**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

# خازن‌گذاری بهینه در سیستم توزیع نامتعادل و در حضورهارمونیک‌ها

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

**سید رسول حسینی**

استاد راهنما

**محمد اسماعیل همدانی گلشن**

**۱۳۸۹**

به نام خداوند بخشنده‌ی مهربان

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

# خازن‌گذاری بهینه در سیستم توزیع نامتعادل و در حضور بارهای هارمونیکی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

**سید رسول حسینی**

استاد راهنما

**محمد اسماعیل همدانی گلشن**

۱۳۸۹

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت آقای سید رسول حسینی

تحت عنوان

# خازن‌گذاری بهینه در سیستم توزیع نامتعادل و در حضور بارهای‌هارمونیکی

در تاریخ ۸۹/۱/۲۵ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه | دکتر محمداسماعیل همدانی گلشن |
| ۲- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر مازیار پالهنگ |
| ۳- استاد داور | دکتر اکبر ابراهیمی |
| ۴- استاد داور | دکتر غلامرضا یوسفی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر سید محمود مدرس‌هاشمی |

## تقدیر و سپاس

خدای بزرگ را شاکرم که مرا یاری کرد و توانایی داد تا این کار را به سرانجام برسانم. بر خود لازم می‌دانم از زحمات تمامی افرادی که در انجام این پایان‌نامه مرا یاری کرده‌اند تشکر کنم. از زحمات استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر همدانی گلشن بخاطر بذل توجه ایشان در طول پروژه و رهنمودهای ارزشمندشان در هر چه بهتر شدن کیفیت کار، که صبورانه بنده را در انجام پایان نامه یاری نمودند، کمال تشکر را دارم. از آقای دکتر مازیار پالهنگ که زحمت مشاوره پایان‌نامه را بر عهده داشتند، سپاس‌گزاری می‌کنم. همچنین از آقای مهندس سید یاسر درخشنده جهت رفع تمامی مشکلات خود سپاسگزارم.

از جناب آقای دکتر مدرس هاشمی سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده برق و کامپیوتر و خانم نکویی مسئول آموزش تحصیلات تکمیلی بخاطر زحمت‌های فراوان در امر آموزش، تشکر می‌کنم.

از محبت‌های دوستان گرامی بخصوص آقایان محمود عیوضی، محمد اکبری، دکتر سید مسعود حسینی، محمد جواد نوروزی، اسماعیل خلخالی، مهدی جعفری، یاسر دامچی، محمود حسنی، مصطفی قاسمی، مجید جودکی، مجید مرادلو، مجید خادمی، ایوب باقری، محمد یحیایی، سید محمود نصرالهی و دیگر دوستان که در طول دوره کارشناسی ارشد در کنار هم بودیم، تشکر کرده و آرزوی موفقیت برای ایشان در تمام مراحل زندگی را دارم.

**کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

تقدیم به:

مادر دلسوزم

خواهران و برادران عزیزم

و به یاد پدر سفر کرده‌ام

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ..... ۱

**فصل اول: مقدمه**

۱-۱ مقدمه ..... ۲

۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده ..... ۳

۱-۳ روند مطالب ارائه شده ..... ۶

**فصل دوم: خازن‌گذاری در شبکه توزیع** **۷**

۲-۱ مقدمه ..... ۷

۲-۲ تکنیک‌های تخصیص خازن بهینه ..... ۸

۲-۲-۱ روش‌های تحلیلی .....

