	۱	.....	m

شکل (۴-۵): ساختار کلی ذرات در الگوریتم اجتماع ذرات

چنانچه الگوریتم اجتماع ذرات برای باسی خازن در نظر بگیرد کد خازن به صورت باینری در داخل ذره قرار می‌گیرد که پس از دیکدینگ مقدار پله خازنی مشخص می‌شود. به طور مثال در شکل فرضی بالا پس از اجرای بهینه‌سازی در باس ۲ خازن با پله ۴ (۶۰۰ کیلو وار) و در باس ۳ خازن با پله ۱ (۱۵۰ کیلووار) نصب شده است.

پارامترهای الگوریتم اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی مسئله خازن‌گذاری در این تحقیق در جدول (۴-۲) بیان شده است.

جدول (۴-۲): پارامترهای الگوریتم اجتماع ذرات

اندازه جمعیت (N)	۵۰
ضریب شتاب (C)	۲
حداقل وزن لختی ( $W_{min}$ )	۰/۴
حداکثر وزن لختی ( $W_{max}$ )	۰/۹
تعداد تکرار ( $IT_{max}$ )	۱۰۰

در ادامه مراحل جایابی خازن‌ها در شبکه توسط الگوریتم اجتماع ذرات به همراه فلوجارت آن آمده است.

مرحله ۱. دریافت سطوح بار و مدت‌زمان هر سطح بار

مرحله ۲. اطلاعات لازم برای محاسبه تابع هزینه از قبیل پارامترهای  $K_A$  و  $K_E$  و  $K_{cfp}$  دریافت می‌شود.

مرحله ۳. دریافت داده‌های سیستم توزیع برای سطح بار موردنظر از قبیل اطلاعات مربوط به خطوط، بارها، طیف هارمونیکی بارهای غیرخطی، محدودیت‌های مربوط به حدود بالا و پایین ولتاژ باس‌ها، واحدهای خازنی موجود، ماکزیمم تعداد خازن مجاز برای نصب در شبکه

مرحله ۴. تنظیم ابعاد هر ذره، تولید جمعیت اولیه از ذرات با وضعیت و سرعت تصادفی و تنظیم اندیس تکرار در  $t=0$

مرحله ۵. اجرای پخش بار در فرکانس اصلی و فرکانس هارمونیکی برای کلیه سطوح بار انجام‌شده محاسبه مقادیر تلفات توان ولتاژ باس‌ها

مرحله ۶. محاسبه تابع هدف و بررسی قیود موردنظر

مرحله ۷. مقایسه مقدار تابع برازش با بهترین ذره برای ذراتی که قیود را ارضا کردند. اگر مقدار تابع برازش<sup>۱</sup> کمتر از بهترین برازش ( $P_{best}$ ) بود، تنظیم این مقدار به‌عنوان  $P_{best}$  جاری و ذخیره وضعیت ذره متناظر

مرحله ۸. انتخاب جمعیت متناظر با حداقل برازش مربوط به هر ذره، ( $P_{best}$ ) از بین کل ذرات و ثبت این مقدار  $P_{best}$  به‌عنوان بهترین برازش سراسری یعنی  $G_{best}$  جاری

مرحله ۹. محاسبه سرعت جدید و موقعیت به‌هنگام شده ذرات

مرحله ۱۰. محدود شدن تعداد بانک‌های خازنی به مقدار موردنظر اگر تعداد آن‌ها از مقدار مجاز

فراتر رفت

---

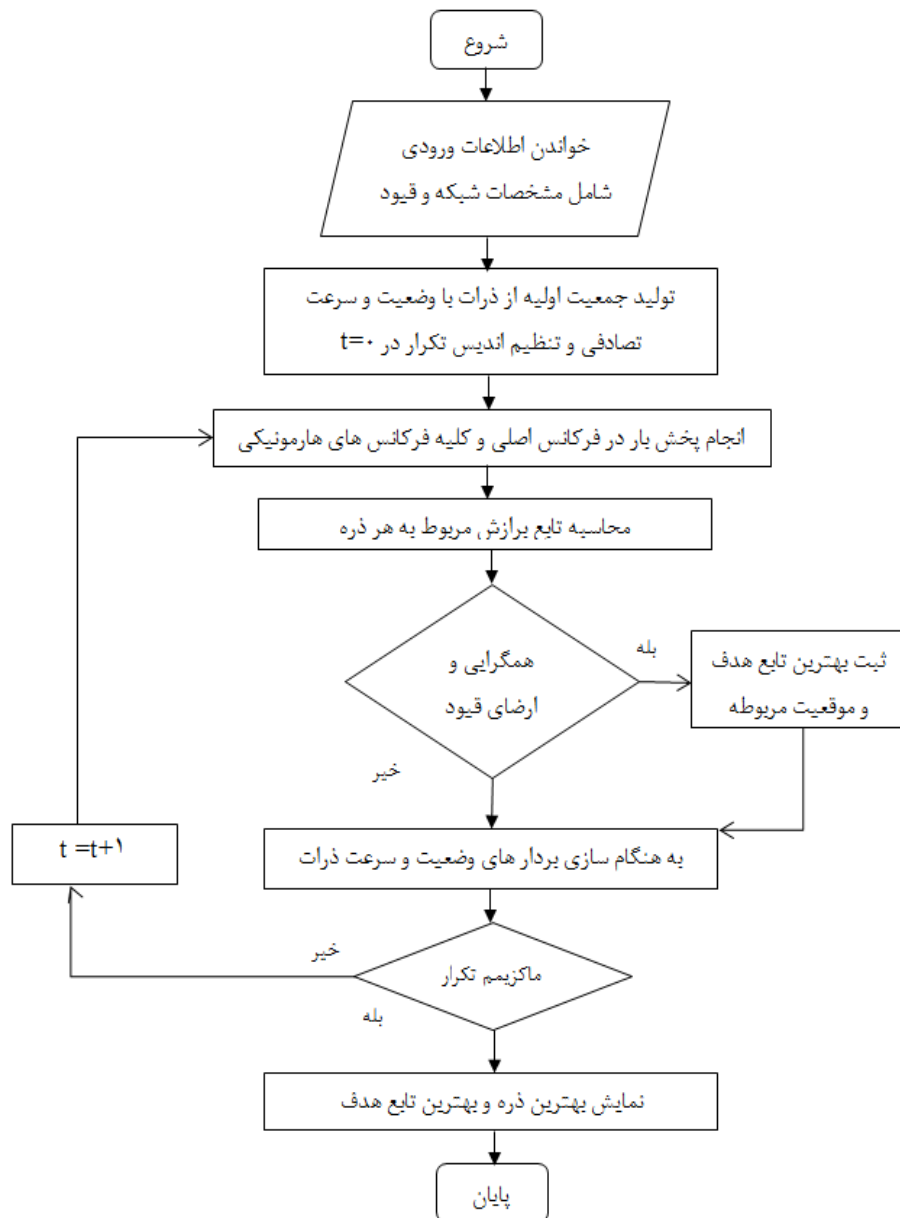
<sup>۱</sup>. Fitting

مرحله ۱۱. اجرای مرحله دوازدهم در صورتی که حداکثر تعداد تکرار انجام شده و در غیر این

صورت افزودن اندیس تکرار ( $t=t+1$ ) و اجرای مرحله چهارم

مرحله ۱۲. نمایش حل بهینه شامل بهترین وضعیت و بهترین مقدار تابع برازش

برای نمایش بهتر روند کار این الگوریتم به صورت فلوچارت شکل (۴-۶) نشان داده شده است:



شکل (۴-۶): فلوچارت جایابی خازن با الگوریتم اجتماع ذرات

تمامی مراحل فوق به همراه تنظیمات اشاره شده، برای محاسبه بهترین پاسخ در شبکه مورد مطالعه اعمال شده و نتایج شبیه‌سازی آن‌ها در فصل بعدی ارائه شده است.

#### ۴-۶ جمع‌بندی

در این فصل به فرمول‌بندی و بیان روابط ریاضی به‌منظور خازن‌گذاری بهینه در سیستم توزیع پرداختیم و با معرفی تابع هدف و قیود مسئله روش اجرای برنامه شبیه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات را توضیح دادیم. همچنین نحوه مدل‌سازی بارهای سیستم توزیع را به‌صورت تابعی از ولتاژ بیان کردیم. در فصل بعد به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌پردازیم.



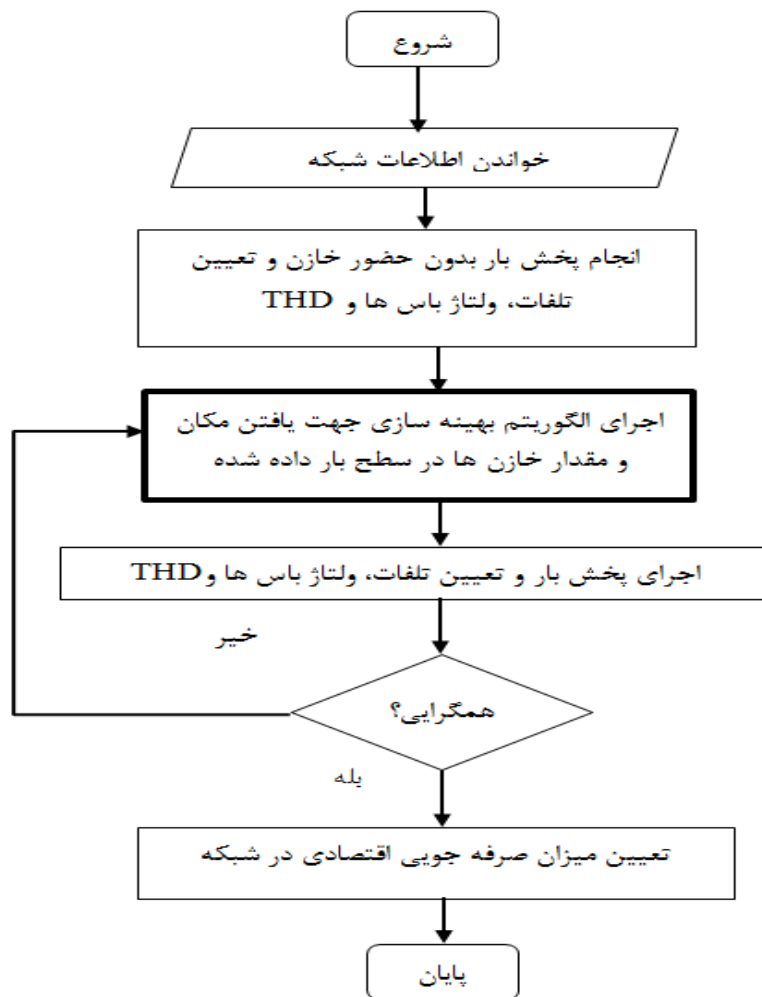
فصل پنجم:

نتایج شبیه‌سازی

## ۵-۱ مقدمه

در بخش‌های قبل مقدمات لازم برای بهینه‌سازی مکان و اندازه خازن‌های شنت در سیستم توزیع توسط دو الگوریتم قدرتمند ژنتیک و اجتماع ذرات تحت شرایط هارمونیک شرح داده شد. همان‌طور که اشاره شد خازن‌گذاری در سیستم توزیع یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با متغیرهای گسسته است. روش‌های هوش مصنوعی همچون الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات اگرچه ممکن است به جواب بهینه سراسری نرسند ولی برای حل مسئله جایابی و مقدار یابی خازن در سیستم‌های بزرگ که دارای شاخه‌های فرعی متعدد هستند، بسیار مناسب هستند. حل تحلیلی این سیستم‌ها بسیار پیچیده و حتی ناممکن است. کلیه فرمول‌بندی‌های خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع در نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از دو الگوریتم شرح داده شده و تابع هدف منتخب در بخش‌های قبلی در سیستم سه فاز متعادل انجام شده است.

در هر قسمت پارامترهای شبیه‌سازی، تابع هدف، قیود مسئله و ضرایب مختلف موردنیاز برای اجرای برنامه بهینه‌سازی ارائه شده است. در ادامه خواهیم دید که الگوریتم‌های مورد استفاده در این پژوهش به‌خوبی قادر به خازن‌گذاری سیستم با توجه به شرایط تعریف شده و قیود حاکم بر مسئله می‌باشند و از دقت و سرعت بالایی برخوردار هستند. درنهایت برای اطمینان از روش پیشنهادی، تست قابلیت انعطاف‌پذیری و همچنین اعتبار سنجی آن، شبکه‌های توزیع مورد مطالعه در مراجع علمی معتبر استخراج شده و خازن‌گذاری بهینه در آن‌ها انجام می‌گیرد. شبکه‌های مورد استفاده در اجرای برنامه شبیه‌سازی این پایان‌نامه به ترتیب ۳۳ باسه و ۶۹ باسه استاندارد IEEE هستند که به دلیل آرایش مختلف و بارهای مختلف این شبکه‌ها باهم، برنامه خازن‌گذاری بهینه را بر روی این دو شبکه اجرا نمودیم. بررسی و مقایسه نتایج حاصله نشان از کارایی و دقت بالای روش موردنظر دارند. فلوچارت اجرای برنامه مطابق شکل (۵-۱) است:



شکل (۱-۵): فلوچارت اجرای برنامه توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی

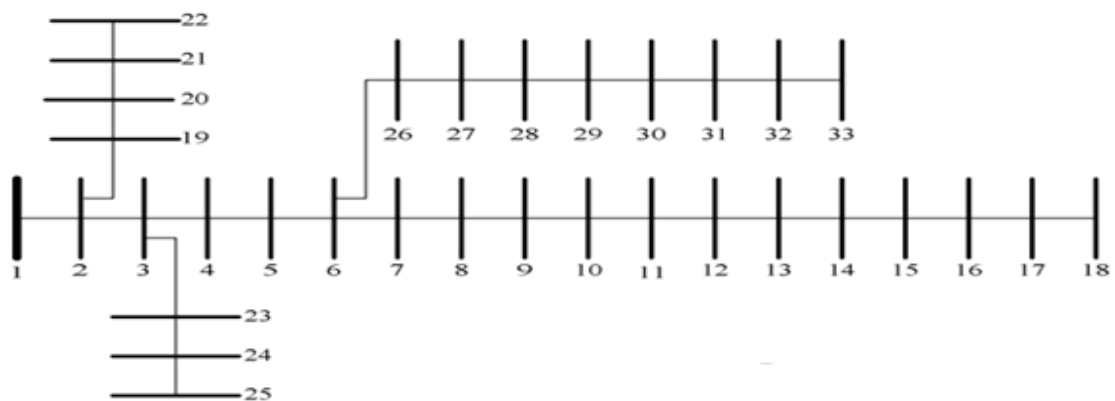
## ۲-۵ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE

شبکه مورد مطالعه یک شبکه ۳۳ باسه استاندارد شعاعی با ولتاژ نامی ۱۲/۶۶ کیلو ولت می‌باشد.

دیاگرام تک‌خطی شبکه مورد نظر مطابق شکل (۲-۵) و داده‌های مربوط به خطوط و همچنین

توان‌های اکتیو و راکتیو باس‌ها به ترتیب در جداول (۱-۵) و (۲-۵) آمده است:





شکل (۲-۵): دیاگرام تک خطی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE [۵۵]

جدول (۱-۵): پارامترهای خطوط شبکه ۳۳ باسه نمونه [۵۵]

From Bus	To Bus	R(pu)	X(pu)	From Bus	To Bus	R(pu)	X(pu)	From Bus	To Bus	R(pu)	X(pu)
۱	۲	۰/۰۹۲۲	۰/۰۴۷	۱۲	۱۳	۱/۴۶۸	۱/۱۵۵	۲۳	۲۴	۰/۱۹۸	۰/۷۰۹۱
۲	۳	۰/۴۹۳	۰/۲۵۱۱	۱۳	۱۴	۰/۵۴۱۶	۰/۷۱۲۹	۲۴	۲۵	۰/۱۹۶	۰/۷۰۱۱
۳	۴	۰/۳۶۶	۰/۱۸۶۴	۱۴	۱۵	۰/۵۹۱	۰/۵۲۶	۶	۲۶	۰/۲۰۳	۰/۱۰۳۴
۴	۵	۰/۳۸۱۱	۰/۱۹۴۱	۱۵	۱۶	۰/۷۴۶۳	۰/۵۴۵	۲۶	۲۷	۰/۲۸۴۲	۰/۱۴۴۷
۵	۶	۰/۸۱۹	۰/۷۰۷	۱۶	۱۷	۱/۲۸۹	۱/۷۲۱	۲۷	۲۸	۱/۰۵۹	۰/۹۳۷۷
۶	۷	۰/۱۸۷۲	۰/۶۱۸۸	۱۷	۱۸	۰/۷۳۲	۰/۵۷۴	۲۸	۲۹	۰/۸۰۴۲	۰/۷۰۰۶
۷	۸	۰/۷۱۱۴	۰/۲۳۵۱	۲	۱۹	۰/۱۶۴	۰/۱۵۶۵	۲۹	۳۰	۰/۵۰۷۵	۰/۲۵۸۵
۸	۹	۱/۰۳	۰/۷۴	۱۹	۲۰	۱/۵۰۴۲	۱/۳۵۵۴	۳۰	۳۱	۰/۹۷۴۴	۰/۹۶۳
۹	۱۰	۱/۰۴۴	۰/۷۴	۲۰	۲۱	۰/۴۰۹۵	۰/۴۷۸۴	۳۱	۳۲	۰/۳۱۰۵	۰/۳۶۱۹
۱۰	۱۱	۰/۱۹۶۶	۰/۰۶۵	۲۱	۲۲	۰/۷۰۸۹	۰/۹۳۷۳	۳۲	۳۳	۰/۳۴۱۵	۰/۵۳۰۲
۱۱	۱۲	۰/۳۷۴۴	۰/۱۲۳۸	۳	۲۳	۰/۴۵۱۲	۰/۳۰۸۳	-	-	-	-

جدول (۲-۵): پارامترهای بار شبکه ۳۳ باسه نمونه [۵۵]

Bus	P(KW)	Q(Kvar)	Bus	P(KW)	Q(Kvar)	Bus	P(KW)	Q(Kvar)
۱	۰	۰	۱۲	۶۰	۳۵	۲۳	۹۰	۵۰
۲	۱۰۰	۶۰	۱۳	۶۰	۳۵	۲۴	۴۲۰	۲۰۰
۳	۹۰	۴۰	۱۴	۱۲۰	۸۰	۲۵	۴۲۰	۲۰۰
۴	۱۲۰	۸۰	۱۵	۶۰	۱۰	۲۶	۶۰	۲۵
۵	۶۰	۳۰	۱۶	۶۰	۲۰	۲۷	۶۰	۲۵
۶	۶۰	۲۰	۱۷	۶۰	۲۰	۲۸	۶۰	۲۰
۷	۲۰۰	۱۰۰	۱۸	۹۰	۴۰	۲۹	۱۲۰	۷۰
۸	۲۰۰	۱۰۰	۱۹	۹۰	۴۰	۳۰	۲۰۰	۶۰۰
۹	۶۰	۲۰	۲۰	۹۰	۴۰	۳۱	۱۵۰	۷۰
۱۰	۶۰	۲۰	۲۱	۹۰	۴۰	۳۲	۲۱۰	۱۰۰
۱۱	۴۵	۳۰	۲۲	۹۰	۴۰	۳۳	۶۰	۴۰

شبیه‌سازی در سه سطح مختلف بار یعنی بار سبک، بار پایه و پرباری و با مدت‌زمان‌های معلوم در طول یک سال (۸۷۶۰ ساعت) مطابق جدول (۳-۵) انجام می‌شود. ضمناً فرض می‌شود توان اکتیو و راکتیو هر دو با الگوی یکسانی تغییر می‌کنند.

جدول (۳-۵): سطوح مختلف بار در نظر گرفته شده

سطح بار (%)	۵۰	۸۰	۱۰۰
زمان (ساعت)	۱۰۰۰	۶۷۶۰	۱۰۰۰

هدف از خازن‌گذاری بهینه، کاهش تلفات توان و انرژی با صرف کمترین هزینه برای خازن‌گذاری، ضمن حفظ ولتاژ باس‌ها در محدوده موردنظر و همچنین رعایت محدودیت‌های مرتبط با حداکثر اعوجاجات هارمونیکی شبکه طبق استاندارد IEEE-۵۱۹ می‌باشد [۵۸].

