

جایابی همزمان خازنهای ثابت و قابل کلید زنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شبکه توزیع با بار غیر قطعی

محمود رضا حقی فامⁱ؛ سید محسن قاضی طباطبائیⁱⁱ

چکیده

جایابی بهینه خازن در شبکه‌های توزیع، به منظور کاهش تلفات انرژی، کاهش تلفات در پیک مصرف، آزادسازی ظرفیت تجهیزات نصب شده و بهبود پروفیل ولتاژ، یکی از روشهای مؤثر در بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع است. در این مقاله روش جدیدی برای جایابی همزمان خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی در سیستم‌های توزیع با بار متغیر ارائه شده و مزایای آن نسبت به روش‌های موجود بیان می‌گردد. در این روش ساختار شبکه، اطلاعات اقتصادی و اطلاعات بار به صورت تعداد سطوح اختیاری با مقدار فازی دریافت شده و با کدگذاری جدید تعریف شده برای الگوریتم ژنتیک، مقدار و محل بهینه خازن‌ها تعیین می‌شود. نتایج حاصل از اجرای این روش بر روی شبکه‌های آزمون ارائه شده و با نتایج دیگر روش‌ها مقایسه شده است که کار این روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

خازن‌گذاری، کاهش تلفات، اصلاح پروفیل ولتاژ، الگوریتم ژنتیک، عدم قطعیت در بار

Simultaneous Placement of Fixed and Switchable Capacitors in Distribution Networks with Load Uncertainty Using Genetic Algorithm

M.-R. Haghifam, S.M. Ghazi-Tabatabaei

ABSTRACT

Optimal capacitors placement in distribution systems for power loss reduction, releasing kVA of equipments and voltage profile improvement is one of the efficient methods for distribution system operation. In this paper, a novel method for simultaneous allocation of fixed and switchable capacitors in distribution systems with varying load is presented. In this method network configuration, load as fuzzy in multi levels and economical data are used as input data. Then using genetic algorithm, fixed and switchable capacitors are allocated simultaneously. The proposed method was tested and compared with other methods in many cases with satisfactory results.

KEYWORDS

Capacitor Placement, Loss Reduction, Voltage Profile Improvement, GA, Load Uncertainty

ⁱ دانشجویان برق، دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ص. پ ۱۱۱-۱۴۱۱۵، Email: haghifam@modares.ac.ir

ⁱⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جنوب تهران، دانشکده تحصیلات تکمیلی



است [۱۶-۱۴]. در این روش جایابی خازنهای ثابت و قابل کلیدزنی در شبکه های توزیع با بار متغیر بصورت همزمان انجام می‌گیرد. برای این منظور از کروموزمهای دو سطحی استفاده شده است. بارها نیز بصورت انعطاف‌پذیری با چند سطح در نظر گرفته می‌شوند. در این روش تعداد سطوح بارها محدودیتی نداشته و با توجه به اطلاعات موجود از بار، تعداد سطوح انتخاب می‌گردد. در ضمن هر سطح بار بصورت یک عدد فازی مثلثی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که جهت کاربردی کردن هر چه بیشتر روش پیشنهادی، ظرفیت خازن‌های پیشنهادی بر اساس بانک اطلاعات مربوط به خازن‌های در دسترس انتخاب می‌گردد. در بخشهای بعدی مقاله موارد زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- نحوه مدل کردن بار و انجام پخش بار
- روند انتخاب پله مناسب خازن
- کدگذاری و ساختار کروموزوم
- تابع هدف و قیود حاکم بر آن
- الگوریتم ژنتیکی
- مطالعات عددی

۲- مدل کردن بار و روش انجام پخش بار

با نگرشی به تحقیقات گذشته، این نکته جلب توجه می‌کند که در اکثر این تحقیقات از یک مقدار ثابت برای هر سال (که معمولاً مقدار میانگین بار سالیانه می‌باشد) برای جایابی خازن استفاده شده است. با توجه به تغییرات بار در طول مدت مطالعه و همچنین عدم قطعیت در پیش‌بینی بار سالهای آینده، بار ثابت سالیانه دارای دقت لازم در مدلسازی بار را ندارد. برای حل این عیب و حرکت به سمت دقت بیشتر در موضوع جایابی خازن، در روش ارائه شده، مدل بار به صورت تعداد سطوح متغیر در نظر گرفته شده است. در این روش به هر تعدادی که بتوان سطح بار را پیش‌بینی کرد، محاسبات براساس آن انجام می‌پذیرد و نکته اساسی دیگر اینکه هر یک از سطوح بار به صورت فازی مدل می‌شود. در الگوریتم ارائه شده هر سطح بار برای لحاظ کردن عدم قطعیت در پیش‌بینی بار به صورت یک عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شده است. مقدار فازی فوق پس از انجام محاسبات پخش‌بار به صورت غیر فازی تبدیل شده و در پروسه جایابی خازن مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای فازی‌زدائی، از روش برش α استفاده شده است، که با توجه به مقدار دریافت شده برای α ، متغیرهای فازی بدست‌آمده فازی‌زدائی می‌شوند. در روش برش α برای فازی‌زدائی مقادیر بزرگتر از α انتخاب می‌گردد تا مقدار

مطالعات نشان می‌دهد که حدود ۱۳٪ از توان تولید شده در سیستم قدرت بصورت تلفات اهمی در بخش توزیع تلف می‌شود [۱]. تلفات جریان راکتیو درصدی از این تلفات را به خود اختصاص می‌دهند و با افزایش جریان راکتیو بارها، تلفات سیستم نیز افزایش می‌یابد. نصب خازنهای ثابت و کلیدزنی شده در ظرفیت و مکان‌های مناسب به منظور جبران راکتیو مصرفی، علاوه بر کاهش تلفات انرژی و تلفات پیک مصرف، می‌تواند باعث آزادسازی ظرفیت تجهیزات نصب‌شده در سیستم توزیع و نیز بهبود پروفیل ولتاژ گردد. روشهای جایابی بهینه خازن به چهار گروه اصلی، تحلیلی، برنامه‌ریزی عددی، ابتکاری و استفاده از روشهای هوشمند دسته‌بندی می‌شوند [۶-۱]. پرکاربردترین این روشها، روش تحلیلی است. در این روش فیدر فاقد شاخه‌های فرعی فرض می‌گردد. سطح مقطع آن در تمام بخشها یکسان بوده و همچنین بار بصورت یکنواخت و پیوسته در طول فیدر توزیع فرض می‌شود [۷]. روشهای تحلیلی، به اطلاعات کمی از سیستم توزیع نیاز دارند و بکارگیری آنها در عمل بسیار آسان می‌باشد. از این رو، با وجود فرضیات غیرواقعی موجود در آنها هنوز تعدادی از شرکتهای برق، اساس برنامه‌های جایابی خازن خود را بر این قانون بنا نهاده‌اند [۸] و برخی از کارخانه‌های سازنده خازن، این قانون را در راهنمای کار محصولات خود، توصیه می‌کنند [۹]. معروفترین نتیجه روش فوق قانون « $2/3$ » است. بر اساس این قانون «برای کسب بیشترین کاهش در تلفات، باید خازنی با قدرت $2/3$ توان راکتیو ابتدای فیدر، در محلی به فاصله $2/3$ از ابتدای فیدر نصب گردد». فرضیات ساده کننده در روش فوق، به طور حتم باعث ایجاد خطا در کسب بهترین نتیجه می‌شود. مرجع [۱۰] نشان می‌دهد که چگونه اعمال قانون « $2/3$ » می‌تواند حتی باعث افزایش تلفات گردد. در روش های مبتنی بر برنامه‌ریزی ریاضی به کمک روشهایی چون: برنامه‌ریزی خطی، غیر خطی، پویا و... به جایابی خازن اقدام می‌کنند. مهمترین اشکال این روشها عدم انعطاف در تابع هدف و نیز گیر افتادن در نقاط بهینه محلی است. در روشهای ابتکاری نیز به کمک قضاوت‌های مهندسی و تجربی به ارائه الگوریتم‌هایی پرداخته می‌شود [۱۱-۱۳]. همچنین استفاده از روشهای هوشمندی چون الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی نیز در جایابی خازن ارائه شده است.