۲-۲-۲ روش‌های برنامه‌ریزی عددی ..... ۹

۲-۲-۳ روش‌های مکاشفه‌ای ..... ۱۰

۲-۲-۴ روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی(AI) ..... ۱۱

۲-۳ روش‌های هوش مصنوعی برای حل مسأله خازن‌گذاری ..... ۱۱

۲-۳-۱ الگوریتم ژنتیک ..... ۱۲

۲-۳-۲ ترکیب روش فازی و ژنتیک(FUZZY-GA) ..... ۱۳

۲-۳-۳ بهینه سازی توابع هدف چند منظوره با توابع هدف فازی ..... ۱۳

۲-۳-۴ الگوریتم مبتنی بر آهنگ تدریجی سرد شدن فلزات (SA) ..... ۱۳

۲-۴ انتخاب روش ..... ۱۴

۲-۴-۱ مسأله‌ی مورد نظر ..... ۱۴

۲-۴-۲ پیچیدگی مسأله ..... ۱۵

۲-۴-۳ دقت مورد انتظار برای نتایج ..... ۱۵

۲-۴-۴ قابلیت پیاده‌سازی در عمل ..... ۱۵

۲-۵ سطوح مختلف مسأله خازن‌گذاری ..... ۱۵

۲-۶ مراحل حل مسأله خازن‌گذاری ..... ۱۷

۲-۶-۱ تابع هدف و قیود مناسب ..... ۱۷

**فصل سوم: معرفی و تشریح الگوریتم بهینه سازی فرا مکاشفه ای** PSO **۱۹**

۳-۱ مقدمه ..... ۱۹

۳-۲ تعاریف و تاریخچه پیدایش ..... ۲۰

۳-۳ انواع همبندی و اصل همسایگی ..... ۲۱

۳-۳-۱ همبندی ستاره ..... ۲۱

۳-۳-۲ همبندی حلقه ..... ۲۲
۳-۳-۳ همبندی چرخی ..... ۲۲
۳-۴ الگوریتم‌های PSO ..... ۲۲
۳-۴-۱ الگوریتم بهترینِ فردی ..... ۲۴
۳-۴-۲ الگوریتم بهترینِ سراسری ..... ۲۵
۳-۴-۳ الگوریتم بهترینِ محلی ..... ۲۶
۳-۵ پارامترهای PSO ..... ۲۷
۳-۵-۱ بررسی چگونگی تاثیرضرایب C1 و C2 در روند همگرایی الگوریتم PSO ..... ۲۷
۳-۵-۲ حداکثر سرعت ..... ۲۸
۳-۵-۳ بررسی چگونگی تاثیر وزن اینرسی، w، در روند همگرایی الگوریتم PSO ..... ۲۸
۳-۵-۴ ضریب انقباض ..... ۳۰
۳-۵-۵ بعد مسأله ..... ۳۰
۳-۵-۶ تعداد ذرات ..... ۳۰
۳-۵-۷ اندازه همسایگی ..... ۳۱
۳-۶ PSO دوتایی یا BPSO ..... ۳۱
۳-۷ مقایسه الگوریتم PSO با الگوریتم ژنتیک (GA) ..... ۳۲
**فصل چهارم: تجزیه و تحلیل فیدرهای توزیع در حالت ماندگار ۳٤**
۴-۱ مقدمه ..... ۳۴
۴-۲ ضرورت پرداختن به مسأله پخش باردر سیستم‌های توزیع به طور خاص ..... ۳۵
۴-۳ مدل‌های بار ..... ۳۶
۴-۴ خازن‌های شنت ..... ۳۷
۴-۵ تجزیه و تحلیل فیدرهای توزیع با روش پیش رو-پس رو ..... ۳۷
۴-۵-۱ فیدر شعاعی در حالت کلی ..... ۳۷
۴-۶ فیدر توزیع سه فاز نامتعادل ..... ۴۰
۴-۶-۱ اجزاء سری ..... ۴۰
۴-۶-۲ عناصر شنت ..... ۴۲
۴-۶-۳ استفاده از روش نردبانی برای فیدر سه فاز نامتعادل ..... ۴۲
۴-۷ پخش بارهارمونیکی در سیستم متعادل ..... ۴۳
۴-۸ پخش بارهارمونیکی در سیستم نامتعادل ..... ۴۷
۴-۸-۱ ساخت ماتریس ادمیتانس گره ..... ۴۸
**فصل پنجم: انتخاب باس‌های کاندیدا برای نصب خازن ۵۵**
۵-۱ مقدمه ..... ۵۵
۵-۲ شاخص حساسیت ..... ۵۶
۵-۳ تحلیل حساسیت ..... ۵۶
۵-۳-۱ آنالیز حساسیت با استفاده از ماتریس ژاکوبین ..... ۵۶

