

کنترل توان راکتیو شبکه‌های توزیع بار متغیر در حضور منابع تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته

علیرضا صالح‌نیا^{۱*}، محمودرضا حقی‌فام^۲، مجید شهابی^۳

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۰/۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۰/۶/۵

چکیده:

ورود منابع تولید پراکنده به شبکه توزیع، نحوه بهره‌برداری و طراحی این شبکه‌ها را دستخوش تغییر کرده است. تأثیر بر مدیریت توان راکتیو و خازن‌گذاری در شبکه‌های توزیع از این دسته می‌باشد. وجود انواع فناوری منابع تولید پراکنده (DG)، نحوه مدل‌سازی و ظرفیت گوناگون آنها در شبکه می‌تواند خازن‌گذاری بهینه را در شبکه توزیع تحت تأثیر قرار دهد. در این مقاله، تأثیر حضور منابع تولید پراکنده در مکان و ظرفیت خازن‌های ثابت و سوئیچ‌شونده مورد بررسی قرار می‌گیرد. هزینه تلفات انرژی، هزینه تولید توان در شرایط پیک بار و هزینه‌های خرید و نصب خازن‌های ثابت و سوئیچ‌شونده به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک بهبود یافته به همراه کدگذاری و اپراتورهای جدید به عنوان ابزار بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین مشخصه الگوریتم ارائه شده فراهم کردن جدول کلیدزنی خازن‌های سوئیچ‌شونده در سطوح مختلف بار می‌باشد.

کلمات کلیدی:

منابع تولید پراکنده، جایابی خازن، کروموزوم سطحی، الگوریتم ژنتیک، توان راکتیو

مقدمه

خازن ها در شبکه های توزیع فشار متوسط به طور گسترده ای جهت جبران توان راکتیو استفاده می شوند. خازن ها می توانند تلفات توان و انرژی را در شبکه کاهش داده و با بهبود ولتاژ، کیفیت برق رسانی را ارتقا دهند. مسأله خازن گذاری بهینه عبارت است از یافتن مکان، ظرفیت و کنترل خازن ها جهت ماکزیمم کردن منافع ناشی از نصب خازن ها در مقابل هزینه آنها. این مسأله مدتها موضوع تحقیق و پژوهش بوده و روش های گوناگونی جهت خازن گذاری بهینه پیشنهاد گردیده است که کاهش تلفات در هر کدام از آنها یکی از اصول اساسی است. مسأله خازن گذاری بهینه می تواند از طریق آنالیز عددی، هوش مصنوعی و یا روش های ابتکاری حل شود [۲]. در سیستم های قدرت مرسوم منابع تولید به طور متمرکز در شبکه گسترده قدرت و در فاصله ای نسبتاً دور از مصرف کننده قرار دارند. منابع تولید پراکنده این نحوه چیدمان شبکه را تغییر داده اند. این منابع واحدهای تولید انرژی نزدیک به مصرف کننده می باشند. یکی از مزایای نزدیکی به مصرف کننده کاهش هزینه های انتقال است [۴ و ۵]. استفاده از DG در شبکه های توزیع طی سال های اخیر به یک موضوع مهم تبدیل شده است و نحوه بهره برداری و طراحی این شبکه ها را تحت تاثیر خود قرار داده است. تاثیر بر خازن گذاری بهینه در شبکه های توزیع از این دسته می باشد. وجود انواع فناوری DG، تنوع مکانی و ظرفیت های گوناگون آنها در شبکه می تواند خازن گذاری بهینه را در شبکه توزیع تحت تاثیر قرار دهد. در این مقاله، تاثیر حضور منابع تولید پراکنده در مکان و ظرفیت خازن های ثابت و سوئیچ شونده تحت بررسی قرار می گیرد. الگوریتم ژنتیک بهبود یافته ای به همراه کدگذاری اپراتورهای جدید به عنوان ابزار بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است، به کمک کدگذاری، معرفی شده جایابی خازن ها و اندازه آنها با توجه به تغییرات بار در یک مرحله صورت می پذیرد. به عنوان نوآوری این مقاله می توان به نحوه اعمال اهمیت نقاط بار و نیز کدگذاری جدید ژنتیکی و عملگرهای متناسب با آن در بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک اشاره نمود.