هزینه سالانه خازن‌های شبکه در جدول (۴-۵) و خلاصه پارامترهای استفاده شده در جدول (۵-۵)

آمده است:

جدول (۴-۵): هزینه سالانه خازن‌های شبکه [۵۷]

Capacitor step	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
Capacitor size(kvar)	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۶۰۰	۷۵۰	۹۰۰	۱۰۵۰	۱۲۰۰
Capacitor cost(\$/kvar)	۰/۵	۰/۳۵	۰/۲۵۳	۰/۲۲	۰/۲۷۶	۰/۱۸۳	۰/۲۲۸	۰/۱۷
Capacitor step	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
Capacitor size(kvar)	۱۳۵۰	۱۵۰۰	۱۶۵۰	۱۸۰۰	۱۹۵۰	۲۱۰۰	۲۲۵۰	۲۴۰۰
Capacitor cost(\$/kvar)	۰/۲۰۷	۰/۲۰۱	۰/۱۹۳	۰/۱۸۷	۰/۲۱۱	۰/۱۷۶	۰/۱۹۷	۰/۱۷
Capacitor step	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
Capacitor size(kvar)	۲۵۵۰	۲۷۰۰	۲۸۵۰	۳۰۰۰	۳۱۵۰	۳۳۰۰	۳۴۵۰	۳۶۰۰
Capacitor cost(\$/kvar)	۰/۱۸۹	۰/۱۸۷	۰/۱۸۳	۰/۱۸	۰/۱۹۵	۰/۱۷۴	۰/۱۸۸	۰/۱۷

جدول (۵-۵): خلاصه پارامترهای استفاده‌شده [۵۷]

۱۰	توان نامی شبکه (MVA)	حدود متغیرها
۱۲/۶۶	ولتاژ نامی شبکه (KV)	
۱/۱	حداکثر ولتاژ هر باس (pu)	
۰/۹	حداقل ولتاژ هر باس (pu)	
۵٪	حداکثر اعوجاج هارمونیک هر باس	
۵	تعداد خازن‌های مجاز مورد استفاده	
۵۰	هزینه تلفات انرژی (\$/MWh)	هزینه‌ها
۱۲۰۰۰۰	هزینه تلفات توان (\$/MW)	

ابتدا جایابی خازن‌ها را با در نظر گرفتن بارهای خطی و سپس با در نظر گرفتن بارهای غیرخطی انجام می‌دهیم.

### ۵-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE با بارهای خطی

مکان‌یابی و مقدار یابی خازن‌های بهینه توسط دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات با در نظر گرفتن بارهای خطی در جدول (۵-۶) آمده است. لازم به ذکر است نتایج در حالت بارهای خطی فقط برای یک سطح بار (کم باری) انجام شده است اما می‌توان مشابه آن را برای دو سطح بار دیگر نیز انجام داد.

جدول (۵-۶): مکان و مقدار خازن‌های بهینه شبکه ۳۳ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪

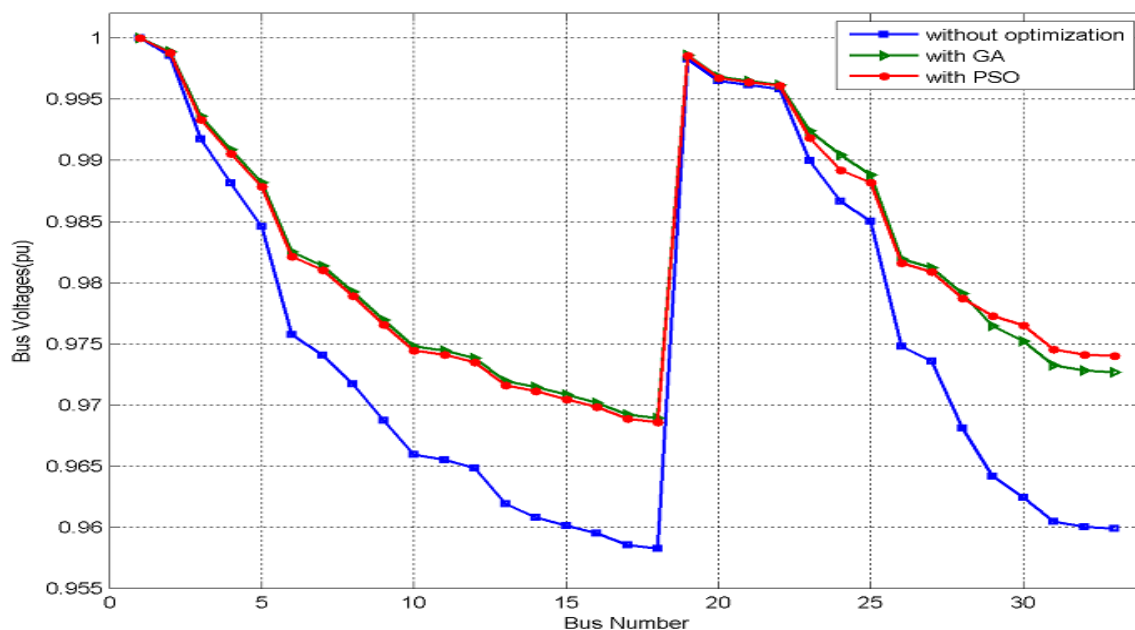
GA	شماره باس	۲۴	۲۸	۲	۴	۳۰
	مقدار خازن	۳۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۵۰	۳۰۰
PSO	شماره باس	۳۰	۲۵	۱	۱۴	۱
	مقدار خازن	۶۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰

مقایسه نتایج حاصل از اجرای برنامه در جدول (۵-۷) به طور کامل آمده است.

جدول (۵-۷): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۱۲۰۰	۱۲۰۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۵۸۳	۰/۹۶۹	۰/۹۹۸۸
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۸۹	۰/۹۶۸۶
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۰	۰	۰
کل تلفات شبکه (Kw)	۴۷/۰۷۱۲	۳۲/۲۳۲۱	۳۲/۳۹۷۲
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۱۲۵۲۱	۸۵۷۴/۲	۵۵۰۸
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۳۹۴۶/۸	۷۰۱۳

مقدار کل راکتیو خازنی پس از بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک ۱۲۰۰ کیلووار و با الگوریتم اجتماع ذرات نیز ۱۲۰۰ کیلووار به دست آمده است ولی آرایش قرارگیری خازن‌ها در باس‌های کاندید و همچنین مقادیر پله‌های خازنی با یکدیگر متفاوت است. نتایج استفاده از هر دو الگوریتم نشان می‌دهد که پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه پس از نصب خازن به دلیل تزریق توان راکتیو مسطح‌تر شده است چراکه توان راکتیو مصرفی مورد نیاز بارها به جای تأمین از طریق ژنراتور به صورت محلی و توسط خازن‌ها تأمین می‌گردد. شارش کمتر توان راکتیو در خطوط شبکه و به دنبال آن کاهش تلفات پس از نصب خازن نیز به خوبی در جدول مشخص می‌باشد. با اجرای خازن‌گذاری توسط الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات به ترتیب ۳۹۴۶/۸ و ۷۰۱۳ دلار صرفه‌جویی اقتصادی حاصل خواهد شد. در ادامه نمودار مربوط به پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه قبل و بعد از اجرای خازن‌گذاری آمده است:



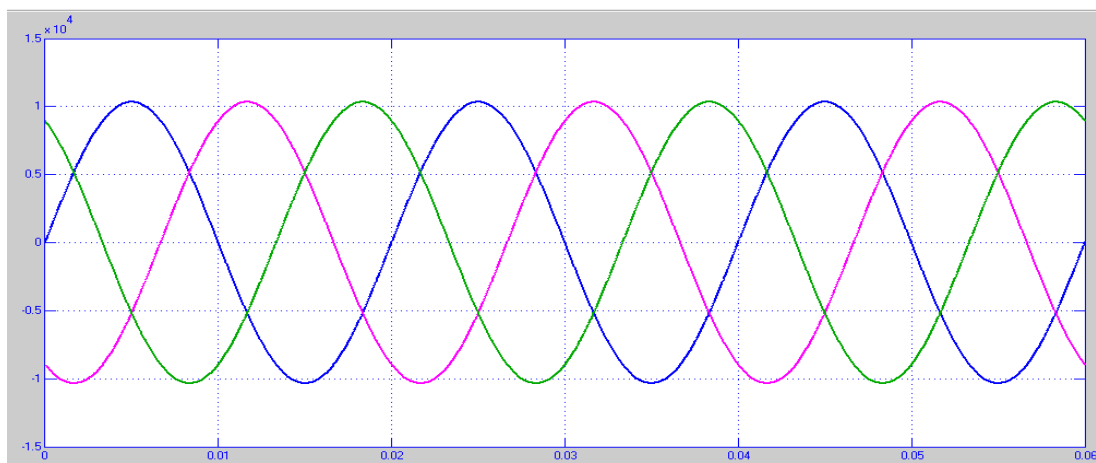
شکل (۳-۵): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪

بهبود پروفیل ولتاژ باس‌ها بعد از خازن‌گذاری با هر دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات در شکل به‌خوبی مشخص است. در حقیقت نصب خازن در شبکه موجب کاهش افت ولتاژ کلیه باس‌ها به دلیل آزادسازی ظرفیت خطوط می‌شود. یعنی توان راکتیو به‌جای تأمین از نیروگاه دور دست به‌صورت محلی توسط خازن تأمین گردیده و جریان کمتری در خطوط جاری می‌شود که خود این امر باعث کاهش تلفات و کاهش افت ولتاژ می‌گردد.

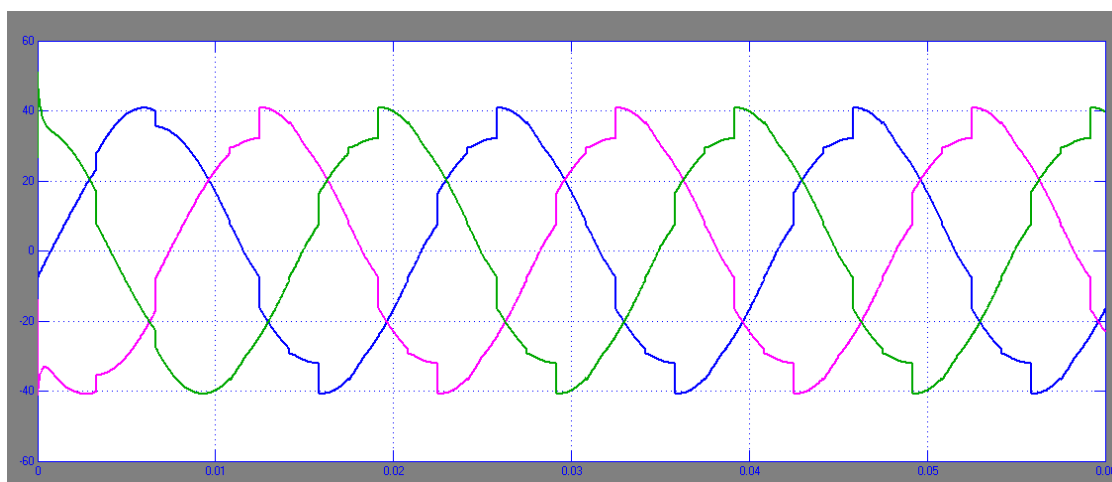
### ۵-۲-۲ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه استاندارد IEEE با بارهای غیرخطی

بار غیرخطی هارمونیک را در این مسئله کانورتر ۱۲ پالس سه فاز با فرکانس کاری ۵۰ هرتز در نظر گرفته و شبیه‌سازی آن در محیط سیمولینک MATLAB انجام شده است. محل‌های قرارگیری بار غیرخطی در باس‌های ۵ و ۱۵ و ۲۱ و ۲۹ در نظر گرفته شده است. همچنین در شبیه‌سازی تعداد خازن‌های مجاز مورد استفاده ۵ عدد فرض شده است.

ولتاژهای سه فاز کانورتر همان‌طور که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌کنید کاملاً سینوسی و فاقد هارمونیک است اما شکل موج جریان‌های سه فاز مطابق شکل (۵-۵) دارای اعوجاج می‌باشد. در واقع کانورتر تزریق کننده جریان‌های هارمونیک به شبکه و ایجاد اعوجاج در باس‌ها می‌باشد.

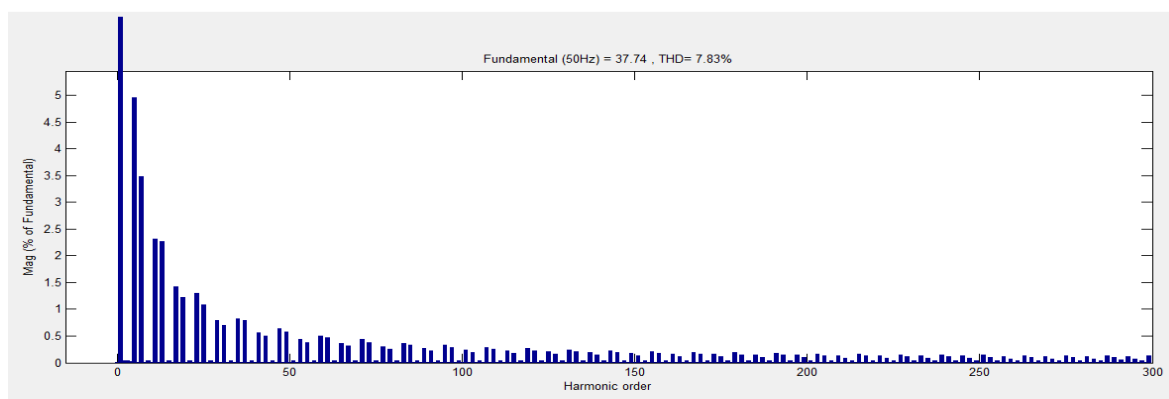


شکل (۴-۵): شکل موج ولتاژهای سه فاز کانورتر ۱۲ پالس



شکل (۵-۵): شکل موج جریانهای سه فاز کانورتر ۱۲ پالس

طیف هارمونیکی کانورتر در فرکانس ۵۰ هرتز در شکل (۶-۵) نشان داده شده است:



شکل (۶-۵): طیف هارمونیکی کانورتر ۱۲ پالس در فرکانس ۵۰ هرتز

هارمونیک‌های قابل توجه در کانورت‌تر ۱۲ پالسه که در فرآیند حل مسئله در نظر گرفته شده‌اند در

جدول (۵-۶) آمده است:

جدول (۵-۸): مشخصات هارمونیک‌های تولیدی توسط کانورت‌تر ۱۲ پالسه

مرتبۀ هارمونیکی	دامنه	زاویه (رادیان)	زاویه (درجه)	مرتبۀ هارمونیکی	دامنه	زاویه (رادیان)	زاویه (درجه)
۱	۳۷/۷۶۹۸۶	-۰/۴۶۳۴۷	-۲۶/۵۵۴۹	۶۱	۰/۱۷۲۳۵۵	۱/۹۳۱۱۴۲	۱۱۰/۶۴۶۳
۵	۱/۸۴۴۸۰۷	۳/۰۲۹۴۱۴	۱۷۳/۵۷۲۷	۷۱	۰/۱۷۶۳۹۵	۱/۵۰۳۹۹	۸۶/۱۷۲۲۹
۷	۱/۲۷۵۵۶۷	۰/۰۶۰۳۲۵	۳/۴۵۶۳۵۸	۷۳	۰/۱۶۴۹۱	-۱/۰۷۳۷۵	-۶۱/۵۲۱۶
۱۱	۰/۸۶۲۵۸۳	-۱/۷۸۱۶	-۱۰۲/۰۷۸	۸۳	۰/۱۳۶۷۴۹	-۱/۷۱۱۰۱	-۹۸/۰۳۳۹
۱۳	۰/۸۵۹۳۱۲	۱/۸۷۴۰۴۹	۱۰۷/۳۷۵۱	۸۵	۰/۱۳۱۹۳۱	۱/۹۴۶۵۴۳	۱۱۱/۵۲۸۷
۱۷	۰/۵۴۸۴۰۲	-۰/۲۳۹۹۵	-۱۳/۷۴۸	۹۵	۰/۱۳۳۰۹۶	۱/۵۸۵۱۲۹	۹۰/۸۲۱۱۸
۱۹	۰/۵۰۸۴	-۲/۷۲۱۲۵	-۱۵۵/۹۱۶	۹۷	۰/۱۲۷۲۴۵	-۰/۹۹۴۹۱	-۵۷/۰۰۴۱
۲۹	۰/۲۸۳۷۹	-۳/۱۰۵۴	-۱۷۷/۹۲۶	۱۰۷	۰/۱۱۲۹۸۸	-۱/۶۱۰۳۴	-۹۲/۲۶۵۵
۳۱	۰/۲۵۵۹۷۴	۰/۴۸۷۶۹۹	۲۷/۹۴۳۰۸	۱۰۹	۰/۱۰۹۰۶۳	۲/۰۳۶۲۱۹	۱۱۶/۶۶۶۸
۳۵	۰/۲۹۳۹۳۹	-۱/۷۰۹۷۱	-۹۷/۹۵۹۴	۱۱۹	۰/۰۹۸۰۲۸	۱/۵۸۶۵۳۹	۹۰/۹۰۲
۳۷	۰/۲۹۳۸۹۸	۱/۹۴۱۲۲۱	۱۱۱/۲۲۳۸	۱۲۱	۰/۰۹۷۰۵۷	-۰/۹۸۶۱۷	-۵۶/۵۰۳۵
۴۷	۰/۲۵۶۱۷۳	۱/۴۶۶۸۷۴	۸۴/۰۴۵۶۹	۱۳۱	۰/۰۹۶۴۵۲	-۱/۵۶۲۴۱	-۸۹/۵۱۹۶
۴۹	۰/۲۳۲۷۱۴	-۱/۱۲۰۹۵	-۶۴/۲۲۵۷	۱۳۳	۰/۰۹۴۹۶۴	۲/۱۰۴۰۷۲	۱۲/۵۵۴۴
۵۹	۰/۱۷۴۱۳۱	-۱/۷۲۸۲۹	-۹۹/۰۲۴	۱۴۳	۰/۰۸۶۴۸۱	۱/۴۹۱۵۸۳	۸۵/۴۶۱۴۱

در این حالت به منظور حداقل کردن تلفات شبکه، با در نظر گرفتن قیود پخش بار، قیود مربوط به حداکثر و حداقل ولتاژ باس‌ها، قیود مربوط به حداکثر اعوجاج هارمونیکی و قیود مربوط به خازن‌ها، انجام برنامه در سه سطح بار مختلف انجام شده است. شبیه‌سازی این برنامه با دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات انجام و نتایج آن‌ها باهم مقایسه شده است.

در ادامه برنامه شبیه‌سازی برای شبکه ۳۳ باسه با بار غیرخطی را اجرا می‌کنیم. پس از اجرای برنامه مکان و مقدار خازن‌های بهینه به منظور دستیابی به بهترین مقدار تابع هدف توسط دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات در جداول زیر آمده است:

جدول (۹-۵): مکان و مقدار خازن‌های بهینه شبکه ۳۳ با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

الف: بارگذاری سبک ( ۵۰٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۱۵	۲۵	۵	۲۱	۲۹
	مقدار خازن	۴۵۰	۱۵۰	۷۵۰	۶۰۰	۷۵۰
PSO	شماره باس	۱	۵	۱۵	۲۱	۲۹
	مقدار خازن	۱۵۰	۱۵۰	۶۰۰	۱۵۰	۹۰۰

ب: بارگذاری متوسط ( ۸۰٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۲۱	۱۱	۷	۱۵	۲۹
	مقدار خازن	۶۰۰	۱۲۰۰	۱۰۵۰	۱۵۰	۴۵۰
PSO	شماره باس	۱	۵	۲۹	۲۱	۱۵
	مقدار خازن	۳۶۰۰	۴۵۰	۱۲۰۰	۶۰۰	۱۰۵۰

ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۱۰	۱۷	۲۰	۵	۲۹
	مقدار خازن	۱۲۰۰	۶۰۰	۴۵۰	۲۷۰۰	۱۲۰۰
PSO	شماره باس	۱	۱۵	۲۱	۵	۲۹
	مقدار خازن	۱۵۰	۱۸۰۰	۶۰۰	۱۰۵۰	۱۲۰۰

مشاهده می‌کنیم که در سطوح بارگذاری مختلف مکان و مقدار خازن‌های جایابی شده متفاوت

می‌باشد.