۵-۳-۲ تحلیل حساسیت با استفاده از مشتق گیری تابع تلفات نسبت به توان تزریقی باس‌ها ۵۷
**فصل ششم: خازن‌گذاری در حالت متعادل ۶۱**
۶-۱ مقدمه ۶۱
۶-۲ حل مسأله خازن‌گذاری با الگوریتم PSO ۶۲
۶-۲-۱ تعریف ذره در مسأله خازن‌گذاری ۶۲
۶-۲-۲ تعریف جمعیت در قالب PSO دوتایی ۶۳
۶-۲-۳ ابتکار بکار رفته در انتخاب جمعیت اولیه تصادفی ۶۴
۶-۳ خازن‌گذاری در شبکه‌های متعادل و سینوسی ۶۶
۶-۳-۱ سیستم تست ۹ باس ۶۶
۶-۳-۲ سیستم تست ۶۹ باس ۶۹
۶-۳-۲ خازن‌گذاری با در نظر گرفتن مطالعات اقتصادی در شبکه ۷۴
۶-۴ خازن‌گذاری در سیستم متعادل و در حضورهارمونیک‌ها ۷۹
۶-۴-۱ خازن‌گذاری در سیستم توزیع بدون در نظر گرفتن قیود ۸۰
۶-۴-۲ خازن‌گذاری با در نظر گرفتن قید THD ۸۱
۶-۴-۱ خازن‌گذاری با در نظر گرفتن قید ولتاژ ۸۳
**فصل هفتم: خازن‌گذاری در سیستم نامتعادل ۸۵**
۷-۱ مقدمه ۸۵
۷-۲ محاسبه تلفات در شرایط نامتعادل و غیرسینوسی ۸۶
۷-۲-۱ محاسبه تلفات ناشی از مولفه اصلی جریان ۸۶
۷-۲-۲ محاسبه تلفات ناشی از مولفه‌های‌هارمونیکی ۸۸
۷-۳ خازن‌گذاری در سیستم تست ۱۳ باس ۸۸
۷-۳-۱ استفاده از مقادیر مختلف خازنی در فازهای مختلف(بانک سه فاز نامتعادل) ۸۹
۷-۳-۲ استفاده از مقادیر خازنی یکسان در فازهای مختلف(بانک سه فاز متعادل) ۹۴
۷-۴ خازن‌گذاری در سیستم تست ۳۴ باس ۹۶
۷-۴-۱ خازن‌گذاری با مقادیر خازنی نامتعادل ۹۶
۷-۴-۲ خازن‌گذاری با خازن متعادل ۹۹
۷-۴-۳ خازن‌گذاری در سیستم ۳۴ باس با در نظر گرفتن نرخ تورم و نرخ بهره در طول افق برنامه ریزی ۱۰۰
۷-۵ خازن‌گذاری در سیستم سه فاز نامتعادل و در حضورهارمونیک‌ها ۱۰۳
۷-۵-۱ خازن‌گذاری در سیستم تست ۳۴ باس در حضورهارمونیک ۱۰۳
**فصل هشتم: نتیجه‌گیری ۱۰۸**
مراجع ۱۲۰

**چکیده**

جایابی خازن در شبکه‌های توزیع به منظور کاهش تلفات انرژی، کاهش تلفات توان، آزاد سازی ظرفیت تجهیزات نصب شده در سیستم توزیع و بهبود پروفیل ولتاژ یکی از موضوعات شناخته شده در بهره برداری موثر از سیستم‌های توزیع است. با وجود استفاده از خازن‌های شنت در سیستم‌های توزیع، تلفات در این شبکه‌ها همچنان می‌تواند قابل توجه باشد که این به دلیل در نظر گرفتن برخی از شرایط عملی نظیر نامتعادلی سیستم و وجود بارهای غیرخطی است. نامتعادلی خطوط سه فاز، بارگذاری نامتعادل و وجود خطوط تکفاز و دوفاز در سیستم توزیع، باعث ایجاد شرایط عدم تعادل در سیستم توزیع می‌گردد. استفاده وسیع از بارهای غیرخطی و عناصر الکترونیک قدرت، باعث تولید و تزریق جریان‌های هارمونیکی به سیستم قدرت می‌شود. مسأله کلی جایابی خازن در سیستم‌های توزیع شامل تعیین محل بهینه، نوع و اندازه خازن‌ها به گونه ای است که تلفات انرژی همزمان با هزینه خازن‌ها حداقل شود.

در این پایان نامه مسأله خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع نامتعادل و در حضور هارمونیک‌ها در قالب یک مسأله بهینه سازی با متغیرهای گسسته مورد مطالعه قرار گرفته و پارامترهای اقتصادی همچون هزینه خازن‌ها و نرخ تورم و بهره برای ارزیابی اقتصادی دقیق تر در نظر گرفته می شوند. برای حل مسأله از الگوریتم PSO دوتایی استفاده می‌شود. الگوریتم‌های مختلف خازن‌گذاری بر روی چندین سیستم تست توزیع متعادل و نامتعادل بکار گرفته می‌شوند.