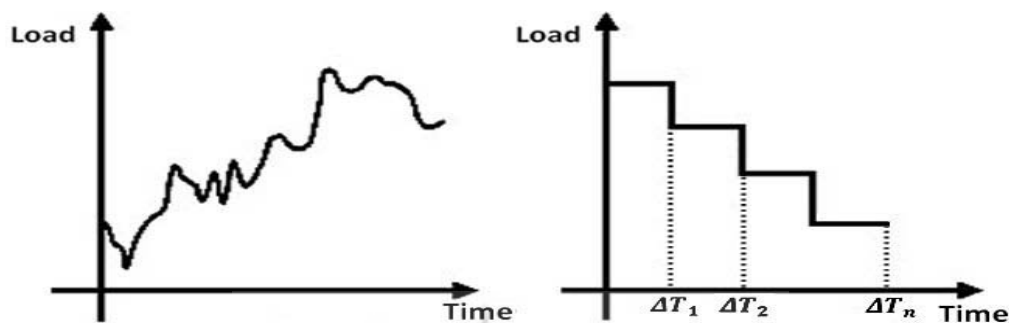
مدل سازی ریاضی مسأله

در این بخش، مدل بار، تولیدات پراکنده، تابع هدف و قیود به کار گرفته شده جهت تعیین مکان، نوع، تعداد و اندازه خازن های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه های توزیع مجهز به منابع تولید پراکنده بیان می شوند.

الف) مدل سازی بار

همان گونه که می دانیم بار در شبکه های توزیع ثابت نیست و همواره متغیر می باشد. این تغییرات در طی ساعات شبانه روز به دلیل تغییر نوع مصرف و در طول سال براساس تغییرات فصول مختلف صورت می پذیرد. لذا برای مدل سازی دقیق بار استفاده از مدل متغیر با زمان آن پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه مدل تغییرات ساعتی بار، حجم محاسبات و در نتیجه، زمان لازم برای انجام شبیه سازی را افزایش می دهد، لذا می توان برای کاهش پیچیدگی های مسأله این تغییرات را

به سطوح معینی دسته بندی کرد که به منحنی تداومی بار موسوم می باشد همانند شکل (۱). هرچه تعداد سطوح در نظر گرفته شده بیشتر باشد، دقت محاسبات در قبال افزایش زمان طراحی بیشتر می گردد [۶].



شکل (۱) نمودار تغییرات زمانی و سطح بندی بار

ب) مدل سازی منابع تولید پراکنده

به طور کلی، منابع تولید پراکنده ای که به شبکه های توزیع متصل می شوند، به دلیل کوچک بودن ظرفیت تولیدیشان نمی توان آنها را همانند نیروگاه های متمرکز که شین متصل شده به آنها را همواره PV در نظر می گرفتیم در نظر گرفت. لذا منابع تولید پراکنده از لحاظ بهره برداری در شبکه های توزیع، به دو گروه زیر تقسیم می شوند [۹]:

به صورت مدل PV

در شبیه سازی مولد به صورت مدل PV، مولد ولتاژی ثابت را تحت زاویه فازی معین تحویل شبکه می دهد. در این حالت، وظیفه منبع تولید انرژی، حفظ دامنه ولتاژ شین در محدوده مجاز است. زمانی این امر ممکن می شود که منبع DG قادر باشد، توان راکتیو بارهای مصرفی متصل به آن شین را تامین کند.