در جدول (۵-۱۰) مقایسه نتایج حاصل از اجرای برنامه توسط دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات

در سطوح مختلف بارگذاری آورده شده است:



جدول (۵-۱۰): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری

متوسط، ج: بارگذاری سنگین

الف: بارگذاری سبک (۵۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۲۷۰۰	۱۹۵۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۰۵۱	۰/۹۰۸۷	۰/۹۱۱۸
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۶۴	۰/۹۹۷۱	۰/۹۹۶۹
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۲۱/۹۵۲۱	۲/۶۳۰۵	۲/۲۸۴۳
کل تلفات شبکه (Kw)	۱۰۴۵/۷	۲۴۴/۴۷۹۶	۲۵۲/۱۹۵۶
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۱۷۷۷۶۰	۴۱۵۶۲	۴۲۸۷۴
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۱۳۶۱۹۸	۱۳۴۸۸۶

ب: بارگذاری متوسط (۸۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۳۴۵۰	۶۹۰۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۸۷۹۲	۰/۹۰۱۶	۰/۹۰۰۴
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۶۳	۰/۹۹۶۳
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۲۲/۶۳۳۰	۱/۷۱۳۷	۱/۳۸۷۲
کل تلفات شبکه (Kw)	۱۲۰۷/۱	۴۱۹/۶۶۴۶	۳۸۴/۳۹۷۴
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۵۵۲۸۶۰	۱۹۲۲۱۰	۱۷۶۰۶۰
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۳۶۰۶۵۰	۳۷۶۸۰۰

ج: بارگذاری سنگین (۱۰۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۶۱۵۰	۴۸۰۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۸۶۱۱	۰/۹۰۰۵	۰/۹۰۰۱
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۵۸
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۲۳/۱۳۲۴	۲/۶۵۶۹	۱/۰۳۹۲
کل تلفات شبکه (Kw)	۱۳۴۱/۴	۶۲۸/۳۹۶۹	۵۷۹/۳۴۳۳
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۲۲۸۰۴۰	۱۰۶۸۳۰	۹۸۴۸۹
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۱۲۱۲۱۰	۱۲۹۵۵۱

با بررسی جداول درمی‌یابیم به‌جز بارگذاری متوسط، الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم اجتماع

ذرات به کیلووار خازنی بیشتری برای بهینه‌سازی تابع هدف نیاز دارد. هرچه قدر سطح بارگذاری بالاتر

می‌رود، میزان افت ولتاژ باس‌ها، میزان تلفات شبکه و همچنین میزان اعوجاج هارمونیک باس‌ها

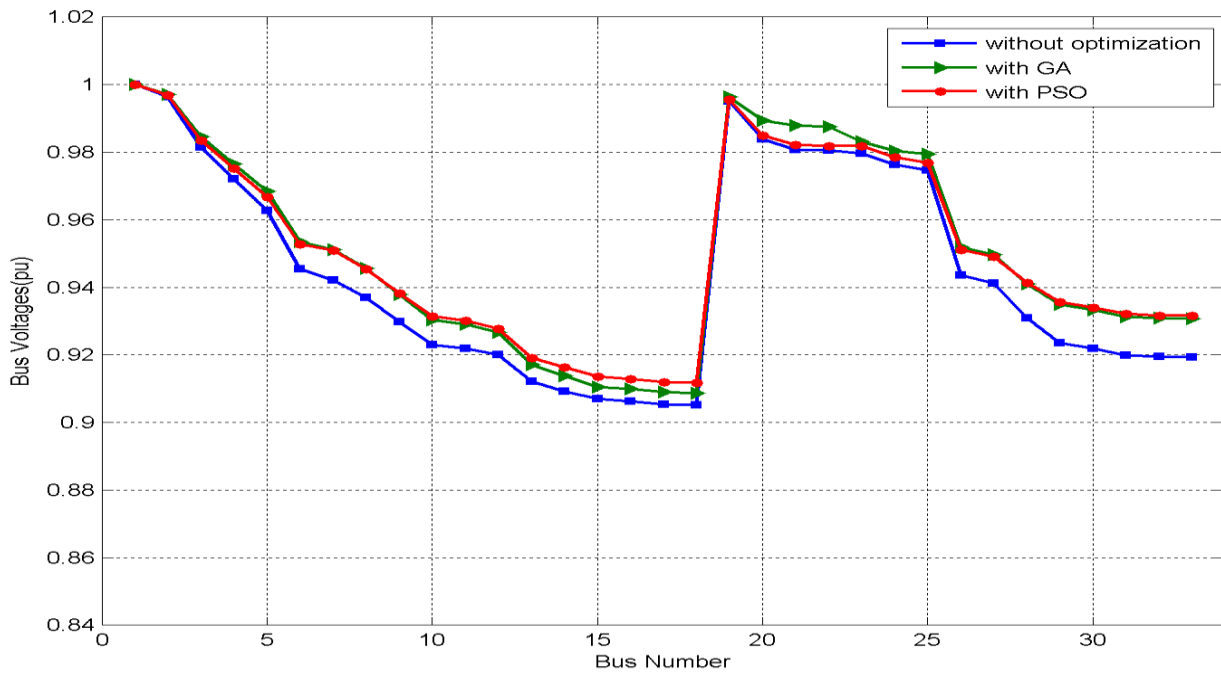
افزایش می‌یابد، چراکه شبکه در بار کامل قرار دارد و تقاضای توان زیادی را پاسخ می‌دهد. تأثیر مثبت و چشمگیر اجرای خازن‌گذاری در این شبکه کاهش مطلوب اعوجاج هارمونیک می‌باشد. به‌نحوی که با آرایش ذکرشده در مورد کانورتر ۱۲ پالسه شبکه به‌شدت هارمونیک شده بود و حداکثر اعوجاج هارمونیک ۲۳/۱۳۲۴ درصد را در باس ۱۸، در بارگذاری سنگین داشتیم که این مقدار پس از اجرای خازن‌گذاری به ۲/۶۵۶۹ درصد کاهش یافته است. مشاهده می‌کنیم که الگوریتم اجتماع ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک توانایی بالاتری در کاهش اعوجاج هارمونیک باس‌ها دارد.

همچنین پس از خازن‌گذاری کاهش قابل‌توجهی در تلفات کل شبکه رخ داده است به‌گونه‌ای که بیشترین تلفات قبل از نصب خازن در بار سنگین برابر ۱۳۴۱/۴ کیلووات است. این مقدار پس از خازن‌گذاری با الگوریتم ژنتیک به ۶۲۸/۳۹۶۹ کیلووات و با الگوریتم اجتماع ذرات به ۵۷۹/۳۴۳۳ کاهش یافته است. به‌جز بار سبک پس از خازن‌گذاری با الگوریتم اجتماع ذرات تلفات شبکه نسبت به خازن‌گذاری با الگوریتم ژنتیک کاهش بیشتری خواهد داشت.

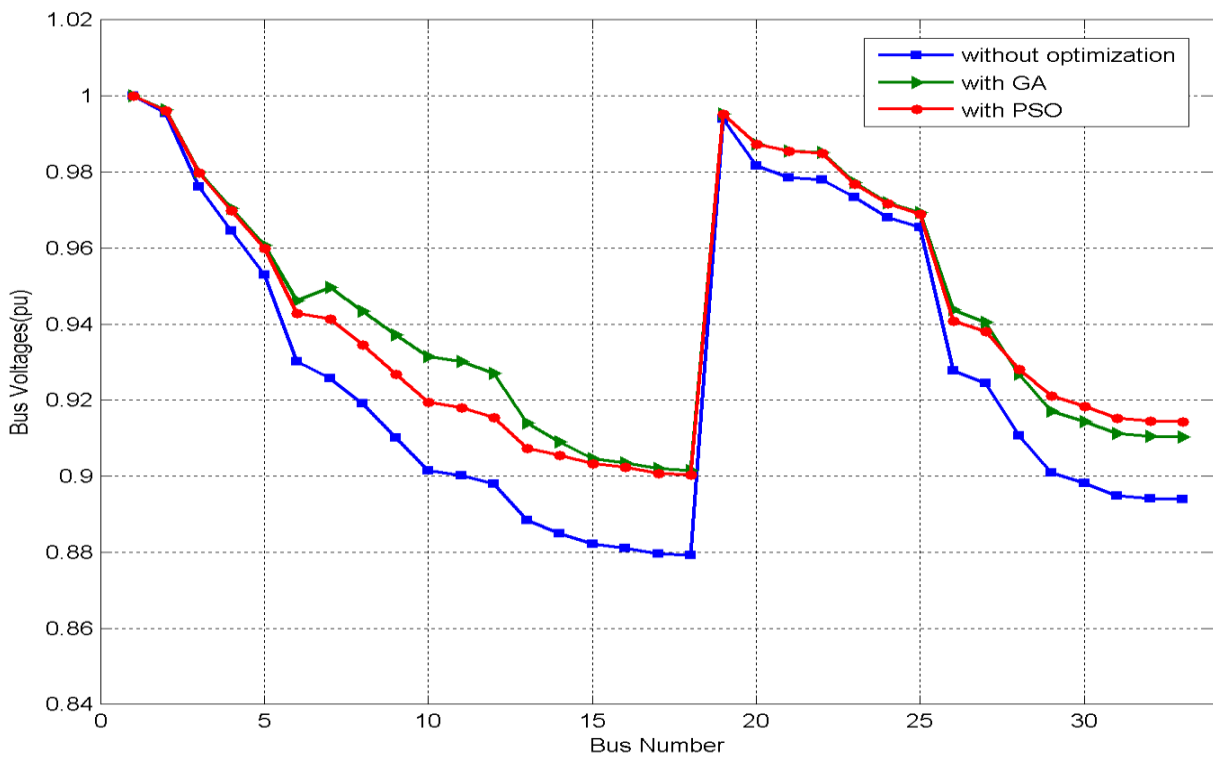
بیشترین سود حاصل از خازن‌گذاری ۳۷۶۸۰۰ دلار در اجرای برنامه با الگوریتم اجتماع ذرات برای بارگذاری متوسط است. نتیجه می‌گیریم چنانچه خازن‌ها در شبکه به‌طور مناسب جایابی و مقدار یابی شوند صرفه‌جویی اقتصادی بسیار مناسبی برای بهره‌بردار شبکه به همراه دارند.

در ادامه نمودار مربوط به پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه قبل و بعد از اجرای خازن‌گذاری آمده

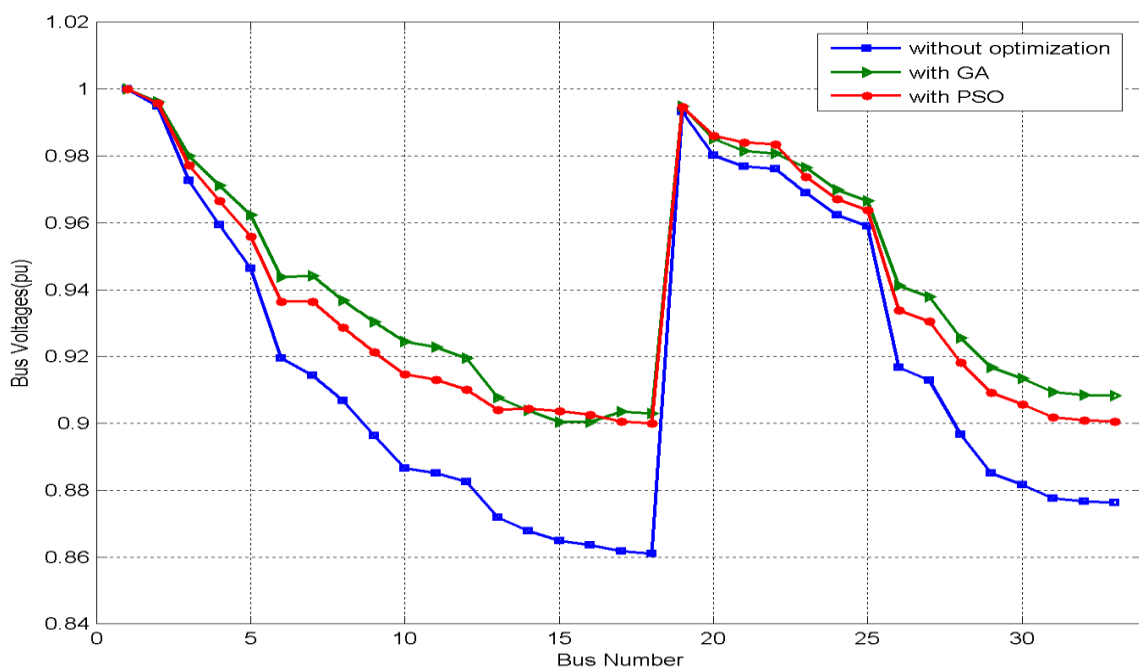
است:



الف: بارگذاری سبک ( ۵۰٪ بار نامی)



ب: بارگذاری متوسط ( ۸۰٪ بار نامی)



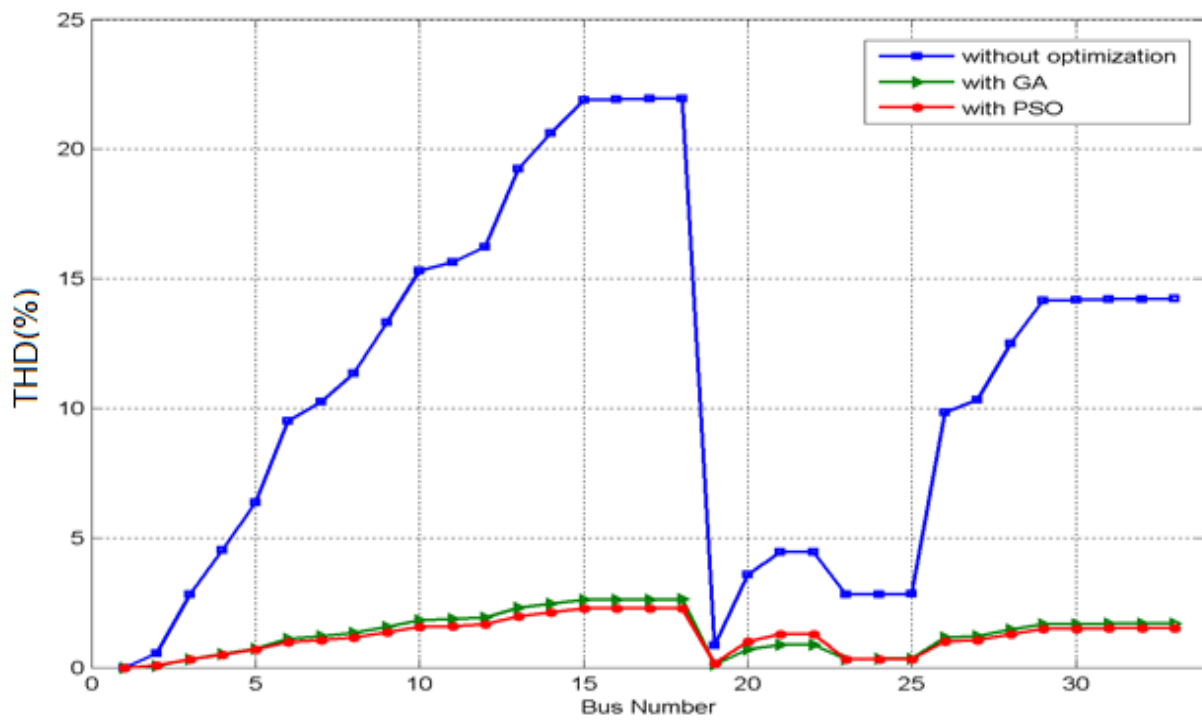
ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

شکل (۷-۵): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۳۳ باس با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط،

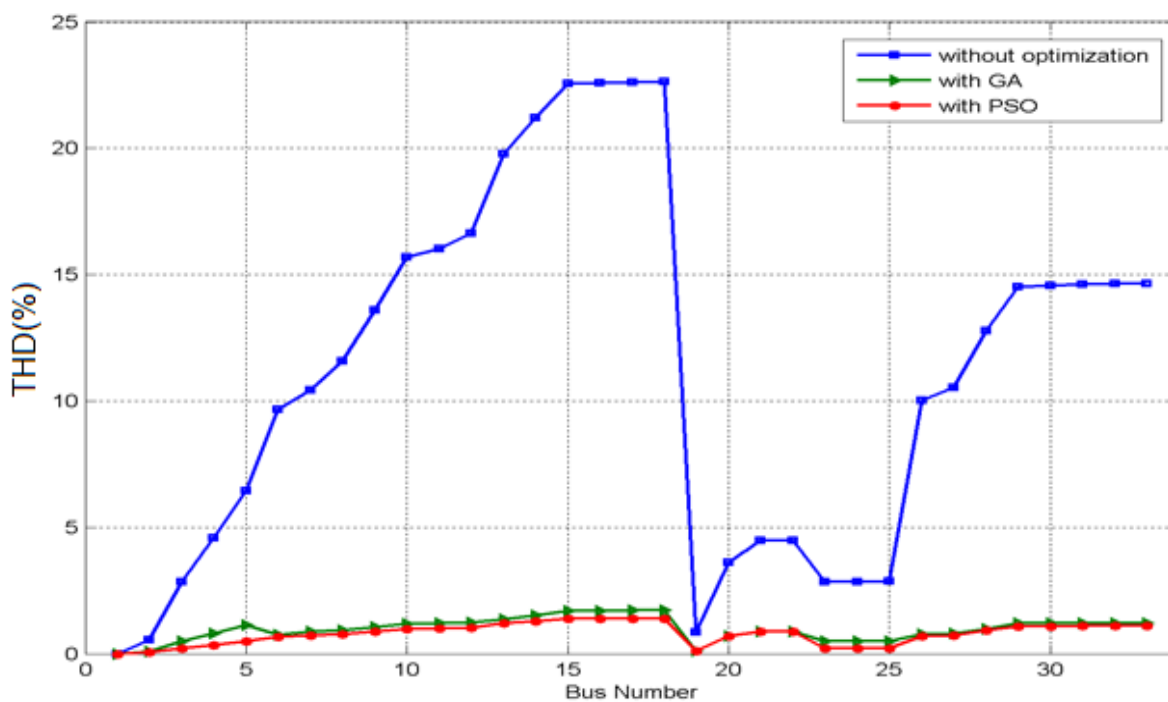
ج: بارگذاری سنگین

همان‌طور که در شکل (۷-۵) مشاهده می‌کنیم پروفیل ولتاژ باس‌ها از باس اسلک به بعد رو به کاهش می‌گذارد و این مقدار در باس ۱۸ که دورترین باس از ژنراتور است به بیشترین حد خود می‌رسد. علت این امر را می‌توان در افزایش فاصله از تولید و اتلاف انرژی در این فاصله بیان کرد به نحوی که دورترین ناحیه دارای کمترین حد ولتاژ است. این مقدار در باس ۱۹ به دلیل آرایش شبکه و نزدیکی به تولید مجدداً افزایش داشته است. در بارگذاری سبک و متوسط، ولتاژ هیچ باسی حتی قبل از اجرای بهینه‌سازی و خازن‌گذاری از قیود در نظر گرفته کمتر نشده که این مربوط به سطح تقاضای کم بار می‌باشد. اما در بارگذاری سنگین ولتاژ تعدادی از باس‌ها به دلیل تلفات بالا و تقاضای زیاد شبکه از محدوده مجاز ۰/۹ پایین‌تر رفته‌اند. بعد از اجرای بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ کلیه باس‌ها ضمن رعایت قیود مربوطه بهبود پیدا کرده و در محدوده مجاز قرار گرفته است.

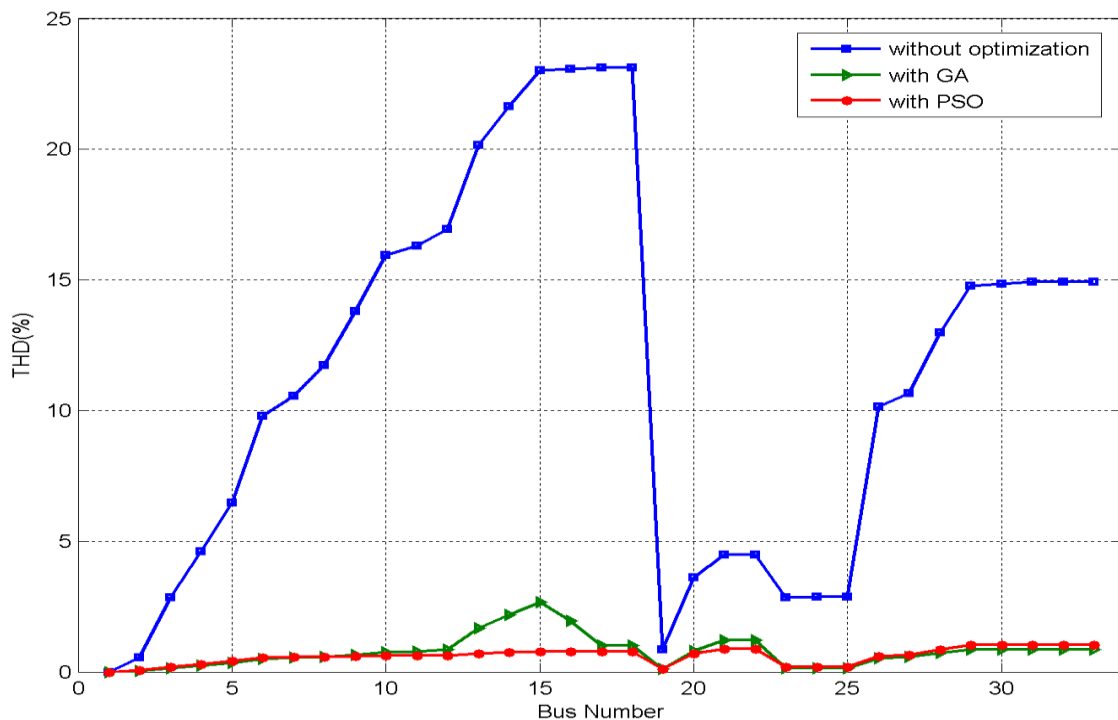
در ادامه نمودارهای مربوط به اعوجاجات هارمونیک باس‌ها آمده است:



الف: بارگذاری سبک ( ۵۰٪ بار نامی)



ب: بارگذاری متوسط ( ۸۰٪ بار نامی)



ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

شکل (۵-۸): اعوجاج هارمونیکي باس‌های شبکه ۳۳ باس با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

مقدار اعوجاج هارمونیکي باس‌ها به تدریج با دور شدن از ژنراتور افزایش یافته و در دورترین باس یعنی باس ۱۸ به حداکثر خود در مقدار خود می‌رسند. در واقع نقش ژنراتور در مرحله قبل از خازن‌گذاری مشابه خازن بوده و با تولید توان راکتیو منجر به بهبود ولتاژ و اعوجاجات هارمونیکي شبکه می‌شود. در اینجا می‌توان به کیفیت کارکرد خازن به‌عنوان یک منبع توان راکتیو در بهبود پارامترهای شبکه پی برد. کلیه اعوجاجات هارمونیکي باس‌ها پس از بهینه‌سازی بهبود پیدا کرده و در محدوده مجاز خود قرار گرفته است.