کلمات کلیدی: ۱- خازن‌گذاری ۲- سیستم توزیع نامتعادل ۳- بار غیر خطی ۴- الگوریتم PSO

# فصل اول
# مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

موضوع تلفات از دیر زمان در شبکه‌های الکتریکی مورد توجه کارشناسان و مدیران شرکت‌های برق بوده است و از ابتدای گسترش سیستم‌های برق‌رسانی همواره برای کاهش آن تلاش‌هایی صورت گرفته است. با این وجود، آمار تلفات همچنان بالا بوده و هر ساله آمار و ارقام قابل توجهی از انرژی‌های هدر رفته در قسمت‌های مختلف سیستم‌های قدرت، اعم از خطوط انتقال، توزیع و یا ترانسفورماتورها منتشر می‌شود که این آمار در هر کشور گویای همت و تلاش مسئولین و دست‌اندرکاران سیستم آن کشور در توجه به مسأله تلفات است.

از جمله اقداماتی که برای کاهش تلفات انجام گرفته می‌توان به افزایش سطح ولتاژ، برای انتقال توانهای بزرگ در مسیرهای طولانی اشاره کرد. اما به علت برخی دلایل از جمله بالا رفتن سطح ایزولاسیون و در نتیجه افزایش هزینه شبکه‌ها، انجام این کار در سیستم توزیع با محدودیت روبرو است. از زمانی که مسأله جبران توان راکتیو مطرح شد، متخصصان برق به این فکر افتادند که هر چند کاهش تلفات ناشی از انتقال توان با افزایش سطح مقطع خطوط، ممکن است توجیه اقتصادی کمی‌داشته باشد، اما می‌توان بوسیله جبران کننده‌ها، انتقال توان راکتیو را کاهش داد تا تلفات ناشی از انتقال این توان کمتر شود. لذا مسأله خازن‌گذاری در شبکه توزیع برای کاهش تلفات انرژی، بهبود پروفیل ولتاژ، افزایش ظرفیت خطوط توزیع و ترانسفورماتورها و بهبود ضریب توان مطرح گردید[۱].

مسأله جایابی خازن در سیستم‌های توزیع در حالت کلی شامل تعیین محل، نوع و اندازه خازن‌ها به گونه ای است که تلفات توان و انرژی حداقل شود در حالیکه هزینه خازن‌ها هم به حساب آید. با این وجود تخصیص خازن بهینه کار آسانی نیست. در اکثر روش‌های مهندسی برای تعیین محل خازن‌ها در شبکه‌های توزیع، بعلت پیچیدگی روابط اصلی، فرضیاتی در نظر گرفته شده است که دور از واقعیت است و باعث نتایج تقریبی می‌شود. از جملهٔ این فرضیات این است که توزیع بارها در شبکه یکنواخت بوده یا اینکه شبکه یک خط مستقیم و بدون انشعاب با سطح مقطع یکسان است. از دیگر فرضیات در نظر گرفته شده می‌توان به جایابی بهینه خازن‌های شنت در شبکه‌هایی با کمیت‌های سینوسی اشاره نمود که بدین ترتیب از تأثیرهارمونیک‌ها بطور کلی چشم پوشی می‌گردد[۲]. گسترش وسیع استفاده از لامپ‌های فلورسنت با بازده بالا، عناصر الکترونیک قدرت و الکترومغناطیسی باعث تولید و تزریق قابل ملاحظه جریان‌های‌هارمونیکی به سیستم قدرت می‌شود. اگر بانک‌های خازنی شنت بطور مناسب انتخاب نشوند می‌توانند موجب تقوی هارمونیک‌ها شده و کیفیت توان سیستم را به سطح غیر قابل قبول کاهش دهند. همچنین می‌توانند باعث ایجاد رزونانس‌های‌هارمونیکی موازی در سیستم گردند[۳] .

مطالعات اولیه روی مسأله خازن‌گذاری منجر به تولید الگوریتم‌های حل برای فیدرهای توزیع متعادل گردید. اما در عمل با سیستم توزیع نامتعادل سه فاز شامل فیدرهای تک‌فاز یا دوفاز، فیدرهایی با بارگیری نامتعادل روبرو هستیم[۴]. لذا شرایط عدم تعادل سیستم توزیع نیز باید به نوعی در مسأله بهینه سازی مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، برای رسیدن به بیشترین تأثیر نصب خازن‌ها در سیستم‌های توزیع از نظر کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و آزادسازی ظرفیت تجهیزات همزمان با بکارگیری کمترین ظرفیت خازنی به منظور حداقل کردن هزینه‌ها، لازم است در حد امکان شرایط واقعی کار سیستم‌های توزیع در نظر گرفته شود و فرمول بندی مناسب برای مسأله خازن‌گذاری تدوین گردد.