به صورت مدل PQ

در شبیه سازی مولد بصورت مدل PQ، مولد توان اکتیو و راکتیو معینی را به شبکه تزریق می کند و یا از واحدهای DG در یک ضریب توان ثابت بهره برداری می شود. این مدل سازی شبیه مدل سازی بارهای توان ثابت می باشد، با این تفاوت که جریان به داخل شین تزریق می گردد. در این حالت، وظیفه منبع DG تغذیه شبکه و تأمین بخشی از توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز آن است. این حالت، زمانی اتفاق می افتد که مولد قادر به تولید توان راکتیو مورد نیاز نباشد.

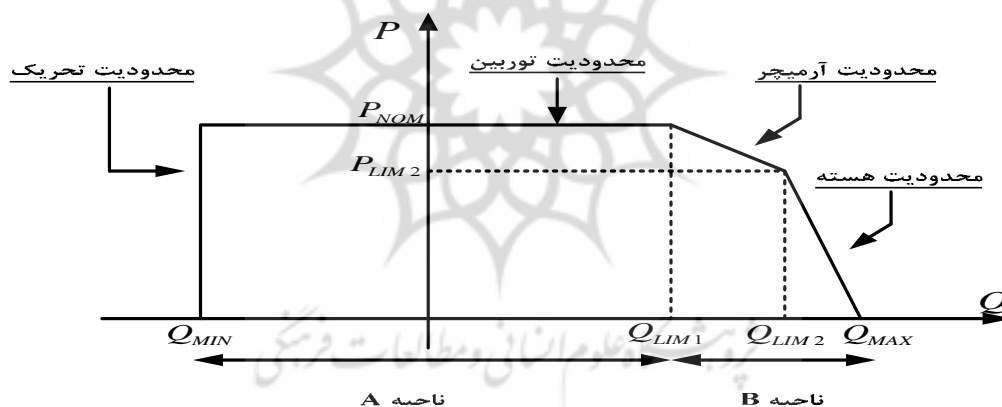
مقایسه و انتخاب مدل

در نظر گرفتن هر کدام از مدل های یاد شده بستگی به فلسفه و چگونگی بهره برداری از DG در شبکه توزیع خواهد

داشت. باید توجه داشت که مدل PV تولید پراکنده تا زمانی معتبر است که توان اکتیو و راکتیو تحویلی آن از ظرفیت مجاز تولید مولد تجاوز نکند. در غیر این صورت، توان اکتیو و راکتیو در همان حد ماکزیمم و یا مینییمم ثابت می شود و این شین از حالت PV به PQ تبدیل می گردد.

براین اساس، در این مقاله فرض می شود که منابع تولید پراکنده به کار رفته در شبکه قابلیت تولید توان راکتیو مطابق منحنی قابلیت شکل (۲) در ناحیه A را دارند [۷]. در این ناحیه منحنی، تولید توان راکتیو هیچگونه اثری بر تولید توان اکتیو مولد ندارد. بنابراین، می توان هزینه تولید توان راکتیو در این ناحیه را صفر در نظر گرفت. اخذ توان راکتیو از مولد در ناحیه B، موجب کاهش تولید توان اکتیو می گردد.

براساس اطلاعات موجود، هزینه تولید هر واحد توان راکتیو در این ناحیه توسط مولد بیشتر از هزینه تولید توان راکتیو توسط خازن می باشد. از طرف دیگر، هدف از نصب و بهره برداری از مولدهای تولید پراکنده تولید توان اکتیو می باشد. از این رو، بهره برداری از مولد در ناحیه B اقتصادی و مقرون به صرفه نبوده و اجازه کار به مولد در این ناحیه داده نخواهد شد و مابقی توان راکتیو مورد نیاز بارها توسط خازن های ثابت و سوئیچ شونده تامین می گردد.