در این مقاله روش مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه شده

میانگین مقادیر بالاتر از α محاسبه گردد. پخش بار استفاده شده بر مبنای روش جاروب رفت و برگشت است. برای کارایی بیشتر الگوریتم خازن گذاری نوآوری‌هایی در روش پخش بار که مشتمل بر دو مورد زیر می باشد، اعمال شد.

- با توجه به اینکه در الگوریتم خازن گذاری از سطوح مختلف بار استفاده می‌شود برای سرعت دادن به اجرای الگوریتم، برنامه پخش بار نیز به گونه‌ای تهیه شده که بصورت همزمان برای تعدادی از سطوح بار، مطالعات پخش بار انجام می‌گیرد.

- با توجه به فازی بودن هر یک از سطوح بارها، الگوریتم پخش بار بر اساس بارهای فازی تهیه شده که با استفاده از قوانین ریاضیات بازه‌ای عمل می‌کند.

۳- کدگذاری و ساختار کروموزوم‌ها

در اکثر روش‌های انجام شده برای خازن گذاری پس از انجام محاسبات لازم که از طریق روش‌های گوناگونی انجام می‌گیرند، تقریب‌هایی در نتایج بدست آمده صورت می‌پذیرد تا با مقادیر بانک‌های خازنی موجود و در دسترس مطابقت پیدا کند، که این عمل خود باعث خارج شدن از نقطه بهینه بدست آمده می‌شود و این سؤال را ایجاد می‌کند که چرا حوزه تغییر متغیرها در محدوده خازن‌های موجود نباشد (یا به عبارتی با استفاده از مقادیر ممکن خازن‌ها حالت بهینه را ایجاد نمائیم). برای رسیدن به این هدف در این مقاله روشی برای کدگذاری الگوریتم ژنتیک ارائه شده است که در آن ابتدا مقادیر موجود بانک‌های خازنی به صورت یک مجموعه مانند زیر به الگوریتم ارائه می‌گردد:

$$\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\} \quad (1)$$

در ادامه، با استفاده از مقادیر ارائه شده، ترکیب‌های ممکن از خازن‌ها ایجاد می‌شود. البته در ایجاد ترکیب‌های جدید شرایط خاصی نیز می‌توان اعمال کرد؛ بدین صورت که ترکیب‌هایی با تعداد اعضای مشخص ایجاد شود و یا اینکه در صورت مساوی بودن مقادیر ترکیب‌ها، حالتی که از بانک‌های کوچکتر تشکیل شده انتخاب گردد، که این شرایط بسته به نظر استفاده کننده می‌تواند متفاوت و گوناگون باشد. به هر حال در نهایت مجموعه‌ای بدست می‌آید که اعضای آن مقادیر مورد نظر برای قرارگرفتن در هر یک از نقاط نامزد می‌باشند. شماره ردیف هر یک از اعضا در این مجموعه به عنوان کد مربوط به آن عضو در نظر گرفته می‌شود. با این روش کدینگ، یک مجموعه منطبق بر واقعیت وجود خواهد داشت که الگوریتم فقط با استفاده از

آن جستجو را انجام می‌دهد. برای اینکه در خازن گذاری شرایط وجود یا عدم وجود خازن‌ها در حالت انتخاب تصادفی حل شود در مجموعه بدست آمده تعدادی عدد صفر قرار می‌گیرد. برای یکسان شدن احتمال وجود یا عدم خازن بهتر است به تعداد اعضای موجود صفر به این مجموعه اضافه گردد؛ بدین صورت که نیمه اول مجموعه شامل اعضای صفر و نیمه دوم شامل مقادیر ترکیب‌های خازنی باشد. البته این تنها روش ممکن نبوده و برای احتمال وجود خازن‌ها می‌توان از روشها و شرایط دیگری نیز استفاده کرد.

در جدول (۱) نمونه‌ای از کدگذاری نشان داده شده است که با فرض ایجاد ترکیب‌های دو تایی خازنهای ۱۲، ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلووار حاصل شده است. در روش پیشنهادی در این مقاله از کروموزم‌هایی که دارای دو ردیف برای نشان دادن ظرفیت خازنهای ثابت و قابل کلید زنی می‌باشند، استفاده شده است و تعداد ستونهای هر دو ردیف با هم یکسان و برابر با تعداد باس‌های شبکه مورد مطالعه است (جدول (۲)). هر کدام از خانه‌های کروموزم‌ها (ژنها) نشان دهنده اطلاعات خازن در باس مربوط بوده و حاوی یکی از مقادیر کدگذاری ارائه شده می‌باشد.

جدول (۱): مثالی برای نحوه کدگذاری ظرفیت های خازن

کد	ظرفیت خازن	پنه های خازن	
1	0	0	0
:	:	:	:
6	0	0	0
7	12	12	0
8	25	25	0
9	50	50	0
10	75	75	0
11	37	12	25
12	62	12	50
13	87	12	75
14	75	25	50
15	100	25	75
16	125	50	75

جدول (۲): کدگذاری خازن‌های انتخابی ثابت و قابل کلید زنی برای هر باس

ثابت	شماره باس			
	۱	۲	۳	۴
C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C _{1n}
C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C _{2n}

۴- تابع هزینه

تابع هزینه در این تحقیق شامل موارد زیر است:

۴-۱- تلفات

در این قسمت مقدار تلفات در کل فیدر از جمع تلفات در تک تک سکشن‌ها بدست می‌آید که در هر سکشن، مقدار تلفات برای هر سال برابر است با:

$$P_{\text{loss } i} = R_i * I_i^2 \quad (2)$$

که در آن R_i مقاومت در سکشن i و I_i جریان سکشن i است. در نتیجه برای تلفات کل شبکه در یک سال داریم:

$$P_{\text{loss-total}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{loss } i} \quad (3)$$

با توجه به قیمت هر کیلووات ساعت انرژی، هزینه تلفات ایجاد شده در سال برابر است با:

$$COST_{\text{loss}} = C_e * P_{\text{loss-total}} \quad (4)$$

که در آن C_e قیمت کیلووات ساعت انرژی است.