### ۱-۲ مروری بر کارهای انجام شده

مسأله تخصیص خازن بهینه موضوعی است که تحقیقات زیادی در آن صورت گرفته است. رویکردها از حیث نحوهٔ فرمول‌بندی مسأله و روش‌های حل با یکدیگر متفاوتند. بطور کلی می‌توان روش‌های حل مسأله خازن‌گذاری را به چهار دسته طبقه بندی کرد:

- روش‌های تحلیلی
- روش‌های برنامه ریزی عددی

- روش‌های مکاشفه ای[1]
- روش‌های هوش مصنوعی

کلیهٔ مطالعات اولیهٔ خازن‌گذاری بهینه از روش‌های تحلیلی استفاده کرده‌اند. این الگوریتم‌ها زمانی که ابزار محاسباتی قوی موجود نبوده و یا گران بوده‌اند پیشنهاد گردیده‌اند. از تحقیقات اولیه قانون معروف " $\frac{2}{3}$ " ایجاد شد. قانون $\frac{2}{3}$ بیان می‌داشت که برای حداکثر کاهش تلفات، یک خازن به میزان $\frac{2}{3}$ پیک بار راکتیو باید در محلی به فاصله $\frac{2}{3}$ در طول فیدر نصب شود.

روش‌های تحلیلی از نظر یادگیری و پیاده سازی آسان بودند. به عنوان مثال با وجود فرضیات غیر واقعی اعمال شده در قانون $\frac{2}{3}$، تعدادی از شرکت‌های برق منطقه‌ای هنوز نیز پیاده سازی مسأله خازن‌گذاری را بر اساس این قانون انجام می‌دهند[۵] و بعضی از کارخانه‌های تولید خازن این قانون را در راهنمای کاربردی محصولاتشان عنوان می‌کنند .

در ادامه تحقیقات پیرامون خازن‌گذاری برای رسیدن به نتایج دقیق تر، مدل‌های فیدر بهبود یافتند. گرینجر[۶] و سالاما[۷] فیدرهای معادل را با در نظر گرفتن سایزهای مختلف‌هادی‌در طول فیدر و بار توزیع شده غیر یکنواخت فرمول بندی کردند. گرینجر با یک مثال در[۶] نشان داد که قانون $\frac{2}{3}$ در برخی موارد می‌تواند غیر دقیق باشد و صرفه‌جویی منفی را نتیجه دهد. یک اشکال همه روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی محل‌های خازن‌گذاری و اندازه‌های خازن‌ها بصورت متغیرهای پیوسته است. بنابراین اندازه‌های خازن محاسبه شده ممکن است با اندازه‌های استاندارد موجود مطابقت نداشته و محل‌های بدست آمده نیز ممکن است با محل گره‌های فیزیکی در سیستم توزیع منطبق نباشد. برای گریز ازمشکلات موجود درروش‌های تحلیلی، روش‌های برنامه ریزی عددی توسعه یافتند. دوران[۸] برای اولین بار یک رویکرد برنامه‌ریزی پویا[2]برای حل مسأله خازن‌گذاری استفاده کرد. فرمول‌بندی این مسأله ساده بود و فقط کاهش تلفات انرژی و اندازه‌های مجزای خازنی را در نظرمی‌گرفت. فاوزی[۹] کار انجام شده[۸] را دنبال کرد و ظرفیت KVA آزاد شده را در تابع صرفه‌جویی لحاظ کرد. پاناویکو و رائو[۱۰]یک روش عددی بنام تغییرات محلی استفاده کرده و مسأله را گسترش بیشتری دادند تا اثرات رشد بار و خازن‌های کلیدزنی برای تغییر بار را در نظر بگیرند. بطور مشابه باران و وو [۱۱] و[۱۲] مسأله خازن‌گذاری را با استفاده از برنامه‌ریزی عددی مختلط فرمول‌بندی نمودند. بالدیک و وو[۱۳] با استفاده از برنامه‌ریزی عددی درجه دوم برای هماهنگی عملکرد بهینه کار را ادامه دادند.

ادامه تحقیقات در این زمینه به ظهور رویکردهای مکاشفه ای منجر گردید. روش‌های مبتنی بر تکنیک‌های جستجوی مکاشفه ای برای کاهش تلفات سیستم توزیع از طریق تجدید آرایش معرفی شدند[۱۴] و[۱۵]. عبدالسلام

1. Heuristic
2. Dynamic Programming

در[۱۶] یک تکنیک مکاشفه ای مبتنی بر ایده‌هایی از [۱۴] و[۱۵] برای شناسایی یک بخش در سیستم توزیع با بالاترین تلفات در اثر جریان‌های بار راکتیو پیشنهاد کرد و سپس گره‌های حساس در آن بخش را که بیشترین تأثیر در کاهش تلفات سیستم دارند را دقیقا مشخص نمود. در [۱۷] کار [۱۶] از طریق تعیین گره‌های حساس و با بهینه کردن اندازه‌های خازنی بر اساس حداکثر صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش تلفات انرژی و تلفات توان پیک بطور همزمان بهبود یافت.