شکل (۲) منحنی قابلیت تولید توان منبع تولید پراکنده

تابع هدف مسأله

تابع هدف پیشنهاد شده در این تحقیق جهت خازن گذاری و کنترل توان راکتیو شامل بخش های زیر می باشد:

هزینه تلفات انرژی

به ازای هر کیلووات ساعت تولید انرژی، هزینه مشخصی محاسبه می گردد که این هزینه با توجه به تعیین سوخت و هزینه های تولید در هر کشور متفاوت می باشد. به منظور محاسبه هزینه تلفات انرژی شبکه، باید مجموع انرژی تلفاتی در

سطوح بار مختلف در طول پریود مورد مطالعه (معمولاً یکسال) محاسبه گردد. در رابطه (۱) نحوه محاسبه انرژی تلفاتی ارائه گردیده است.

$$CE_{Loss} = C_e \left(\sum_{j=1}^M \sum_{i=0}^{N-1} P_{Loss(i,i+1)}^{\Delta T_j} \cdot \Delta T_j \right) \quad \text{که در آن: (۱)}$$

CE_{Loss} : مجموع هزینه تلفات انرژی

$P_{loss(i,i+1)}^{\Delta T_j}$: تلفات توان اکتیو در سکشن $(i, i + 1)$ در سطح بار j و در مدت زمان ΔT_j

C_e : قیمت هر کیلووات ساعت انرژی

N : تعداد شین های شبکه

M : تعداد سطوح بار

هزینه خازن گذاری

برای اینکه هزینه خازن ها دارای انعطاف زیادی باشد، روند کاملی برای هزینه خازن ها در نظر گرفته شده است. بدین صورت که هزینه خازن های ثابت و سوئیچ شونده به طور مستقل از هم بوده و هر کدام دارای دو جزء می باشند که یک قسمت از هزینه ها برای هر بانک نصب شده به صورت ثابت (هزینه نصب) و قسمت دیگر به صورت ضریبی از مقدار خازن نصب شده می باشد (هزینه خرید). رابطه (۳) نشان دهنده نحوه محاسبه هزینه خازن گذاری می باشد.

$$C_{capacitor} = (M_f * C_{If} + \sum_{i=1}^N C_{vf} * Q_{fi}) + (M_s * C_{Is} + \sum_{i=1}^N C_{vs} * Q_{si}) \quad (۳)$$

که در آن:

M_f : تعداد خازن های ثابت نصب شده در شبکه

M_s : تعداد خازن های سوئیچ شونده نصب شده در شبکه

C_{If} : هزینه نصب خازن های ثابت

C_{Is} : هزینه نصب خازن های سوئیچ شونده

Q_{fi} : مقدار خازن ثابت نصب شده در باس i ام

Q_{si} : مقدار خازن سوئیچ شونده نصب شده در باس i ام

C_{vf} : هزینه هر کیلووات خازن ثابت

C_{VS} : هزینه هر کیلووار خازن سوئیچ شونده

در نهایت، تابع هزینه کل به منظور جایابی و اندازه یابی بهینه خازن های ثابت و سوئیچ شونده به صورت زیر می باشد:

$$Min.F = CE_{Loss} + CP_{Loss}^{Peak} + C_{capacitor} \quad (۴)$$

قیود مسأله

قیود و محدودیت های حاکم بر مسأله عبارتند از:

۱- رعایت محدوده مجاز ولتاژ گره ها :

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (۵)$$

۲- رعایت محدوده جریان مجاز خطوط :

$$I_{(i,i+1)} \leq I_{(i,i+1)\max} \quad (۶)$$

۳- رعایت قید حداکثر جبران در شبکه :

$$\sum_{i=1}^N (Q_{fi} + Q_{si}) \leq \sum_{i=1}^N Q_{Loadi} \quad (۷)$$

که در آن Q_{Loadi} بار راکتیو متصل به گره i -ام می باشد

۴- لحاظ کردن محدودیت حداکثر بودجه در دسترس برای خرید و نصب خازن

$$C_{capacitor} \leq Budget \quad (۸)$$

با استفاده از این قید، عمل خازن گذاری تا در دسترس بودن بودجه برای خرید و نصب خازن صورت می گیرد.

معرفی روش بهینه سازی پیشنهادی

با توجه به اینکه میزان مصرف توان در شبکه های توزیع با تغییرات فصلی، ماهانه و ساعتی تغییر می کند، لذا پیدا کردن مکان بهینه برای خازن های ثابت و سوئیچ شونده باید با توجه به این تغییرات صورت گیرد.