در جدول (۵-۱۱) به صورت خلاصه نتایج خازن‌گذاری برای کلیه حالت‌ها با استفاده از الگوریتم

ژنتیک و اجتماع ذرات بیان شده است:

جدول (۵-۱۱): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۳۳ باسه در شرایط مختلف بارگذاری

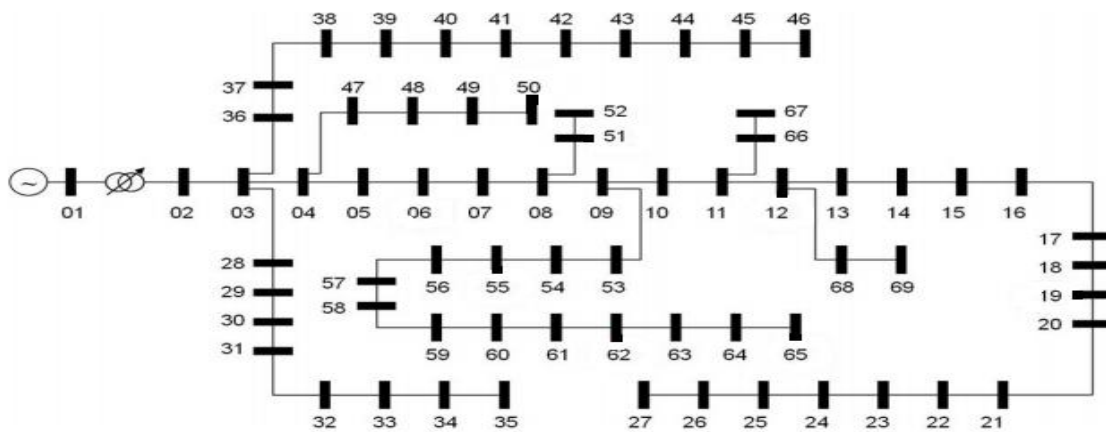
پارامتر	سطح بار	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)		بعد از بهینه‌سازی			
		بار خطی	بار غیرخطی	GA		PSO	
				بار خطی	بار غیرخطی	بار خطی	بار غیرخطی
کل خازن بکار رفته	S=۰/۵	۰	۰	۱۲۰۰	۲۷۰۰	۱۲۰۰	۱۹۵۰
	S=۰/۸	۰	۰	۲۱۰۰	۳۴۵۰	۱۶۵۰	۶۹۰۰
	S=۱	۰	۰	۲۴۰۰	۶۱۵۰	۲۱۰۰	۴۸۰۰
حداقل ولتاژ شبکه	S=۰/۵	۰/۹۵۸۳	۰/۹۰۵۱	۰/۹۶۹	۰/۹۰۸۷	۰/۹۹۸۸	۰/۹۱۱۸
	S=۰/۸	۰/۹۳۱۶	۰/۸۷۹۲	۰/۹۴۹	۰/۹۰۱۶	۰/۹۴۸۴	۰/۹۰۰۴
	S=۱	۰/۹۱۳۱	۰/۸۶۱۱	۰/۹۳۴۲	۰/۹۰۰۵	۰/۹۳۱۶	۰/۹۰۰۱
حداکثر ولتاژ شبکه	S=۰/۵	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۶۴	۰/۹۹۸۹	۰/۹۹۷۱	۰/۹۶۸۶	۰/۹۹۶۹
	S=۰/۸	۰/۹۹۷۷	۰/۹۹۵۵	۰/۹۹۸۲	۰/۹۹۶۳	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۶۳
	S=۱	۰/۹۹۷	۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۷۷	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۷۶	۰/۹۹۵۸
حداکثر اعوجاج هارمونیکی	S=۰/۵	۰	۲۱/۹۵۲۱	۰	۲/۶۳۰۵	۰	۲/۲۸۴۳
	S=۰/۸	۰	۲۲/۶۳۳۰	۰	۱/۷۱۳۷	۰	۱/۳۸۷۲
	S=۱	۰	۲۳/۱۳۲۴	۰	۲/۶۵۶۹	۰	۱/۰۳۹۲
کل تلفات شبکه	S=۰/۵	۴۷/۰۷۱۲	۱۰۴۵/۷	۳۲/۲۳۲۱	۲۴۴/۴۷	۳۲/۳۹۷۲	۲۵۲/۱۹
	S=۰/۸	۱۲۵/۸۰۴	۱۲۰۷/۱	۸۵/۱۶۳۵	۴۱۹/۶	۸۵/۷۱۴۵	۳۸۴/۳
	S=۱	۲۰۲/۶۸	۱۳۴۱/۴	۱۳۶/۹۱۴	۶۲۸/۳۹۶۹	۱۳۸/۳۹۵	۵۷۹/۳۴
کل هزینه‌های شبکه	S=۰/۵	۱۲۵۲۱	۱۷۷۷۶۰	۸۵۷۴/۲	۴۱۵۶۲	۵۵۰۸	۴۲۸۷۴
	S=۰/۸	۳۳۴۶۴	۵۵۲۸۶۰	۲۲۶۵۴	۱۹۲۲۱۰	۳۹۲۵۸	۱۷۶۰۶۰
	S=۱	۵۳۹۱۳	۲۲۸۰۴۰	۳۶۴۲۰	۱۰۶۸۳۰	۲۳۵۲۸	۹۸۴۸۹
سود خازن‌گذاری	S=۰/۵	۰	۰	۳۹۴۶/۸	۱۳۶۲۰	۷۰۱۳	۱۳۴۸۸۶
	S=۰/۸	۰	۰	۱۰۸۱۰	۳۶۰۶۵۰	۱۸۳۶۱	۳۷۶۸۰۰
	S=۱	۰	۰	۱۷۴۹۳	۱۲۱۲۱۰	۳۰۳۸۵	۱۲۹۵۵۱

### ۵-۳ شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE

شبکه مورد مطالعه یک شبکه ۶۹ باسه استاندارد شعاعی با ولتاژ نامی ۱۲/۶۶ کیلوولت می‌باشد.

دیاگرام تک‌خطی شبکه مورد نظر مطابق شکل (۵-۹) و داده‌های مربوط به خطوط و همچنین

توان‌های اکتیو راکتیو باس‌ها به ترتیب در جداول (۵-۱۲) و (۵-۱۳) آمده است:



شکل (۹-۵): دیاگرام تک خطی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEE [۶۱]

جدول (۱۲-۵): پارامترهای خطوط شبکه ۶۹ باسه نمونه [۶۱]

From Bus	To Bus	R(pu)	X(pu)	From Bus	To Bus	R(pu)	X(pu)	From Bus	To Bus	R(pu)	X(pu)
۱	۲	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۲	۲۴	۲۵	۰/۷۴۸۸	۰/۲۴۷۵	۴۷	۴۸	۰/۰۸۵۱	۰/۲۰۸۳
۲	۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۱۲	۲۵	۲۶	۰/۳۰۸۹	۰/۱۰۲۱	۴۸	۴۹	۰/۲۸۹۸	۰/۷۰۹۱
۳	۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۶	۲۶	۲۷	۰/۱۷۳۲	۰/۰۵۷۲	۴۹	۵۰	۰/۰۸۲۲	۰/۲۰۱۱
۴	۵	۰/۰۲۵۱	۰/۰۲۹۴	۲۷	۲۸	۰/۰۰۴۴	۰/۰۱۰۸	۵۰	۵۱	۰/۰۹۲۸	۰/۰۴۷۳
۵	۶	۰/۳۶۶	۰/۱۸۶۴	۲۸	۲۹	۰/۰۰۶۴	۰/۱۵۶۵	۵۱	۵۲	۰/۳۳۱۹	۰/۱۱۱۴
۶	۷	۰/۳۸۱۱	۰/۱۹۴۱	۲۹	۳۰	۰/۳۹۷۸	۰/۱۳۱۵	۵۲	۵۳	۰/۲۸۱۳	۰/۱۴۳۳
۷	۸	۰/۰۹۲۲	۰/۰۴۷	۳۰	۳۱	۰/۰۷۰۲	۰/۰۲۳۲	۵۳	۵۴	۰/۲۰۳	۰/۱۰۳۴
۸	۹	۰/۰۴۹۳	۰/۰۲۵۱	۳۱	۳۲	۰/۳۵۱	۰/۱۱۶	۵۴	۵۵	۰/۲۸۴۲	۰/۱۴۴۷
۹	۱۰	۰/۸۱۹	۰/۲۷۰۷	۳۲	۳۳	۰/۸۳۹	۰/۲۸۱۶	۵۵	۵۶	۰/۲۸۱۳	۰/۱۴۳۳
۱۰	۱۱	۰/۱۸۷۲	۰/۰۶۱۹	۳۳	۳۴	۱/۷۰۸	۰/۵۶۴۶	۵۶	۵۷	۱/۵۹	۰/۵۳۳۷
۱۱	۱۲	۰/۷۱۱۴	۰/۲۳۵۱	۳۴	۳۵	۱/۴۷۴	۰/۴۸۷۳	۵۷	۵۸	۰/۷۸۳۷	۰/۲۶۳
۱۲	۱۳	۱/۰۳	۰/۳۴	۳۵	۳۶	۰/۰۰۴۴	۰/۰۱۰۸	۵۸	۵۹	۰/۳۰۴۲	۰/۱۰۰۶
۱۳	۱۴	۱/۰۴۴	۰/۳۴۵	۳۶	۳۷	۰/۰۰۶۴	۰/۱۵۶۵	۵۹	۶۰	۰/۳۸۶۱	۰/۱۱۷۲
۱۴	۱۵	۱/۰۵۸	۰/۳۴۹۶	۳۷	۳۸	۰/۱۰۵۳	۰/۱۲۳	۶۰	۶۱	۰/۵۰۷۵	۰/۲۵۸۵
۱۵	۱۶	۰/۱۹۶۶	۰/۰۶۵	۳۸	۳۹	۰/۰۳۰۴	۰/۰۳۵۵	۶۱	۶۲	۰/۰۹۷۴	۰/۰۴۹۶
۱۶	۱۷	۰/۳۷۴۴	۰/۱۲۳۸	۳۹	۴۰	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۲۱	۶۲	۶۳	۰/۱۴۵	۰/۰۷۳۸
۱۷	۱۸	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۱۶	۴۰	۴۱	۰/۷۲۸۳	۰/۸۵۰۹	۶۳	۶۴	۰/۷۱۰۵	۰/۳۶۱۹
۱۸	۱۹	۰/۳۲۷۶	۰/۱۰۸۳	۴۱	۴۲	۰/۳۱	۰/۳۶۲۳	۶۴	۶۵	۱/۰۴۱	۰/۵۳۰۲
۱۹	۲۰	۰/۲۱۰۶	۰/۰۶۹	۴۲	۴۳	۰/۰۴۱	۰/۰۴۷۸	۶۵	۶۶	۰/۲۰۱۲	۰/۰۶۱۱
۲۰	۲۱	۰/۳۴۱۶	۰/۱۱۲۹	۴۳	۴۴	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۱۶	۶۶	۶۷	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۱۴
۲۱	۲۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۴۶	۴۴	۴۵	۰/۱۰۸۹	۰/۱۳۷۳	۶۷	۶۸	۰/۷۳۹۴	۰/۲۴۴۴
۲۲	۲۳	۰/۱۵۹۱	۰/۰۵۲۶	۴۵	۴۶	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۱۲	۶۸	۶۹	۰/۰۰۴۷	۰/۰۰۱۶
۲۳	۲۴	۰/۳۴۶۳	۰/۱۱۴۵	۴۶	۴۷	۰/۰۰۳۴	۰/۰۰۸۴	-	-	-	-



جدول (۵-۱۳): پارامترهای بار شبکه ۶۹ با سه نمونه [۶۱]

Bus	P(KW)	Q(Kvar)	Bus	P(KW)	Q(Kvar)	Bus	P(KW)	Q(Kvar)
۱	۰	۰	۲۴	۲۸	۲۰	۴۷	۰	۰
۲	۰	۰	۲۵	۰	۰	۴۸	۷۹	۵۶/۴
۳	۰	۰	۲۶	۱۴	۱۰	۴۹	۳۸۴/۷	۲۷۴/۵
۴	۰	۰	۲۷	۱۴	۱۰	۵۰	۳۸۴/۷	۲۷۴/۵
۵	۰	۰	۲۸	۲۶	۱۸/۶	۵۱	۴۰/۵	۲۸/۳
۶	۲/۶	۲/۲	۲۹	۲۶	۱۸/۶	۵۲	۳/۶	۲/۷
۷	۴۰/۴	۳۰	۳۰	۰	۰	۵۳	۰	۰
۸	۷۵	۵۴	۳۱	۰	۰	۵۴	۲۶/۴	۱۹
۹	۳۰	۲۲	۳۲	۰	۰	۵۵	۲۴	۱۷/۲
۱۰	۲۸	۱۹	۳۳	۱۴	۱۰	۵۶	۰	۰
۱۱	۱۴۵	۱۰۴	۳۴	۹/۵	۱۴	۵۷	۰	۰
۱۲	۱۴۵	۱۰۴	۳۵	۶	۴	۵۸	۰	۰
۱۳	۸	۵	۳۶	۲۶	۱۸/۵۵	۵۹	۱۰۰	۷۲
۱۴	۸	۵/۵	۳۷	۲۶	۱۸/۵۵	۶۰	۰	۰
۱۵	۰	۰	۳۸	۰	۰	۶۱	۱۲۴۴	۸۸۸
۱۶	۴۵/۵	۳۰	۳۹	۲۴	۱۷	۶۲	۳۲	۲۳
۱۷	۶۰	۳۵	۴۰	۲۴	۱۷	۶۳	۰	۰
۱۸	۶۰	۳۵	۴۱	۱/۲	۱	۶۴	۲۲۷	۱۶۲
۱۹	۰	۰	۴۲	۰	۰	۶۵	۵۹	۴۲
۲۰	۱	۰/۶	۴۳	۶	۴/۳	۶۶	۱۸	۱۳
۲۱	۱۱۴	۸۱	۴۴	۰	۰	۶۷	۱۸	۱۳
۲۲	۵	۳/۵	۴۵	۳۹/۲۲	۲۶/۳	۶۸	۲۸	۲۰
۲۳	۰	۰	۴۶	۳۹/۲۲	۲۶/۳	۶۹	۲۸	۲۰

همانند شبکه ۳۳ با سه در اینجا نیز شبیه‌سازی در سه سطح بار سبک، بار پایه و پرباری انجام می‌شود. الگوی تغییر توان اکتیو راکتیو نیز یکسان فرض می‌شود. همچنین هزینه سالانه خازن‌های شبکه همانند جدول (۴-۵) است. قیود و پارامترهای به‌کاررفته در شبکه نیز مانند قبل می‌باشد.

هدف از خازن‌گذاری بهینه، کاهش تلفات توان و انرژی با صرف کمترین هزینه برای خازن‌گذاری، ضمن حفظ ولتاژ باس‌ها در محدوده موردنظر و همچنین رعایت محدودیت‌های مرتبط با حداکثر اعوجاجات هارمونیک شبکه طبق استاندارد IEEE-۵۱۹ می‌باشد. ابتدا برنامه شبیه‌سازی را با در نظر گرفتن بارهای خطی و سپس با در نظر گرفتن بارهای غیرخطی اجرا می‌کنیم.

### ۵-۳-۱ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با بارهای خطی

نتایج حاصل از اجرای بهینه‌سازی شامل مکان و مقدار بهینه خازن‌ها و سایر پارامترهای شبکه توسط دو الگوریتم در جدول (۵-۱۴) آمده است. لازم به ذکر است اجرای برنامه با بارهای خطی تنها در یک سطح بار انجام شده است اما می‌توان برای سایر سطوح بار نیز مشابه این حالت شبیه‌سازی را تکرار نمود.

جدول (۵-۱۴): مکان و مقدار خازن‌های بهینه شبکه ۶۹ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪.

GA	شماره باس	۲	۹	۵۰	۱۸	۹	۴۷	۶۲	۴۸	۹	۲
	مقدار خازن	۱۵۰	۳۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۳۰۰	۱۵۰	۶۰۰	۱۵۰	۳۰۰	۱۵۰
PSO	شماره باس	۶۹	۱	۱	۸	۵۰	۶۹	۱۸	۶۹	۶۱	۱
	مقدار خازن	۳۶۰۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۶۰۰	۳۶۰۰

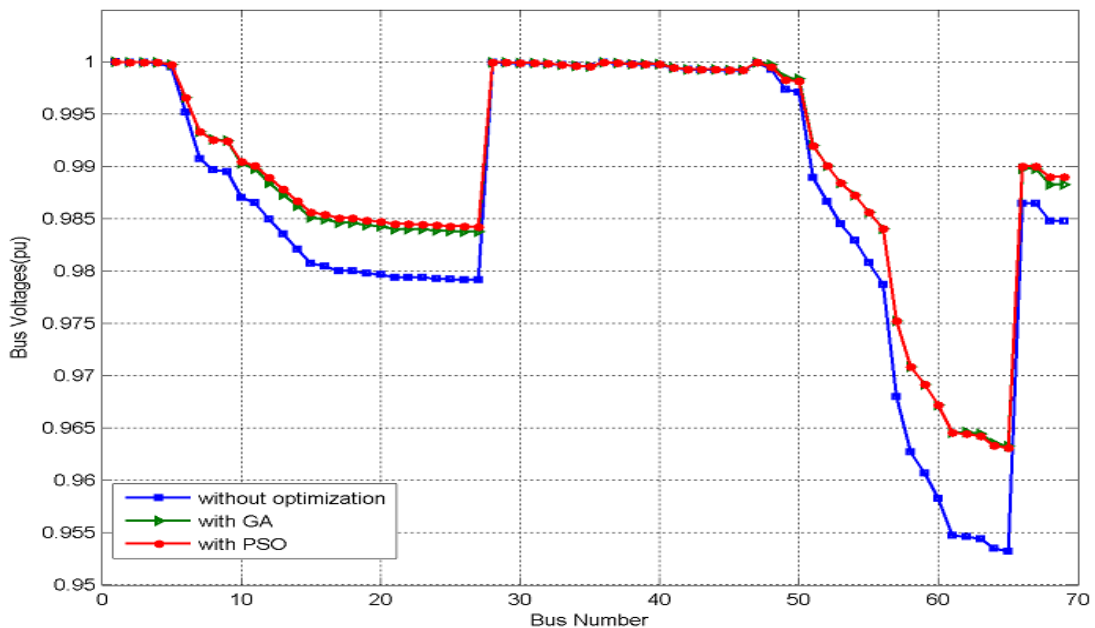
در جدول (۵-۱۵) مقایسه پارامترهای شبکه با دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات انجام شده است.

جدول (۵-۱۵): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪.