محبوبیت روش‌های هوش مصنوعی بسیاری از محققین را به بررسی استفاده از آن‌ها در کاربردهای مهندسی قدرت رهنمون کرد که مسأله خازن‌گذاری از این امر مستثنی نبوده است. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی شامل الگوریتم ژنتیک، سرد کردن شبیه سازی شده، جستجوی ممنوع، سیستم‌های خبره، شبکه‌های عصبی مصنوعی و نظریه مجموعه فازی هستند.[۱۸،۱۹،۲۰و۲۱] از روش فازی-ژنتیک برای حل مسأله خازن گذاری استفاده کرده‌اند. در [۱۸] ولتاژ شین و ماکزیمم سود اقتصادی به عنوان متغیرهای تصمیم در مسأله جایابی خازن هستند. در [۱۹] ابتدا دو هدف، یعنی حداکثر کردن صرفه‌جویی هزینهٔ شبکه و کمینه کردن انحراف ولتاژ گره‌ها فازی شده، سپس اقدام به ترکیب آنها در یک تابع هدف از طریق ضرایب وزنی مناسب می‌کند. در [۲۲] از سرد کردن شبیه سازی شده برای حل مسأله خازن‌گذاری استفاده شده است.

هدف از این پایان‌نامه، تدوین‌فرمول‌بندی‌های مناسب برای مسأله خازن‌گذاری است که در آن علاوه بر در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی، شرایط کار واقعی سیستم‌های توزیع از نظر عدم تعادل و یا وجود هارمونیک‌ها در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه از الگوریتم PSO[۳] برای بهینه سازی مسأله خازن‌گذاری استفاده می‌شود. الگوریتم PSO یکی از الگوریتم‌های فرامکاشفه ای مبتنی بر جمعیت است که قدرت بالایی در یافتن نقطه بهینه در مسأله بهینه سازی دارد. با بکارگیری روش‌های هوش مصنوعی از جمله PSO، فرضیات ساده کننده در مسأله را کنار گذاشته و مسأله را در شرایط واقعی در نظر می‌گیریم. در این تحقیق خازن‌گذاری برای سه حالت از شرایط کار انجام می‌شود. ابتدا الگوریتم یافتن محل و مقدار بهینه خازن در سیستم توزیع متعادل با کمیت‌های سینوسی ارائه و در ادامه فرضیات عدم تعادل سیستم توزیع و وجودهارمونیک‌ها در سیستم نیز در نظر گرفته می‌شود.

[3] . Particle Swarm Optimization

### ۱-۳ روند ارائه مطالب

فصل دوّم به مروری بر کارهای انجام شده در زمینه خازن‌گذاری اختصاص دارد. در این فصل شرح مختصری از روش‌های بکارگرفته شده، ارائه می‌گردد.

در فصل سوّم، به شرح الگوریتم فرامکاشفه ای PSO پرداخته و الگوریتم‌هایPSO و راهبردهای مختلف بکار گرفته شده برای یافتن جواب بهینه در این الگوریتم شرح داده می‌شود.

در فصل چهارم تجزیه و تحلیل فیدرهای توزیع در حالت ماندگار مورد بررسی قرار گرفته و به شرح پخش بار پیش‌رو ــپس‌رو که مختص شبکه‌های توزیع است پرداخته می‌شود. در ادامه این فصل به چگونگی انجام پخش بارهارمونیکی در سیستم متعادل می‌پردازد و روش تعمیم یافته ای از پخش بارهارمونیکی سیستم متعادل، برای سیستم نامتعادل بکار گرفته می‌شود.

در فصل پنجم ضرورت انتخاب باس کاندیدا برای خازن‌گذاری شرح داده می‌شود و به نحوه انتخاب باس کاندیدا به سه روش معمول پرداخته و در پایان نتایج اعمال سه روش برای انتخاب باس کاندیدا در سیستم تست ۶۹ باس ارائه وبا هم مقایسه می‌شوند.

فصل ششم به خازن‌گذاری در سیستم توزیع متعادل می‌پردازد. در ابتدا نحوه پیاده سازی مسأله خازن‌گذاری با الگوریتم PSO شرح داده شده و در ادامه نتایج بدست آمده از خازن‌گذاری در شرایط کار سینوسی وهارمونیکی ارائه می‌گردد.