با توجه به روابط اقتصاد مهندسی مقادیر بدست آمده برای هر سال به سال مینا منتقل می‌گردد و کل محاسبات در سال مینا انجام می‌شود [۱۷].

۴-۲- هزینه خازن گذاری

برای اینکه هزینه خازن‌ها دارای انعطاف زیادی باشد، روند کاملی برای محاسبه هزینه خازن‌ها در نظر گرفته شده است. بدین صورت که هزینه خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی بطور مستقل از هم بوده و هر کدام دارای دو جزء است. که قسمتی از هزینه‌ها برای هر بانک نصب شده بصورت ثابت و قسمت دیگر بصورت ضریبی از مقدار خازن نصب شده در نظر گرفته می‌شود:

C_{ff} : هزینه ثابت خازنهای ثابت (واحد پول)

C_{vf} : هزینه هر kVar خازن ثابت (واحد پول)

C_{fi} : مقدار خازن نصب شده در پست i ام (kVar)

C_{fs} : هزینه ثابت خازن قابل کلیدزنی (واحد پول)

C_{vs} : هزینه هر kVar خازن قابل کلیدزنی (واحد پول)

C_{si} : مقدار خازن قابل کلیدزنی نصب شده در پاس i ام (kVar)

با توجه به تعاریف فوق هزینه خازن نصب شده در پست i ام

برابر است با:

$$COST_{\text{CAPACITOR } i} = C_{ff} + C_{vf} * C_{fi} + C_{fs} + C_{vs} * C_{si} \quad (5)$$

یادآور می‌شود که هر کدام از اجزای فوق فقط در صورت وجود در یک پاس لحاظ می‌شوند. بنابراین هزینه کل خازن گذاری در شبکه برابر است با:

$$COST_{\text{CAPACITOR-total}} = \sum_{i=1}^n COST_{\text{CAPACITOR } i} \quad (6)$$

n تعداد پاس‌های شبکه است که در آن‌ها خازن وجود دارد. لحاظ کردن دو قسمت ارائه شده از تابع هزینه اجباری است ولی قسمت سوم از آن که در ادامه می‌آید، بصورت اختیاری می‌باشد.

۴-۳- ظرفیت آزاد شده تجهیزات

این قسمت برای مدل کردن کاهش هزینه‌های ناشی از خازن گذاری در شبکه توزیع و کاهش تلفات است که منجر به آزادسازی ظرفیت شبکه‌های بالا دستی می‌گردد:

$$COST_{up} = (P_{\text{loss1}} - P_{\text{loss2}}) * C_{up} \quad (7)$$

که در آن C_{up} هزینه احداث برای هر کیلووات شبکه‌های بالادستی، P_{loss1} مقدار تلفات قبل از خازن گذاری و P_{loss2} مقدار تلفات بعد از خازن گذاری است.

معادلات فوق برای هر سال با توجه به تلفات کاهش یافته محاسبه شده و به سال مینا منتقل می‌گردد.

با توجه به موارد گفته شده تابع هزینه کل بصورت زیر خواهد بود:

$$COST_{\text{total}} = COST_{\text{loss}} + COST_{\text{capacitor}} + COST_{up} \quad (8)$$

۵- قیود

در این بخش قیدهای بهینه سازی ارائه می‌گردد.

• قید ولتاژ

قید موجود در این الگوریتم مقدار ماکزیمم ولتاژ است که برای تمام کروموزم‌ها لحاظ می‌شود و چنانچه به ازای خازن گذاری، ولتاژ از مقدار مشخص که توسط کاربر تعیین می‌شود بیشتر گردد، برای جلوگیری از مشکلات ناشی از اضافه ولتاژ در شبکه، مقادیر خازن‌های قابل کلیدزنی با تعویض پله‌ها و خازن‌های ثابت با خروج از شبکه تغییر می‌یابد.

• قید مقدار خازن

مقدار ماکزیمم خازن قابل نصب در یک فیدر بعنوان یک پارامتر محدود کننده دریافت شده و در حین اجرا برای هر کروموزم کنترل می‌شود تا مقدار کل خازن‌های نصب شده از ماکزیمم در نظر گرفته شده بیشتر نگردد.

۶- اعمال الگوریتم ژنتیک

با توجه به ماهیت الگوریتم ژنتیک که یک روش مناسب برای بدست آوردن نقطه بهینه توابع پیچیده، چند متغیره، گسسته و پیوسته می‌باشد، این روش می‌تواند از نقاط مختلف فضای جستجو شروع شده و با روندی که بر اساس اپراتورهای ژنتیکی تعیین می‌شود، جواب بهینه حاصل گردد. با توجه به اینکه الگوریتم از نقاط متعدد شروع می‌شود و این نقاط نیز در هر بار اجرا شدن یکسان نیست، شانس پیدا کردن نقطه بهینه بالا است.

در روند اعمال الگوریتم ژنتیک ابتدا جمعیت اولیه‌ای تولید می‌گردد که نحوه تولید و تعداد آنها قابل انتخاب و کنترل است. پس از تولید جمعیت اولیه، مقدار برازندگی هر یک از جمعیت‌ها محاسبه می‌شود، سپس جمعیت‌های مورد نظر برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند تا با استفاده از آنها نسل جدید جمعیت تولید گردد، برای انتخاب جمعیت‌ها از روشهای متنوعی استفاده می‌شود. پس از انتخاب جمعیت، عمل تولید جمعیت جدید با استفاده از جهش و جابجایی صورت می‌پذیرد. سپس مقدار برازندگی هر یک از جمعیت‌های نسل جدید محاسبه می‌شوند و جمعیت نسل قدیم با نسل جدید ادغام و روندی اجرا می‌شود تا جمعیت‌های مشابه حذف گردند؛ بگونه‌ای که از هر جمعیت فقط یک نمونه در مجموعه باقی بماند. برای اینکه تعداد جمعیت کنترل شود یک شرط تعداد کل جمعیت را کنترل می‌نماید. چنانچه جمعیت از تعداد مشخص شده بیشتر شود، جمعیت‌های دارای کمترین برازندگی را حذف می‌کند تا تعداد کل جمعیت در محدوده مشخص شده باقی بماند.

با انجام مراحل فوق در واقع یک مرحله از الگوریتم کامل شده است. بنابراین برای رسیدن به پاسخ، روند فوق به تعداد دفعات مشخص شده تکرار می‌گردد. یکی دیگر از روشهای کنترل تکرار با استفاده از مقایسه پاسخ‌های بدست آمده در چند مرحله است تا اگر از حد مشخص کمتر گردد روند تکرار الگوریتم متوقف شود. در زیر بخشهای بعدی هر یک از مراحل اعمال الگوریتم ژنتیک و نوآوریهای مربوط آمده است.