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۲۴۰۰	۱۵۷۵۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۵۳۲	۰/۹۶۳۳	۰/۹۶۳۱
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۱	۱	۱
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۰	۰	۰
کل تلفات شبکه (Kw)	۵۵/۱۹۳۲	۳۷/۱۳۲۷	۳۷/۰۴۳
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۹۳۸۲/۸	۶۳۱۳/۴	۶۳۰۰/۳
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۳۰۶۹/۴	۳۰۸۲/۶

همان‌طور که مشاهده می‌کنیم الگوریتم ژنتیک ۲۴۰۰ کیلو وار خازن برای نصب در باس‌های کاندید خود در نظر گرفته درحالی‌که این مقدار در الگوریتم اجتماع ذرات برابر با ۱۵۷۵۰ کیلووار است. پس از نصب خازن و تزریق توان راکتیو توسط آن، پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه افزایش یافته

است. تلفات شبکه قبل از نصب خازن به علت شارش توان راکتیو در طول خطوط ۵۵/۱۹۳۲ کیلووات است که پس از تأمین توان راکتیو توسط خازن‌ها به صورت محلی و کاهش عبور این توان از خطوط، تلفات در اجرای برنامه با هر دو الگوریتم کاهش مناسبی داشته است. در نهایت خازن‌گذاری در این شبکه برای ما ۳۰۶۹/۴ دلار با الگوریتم ژنتیک و ۳۰۸۲/۶ دلار با الگوریتم اجتماع ذرات به همراه دارد. نمودار ولتاژ باس‌های شبکه مطابق شکل (۵-۱۰) است:



شکل (۵-۱۰): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۶۹ باسه با بارهای خطی تحت بارگذاری ۵۰٪

### ۵-۳-۲ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با انواع بارهای غیرخطی

در مطالعات این شبکه علاوه بر کانورتر ۱۲ پالسه، ۴ بار غیرخطی دیگر مطابق با مرجع [۶۲] در نظر گرفته شده است. این بارهای غیرخطی شامل دو کانورتر شش پالسه با توان‌های اکتیو و راکتیو و هارمونیک‌های متفاوت است که در مرجع [۶۲] با شماره‌های ۴ و ۵ نام‌گذاری شده است. بارهای غیرخطی دیگری که در این برنامه شبیه‌سازی استفاده شده، کانورتر شش پالسه درایو فرکانس متغیر<sup>۱</sup> و در نهایت مبدل مدولاسیون پهنای پالس با سرعت قابل تنظیم<sup>۲</sup> می‌باشد. مشخصات این بارهای

<sup>۱</sup>. Variable-Frequency Drive

<sup>۲</sup>. Adjustable Speed Drive

غیرخطی به صورت جداول (۵-۱۶) و (۵-۱۷) می باشد. در این جدول ها مشخصات هارمونیک بارهای غیرخطی به کاررفته در شبکه مشخص شده است که دامنه نشان دهنده درصد آن مؤلفه هارمونیک از مؤلفه اصلی ولتاژ است و فاز زاویه آن مؤلفه هارمونیک را نشان می دهد. همچنین توان اکتیو و راکتیو کاری این بارها نیز آورده شده است:

جدول (۵-۱۶): مشخصات هارمونیک بارهای غیرخطی شبکه ۶۹ باسه [۶۲]

مرتب هارمونیک	بارهای غیرخطی							
	Six-pulse ۴		Six-pulse ۵		six-pulse VFD		PWM-ASD	
	دامنه	فاز	دامنه	فاز	دامنه	فاز	دامنه	فاز
۱	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰	۰
۵	۴۲	۰	۲۸	۰	۲۳/۵۲	۱۱۱	۸۲/۸	-۱۳۵
۷	۱۴/۳	۰	۹	۰	۶/۰۸	۱۰۹	۷۷/۵	۶۹
۱۱	۷/۹	۰	۹	۰	۴/۵۷	-۱۵۸	۴۶/۳	-۶۲
۱۳	۳/۲	۰	۶	۰	۴/۲	-۱۷۸	۴۱/۲	۱۳۹
۱۷	۳/۷	۰	۵	۰	۱/۸	-۹۴	۱۴/۲	۹
۱۹	۲/۳	۰	۴	۰	۱/۳۷	-۹۲	۹/۷	-۱۵۵
۲۳	۲/۳	۰	۳	۰	۰/۷۵	-۷۰	۱/۵	-۱۵۸
۲۵	۱/۴	۰	۳	۰	۰/۵۶	-۷۰	۲/۵	۹۸
۲۹	۰	۰	۰	۰	۰/۴۹	-۲۰	۰	۰
۳۱	۰	۰	۰	۰	۰/۵۴	۷	۰	۰

جدول (۵-۱۷): توان اکتیو راکتیو بارهای غیرخطی شبکه ۶۹ باسه [۶۲]

بار غیرخطی	توان اکتیو (MW)	توان راکتیو (MVAR)
six-pulse ۴	۰/۷۵	۰/۵
six-pulse ۵	۱	۰/۶
six-pulse VFD	۱/۵	۰/۷۵
PWM-ASD	۰۴۷۴/۰	۰۲۹۳/۰

آرایش و محل قرارگیری بارهای غیرخطی شبکه را مطابق جدول (۵-۱۸) در نظر گرفته و تعداد خازن های مجاز را ۱۰ عدد در نظر می گیریم. نخست شبیه سازی را بدون در نظر گرفتن بارهای غیرخطی انجام می دهیم و در مرحله بعد بارهای غیرخطی را در مسئله لحاظ می کنیم.

جدول (۵-۱۸) : محل قرارگیری بارهای غیرخطی در شبکه ۶۹ باسه

شماره باس	نوع بار غیرخطی
۵	six-pulse VFD
۱۵	۱۲-pulse
۲۱	۱۲-pulse
۲۹	six-pulse ۴
۴۳	PWM-ASD+ six-pulse ۵
۵۱	six-pulse ۴
۶۰	PWM-ASD+۱۲-pulse

در ادامه شبیه‌سازی به منظور حداقل کردن تلفات شبکه، با در نظر گرفتن قیود پخش بار، قیود مربوط به حداکثر و حداقل ولتاژ باس‌ها، قیود مربوط به حداکثر اعوجاج هارمونیک و قیود مربوط به خازن‌ها در سه سطح بار مختلف انجام شده است. این شبیه‌سازی با دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات انجام و نتایج آن‌ها باهم مقایسه شده است. در جدول (۵-۱۹) مکان و مقدار خازن‌های شبکه با دو الگوریتم موردنظر آورده شده است:

جدول (۵-۱۹): مکان و مقدار خازن‌های بهینه شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

الف: بارگذاری سبک (۵۰٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۵۹	۴۶	۶۶	۴۹	۶۰	۱۵	۲۱	۶۲	۳۸	۶۰
	مقدار خازن	۳۰۰	۹۰۰	۳۰۰	۱۵۰	۴۵۰	۱۵۰	۶۰۰	۳۰۰	۱۸۰۰	۴۵۰
PSO	شماره باس	۶۹	۱	۴۶	۱	۱۵	۲۱	۱	۶۰	۱	۶۹
	مقدار خازن	۱۵۰	۳۰۰	۱۰۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۶۰۰	۱۵۰	۱۰۵۰	۳۶۰۰	۱۵۰

ب: بارگذاری متوسط ( ۸۰٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۴۵	۲۲	۵۰	۱۵	۶	۶۳	۱۵	۶۰	۹	۹
	مقدار خازن	۱۲۰۰	۱۵۰	۳۰۰	۴۵۰	۳۰۰	۱۰۵۰	۶۰۰	۴۵۰	۳۰۰	۳۰۰۰
PSO	شماره باس	۱	۵۲	۱۷	۶۰	۴۱	۵۴	۱	۲	۱	۶۹
	مقدار خازن	۱۹۵۰	۲۱۰۰	۹۰۰	۱۸۰۰	۱۶۵۰	۱۵۰	۲۷۰۰	۹۰۰	۱۵۰	۱۵۰

ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۴۱	۹	۵۱	۵۰	۶۲	۱۹	۶	۵۳	۴۱	۵۶
	مقدار خازن	۱۵۰	۱۲۰۰	۲۴۰۰	۳۰۰	۱۳۵۰	۷۵۰	۳۳۰۰	۲۲۵۰	۱۳۵۰	۲۱۰۰
PSO	شماره باس	۵	۶۶	۲۵	۴۶	۳۱	۵۴	۴۲	۶۲	۵۲	۵۱
	مقدار خازن	۹۰۰	۱۳۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	۳۶۰۰	۱۰۵۰	۲۴۰۰	۳۱۵۰	۲۸۵۰

در این جداول مکان و مقدار خازن‌ها جهت نصب در باس‌های موردنظر نشان داده شده است. دو الگوریتم پله‌های خازنی مختلفی را برای بهینه‌سازی مسئله در سطوح مختلف بارگذاری در نظر گرفته‌اند. در جدول (۵-۲۰) مقایسه نتایج حاصل از اجرای برنامه توسط دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات در سطوح مختلف بارگذاری آورده شده است:

جدول (۵-۲۰): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باس با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

الف: بارگذاری سبک ( ۰.۵۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۵۴۰۰	۷۳۵۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۰۹۵	۰/۹۰۸۷	۰/۹۰۸۲
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۹۹	۱/۰۰۲۹	۱/۰۰۰۲
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۲۲/۱۰۰۵	۴/۹۹۵۵	۴/۹۳۱۳
کل تلفات شبکه (Kw)	۱۶۱۵/۵	۵۷۲/۸۵۷۶	۵۶۵/۴۸۵
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۲۷۴۶۴۰	۹۷۳۸۷	۹۶۱۳۴
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۱۷۷۲۶۰	۱۷۸۵۰۶

ب: بارگذاری متوسط ( ۰.۸۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۷۸۰۰	۱۲۴۵۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۸۷۹۴	۰/۹۰۰۲	۰/۹۰۰۷
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۹۹	۱/۰۰۰۳	۱/۰۰۱۹
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۲۲/۴۲۸۱	۴/۸۷۹۵	۴/۳۰۰۲
کل تلفات شبکه (Kw)	۱۸۰۸/۳	۷۵۱/۲۲۳۱	۸۱۱/۷۱۷۳
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۸۲۸۱۹۰	۳۴۴۰۶۰	۳۷۱۷۷۰
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۴۸۴۱۳۰	۴۵۶۴۲۰

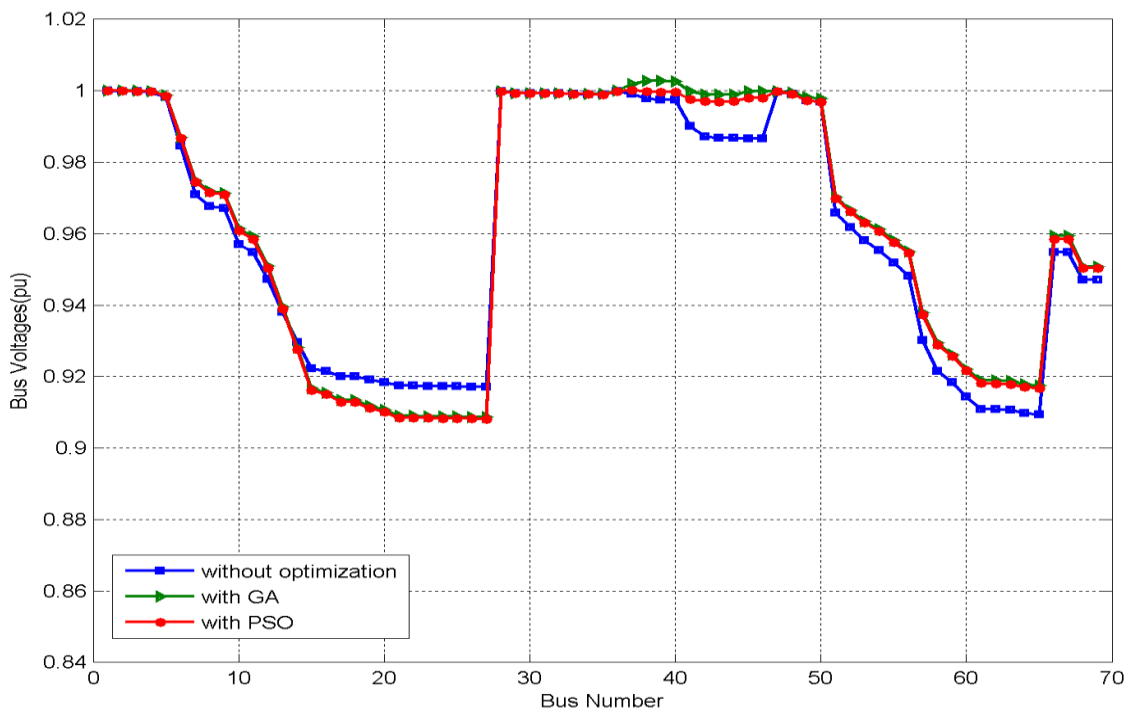
ج: بارگذاری سنگین ( ۱.۰۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVar)	-	۱۵۱۵۰	۱۵۷۵۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۸۵۸۱	۰/۹۰۰۲	۰/۹۰۱۹
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۹۹	۱/۰۰۰۶	۱/۰۰۰۴
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۲۲/۶۵۹۸	۴/۴۰۰۵	۴/۸۸۵۴
کل تلفات شبکه (Kw)	۱۹۷۰/۶	۱۴۴۲/۸	۱۹۵۵/۷
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۳۳۵۰۱۰	۲۴۵۲۷۰	۳۳۲۴۷۰
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۸۹۷۴۰	۲۵۴۰

همان‌طور که در این جداول مشخص است، در تمام سطوح بارگذاری الگوریتم اجتماع ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک کیلووات خازنی بیشتری را در باس‌های کاندید خود نصب می‌کند. هرچه

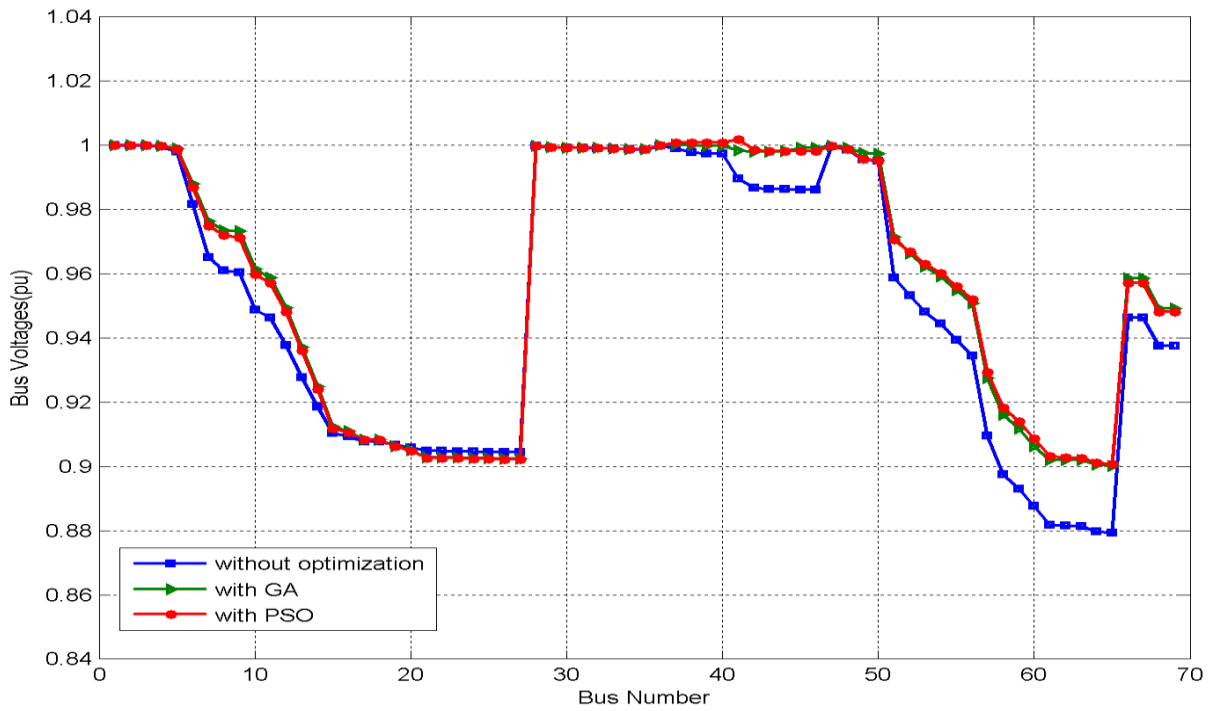
سطح بارگذاری بالاتر می‌رود به دلیل تقاضای توان راکتیو بیشتر بارها، به‌منظور جلوگیری از افت ولتاژ و کاهش تلفات، میزان کیلووار خازنی بیشتری موردنیاز می‌باشد. همچنین افزایش سطح بار با کاهش ولتاژ باس‌ها، افزایش تلفات شبکه و افزایش اعوجاج هارمونیکی همراه است. بیشترین افت ولتاژ در بار سنگین و برابر با  $0/۸۵۸۱$  پریونیت می‌باشد. ولتاژ تمام باس‌ها پس از خازن‌گذاری توسط هر دو الگوریتم به‌خوبی بهبودیافته و در محدوده استاندارد خود قرارگرفته است. به دلیل وجود بارهای غیرخطی مختلف، قبل از نصب خازن شبکه موردنظر به‌شدت آلوده به هارمونیک بود که بیشترین مقدار آن در بار سنگین و برابر با  $۲۲/۶۵۹۸$  درصد است. پس از خازن‌گذاری اعوجاج هارمونیکی تمام باس‌ها کاهش چشمگیری داشته و در محدوده استاندارد خود قرارگرفته است. تلفات شبکه به دلیل عبور جریان‌های راکتیو از خطوط، قبل از حضور خازن‌ها بسیار بالا می‌باشد که با نصب خازن و تأمین توان راکتیو به‌صورت محلی کاهش‌یافته است. همان‌طور که در جداول مشاهده می‌کنید با نصب خازن در شبکه صرفه‌جویی اقتصادی بسیار مناسبی ایجاد می‌شود، به‌نحوی که این مقدار در بار متوسط و توسط الگوریتم ژنتیک بالغ بر  $۳۸۴۰۰۰$  دلار ( $۴۸۴۱۳۰$  دلار) می‌باشد.

در ادامه نمودار مربوط به پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه قبل و بعد از اجرای خازن‌گذاری آمده است:

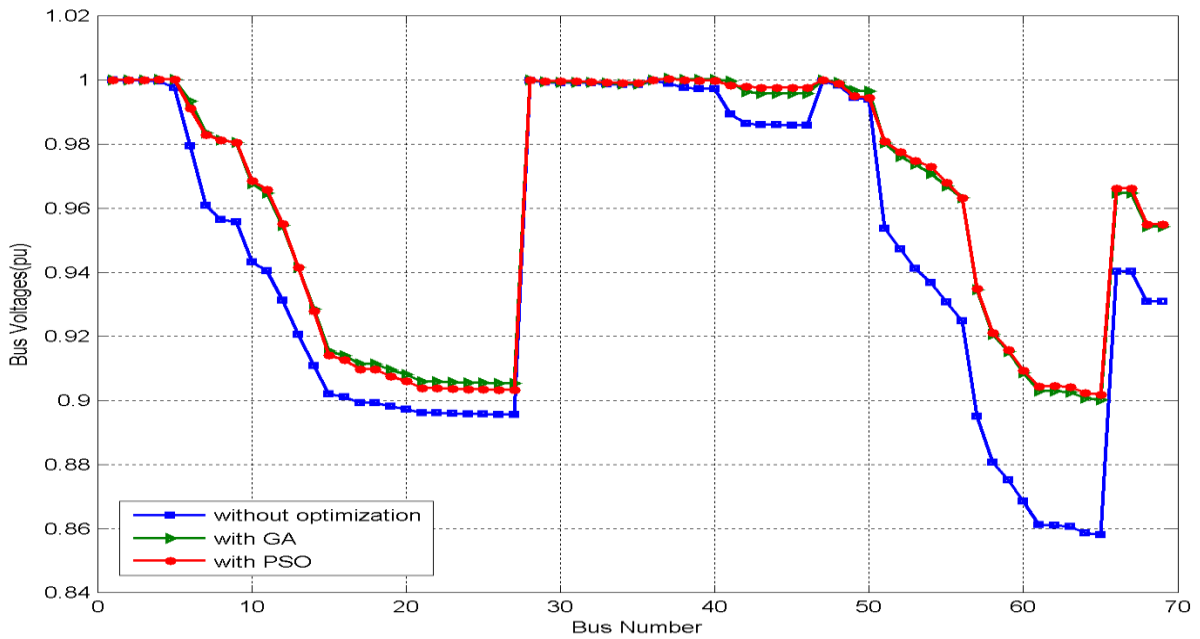




الف: بارگذاری سبک ( ۵۰٪ بار نامی)



ب: بارگذاری متوسط ( ۸۰٪ بار نامی)