در فصل هفتم عمل خازن‌گذاری در سیستم توزیع در شرایط عدم تعادل مورد بررسی قرار می‌گیرد. دو حالت خازن‌گذاری یعنی استفاده از بانک نامتعادل و بانک متعادل ارائه می‌شود. همچنین شبیه سازی‌ها در دو حالت شرایط کار سینوسی وهارمونیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. و در انتها نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد در زمینه خازن‌گذاری در فصل هشتم ارائه خواهد شد.

# فصل دوم
# خازن‌گذاری در شبکه توزیع

## ۲-۱ مقدمه

مسأله جایابی خازن در سیستم‌های توزیع در حالت کلی شامل تعیین محل، نوع و اندازه‌ی خازن‌ها به گونه ای است که تلفات توان و انرژی حداقل شود در حالیکه هزینه خازن‌ها هم به حساب آید. با این وجود تخصیص خازن بهینه کار آسانی نیست. بسیاری از تحقیقات قبلی فرضیات ساده کننده‌ای برای ساده‌سازی فرمول‌بندی مسأله بکار گرفته‌اند که در برخی مواقع این فرضیات ممکن است موجب غیرقابل قبول شدن حل شوند.

مسأله تخصیص خازن بهینه موضوعی است که تحقیقات زیادی در مورد آن صورت گرفته است. رویکردها از حیث نحوهٔ فرمول‌بندی مسأله و روش‌های حل با یکدیگر متفاوتند. در این فصل ابتدا در مورد تکنیک‌های حل مسأله خازن‌گذاری و معیارهای انتخاب روش مناسب بحث کرده سپس سطوح مختلف مسأله از ساده تا پیشرفته را بیان کرده و به بررسی رویکردهای حل مسأله در مراجع مختلف خواهیم پرداخت. در این فصل فرض می‌شود که سیستم متعادل و غیرهارمونیکی است و مباحث مرتبط با عدم تعادل و وجودهارمونیک در سیستم در بخش‌های آتی ارائه می‌گردد.

## ۲-۲ تکنیک‌های تخصیص خازن بهینه

تخصیص خازن برای کاهش تلفات در سیستم توزیع الکتریکی مسأله‌ای است که تحقیقات زیادی پیرامون آن صورت پذیرفته است و مقالات منتشر شده که الگوریتم‌های خازن‌گذاری را توصیف می‌کنند، فراوان هستند. روند کلی تکامل این تحقیقات و الگوریتم‌های تخصیص خازن را بصورت زیر طبقه بندی می‌شوند[۱]:

### ۲-۲-۱ روش‌های تحلیلی

کلیهٔ مطالعات اولیهٔ خازن‌گذاری بهینه از روش‌های تحلیلی استفاده کرده‌اند. این الگوریتم‌ها زمانی که ابزار محاسباتی قوی موجود نبوده و یا گران بوده‌اند پیشنهاد گردیده‌اند. روش‌های تحلیلی شامل استفاده از حساب دیفرانسیل و انتگرال برای تعیین حداکثر مقدار تابع صرفه‌جویی[1] است. این تابع اغلب با معادله (۲-۱) بیان می‌شود:

$$S = K_E \Delta E + K_P \Delta P - K_C C \qquad ۱-۲$$

که در آن $K_E \Delta E$ و $K_P \Delta P$ به ترتیب کاهش تلفات انرژی و تلفات پیک توان بعد از خازن‌گذاری و $K_C C$ هزینه خازن را نشان می‌دهند.

پیشگامان خازن‌گذاری بهینه همگی از رویکردهای تحلیلی برای حداکثر کردن توابعی مشابه (۲-۱) استفاده کرده‌اند. گر چه حل‌ها به شکل بسته[2] حاصل شد، این حل‌ها بر اساس فرضیات غیر واقعی نظیر فیدر با اندازه ثابت هادی و بارگذاری یکنواخت استوار بوده و محل و اندازه‌ی خازن‌ها بصورت متغیرهای پیوسته مدل می‌گردیدند. از تحقیقات اولیه قانون معروف " $\frac{2}{3}$ " ایجاد شد. قانون $\frac{2}{3}$ بیان می‌داشت که برای حداکثر کاهش تلفات، یک خازن به میزان $\frac{2}{3}$ پیک بار راکتیو باید در محلی به فاصله $\frac{2}{3}$ در طول فیدر نصب شود.