۶-۲- تولید جمعیت اولیه

برای تولید جمعیت اولیه در این مقاله از دو روش استفاده شده است که هر یک جداگانه توضیح داده می‌شود.

• روش تولید تصادفی

در این روش جمعیت اولیه بصورت تصادفی تشکیل می‌شوند. مقدار خازن موجود در هر باس توسط یک عدد تصادفی در محدوده کدگذاری خازن‌های در دسترس (مانند جدول (۱)) می‌باشد تعیین شده است. در این روش جمعیت‌های کاملاً متفاوت بوجود می‌آیند که تنوع خوبی در جمعیت اولیه ایجاد می‌کند. از طرفی با توجه به تصادفی بودن مقادیر هیچ‌گونه جهت‌دهی خاصی برای الگوریتم صورت نمی‌گیرد.

• روش جهش تک متغیره

در این روش برای تولید هر یک از جمعیت‌های اولیه ابتدا یک کروموزم که بدون خازن است، تشکیل می‌گردد و به تعداد مشخص جهش‌های تک متغیره تصادفی روی آن اعمال می‌شود. سپس کروموزمی که دارای بهترین برازندگی است انتخاب می‌شود و بر روی این انتخاب جهش‌های تک متغیره اعمال می‌گردد و دوباره بهترین جمعیت انتخاب شده و روند فوق تکرار می‌شود. جهش در هر مرحله و تعداد تکرار مراحل برای هر کروموزوم قابل کنترل و مشخص است. پس از انجام روند فوق به تعداد مشخص کروموزم تولید شده است. مزیت این روش نسبت به حالت قبل در این است که از همان ابتدا جمعیت اولیه به سمت جمعیت‌های با برازندگی بالا حرکت کرده و از تولید هر گونه جمعیت دارای برازندگی پائین جلوگیری می‌شود. نکته دیگر در این روش حفظ تنوع جمعیت اولیه است؛ جهش‌های تصادفی است نمودار جریان این روش در شکل (۱) نشان داده شده است.

۶-۳- برازندگی

در الگوریتم ژنتیک برای مشخص شدن ارزش هر یک از جمعیت‌ها، پارامتری تحت عنوان برازندگی هر کروموزم تعریف می‌شود. برازندگی کروموزم‌ها در روش‌های گوناگون دارای تعریف‌های متفاوتی می‌باشند، در روش ارائه شده با توجه به اینکه هدف کمینه‌سازی تابع هزینه می‌باشد لذا برازندگی را می‌توان به عنوان عکس تابع هزینه هر کروموزم تعریف کرد. بنابراین با کاهش یافتن تابع هزینه مقدار برازندگی آن افزایش می‌یابد.

$$\text{Fitness}(i) = 1/\text{Cost Function}(i) \quad (9)$$

۶-۴- روش انتخاب

برای انتخاب جمعیت‌های مولد نسل بعدی از روش معروف چرخ‌رولت استفاده شده است که با ایجاد تغییراتی در این مقاله، کارایی این روش افزایش یافته است. در روش چرخ‌رولت اگر تعداد اعضا کم و تفاوت مقادیر نیز قابل ملاحظه باشد، روش به خوبی پاسخ می‌دهد.

چنانچه تعداد جمعیت اولیه زیاد و مقادیر آنها نزدیک به هم باشند، این روش کارایی مطلق خود را از دست داده و در واقع توزیعی تقریباً یکنواخت در کل مجموعه را ایجاد می‌کند. برای حل مشکل در این مقاله یک تابع خاص در مجموعه مورد نظر ضرب می‌گردد و سپس روند معمول چرخ‌رولت اجرا می‌شود. بدین صورت که ابتدا مقادیر برازندگی جمعیت‌ها مرتب‌شده و به ترتیب از کوچکتر به بزرگتر در یک مجموعه X_0 قرار می‌گیرند، حال هر یک از اجزاء مجموعه فوق در یک مقدار که تابعی از ترتیب عضویت در مجموعه (X_0) می‌باشد ضرب می‌گردد.

$$X_n(i) = X_0(i) * F(i) \quad (10)$$

برای مجموعه جدید X_n روند زیر اجرا می‌شود:
برای هر عضو مجموعه X_n رابطه زیر اجرا می‌شود تا مجموعه جدید X_p تشکیل گردد:

$$X_p(i) = \frac{X_n(i)}{\sum_{i=1}^n X_n(i)} \quad (11)$$

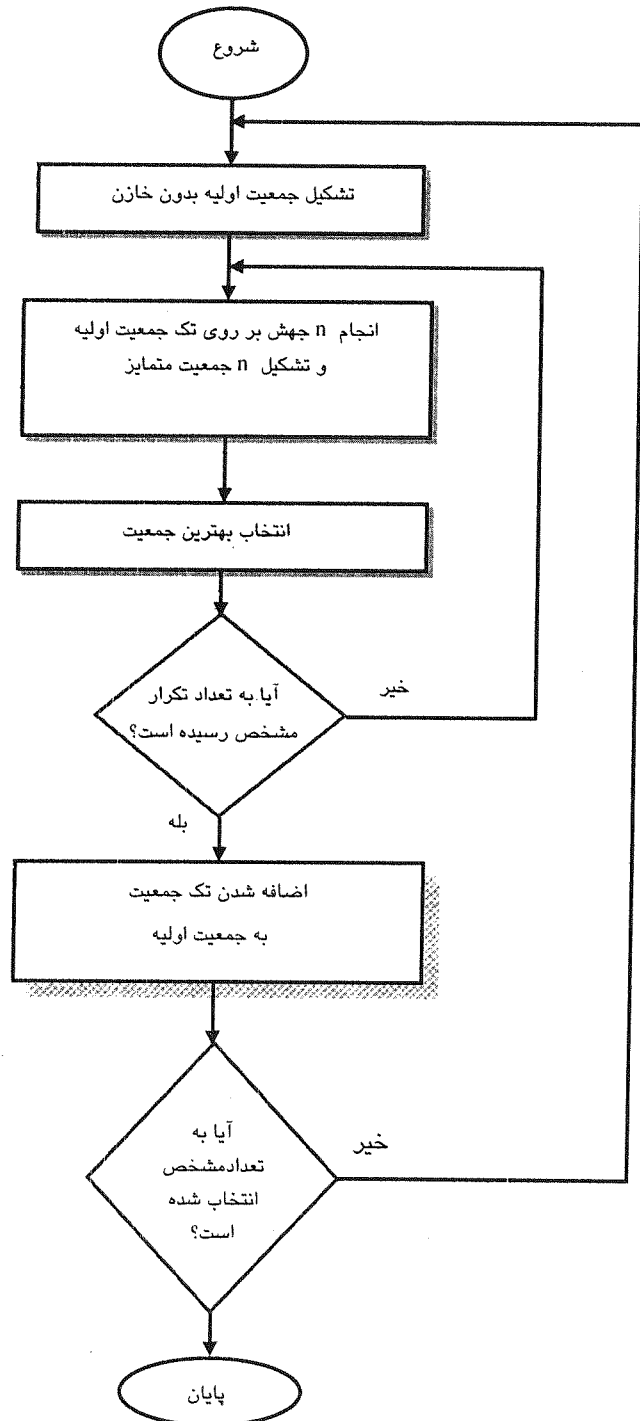
مجموعه نهائی X_f که هر یک از اجزاء آن با رابطه زیر تعریف می‌شوند ایجاد می‌گردد:

$$X_f(i) = X_n(i) + \sum_{j=1}^i X_n(j) \quad (12)$$

اعضای مجموعه X_f از کوچکترین مقدار شروع شده و در نهایت به یک ختم می‌شود. برای انتخاب هر جمعیت ابتدا یک عدد تصادفی در بازه $\{0, 1\}$ تولید می‌شود سپس عدد تصادفی فوق با اعضای مجموعه X_f مقایسه می‌گردد و اولین عضوی از مجموعه که دارای مقداری بیشتر از عدد تصادفی تولید شده باشد انتخاب می‌گردد. با استفاده از روند فوق، روند انتخاب بهبود می‌یابد.

۶-۵- روشهای تولید جمعیت‌های جدید

- جایابی تک نقطه‌ای با ترکیب نقط شکست در الگوریتم ژنتیک نسل‌های جدید عمدتاً به وسیله عملگر جایابی تولید می‌شوند. در جایابی با ترکیب کروموزم‌های مولد کروموزم‌های جدید تولید می‌شوند. در این مقاله از یک روند خاص برای جایابی استفاده شده که مبتنی بر نوع کدگذاری و ساختار کروموزم می‌باشد.



شکل (۱): فلوچارت تولید جمعیت اولیه

روش کار بدین صورت می‌باشد که یک عدد تصادفی نقطه شکست دو کروموزم را مشخص می‌کند. تمام ژن‌ها از ابتدای کروموزم تا نقطه شکست بطور کامل جابجایی می‌شوند اما نقطه شکست جابجایی نمی‌شود. در نقطه شکست مقدار ژن مربوطه در دو کروموزم بصورت ریاضی با هم ترکیب می‌شوند بدین صورت که دو عدد تصادفی در بازه $\{0,1\}$ تولید می‌گردد.

(m_2, m_1) این اعداد در مقدار ژن‌های کروموزم اول ضرب شده و روابط (m_2-1) و (m_1-1) در مقادیر ژن‌های کروموزم دوم ضرب می‌گردند لازم به ذکر است که این عمل برای دو ردیف کروموزم در نقطه شکست کروموزم‌ها بصورت جداگانه اعمال می‌شود و مقدار ژن‌ها در کروموزم‌های فرزند بدست می‌آیند.

اگر مقدار ژن α در کروموزم اول (C) با C_{1i} و C_{2i} و در کروموزم دوم (b) با b_{1i} و b_{2i} مشخص شوند، مقایسه ژن‌های فرزند از روابط زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} d_{1i} &= \text{Round}[c_{1i} * m_1 + b_{1i} * (m_1 - 1)] \\ d_{2i} &= \text{Round}[c_{2i} * m_2 + b_{2i} * (m_2 - 1)] \end{aligned} \quad (13)$$

روابط فوق با کدگذاری مربوطه هماهنگی کامل دارند و باعث می‌شود مقادیر ژن‌ها از کدگذاری مربوطه خارج نشوند.

• جابجایی تک ستونی

در این روش پس از انتخاب دو کروموزم، دو عدد تصادفی در محدوده طول کروموزم‌ها تولید می‌شود که عدد اول ستون انتخابی در جمعیت اول و عدد دوم ستون مورد نظر در جمعیت دوم را مشخص می‌کند. برای تولید جمعیت جدید، دو ستون در دو جمعیت با هم جابجا می‌شوند و قسمت‌های دیگر جمعیت‌ها ثابت باقی می‌مانند.

• جهش تک متغیره

جهش به عنوان یکی از قسمت‌های اصلی ساختار الگوریتم ژنتیک می‌باشد که بسته به شرایط مسئله و نوع کدگذاری با روش‌های گوناگونی انجام می‌گیرد. با استفاده از جهش از یک نقطه فضای جستجو بصورت تصادفی و به یکباره بدون اینکه رابط خاصی وجود داشته باشد به نقطه دیگری از فضای جواب جهش صورت می‌گیرد، این عمل برای جلوگیری از توقف الگوریتم در بهینه‌های محلی بسیار مؤثر می‌باشد. در این روش، یک عدد تصادفی در محدوده طول کروموزم‌ها (تعداد باس‌ها) تولید می‌شود یک عدد تصادفی دیگر نیز شماره سطر مورد نظر را انتخاب می‌کند (یک یا دو برای خازن ثابت یا کلیدی).

حال در محدوده کدگذاری توضیح داده شده، یک عدد تصادفی تولید می‌شود و محتوی ژن مشخص شده به مقدار جدید تغییر پیدا می‌کند.

• جهش هم‌زمان به چند مقدار

در این روش تمامی شرایط توضیح داده شده در جهش تک‌متغیره برای چندین بار برای یک ژن (یک نقطه خاص از کروموزم) اجراء می‌گردد و مقدار برانزنگی همه حالت‌ها با هم مقایسه می‌گردد و در نهایت فقط جمعیتی که بهترین برانزنگی را داشته باشد به عنوان جمعیت جدید به مجموعه جمعیت‌های تولید شده اضافه می‌گردد.

۶-۶- روند کنترل جمعیت

در الگوریتم ارائه شده یک ساختار خاص که با تلفیق روش‌های مختلف حاصل شده است، ساختار کلی جمعیت را کنترل می‌نماید. در این روش برای اینکه از به اشباع رفتن جمعیت قبل از رسیدن به پاسخ نهایی جلوگیری به عمل آید از هر جمعیت فقط یک عدد در کل جمعیت می‌تواند وجود داشته باشد و مابقی در اولین بار حذف شده و در تکرارهای بعدی از اضافه شدن جمعیت‌های تکراری به جمعیت‌های موجود جلوگیری می‌شود.

بخش دیگری در این الگوریتم تعداد کل جمعیت را کنترل می‌نماید و چنانچه تعداد کل از یک مقدار مشخص که توسط کاربر تعیین می‌شود بیشتر شود از جمعیت‌های دارای کمترین برانزنگی شروع به حذف می‌گردد تا به تعداد مشخص شده برسد. این روند نیز در سرعت الگوریتم ژنتیک تأثیر بسزایی دارد و از ایجاد مشکلات نرم‌افزاری جلوگیری می‌نماید.