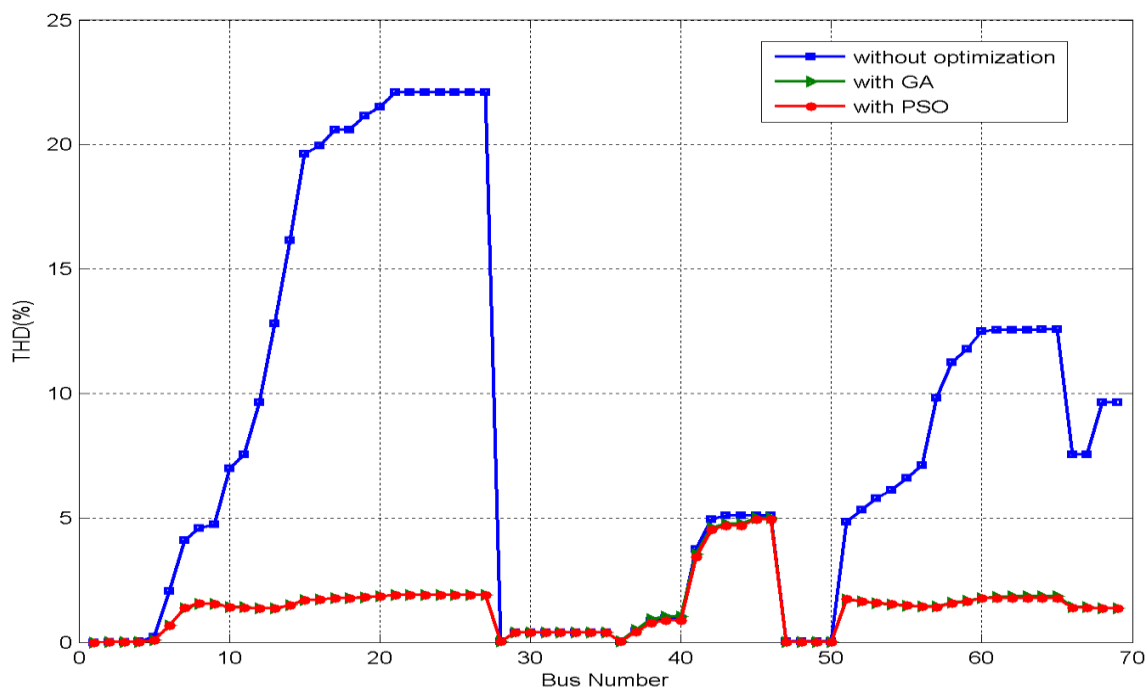


ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

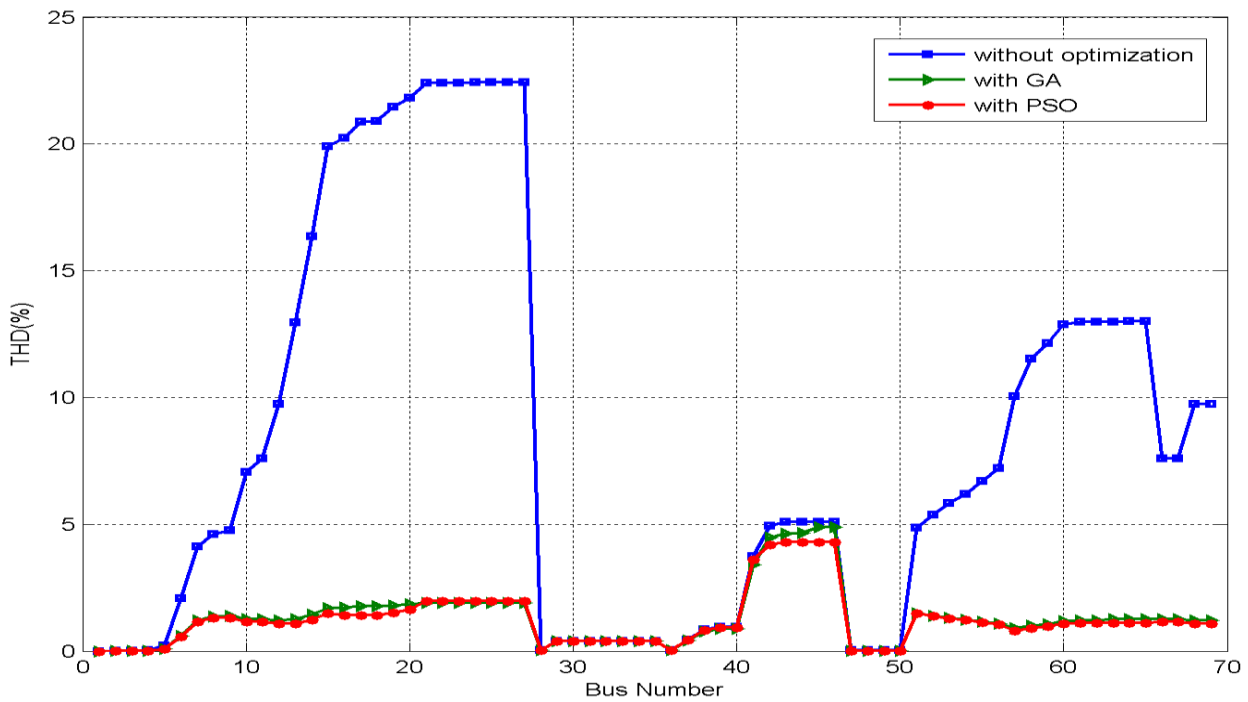
شکل (۵-۱۱): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط،

ج: بارگذاری سنگین

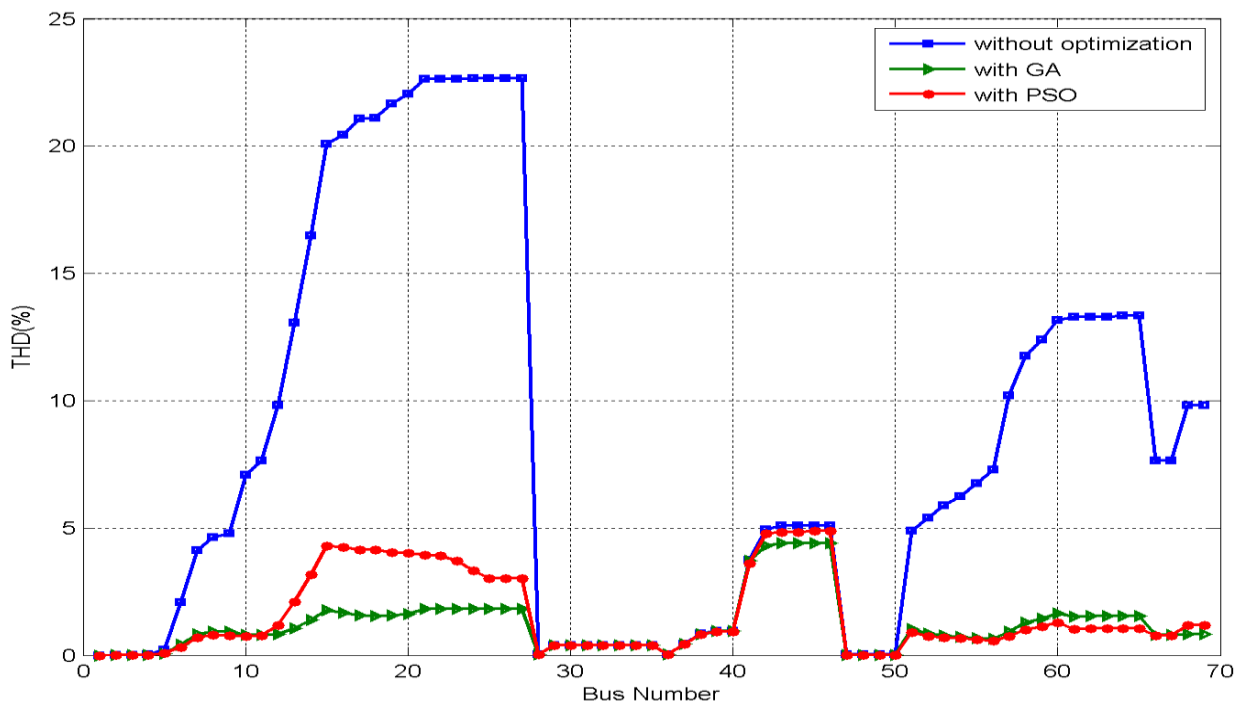
با توجه به آرایش شبکه در باس‌هایی که از ژنراتور دور هستند بیشترین افت ولتاژ را در تمام سطوح بارگذاری شاهد هستیم. پس از نصب خازن توسط هر دو الگوریتم پروفیل ولتاژ باس‌ها مسطح‌تر شده است. همچنین ولتاژ هیچ باسی خارج از محدوده استاندارد خود قرار نمی‌گیرد. که نشان از کارایی مناسب الگوریتم‌های بهینه‌سازی این برنامه شبیه‌سازی دارد. در ادامه نمودارهای مربوط به اعوجاجات هارمونیک باس‌ها آمده است:



الف: بارگذاری سبک ( ۰.۵٪ بار نامی)



ب: بارگذاری متوسط ( ۸۰٪ بار نامی)



ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

شکل (۵-۱۲): اعوجاج هارمونیکي باسهای شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

اعوجاج هارمونیکی زیاد باس‌های شبکه قبل از نصب خازن به‌خوبی در این شکل‌ها مشخص است. پس از بهینه‌سازی این اعوجاج هارمونیکی به‌شدت کاهش پیدا کرده است. در صورتی که مسئله خازن‌گذاری را بدون در نظر گرفتن قیود حل کنیم سود حاصل از خازن‌گذاری بیشتر خواهد شد چراکه در نظر گرفتن قیود آزادی ما را در یافتن مکان و مقدار خازن‌ها برای بهینه‌سازی و کاهش تلفات تحت تأثیر قرار می‌دهد.

## ۴-۵ شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با در نظر گرفتن مدل بار ZIP

همان‌طور که در گذشته اشاره شد بارهای سیستم توزیع لزوماً توان ثابت نیستند و منحنی آن‌ها در طول شبانه‌روز تغییرات مداوم دارد. به همین منظور و برای واقعی‌سازی هر چه بیشتر نتایج و تحلیل‌های این پایان‌نامه در این قسمت بهینه‌سازی مکان و مقدار خازن‌های سیستم با در نظر گرفتن مدل بار عناصر شبکه انجام شده است. در فصل چهارم در قسمت ۴-۴-۳ به‌طور کامل روابط و فرمول‌های لازم برای مدل‌سازی بارهای سیستم توزیع بیان شد که در ادامه مجدداً به آن‌ها اشاره می‌کنیم. همان‌طور که بیان شد، به‌منظور نشان دادن وابستگی بار به ولتاژ از مدل ZIP استفاده کردیم. در فصل قبل فرمول‌بندی این مدل را طبق روابط زیر نشان دادیم (رابطه (۴-۲۴) و (۴-۲۵)):

$$P = P_0 \left[ p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3 \right]$$

$$Q = Q_0 \left[ q_1 \bar{V}^2 + q_2 \bar{V} + q_3 \right]$$

پارامترهای مدل،  $p_1$  تا  $p_3$  و  $q_1$  تا  $q_3$  است که نشان‌دهنده سهم هر جزء در سیستم توزیع می‌باشد.

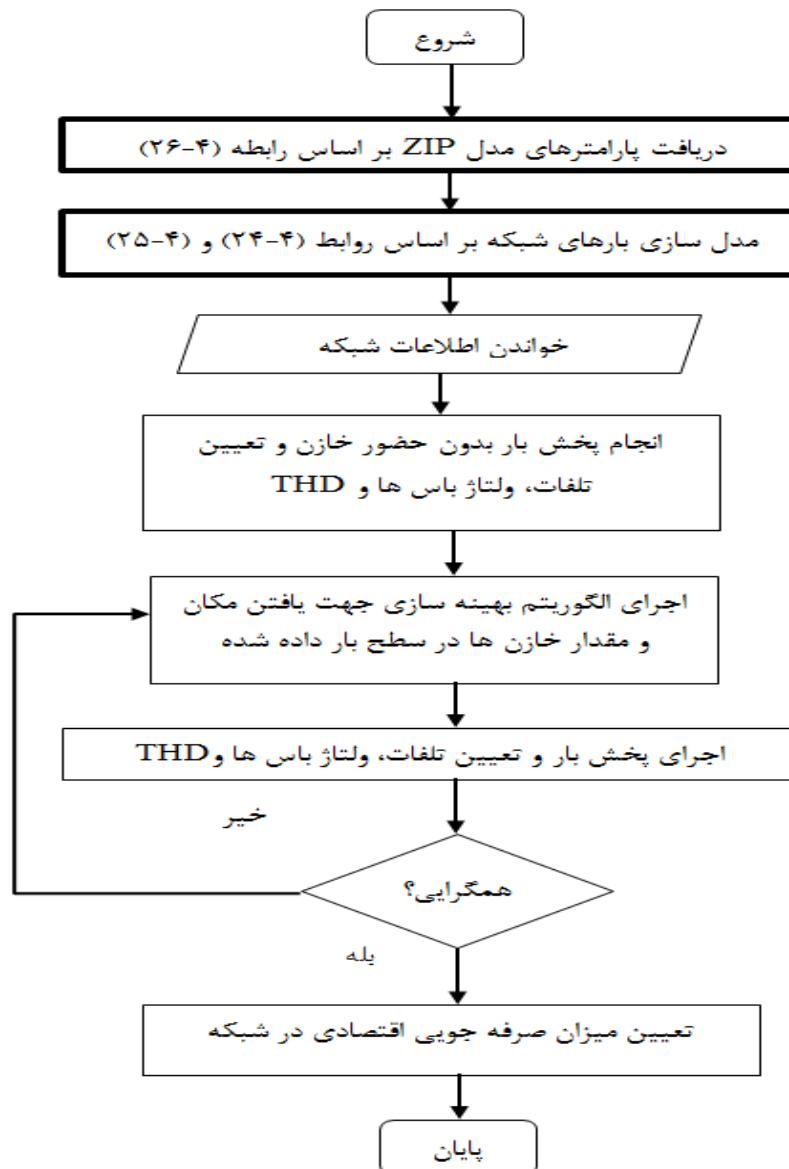
گفته شد که در این مدل پارامترها به‌صورت روابط زیر هستند (رابطه (۴-۲۶)):

$$p_1 + p_2 + p_3 = 1$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 1$$

فلوچارت اجرای برنامه خازن‌گذاری با در نظرگرفتن مدل بار ZIP در شکل (۵-۱۳) نشان داده

شده است:



شکل (۵-۱۳): فلوچارت اجرای برنامه خازن‌گذاری با در نظرگرفتن مدل بار ZIP

برای اجرای برنامه شبیه‌سازی پارامترهای مدل ZIP را به صورت زیر در نظر گرفتیم:

$$\begin{cases} p_1 = .1 \\ p_2 = .05 \\ p_3 = 1 - p_1 - p_2 = .85 \end{cases}$$

$$\begin{cases} q_1 = .1 \\ q_2 = .05 \\ q_3 = 1 - q_2 - q_3 = .85 \end{cases}$$

شبکه مورد مطالعه، شبکه ۶۹ باسه استاندارد در نظر گرفته شده و آرایش بارهای غیرخطی و دیگر المان‌ها مشابه حالت قبل می‌باشد.

### ۱-۴-۵ نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه استاندارد IEEE با در نظر گرفتن مدل بار ZIP با بارهای غیرخطی

پس از مدل‌سازی بارهای شبکه نتایج حاصل از اجرای برنامه شامل مکان و مقدار خازن‌های بهینه و همچنین سایر پارامترهای مورد نظر توسط دو الگوریتم را در جداول زیر مشاهده می‌کنیم:

جدول (۵-۲۱): مکان و مقدار خازن‌های بهینه شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

الف: بارگذاری سبک ( ۰.۵٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۱۵	۴	۸	۵۸	۴۹	۲۴	۳۶	۴۵	۸	۶۱
	مقدار خازن	۳	۱۲	۶	۲	۲	۴	۶	۵	۳	۴
PSO	شماره باس	۱	۶۹	۶۹	۴۶	۶۱	۱	۱	۲۱	۶۹	۱
	مقدار خازن	۱	۱	۲۴	۱	۶	۱	۱	۶	۱	۲۴

ب: بارگذاری متوسط ( ۰.۸٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۴۰	۸	۴	۴۹	۱۷	۳۶	۴۹	۴۵	۶۱	۵۹
	مقدار خازن	۱	۱	۵	۲	۷	۳	۳	۲	۷	۱
PSO	شماره باس	۶۱	۴۵	۲۱	۱	۶۹	۱	۱۵	۶۹	۶۹	۹
	مقدار خازن	۸	۲	۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

GA	شماره باس	۴۹	۳۸	۵	۶۰	۱۵	۲۱	۴۵	۸	۶۱	۴
	مقدار خازن	۴	۳	۷	۱	۴	۴	۴	۴	۸	۱۴
PSO	شماره باس	۱	۶۱	۶۹	۱	۱	۴۵	۶۶	۱۵	۶۹	۲۱
	مقدار خازن	۱	۹	۱	۱	۲۴	۵	۲	۱	۱	۶

مشاهده می‌کنیم که در سطوح بارگذاری مختلف مکان و مقدار خازن‌های جایابی شده متفاوت می‌باشد.

در جدول (۵-۲۲) مقایسه نتایج حاصل از اجرای برنامه توسط دو الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات در سطوح مختلف بارگذاری آورده شده است:

جدول (۵-۲۲): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

الف: بارگذاری سبک ( ۵۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVAR)	-	۷۰۵۰	۹۹۰۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۹۶۶	۱	۰/۹۹۸۱
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۱/۰۶۵۶	۱/۰۸۹۵	۱/۰۸۷۳
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۵/۳۴۳	۴/۶۰۱	۴/۶۰۶۷
کل تلفات شبکه (Kw)	۵۵۵/۵۱۰۲	۵۰۳/۴۵۸۱	۴۹۵/۶۵۱
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۹۴۴۳۷	۸۵۵۸۹	۸۴۲۶۳
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۸۸۴۸	۱۰۱۷۴

ب: بارگذاری متوسط ( ۸۰٪ بار نامی)

پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVAR)	-	۴۸۰۰	۳۳۰۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۸۳۴	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶۶
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۱/۰۵۵۶	۱/۰۷۷۸	۱/۰۷۸۱
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۵/۳۹۳۳	۴/۶۴۷۳	۴/۶۴۵۸
کل تلفات شبکه (Kw)	۵۵۸/۴۹۴۸	۴۶۲/۵۸۵۵	۴۶۰/۲۹۴۸
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۲۵۵۷۹۰	۲۱۱۸۶۵	۲۱۰۸۱۵
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۴۳۹۲۵	۴۴۹۷۵

ج: بارگذاری سنگین ( ۱۰۰٪ بار نامی)

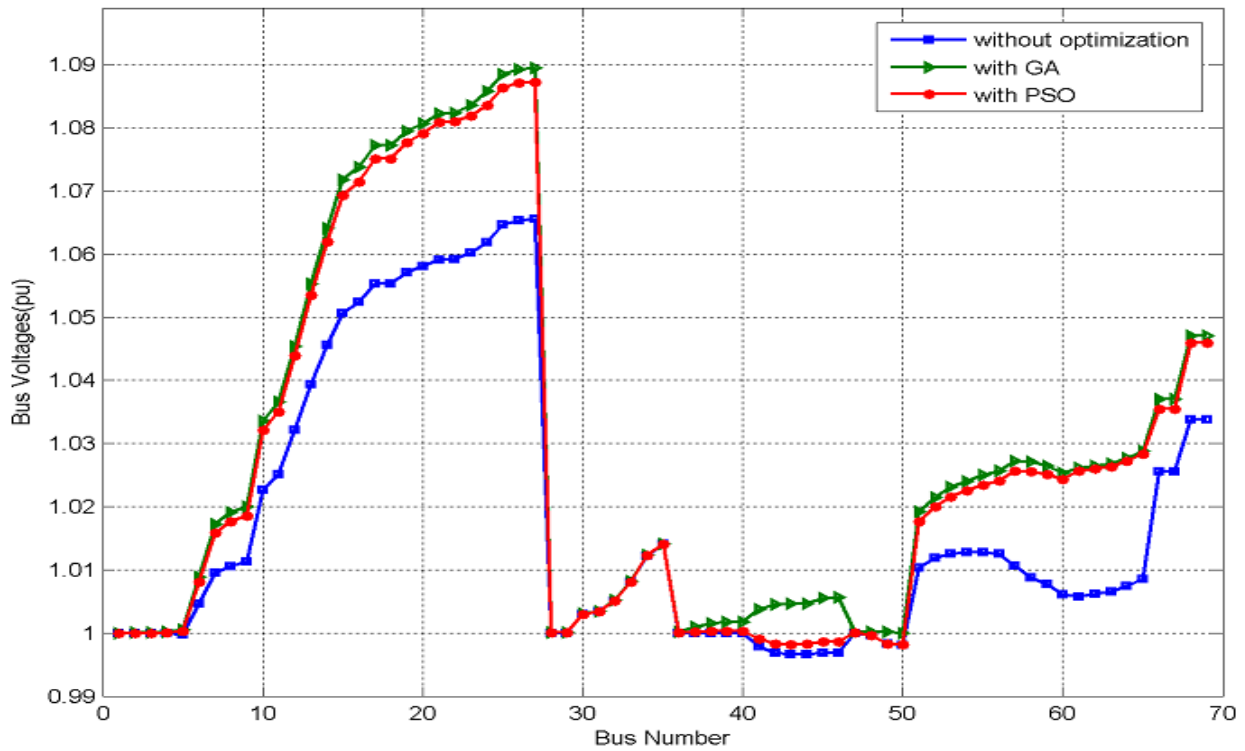
پارامتر	قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)	GA	PSO
کل خازن بکار رفته (KVAR)	-	۷۹۵۰	۷۶۵۰
حداقل ولتاژ شبکه (pu)	۰/۹۶۷۸	۰/۹۹۷۴	۰/۹۹۵۶
حداکثر ولتاژ شبکه (pu)	۱/۰۴۸۸	۱/۰۷۵۷	۱/۰۷۵۲
حداکثر اعوجاج هارمونیکی (%)	۵/۴۲۸۲	۴/۷۶۱۸	۴/۷۶۴
کل تلفات شبکه (Kw)	۵۷۶/۲۰۱۲	۴۵۶/۳۴۹۲	۴۵۷/۸۱۴۴
کل هزینه‌های شبکه (\$)	۹۷۹۵۴	۷۷۵۸۱	۷۷۸۳۰
سود حاصل از خازن‌گذاری (\$)	-	۲۰۳۷۳	۲۰۱۲۴