روش‌های تحلیلی اولیه برای یادگیری و پیاده سازی آسان بودند. با وجود فرضیات غیر واقعی اعمال شده در قانون $\frac{2}{3}$، تعدادی از شرکت‌های برق منطقه‌ای هنوز نیز پیاده سازی مسأله خازن‌گذاری را بر اساس این قانون انجام می‌دهند[۵] و بعضی از کارخانه‌های تولید خازن این قانون را در راهنمای کاربردی محصولاتشان عنوان می کنند .

برای رسیدن به نتایج دقیق تر، مدل‌های فیدر بهبود یافتند. گرینجر[٦] و سالاما[۷] فیدرهای معادل را با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف‌هادی‌در طول فیدر و بار توزیع شده غیر یکنواخت فرمول بندی کردند. گرینجر همچنین طراحی خازن‌های کلیدزنی را نیز در این الگوریتم‌ها معرفی کرده و با وارد کردن رگولاتور در مقالات بعدی، تحقیقات خود را در خازن‌گذاری بهبود بیشتری داد. روش‌های تحلیلی اخیر، امکان مدل‌سازی واقعی از فیدر

---

1. Saving function
2. Close form

های شعاعی را فراهم کرده و تغییرات بار سیستم‌های توزیع را نیز در نظر می‌گیرند. برای نشان دادن بیشتر اهمیت مدل‌سازی مناسب فیدرهای توزیع و در نظر گرفتن تغییرات بار، گرینجر با یک مثال در [٦] نشان داد که قانون $\frac{2}{3}$ در برخی موارد می‌تواند غیر دقیق باشد و صرفه‌جویی منفی را نتیجه دهد.

یک اشکال همه روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی محل‌های خازن‌گذاری و اندازه‌های خازنها بصورت متغیر های پیوسته است. بنابراین اندازه‌های خازن محاسبه شده ممکن است با اندازه‌های استاندارد موجود مطابقت نداشته و محل‌های محاسبه شده ممکن است با محل گره‌های فیزیکی در سیستم توزیع منطبق نباشد. به همین خاطر نیاز است تا نتایج به نزدیکترین مقدار عملی (به بالا یا پایین) گرد شود و ممکن است باعث اضافه ولتاژ شده یا کاهش تلفات کمتری از مقدار محاسبه شده را نتیجه دهد. برای یک فیدر ساده با بارهای توزیع شدهٔ مساوی، روش‌های تحلیلی اخیر با اندازه‌های قابل توجه، خیلی دقیق و مناسبند، اما به اطلاعات بیشتر سیستم توزیع و زمان پیاده سازی بیشتر نیازمند هستند.

### ۲-۲-۲ روش‌های برنامه‌ریزی عددی

حافظه‌های کامپیوتری ارزان‌قیمت و قدرت محاسباتی بسیار بالا، باعث شد تا روش‌های برنامه‌ریزی عددی برای حل مسائل بهینه‌سازی توصیه شوند. روش‌های برنامه‌ریزی عددی تکنیک‌های تکراری مورد استفاده برای بهینه سازی یک تابع هدف از متغیرهای تصمیم هستند. مقادیر متغیرهای تصمیم باید یک مجموعه از قیود را نیز ارضا کند. برای تخصیص خازن بهینه، تابع صرفه‌جویی تابع هدف بوده و محل‌ها، اندازه‌ها، تعداد خازن‌ها، ولتاژها و جریان‌های باس، متغیرهای تصمیم خواهند بود که باید همهٔ قیود عملکردی را ارضا کنند. روش‌های برنامه‌ریزی عددی امکان استفاده از تابع هزینه با جزئیات بیشتر را برای مسأله خازن‌گذاری بهینه فراهم می‌آورند. تابع هدف می تواند همهٔ ولتاژ و قیود بارگذاری خط، اندازهٔ خازن‌ها و محل‌های فیزیکی گره‌ها را در نظر بگیرد. با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی عددی مسأله تخصیص خازن را می‌توان بصورت (۲-۲) فرمول‌بندی نمود:

$$MAX:\ S = K_L \Delta L - K_C C \qquad \text{S.to:}\ \ \Delta V \le \Delta V_{\max} \qquad \text{۲-۲}$$

که $K_L \Delta L$ صرفه‌جویی هزینه است که می‌تواند شامل کاهش تلفات انرژی و تلفات توان پیک و آزادسازی ظرفیت باشد، $K_C C$ هزینه نصب خازن است و $\Delta V$ تغییرات ولتاژ به علت نصب خازن است که نباید بیشتر از $\Delta V_{\max}$ باشد.