۷- مطالعات عددی

۷-۱- مطالعه بر روی شبکه آزمون

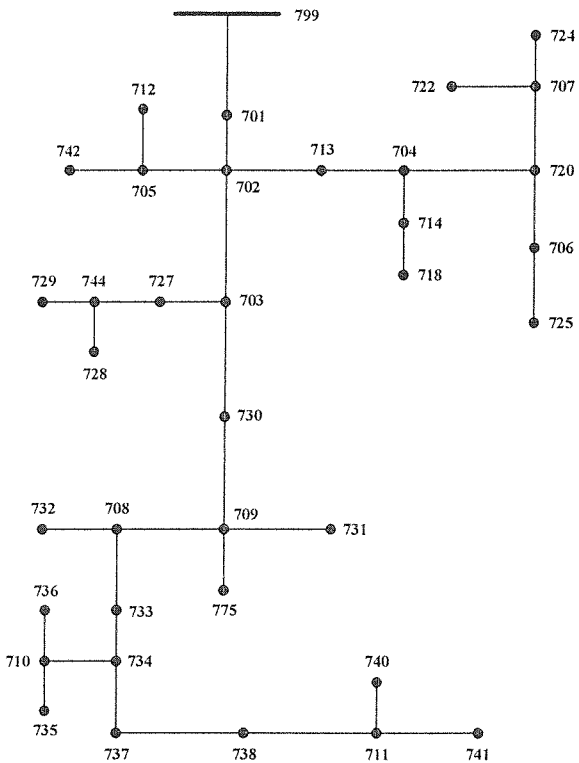
مطالعات انجام شده در این قسمت با استفاده از آزمون فیدر ۲۷ باسه IEEE انجام شده که در شکل (۲) دیاگرام تک خطی آن ارائه شده و اطلاعات الکتریکی آن در جدول (۵) ارائه شده است. در جدول (۴) اطلاعات مورد نیاز جهت اجرای الگوریتم نشان داده شده است، بارهای الکتریکی موجود در این شبکه که به صورت متعادل و نقطه‌ای در نظر گرفته شده است، در جدول (۳) با یک سطح بار نشان داده شده است.

جدول (۴): اطلاعات مورد نیاز جهت اجرای الگوریتم

2.5 MVA	توان مبنا (S_0)
4.8 kV	ولتاژ مبنا (V_b)
5%	حداکثر ولتاژ مجاز
4 سال	دوره مورد مطالعه
12.5, 50, 100	پله‌های بانک‌های خازنی
7%	نرخ رشد بار سالیانه (تمام بارها)
15%	نرخ سود
100-300	قیمت انرژی (kWh / واحد پول)
3000-30000	قیمت خازن ثابت (kVar / واحد پول)
6000-50000	قیمت خازن قابل کلید زنی (kVar / واحد پول)

جدول (۳): بار هر یک از باس‌های شبکه ۳۷ باس IEEE

ردیف	شماره باس	توان اکتیو (kw)	توان راکتیو (kvar)
1	701	210	105
2	702	0	0
3	703	0	0
4	704	0	0
5	705	0	0
6	706	0	0
7	707	0	0
8	708	0	0
9	709	0	0
10	710	0	0
11	711	0	0
12	712	28	13
13	713	28	13
14	714	12	6
15	718	28	13
16	720	28	13
17	722	53	27
18	724	14	7
19	725	14	7
20	727	14	7
21	728	42	21
22	729	14	7
23	730	28	13
24	731	28	13
25	732	14	7
26	733	28	13
27	734	14	7
28	735	28	13
29	736	14	7
30	737	47	23
31	738	42	21
32	740	28	13
33	741	14	7
34	742	31	14
35	744	14	7
36	775	0	0
37	799	0	0



شکل (۲): دیاگرام تک خطی فیدر ۳۷ باس IEEE

جدول (۵): اطلاعات الکتریکی فیدر ۳۷ باسه IEEE

ماره سکتشن	باس ابتدا	باس انتها	r(total)	x(total)
1	701	702	0.053544	0.036105
2	702	705	0.098637	0.051186
3	702	713	0.088127	0.045732
4	702	703	0.073514	0.049571
5	703	727	0.059021	0.030628
6	703	730	0.147956	0.076779
7	704	714	0.019727	0.010237
8	704	720	0.197274	0.102373
9	705	742	0.07891	0.040949
10	705	712	0.059182	0.030712
11	706	725	0.069046	0.03583
12	707	724	0.18741	0.097254
13	707	722	0.029591	0.015356
14	708	733	0.07891	0.040949
15	708	732	0.07891	0.040949
16	709	731	0.147956	0.076779
17	709	708	0.07891	0.040949
18	710	735	0.049319	0.025593
19	710	736	0.316625	0.164308
20	711	741	0.098637	0.051186
21	711	740	0.049319	0.025593
22	713	704	0.128228	0.066542
23	714	718	0.128228	0.066542
24	720	707	0.226865	0.117729
25	720	706	0.147956	0.076779
26	727	744	0.069046	0.03583
27	730	709	0.049319	0.025593
28	733	734	0.138092	0.071661
29	734	737	0.157819	0.081898
30	734	710	0.128228	0.066542
31	737	738	0.098637	0.051186
32	738	711	0.098637	0.051186
33	744	728	0.049319	0.025593
34	744	729	0.069046	0.03583
35	709	775	0.069046	0.03583
36	799	701	0.103184	0.069578

ب) برای دو خازن ۱۲/okVar جایابی به صورت جستجوی مستقیم انجام گرفت که باس‌های شماره ۷۴۰ و ۷۴۱ به عنوان دو نقطه کاندید بدست آمدند، با استفاده از نرم افزاری که بر اساس الگوریتم ارائه شده در این مقاله تهیه شده است، نیز آزمایش با ماکزیمم مقدار ۲okVar و خازن‌های ۱۲/okVar انجام گرفت که نتیجه بدست آمده باس‌های شماره ۷۴۰ و ۷۴۱ بود که با روش جستجوی مستقیم یکسان می‌باشد. دو آزمایش فوق با بانک خازنی ۱۲/okVar و با یک و دو عدد خازن انجام گرفت. چنانچه برای تعداد بیشتری از حالت‌های ممکن با خازن ۱۲/okVar و در حالتی کلی‌تر از بانک‌های مختلف خازنی استفاده گردد حالت‌های ممکن قرارگیری خازن‌ها در روی نقاط کاندید بسیار زیاد خواهد شد و برای بدست آوردن پاسخ جستجوی مستقیم زمانی بسیار طولانی لازم می‌باشد.

۷-۳- انجام آزمایش با قیمت خازن صفر

در این آزمایش با صفر قرار دادن تمام هزینه‌های مربوط به خازن‌ها، نتایج بدست آمده تحلیل می‌شود. زمانی که هزینه‌ای برای خازن در نظر گرفته نشده باشد نرم‌افزار باید مقادیر جریان‌های موهومی را صفر نماید. البته با توجه به اینکه آزمایش با پله‌های محدود خازن انجام می‌گیرد، لذا نرم افزار از نزدیک‌ترین مقادیر بانک‌های خازنی استفاده می‌نماید که در شکل (۳) پروفیل مقادیر موهومی جریان سکتشن‌های ۶، ۲۱، ۳۶ و ۳۶ نشان داده شده است، در ضمن مقادیر خازن‌ها در جدول (۶) ارائه شده است. یک آزمایش ساده نیز با قیمت انرژی صفر انجام گرفت که مطابق انتظار هیچ گونه خازنی در هیچ یک از باس‌ها جایابی نشد.