به جز بار سبک در سایر سطوح بارگذاری الگوریتم ژنتیک نسبت به الگوریتم اجتماع ذرات کیلووار خازنی بیشتری را در باس‌های کاندید نصب می‌کند. آنچه از این جداول مشخص می‌شود این است که به دلیل ماهیت بارهای شبکه پروفیل ولتاژ در کلیه باس‌ها مسطح‌تر از حالت توان ثابت شده است و در مقایسه با مدل توان ثابت شاهد افت کمتری در مقادیر ولتاژها در کلیه سطوح بارگذاری شبکه هستیم. به طوری که حتی قبل از نصب خازن نیز ولتاژ هیچ باسی از ۰/۹ کمتر نشده است. در حقیقت در نظر گرفتن مدل بار به صورت تابعی از ولتاژ منجر به بهبود پارامترهای شبکه از جمله پروفیل ولتاژ می‌شود. هنگامی که بارها به صورت تماماً توان ثابت مدل شده بودند توجه به ولتاژ، میزان توان ثابتی از سوی این بارها مورد تقاضا بود که خود این امر موجب کاهش بیشتر ولتاژ و افزایش تلفات به دلیل شارش توان در خطوط بود. در حالی که مدل‌سازی بار به صورت تابعی از ولتاژ باعث کاهش سطح تقاضا در صورت کاهش ولتاژ دو سر بار می‌شود و این امر موجب کاهش کمتر در ولتاژ باس‌ها و همچنین کاهش تلفات خطوط به دلیل عبور کمتر توان است. علاوه بر این نقش مدل‌سازی بارها در کاهش تلفات شبکه به خوبی در جداول مشخص می‌باشد. هنگامی که مدل بارهای شبکه وابسته به ولتاژ باشد و با کاهش ولتاژ باس‌ها توان مورد تقاضا از سمت بارهای مصرف‌کننده کاهش یابد به دنبال آن جریان‌های عبوری خطوط کم شده و تلفات شبکه افت چشمگیری خواهد داشت. مثلاً تلفات در بارگذاری سنگین بدون در نظر گرفتن مدل بار برابر ۱۹۷۰/۶ کیلووات بود

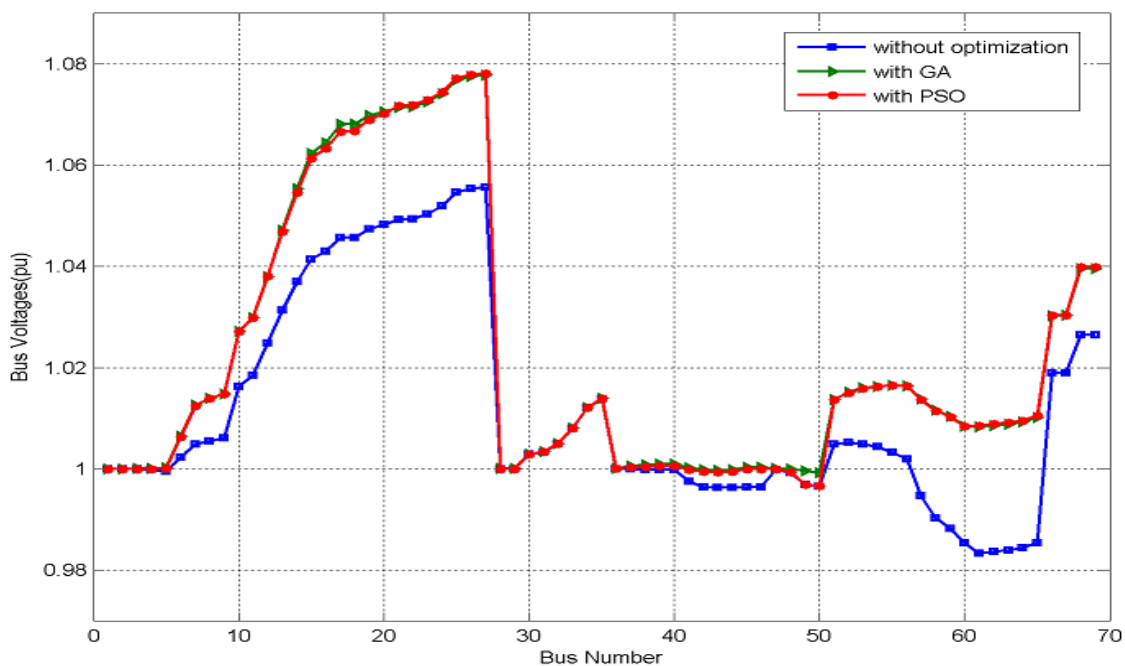


درحالی که این مقدار در همان سطح بار و با در نظر گرفتن مدل بار ۵۷۶/۲۰۱۲ کیلووات است. یعنی تلفات شبکه حدوداً یک سوم شده است.

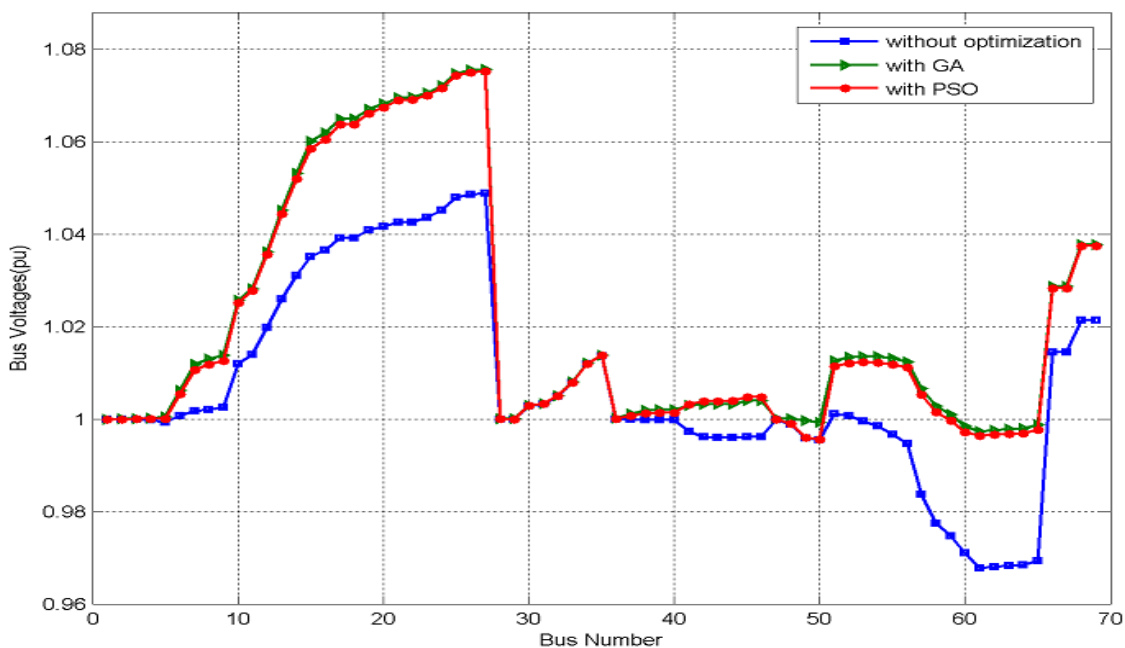
نمودار مربوط به پروفیل ولتاژ باس های شبکه در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است:



الف: بارگذاری سبک ( ۰.۵٪ بار نامی)



ب: بارگذاری متوسط ( ۰.۸۰ بار نامی)



ج: بارگذاری سنگین ( ۱.۱۰۰ بار نامی)

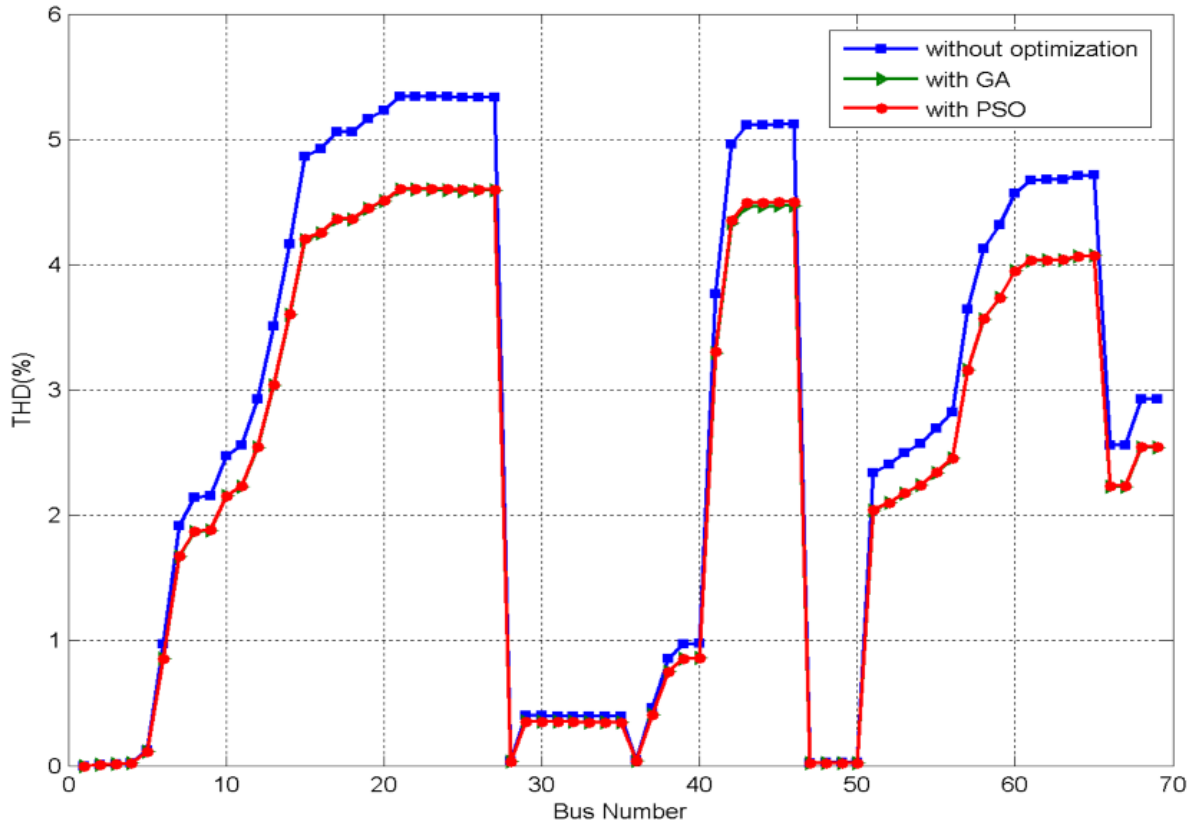
شکل (۵-۱۴): پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک،

ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

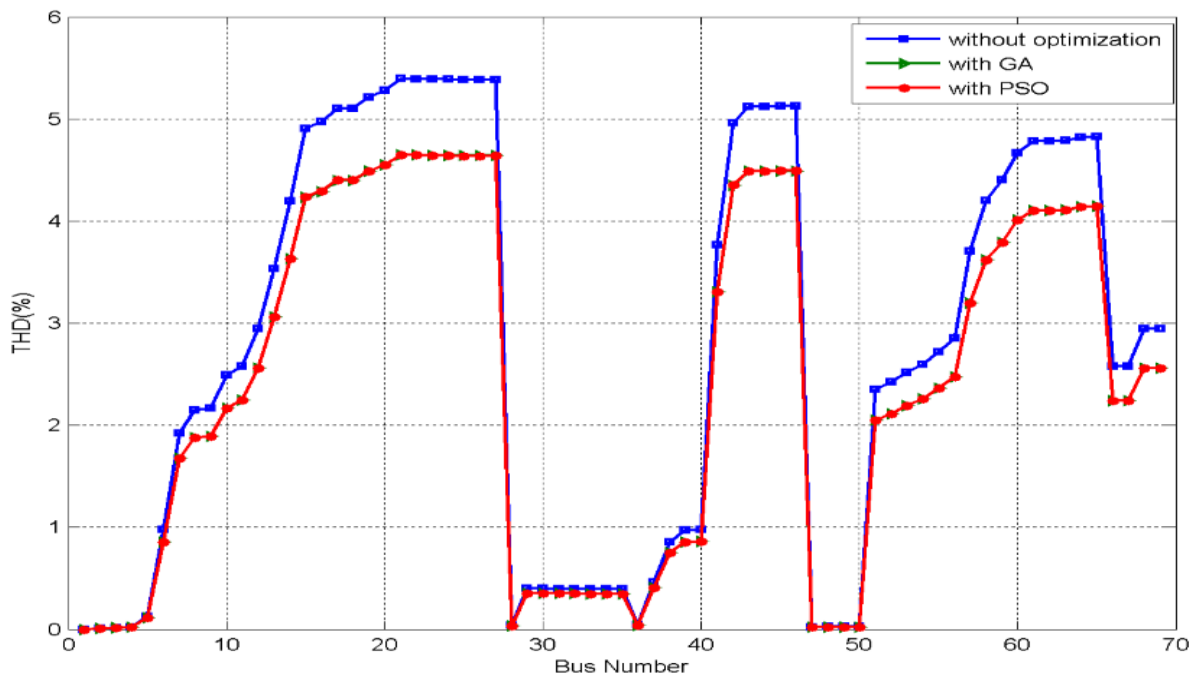
همان‌طور که گفته شد و در این شکل‌ها هم به‌خوبی مشخص است در صورتی که بارهای شبکه را

به‌صورت تابعی از ولتاژ مدل‌سازی کنیم افت ولتاژهای کمتری را در باس‌ها شاهد هستیم که پس از

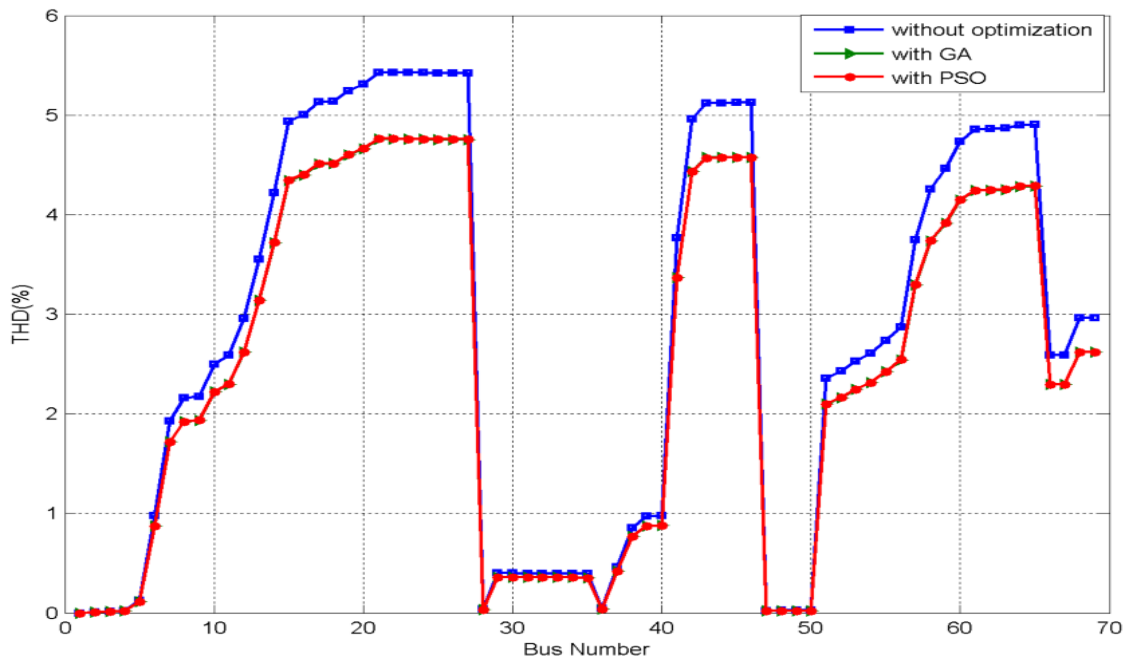
نصب خازن این ولتاژها بهبود هم پیدا می‌کنند. در ادامه نمودار مربوط به اعوجاج هارمونیک باس‌ها آورده شده است:



الف: بارگذاری سبک ( ۰.۵٪ بار نامی)



ب: بارگذاری متوسط ( ۰.۸٪ بار نامی)



ج: بارگذاری سنگین ( ۱.۰٪ بار نامی)

شکل (۵-۱۵): اعوجاج هارمونیکی باس‌های شبکه ۶۹ باسه با بارهای غیرخطی و مدل بار ZIP، الف: بارگذاری سبک، ب: بارگذاری متوسط، ج: بارگذاری سنگین

همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، اعوجاج هارمونیکی باس‌های شبکه پس از اجرای بهینه‌سازی با دو الگوریتم بهبود پیدا کرده‌است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت چنانچه مدل بار را در شبیه‌سازی‌ها به کار ببریم علاوه بر واقعی شدن هرچه بیشتر برنامه شبیه‌سازی شاهد بهبود کلیه پارامترها نیز هستیم. در سیستم‌های توزیع نیز در واقعیت بارها به‌صورت توان ثابت نیستند و برای حصول نتایج واقعی‌تر باید در مطالعات شبکه به مدل‌سازی بارها توجه ویژه‌ای داشته باشیم. مقایسه کاملی از انواع شرایط بارگذاری با در نظر گرفتن مدل بار شبکه ۶۹ باسه در جدول (۵-۲۳) آمده است:

جدول (۵-۲۳): مقایسه نتایج شبیه‌سازی شبکه ۶۹ با سه در شرایط مختلف بارگذاری

پارامتر	سطح بار	بعد از بهینه‌سازی								
		قبل از بهینه‌سازی (بدون خازن)			GA			PSO		
		بار خطی	بار غیر خطی	مدل بار ZIP	بار خطی	بار غیر خطی	مدل بار ZIP	بار خطی	بار غیر خطی	مدل بار ZIP
کل خازن بکار رفته	S=۰/۵	۰	۰	۰	۲۴۰۰	۵۴۰۰	۷۰۵۰	۱۵۷۵۰	۷۳۵۰	۹۹۰۰
	S=۰/۸	۰	۰	۰	۳۱۵۰	۷۸۰۰	۴۸۰۰	۲۴۰۰	۱۲۴۵۰	۳۳۰۰
	S=۱	۰	۰	۰	۴۸۰۰	۱۵۱۵۰	۷۹۵۰	۱۶۵۰۰	۱۵۷۵۰	۷۶۵۰
حداقل ولتاژ شبکه	S=۰/۵	۰/۹۵۳۲	۰/۹۰۹۵	۰/۹۹۶۶	۰/۹۶۳۳	۰/۹۰۸۷	۱	۰/۹۶۳۱	۰/۹۰۸۲	۰/۹۹۸۱
	S=۰/۸	۰/۹۲۲۹	۰/۸۷۹۴	۰/۹۸۳۴	۰/۹۳۹۲	۰/۹۰۰۲	۰/۹۹۳	۰/۹۳۹۲	۰/۹۰۰۷	۰/۹۹۶۶
	S=۱	۰/۹۰۱۵	۰/۸۵۸۱	۰/۹۶۷۸	۰/۹۲۲	۰/۹۰۰۲	۰/۹۹۷۴	۰/۹۲۰۷	۰/۹۰۱۹	۰/۹۹۵۶
حداکثر ولتاژ شبکه	S=۰/۵	۱	۰/۹۹۹۹	۱/۰۶۵۶	۱	۱/۰۰۲۹	۱/۰۸۹۵	۱	۱/۰۰۰۲	۱/۰۸۷۳
	S=۰/۸	۱	۰/۹۹۹۹	۱/۰۵۵۶	۱	۱/۰۰۰۳	۱/۰۷۷۸	۱	۱/۰۰۱۹	۱/۰۷۸۱
	S=۱	۱	۰/۹۹۹۹	۱/۰۴۸۸	۱	۱/۰۰۰۶	۱/۰۷۵۷	۱	۱/۰۰۰۴	۱/۰۷۵۲
حداکثر اعوجاج هارمونیک	S=۰/۵	۰	۲۲/۱۰۰۵	۵/۳۴۳	۰	۴/۹۹۵۵	۴/۶۰۱	۰	۴/۹۳۱۳	۴/۶۰۶۷
	S=۰/۸	۰	۲۲/۴۲۸۱	۵/۳۹۳۳	۰	۴/۸۷۹۵	۴/۶۴۷۳	۰	۴/۳۰۰۲	۴/۶۴۵۸
	S=۱	۰	۲۲/۶۵۹۸	۵/۴۲۸۲	۰	۴/۴۰۰۵	۴/۷۶۱۸	۰	۴/۸۸۵۴	۴/۷۶۴
کل تلفات شبکه	S=۰/۵	۵۵/۱۹۳۲	۱۶۱۵/۵	۵۵۵/۵۱	۳۷/۱۳۲۷	۵۷۲/۸۵۷	۵۰۳/۴۵	۳۷/۰۴۳	۵۶۵/۴۸	۴۹۵/۶۵
	S=۰/۸	۱۴۹/۲۹۵	۱۸۰۸/۳	۵۵۸/۴	۹۹/۶۶۶۶	۷۵۱/۲۲۳	۴۶۲/۵	۹۹/۸۱۷۷	۸۱۱/۷۱	۴۶۰/۲
	S=۱	۲۴۲/۷۷۷	۱۹۷۰/۶	۵۷۶/۲	۱۶۲/۰۵۷	۱۴۴۲/۸	۴۵۶/۳	۱۶۳/۷۰۶	۱۹۵۵/۷	۴۵۷/۸
کل هزینه‌های شبکه	S=۰/۵	۹۳۸۲/۸	۲۷۴۶۴۰	۹۴۴۳۷	۶۳۱۳/۴	۹۷۳۸۷	۸۵۵۸۹	۶۳۰۰/۳	۹۶۱۳۴	۸۴۲۶۳
	S=۰/۸	۶۸۳۷۷	۸۲۸۱۹۰	۲۵۵۷۹۰	۴۵۶۴۸	۳۴۴۰۶۰	۲۱۱۸۷۰	۴۵۷۱۷	۳۷۱۷۷۰	۲۱۰۸۲۰
	S=۱	۴۱۲۷۲	۳۳۵۰۱۰	۹۷۹۵۴	۲۷۵۵۱	۲۴۵۲۷۰	۷۷۵۸۱	۲۷۸۳۳	۳۳۲۴۷۰	۷۷۸۳۰
سود خازن‌گذاری	S=۰/۵	۰	۰	۰	۳۰۶۹/۴	۱۷۷۲۵۳	۸۸۴۸	۳۰۸۲/۶	۱۷۸۵۰۶	۱۰۱۷۴
	S=۰/۸	۰	۰	۰	۲۲۷۲۹	۴۸۴۱۳۰	۴۳۹۲۵	۲۲۶۶۰	۴۵۶۴۲۰	۴۴۹۷۵
	S=۱	۰	۰	۰	۱۳۷۲۱	۸۹۷۴۰	۲۰۳۷۳	۱۳۴۳۹	۲۵۴۰	۲۰۱۲۴

## ۵-۵ جمع‌بندی

در این فصل نتایج حاصل از شبیه‌سازی برنامه خازن‌گذاری بیان شد. شبیه‌سازی روی دو سیستم تست نمونه با شرایط مختلف بارگذاری و بارهای غیرخطی مختلف اجرا شد. همچنین به منظور واقعی سازی هرچه بیشتر نتایج، با مدل‌سازی بارهای شبکه به صورت تابعی از ولتاژ برنامه خازن‌گذاری را انجام دادیم. در فصل بعد به نتیجه‌گیری و بیان پیشنهادهایی برای ادامه کار می‌پردازیم.

فصل ششم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶-۱ نتیجه گیری

افت ولتاژ و تلفات مهم‌ترین مسئله در سیستم‌های توزیع می‌باشد. این موضوع ضمن اینکه موجب افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری شبکه می‌شود، نارضایتی مشتریان را به دلیل عدم تأمین پروفیل ولتاژ مسطح به همراه دارد. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ سیستم‌های توزیع جبران توان راکتیو موردنیاز شبکه توسط خازن‌های موازی به صورت محلی می‌باشد. در این پایان‌نامه انواع روش‌های خازن‌گذاری بیان شد و مزایا و معایب هرکدام مورد بررسی قرار گرفت. مسائل مهمی در خازن‌گذاری سیستم توزیع وجود دارد که باید به آن‌ها توجه کرد. از جمله این مسائل می‌توان به در نظر گرفتن خازن‌ها به صورت گسسته و مطابق با مقادیر خازنی موجود در بازار، در نظر گرفتن سطوح مختلف بار، وجود بارهای غیرخطی و در نظر گرفتن هارمونیک‌ها، در نظر گرفتن مدل بار به منظور واقعی سازی هرچه بیشتر نتایج اشاره نمود. در این پایان‌نامه با استفاده از روش پیشنهادی، خازن‌گذاری در خطوط توزیع ۳۳ و ۶۹ باسه استاندارد IEEE در حضور انواع بارهای غیرخطی انجام شد. بنابراین با در نظر گرفتن موارد فوق نتایج زیر حاصل گردید:

۱- استفاده از خازن‌ها در شبکه‌های توزیع شعاعی باعث کاهش سطح تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه می‌شود.

۲- خازن‌گذاری با در نظر گرفتن شرایط هارمونیک منجر به ارزیابی دقیق‌تری از هزینه‌ها و تلفات در سیستم توزیع می‌شود. نصب خازن بدون در نظر گرفتن هارمونیک‌ها می‌تواند منجر به پدیده رزونانس و آسیب‌های جدی به تجهیزات سیستم توزیع شود.

۳- در نظر گرفتن هارمونیک‌ها در مسئله خازن‌گذاری، به دلیل محدودیت‌های رزونانسی میزان خازن تخصیص‌یافته به شبکه را کاهش می‌دهد.

۴- در نظر گرفتن قید انحراف هارمونیک، سود حاصل در خازن‌گذاری را کاهش می‌دهد ولی با توجه به نقش مهم خازن‌ها در انتشار جریان‌های هارمونیک، به منظور جلوگیری از افزایش میزان

THD از حد مجاز، در نظر گرفتن این قید در شبکه‌هایی که دارای بارهای غیرخطی هستند لازم می‌باشد.

۵- در شبکه‌هایی که دارای بارهای غیرخطی هستند، با افزایش سطح بار، میزان اعوجاج هارمونیک افزایش می‌یابد. پس از نصب خازن و افزایش سطح ولتاژ باس‌ها به دلیل جبران توان راکتیو توسط خازن، اعوجاج هارمونیک افزایش می‌یابد که با تعیین قیدی با عنوان حداکثر اعوجاج هارمونیک شبکه، این پارامتر را کنترل می‌کنیم.

## ۶-۲ پیشنهادات

در این پایان‌نامه کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ تنها با استفاده از خازن انجام شده‌است که می‌توان به منظور دستیابی هرچه بیشتر به این اهداف موارد زیر را لحاظ کرد:

۱. به منظور افزایش قابلیت اطمینان شبکه علاوه بر خازن از منابع تولید پراکنده کمک گرفت و جایابی و مقدار یابی خازن‌ها و منابع تولید پراکنده به صورت هم‌زمان انجام شود.

۲. به منظور حذف جریان‌های هارمونیک و استفاده از مقادیر بیشتر بانک‌های خازنی به منظور کاهش تلفات و افزایش سطح ولتاژ از فیلترهای اکتیو استفاده شود.

۳. با توسعه الگوریتم پخش بار هارمونیک مورد استفاده در این پایان‌نامه می‌توان از سایر تجهیزات موجود در سیستم‌های توزیع از قبیل رگولاتورها<sup>۱</sup>، ادوات FACTS، سوئیچ‌ها، ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه برای رسیدن به اهداف مسئله استفاده کرد.

۴. می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تعیین مقدار مناسب تپ ترانس‌های توزیع به منظور بهبود پروفیل ولتاژ در کنار مسئله خازن‌گذاری استفاده کرد.

---

<sup>۱</sup>. Regulators





## مراجع

- [1] Das J. "Power system analysis: short-circuit load flow and harmonics": CRC press; 2002.
- [2] M. Delfanti, G.P. Granelli, P. Marannino, and M. Montagna, "Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms," IEEE Trans. Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 1041–1046, 2000.
- [3] Y.T. Hsiao and C.Y. Chien, "Optimization of capacitor allocation using an interactive trade-off method," IEE Proceedings, Generation, Transmission, and Distribution, vol. 148, no. 4, pp. 371–374, 2001.
- [4] "IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors", IEEE Std. 1036-1992, 1992.
- [5] Dwyer, A., "The use of shunt capacitors applied for line loss savings", in Proc. 1992 CEA Conference, Apr. 1992.
- [6] T. Marx, "The Why and How of Power Capacitor Switching": Fisher Pierce, Mar. 1991.
- [7] S.H. Lee and J.J. Grainger, "Optimum placement of fixed and switched capacitors on primary distribution feeders," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 100, no. 1, pp. 345–352, Jan. 1981.
- [8] J.J. Grainger and S.H. Lee, "Optimum size and location of shunt capacitors for reduction of losses on distribution feeders," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 100, no. 3, pp. 1105–1118, Mar. 1981.
- [9] M.M.A. Salama, A.Y. Chikhani, and R. Hackam, "Control of reactive power in distribution systems with an end-load and fixed load conditions," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 104, no. 10, pp. 2779–2788, Oct. 1985.
- [10] H.N. Ng, M.M.A. Salama, A.Y. Chikhani, "Classification of capacitor allocation techniques," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 15, no. 1, pp.387–392, Jan. 2000.16. T. Marx, "The Why and How of Power Capacitor Switching": Fisher Pierce, Mar. 1991.

- [11] Duran, H., "Optimum number, location and size of shunt capacitors in radial distribution feeders, A dynamic programming approach", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 87, no. 9, pp. 1769-1774, Sept. 1968.
- [12] Fawzi, T. H., Ei-Sobki, S. M. and Abdel-Halim, "New approach for the application of shunt capacitors to the primary distribution feeders", Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 102, no. 1, pp. 10-13, Jan. 1983.
- [13] Baran, M. E. and Wu, F. F., "Optimal capacitor placement on radial distribution system", IEEE Trans. Power Delivery, vol.4, no. 1, pp. 725-734, Jan. 1989.
- [14] Baldick, R. and Wu, F., "Efficient integer optimization algorithms for optimal coordination of capacitor and regulators", IEEE Trans Power system , vol. 5, no. 3, pp. 805-812, Aug. 1990.
- [15] Yu, X.-m., X.-Y. Xiong, and Y.-w. Wu, "A PSO-based approach to optimal capacitor placement with harmonic distortion consideration". Electric Power Systems Research, 2004. 71(1): p. 27-33.
- [16] Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H. and Lee, S. H., "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 1217-1223, July 1988.
- [17] Tylor, T. and Lubkeman, D., "Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration", IEEE Trans. Power Delivery, vol.5, no.1, pp.39-246, Jan.1990.
- [18] Abdel-salam, T. S., Chikhani, A.Y. and Hackam, R., "A new technique for loss reduction using compensating capacitors applied to distribution systems with varying load condition", IEEE Trans. Power Delivery, vol.9,no.2,pp.819-827, Apr. 1994.
- [19] Chis, M., Salama, M.M.A, Jayaram, J., (1997). "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies." IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution 144(3): 225-230.
- [20] Vignaux, G.A. and Z. Michalewicz, "A genetic algorithm for the linear transportation problem". Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on, 1991. 21(2): p. 445-452.

- [21] Goldberg, D.E., B. Korb, and K. Deb, "Messy genetic algorithms: Motivation, analysis, and first results". *Complex systems*, 1989. 3(5): p. 493-530.
- [22] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". *Proceedings of IEEE conference on neural networks*, 1995. p. 1942–8.
- [23] Ghose, T. and Goswami, S. K., "Effects of unbalances and harmonics on optimal capacitor placement in distribution system", *Electric Power Systems Research* 68 (2004) 167\_173.
- [24] Kirkpatrick, S. , Gelatt, C. D. , and Vecchi, M. P. , "Optimization by simulated annealing, *Science*", Vol. 220, pp. 671-680 1983
- [25] Cerny, V. , "A thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm", *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 45, pp. 41-51, 1985
- [26] T. Ananthapadmanabha, A.D. Kulkarni, A.S. Gopala Rao, and K.Raghavendra Rao, "Knowledge-based expert system for optimal reactive power control in distribution system," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 27–31, 1996.
- [27] C.C. Liu and T. Dillon, "State-of-the-art of expert system applications to power systems," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 14, no. 2, pp.86–92, 1992.
- [28] M.M.A. Salama and A.Y. Chikhani, "An expert system for reactive power control of a distribution systems, Part 1: System configuration," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 940–945, Apr. 1992.
- [29] J.R.P.R. Laframboise, G. Ferland, A.Y. Chikhani, and M.M.A. Salama, "An expert system for reactive power control of a distribution system, Part 2: System implementation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no.3, pp. 1433–1441, Aug. 1995.
- [30] M.M.A. Salama, A.Y. Chikhani, and R. Hackam, "Control of reactive power in distribution systems with an end-load and fixed load conditions," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 10, pp. 2779–2788, Oct. 1985.

- [31] M.M.A. Salama, E.A.A. Mansour, A.Y. Chikhani, and R. Hackam, "Control of reactive power in distribution systems with an end-load and varying load conditions," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 104, no. 4, pp. 941–947, Apr. 1985.
- [32] Zadeh, L. A. (1965). "Fuzzy sets." *Information and control* 8(3): 338-353.
- [33] M.A.S. Masoum, A. Jafarian, M. Ladjevardi, E.F. Fuchs, and W.M. Grady, "Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 822–829, Apr. 2004.
- [34] Lee, C.-S., H.V.H. Ayala, and L. dos Santos Coelho, "Capacitor placement of distribution systems using particle swarm optimization approaches". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015. 64: p. 839-851.
- [35] Taher, S.A., A. Karimian, and M. Hasani, "A new method for optimal location and sizing of capacitors in distorted distribution networks using PSO algorithm". *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2011. 19(2): p. 662-672.
- [36] Chang, G.W., Chang, W.C., Chuang, C.H., Shin, D.Y., "Fuzzy logic and immune-based algorithm for placement and sizing of shunt capacitor banks in a distorted power network". *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2011. 26(4): p. 2145-2153.
- [37] Ramadan, H.A., Wahab, M.A.A., El-Sayed, A.H.M., Hamada, M., "A fuzzy-based approach for optimal allocation and sizing of capacitor banks". *Electric Power Systems Research*, 2014. 106: p. 232-240.
- [38] Abul'Wafa, A.R., "Optimal capacitor placement for enhancing voltage stability in distribution systems using analytical algorithm and Fuzzy-Real Coded GA". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014. 55: p. 246-252.
- [39] El-Fergany, A.A. and A.Y. Abdelaziz, "Capacitor placement for net saving maximization and system stability enhancement in distribution networks using artificial bee colony-based approach". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014. 54: p. 235-243.

- [40] Aman, M., Jasmon, G., Bakar, A., Mokhlis, H., Karimi, M., "Optimum shunt capacitor placement in distribution system—A review and comparative study". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. 30: p. 429-439.
- [41] S. F. Mekhamer, S. A. Soliman, M. A. Moustafa, and M. E. El- Hawary, "Application of Fuzzy Logic for Reactive-Power Compensation of Radial Distribution Feeders," *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.18, No.1, February 2003 p. 206-213
- [42] J. P. Chiou, C. F. Chang, C. T. Su, "Capacitor placement in large-scale distribution systems using variable scaling hybrid differential evolution," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 10, pp. 739-745, 2006
- [43] Su CT, Tsai CC. "A new fuzzy-reasoning approach to optimum capacitor allocation for primary distribution systems," *Proceedings of the IEEE international conference on industrial technology*, December 1996. p. 237–41
- [44] Mohkami, H., R. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Fuzzy optimal placement of capacitors in the presence of nonlinear loads in unbalanced distribution networks using BF-PSO algorithm". *Applied Soft Computing*, 2011. 11(4): p. 3634-3642.
- [45] Chiang HD, Wang JC, Cocking O. "Optimal capacitor placements in distribution systems: part 1: a new formulation and the overall problem" *IEEE Trans Power Delivery* 1990: p. 634–42.
- [46] Sundharajan S, Pahwa A. "Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm" *IEEE Trans Power System* 1994: p. 1499–507
- [47] Attia A. El-Fergany, Almoataz Y. Abdelaziz, "Capacitor placement for net saving maximization and system stability enhancement in distribution networks using artificial bee colony- based approach," *Electrical Power and Energy Systems* 54 (2014) 235–243
- [48] R. Srinivasas Rao, S.V.L. Narasimham, M. Ramalingaraju, "Optimal capacitor placement in a radial distribution system using Plant Growth Simulation Algorithm," *Electrical Power and Energy Systems* 33 (2011) 1133–1139
- [49] Natarajan R. "Computer-aided power system analysis": CRC Press; 2002.

- [50] Dugan RC, McGranaghan MF, Beaty HW. "Electrical power systems quality". New York, NY: McGraw-Hill,| c1996. 1996;1.
- [51] Shuter, T., H. Vollkommer Jr, and T. Kirkpatrick, "Survey of harmonic levels on the American electric power distribution system". Power Delivery, IEEE Transactions on, 1989. 4(4): p. 2204-2213.
- [52] Etezadi-Amoli, M. and T. Florence, "Voltage and current harmonic content of a utility system"-A summary of 1120 test measurements. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1990. 5(3): p. 1552-1557.
- [53] Herraiz, S., L. Sainz, and J. Clua, "Review of harmonic load flow formulations". Power Delivery, IEEE Transactions on, 2003. 18(3): p. 1079-1087.
- [54] Shokri, M., Othman, M., Abdul Razak, M., Musirin, I., Zakaria, Z., Kari, M., "A direct approach used for solving the distribution system and harmonic load flow solutions". in Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International. 2013. IEEE.
- [55] Abul'Wafa, A.R., "A new heuristic approach for optimal reconfiguration in distribution systems". Electric Power Systems Research, 2011. 81(2): p. 282-289.
- [56] Teng, J.-H., "A direct approach for distribution system load flow solutions". Power Delivery, IEEE Transactions on, 2003. 18(3): p. 882-887.
- [57] Taher, S.A., M. Hasani, and A. Karimian, "A novel method for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems with nonlinear loads and DG using GA". Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011. 16(2): p. 851-862.
- [58] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std 519-1992, New York, NY, 1993.
- [59] Kundur, P., N.J. Balu, and M.G. Lauby, "Power system stability and control". Vol. 7. 1994: McGraw-hill New York.

[60] Eminoglu, U. and M.H. Hocaoglu, “A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models”. *Electric power systems research*, 2005. 76(1): p. 106-114.

[61] Park, J.-Y., J.-M. Sohn, and J.-K. Park, “Optimal capacitor allocation in a distribution system considering operation costs”. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2009. 24(1): p. 462-468.

[62] Ulinuha, A., M. Masoum, and S. Islam. “Harmonic power flow calculations for a large power system with multiple nonlinear loads using decoupled approach”. in *Power Engineering Conference, 2007. AUPEC 2007. Australasian Universities. 2007. IEEE*.



## **Abstract:**

Shunt capacitors are usually installed in a distribution system to reduce power losses, improve voltage profile, increase capacities of distribution lines and transformers, and improve power factor. Power electronic and electromagnetic devices generate and inject considerable harmonic currents into the power system. If the shunt capacitors are not properly selected and placed in the power system, they can amplify these harmonics and can cause harmonic parallel resonances. Therefore, analyses, simulation, and optimal selection of capacitor banks under harmonic conditions should be investigated.

The purpose of this thesis is to find the optimal placement and sizing of fixed capacitor banks in radial distribution networks in the presence of current harmonics. In this thesis, the objective function includes the cost of power losses, energy losses, and cost of capacitor banks with constraints include voltage limits, number, size and locations of installed capacitors, and the power quality limits consist of total harmonic distortion and reactive power injection from capacitors. In addition, the effect of load modeling in the capacitor placement is studied in this thesis. The proposed method has employed genetic and particle swarm algorithm to find the optimal placement of the capacitors.

The proposed algorithms is simulated on the 33 and 69-bus test system. The results of the simulation show the ability of the proposed algorithms to locate the capacitors in the presence of linear and non-linear loads. Since the voltage dependent loads are considered in the simulation, The results show that the load modeling affects the placement of the capacitors.

**Keywords:** Capacitor placement, Distribution system, Non-linear loads, Load modeling, Genetics algorithm, Particle swarm optimization



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

# **Optimal capacitor placement in distribution system in harmonic environment**

**Seyed Mohammad Rasekhi**

**Supervisor:**

**Dr. Mahdi Banejad**

**Thesis Submitted for the Degree of Master of Science**

**December 2014**