۷-۴- انجام مطالعاتی جهت نمایش تاثیر تغییر قیمت‌ها

در این قسمت مطالعات مختلفی با تغییر قیمت انرژی و خازن‌ها انجام شده که نتایج بدست آمده برای کاهش قیمت انرژی در چند حالت انجام گرفته و در جدول (۷) ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود با کاهش قیمت انرژی مقدار خازن‌های پیشنهادی کاهش یافته است. با تغییر قیمت خازن‌ها نیز نتایج حاصله تغییر می‌کند، در جدول (۸-الف و ب) نتایج تغییر قیمت خازن‌ها نشان داده شده است.

۷-۲- متایسه با جستجوی مستقیم

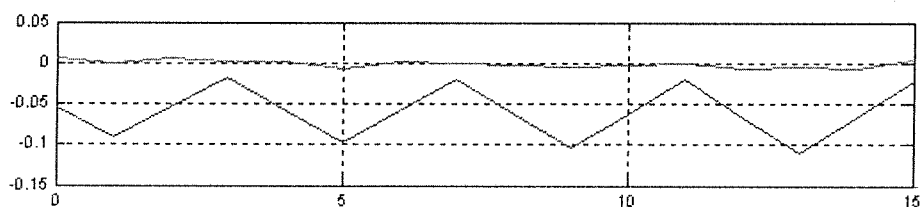
الف) در این مطالعه، ابتدا مکان یک خازن ۱۲/okVar با استفاده از روش جستجوی مستقیم، با قرار دادن آن بر روی تکتک باس‌ها و سپس انتخاب بهترین حالت بدست می‌آید، که در شبکه مورد نظر باس شماره ۷۴۰ می‌باشد، با استفاده از نرم افزار ارائه شده و با شرط ماکزیمم مقدار خازن ۱۲/okVar جایابی انجام گرفت و باس شماره ۷۴۰ انتخاب گردید که نشان دهنده صحت الگوریتم جایابی می‌باشد.

جدول (۷): نتایج تاثیر تغییر قیمت انرژی

ردیف	قیمت انرژی		
	10	20	30
ف	خازن kVar	خازن kVar	خازن kVar
1	0	62.5	75
4	37.5	37.5	0
5	37.5	0	0
7	0	25	0
8	50	0	0
9	0	0	50
11	0	0	25
12	0	0	12.5
15	0	0	25
16	0	0	37.5
17	50	37.5	37.5
21	0	37.5	25
22	0	0	0
23	0	37.5	0
26	0	0	25
27	0	150	0
28	25	0	0
29	0	0	12.5
30	37.5	0	100
31	12.5	50	12.5
32	25	0	0
34	0	25	12.5
35	50	0	37.5
	325	462.5	487.5
	مجموع خازنها		

جدول (۶): مقادیر خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی در هر باس با قیمت خازن صفر

ردیف	شماره باس	خازن ثابت	خازن کلیدی
1	701	25	162.5
3	703	0	25
4	704	0	37.5
5	705	12.5	25
6	706	0	300
7	707	0	75
9	709	0	25
11	711	0	112.5
15	718	0	75
16	720	0	37.5
17	722	12.5	37.5
18	724	0	25
19	725	0	112.5
21	728	0	25
24	731	0	25
27	734	0	100
28	735	12.5	0
29	736	0	125
30	737	12.5	0
31	738	0	37.5
32	740	0	37.5
33	741	12.5	0
34	742	0	37.5
35	744	0	162.5



شکل (۳): کاهش پروفیل جریان موهمی برای سگشن شماره ۶ (به عنوان نمونه) بعد از خازن‌گذاری

جدول (۸-الف): قیمت خازن‌ها

خازن قابل کلید زنی		خازن ثابت		ردیف
ثابت	kVar	ثابت	kVar	
3000	600	1000	300	آزمایش ۱
6000	1200	2000	600	آزمایش ۲
12000	2400	4000	1200	آزمایش ۳
24000	4800	8000	2400	آزمایش ۴

جدول (۸-ب): نتایج تاثیر تغییر قیمت خازن

ردیف	شماره باس	آزمایش ۱		آزمایش ۲		آزمایش ۳		آزمایش ۴	
		خازن ثابت	خازن کلیدی	خازن ثابت	خازن کلیدی	خازن ثابت	خازن کلیدی	خازن ثابت	خازن کلیدی
5	705	37.5	0	0	0	0	0	0	0
7	707	50	0	62.5	0	0	0	0	0
14	714	37.5	0	0	0	0	0	0	0
17	722	0	0	0	0	37.5	0	0	0
21	728	0	0	37.5	0	0	0	0	0
24	731	25	0	25	0	0	0	0	0
27	734	0	50	50	0	50	0	0	0
29	736	12.5	0	0	0	0	0	0	0
31	738	62.5	0	62.5	0	62.5	0	50	0
35	744	50	0	0	0	0	0	0	0
مجموع خازنها		325		237.5		150		50	

۵-۷ - مطالعه تغییر پارامترهای الکتریکی

در این مطالعه مقادیر امپدانس (R, X) تمام سگشن‌های فیدر مورد مطالعه دو و پنج برابر شده، تا مدلی برای شبکه‌های طولانی و با امپدانس بالا باشد. نتایج بدست آمده در جدول (۹) ارائه شده است. با افزایش مقدار امپدانس شبکه مقدار تلفات افزایش یافته و در نتیجه مقدار خازن بیشتری نصب می‌شود.

۶-۷ - مطالعه شبکه ۶۹ باسه IEEE در مرجع [۱۸]

مطالعاتی با توجه به دیاگرام تک خطی شبکه ۶۹ باسه ارائه شده در [۱۸] و اطلاعات ثابت شبکه، بار و پارامترهای اقتصادی، انجام گرفت که نتایج در جدول (۱۰-الف) ارائه شده است. نتایج بدست آمده در [۱۸] نیز در جدول (۱۰-ب) نمایش داده شده است، با توجه به مقادیر بدست آمده ملاحظه می‌گردد که مقادیر کل خازن نصب شده مقادیر نزدیک بوده و در نقاط انتخاب نیز یک نقطه بصورت مشترک انتخاب شده است ولی نقطه دوم دارای موقعیت کاملاً متفاوت می‌باشد.

جدول (۹): نتایج خازن‌گذاری با تغییر امپدانس سگشن‌های فیدر مورد مطالعه

ردیف	شماره باس	Z		Z*2		Z*5	
		خازن ثابت kVar	خازن کلیدی kVar	خازن ثابت kVar	خازن کلیدی kVar	خازن ثابت kVar	خازن کلیدی kVar
7	707	0	0	0	0	50	0
9	709	0	0	0	0	37.5	0
14	714	0	0	0	0	25	0
17	722	0	0	37.5	0	0	0
21	728	0	0	0	0	37.5	0
27	734	0	0	50	0	50	0
31	738	50	0	62.5	0	62.5	0
مجموع خازنها		50		150		262.5	

جدول (۱۰-الف) نتایج مرجع [۱۸]

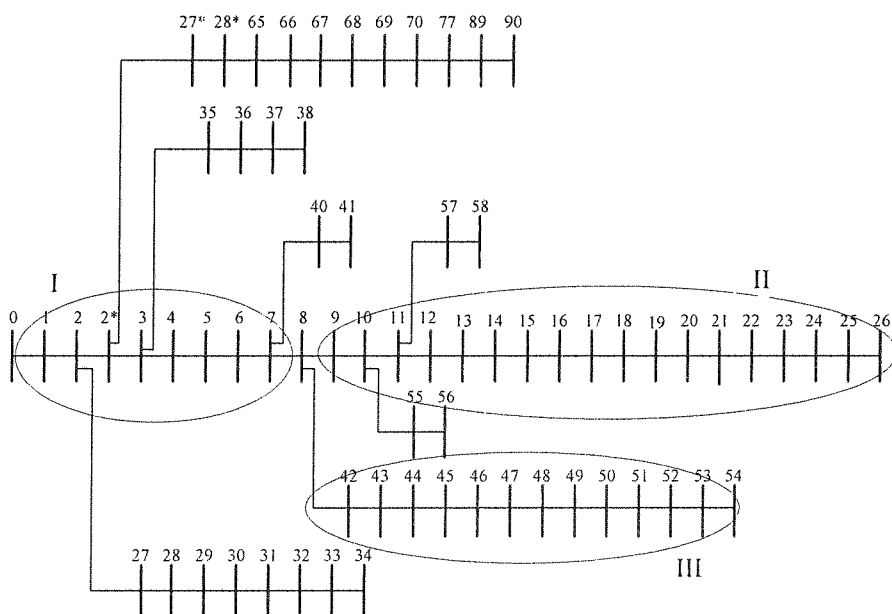
شماره باس	مقدار خازن (kvar)
48	300
50	900

جدول (۱۰-ب) نتایج روش پیشنهادی

شماره باس	مقدار خازن (kVar)
19	300
50	1200

جدول (۱۱): پارامترها در مناطق مشخص شده در شکل (۴)

شماره	توان اکتیو (kw)	توان راکتیو (kw)	در صد توان راکتیو	در صد R کل قسمت (Ω)	X کل قسمت (Ω)
I	1317.64	938.8	34.84	0.9162	0.488
II	767.8	529.1	19.63	8.4672	3.4853
III	1716.75	1226.7	45.15	6.5079	2.7685



شکل (۴): دیاگرام شبکه مورد مطالعه با مناطق مشخص شده

در قسمت III می‌باشد که لزوم جبران توان راکتیو در این بخش را ضروری می‌سازد که با نتیجه حاصله در روش پیشنهادی سازگار می‌باشد.

برای توجیه اختلاف حاصل بین نتایج در روش پیشنهادی و مرجع [18]، در جدول (۱۱)، پارامترهای شبکه شامل مقاومت، راکتانس و درصد توان راکتیو در مناطق مشخص شده آمده است. چنانچه ملاحظه می‌گردد ۴۵/۵۲ درصد از بار کل فیدر

۹- مراجع

- Ng H. N., Salama M. M. A., and Chikhani A. Y., "Classification of Capacitor Allocation Techniques," IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No.1, 2000.
- J.V. Schmill, "Optimum size and location of shunt capacitors on distribution feeders", IEEE Trans. PAS, Sept. 1965, pp. 825-832.
- N. E. Ghang, "Locating shunt capacitors on primary feeder for voltage control and loss reduction", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS, Spet. 1969, pp. 1574-1577.
- "Generalized equations on loss reduction with shunt capacitors", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS, Spet. 1969, pp. 1574-1577.
- Y. G. Bae, "Analytical method of capacitors allocation on distribution primary feeders", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, pp. 1232-

۸- نتیجه گیری

جایابی و نصب خازن در شبکه‌های توزیع، یکی از روشهای معمول برای کاهش تلفات و اصلاح دامنه ولتاژ می‌باشد. در این مقاله روشی نو برای جایابی همزمان خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی در شبکه‌های توزیع با بار متغیر ارائه شد. این روش بر الگوریتم ژنتیک و با کدگذاری دو سطری برای خازن‌های ثابت و قابل کلیدزنی مبتنی است. در این روش امکان مدلسازی بار در سطوح مختلف و بصورت فازی وجود دارد. نتایج حاصل از اعمال این روش در شبکه‌های آزمون، کارایی آن را نشان می‌دهد.

- 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. 10, no. 1, pp. 27–31, 1996.
- G. Boone and H. D. Chiang, "Optimal Capacitors Placement in Distribution systems using a genetic Algorithm," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 15, No. 3, pp. 155–162, 1993.
- S. Sundhararajan and A. Pahwa, "Optimal selection of Capacitors for radial Distribution systems using a genetic Algorithm," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, No. 3, pp. 1499–1507, Aug 1994.
- Miu, K.N., Chiang, H. D. and Darling, G., "Capacitor placement, replacement and control in large-scale distribution systems by a GA-based two-stage algorithm", *Power Systems*, IEEE Transactions. vol. 12, no. 3, pp:1160 – 1166, Aug. 1997.
- H.Lee Willis, "Power distribution planning reference book," Marcel Dekker, 2004.
- Hasio-Dong Ching, Jin-Cheng Wang, "Optimal Capacitors Placement in Distribution System: Part 2: Solution Algorithms and Numerical Results" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 5, No. 2, April. 1990.
- [13] 1238, July 1978.
- 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. [6]
- [14] Capacitor Subcommittee of the IEEE Transmission and Distribution Committee, "Bibliography on power capacitors 1975–1980," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. 102, no. 7, pp. 2331–2334, July 1983. [7]
- [15] IEEE VAR Management Working Group of the IEEE System Control Subcommittee, "Bibliography on reactive power and voltage control," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 361–370, May 1997. [8]
- [16] N. M. Neagle and D. R. Samson, "Loss reduction from capacitors on primary feeders," *AIEE Trans.*, vol. 75, pp. 950–959, Oct. in-stalled 195 [9]
- [17] R. F. Cook, "Analysis of capacitor application as affected by load cycle," *AIEE Trans.*, vol. 78, pp. 950–957, Oct. 1959. [10]
- [18] M. Chis, M. M. A. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, no. 2, pp. 225–230, May 1997. [11]
- J. R. P. R. Laframboise, G. Ferland, A. Y. chikhani, and M. M. A. Salama, "An expert system for reactive power control of distribution systems Part2: System implementation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 3, pp. 1433–1441, Aug. 1995. [12]