در این تحقیق برای انجام بهینه سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و برای وارد کردن سطوح بار در انجام بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک بهبود یافته ای با معرفی کدگذاری و اپراتورهای جدیدی پیشنهاد گردید که در ادامه تشریح آن خواهد آمد.

کد گذاری متغیرهای تصمیم

در اکثر روش های انجام شده برای خازن گذاری، پس از انجام محاسبات لازم که از طریق روش های گوناگونی انجام می پذیرد، تقریب هایی در نتایج بدست آمده لحاظ می شود تا با مقادیر بانک های خازنی موجود و در دسترس مطابقت پیدا کند که این خود باعث خارج شدن از نقطه بهینه به دست آمده می شود. در این بخش، قبل از معرفی ساختار کروموزوم پیشنهادی به معرفی جدول کدگذاری خازن های در دسترس می پردازیم تا بتوانیم با استفاده از مقادیر ممکن خازن ها حالت بهینه را ایجاد کنیم.

ابتدا مقادیر موجود بانک های خازنی به صورت یک مجموعه به الگوریتم ارائه می گردد، در ادامه با استفاده از مقادیر ارائه شده ترکیب های ممکن از خازن ها ایجاد می شود. مطابق جدول (۱) در نهایت مجموعه ای به دست می آید که اعضای آن مقادیر مورد نظر برای قرار گرفتن در هر یک از نقاط نامزد می باشند. شماره ردیف هر یک از اعضا در این مجموعه به عنوان کد مربوط به آن عضو در نظر گرفته می شود. با این روش، یک مجموعه منطبق بر واقعیت وجود خواهد داشت که الگوریتم فقط با استفاده از آن جستجو را انجام می دهد. برای اینکه در خازن گذاری شرایط وجود و یا عدم خازن ها در حالت انتخاب تصادفی حل شود، در مجموعه بدست آمده تعدادی عدد صفر قرار می گیرد. $C_1, \dots, C_K, \dots, C_M$ مجموعه خازن های در دسترس برای نصب در هر یک از شین های شبکه می باشند.

جدول (۱) کدگذاری خازن های انتخابی ثابت و قابل کلیدزنی

C_1	.....	C_k	.....	C_M
1	.....	k	.....	M

در روش پیشنهادی در این مقاله برای حل مسأله مورد نظر، کروموزوم در نظر گرفته شده شامل m سطر و n ستون می باشد که در آن، n نشان دهنده تعداد شین های شبکه می باشد. سطر اول، نشان دهنده مقدار خازن ثابتی است که باید در هر یک از شین های شبکه نصب شود و مابقی سطرها ($m-1$) نشان دهنده مقدار خازن سوئیچ شونده ای است که باید در هر یک از سطوح بار شبکه وارد مدار شوند. شکل (۳) ساختار کروموزوم و ژن های پیشنهادی در مسأله را نشان می دهد، چنین ساختاری را کروموزوم سطحی می نامیم^۱.

۱) Surface Chromosome

	Bus 1	.....	Bus j	.....	Bus n
خازن ثابت	$x_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	.....	$x_{F_{1n}}$
خازن سوئیچ شونده در سطح بار اول	$x_{S_{21}}$	$x_{S_{22}}$	$x_{S_{23}}$	.....	$x_{S_{2n}}$
.....					
خازن سوئیچ شونده در سطح بار i -ام	.....	.....	.....	$x_{S_{ij}}$	.....
.....					
خازن سوئیچ شونده در سطح بار $m-1$	$x_{S_{m1}}$	$x_{S_{m2}}$	$x_{S_{m3}}$	.....	$x_{S_{mn}}$

شکل ۳) ساختار کروموزوم پیشنهادی (کروموزوم سطحی)

که در آن :

$$x_{F_{i,j}}, x_{S_{i,j}} = \begin{cases} 0 & i = 2, 3, \dots, m \\ k & j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

با استفاده از ساختار کروموزوم پیشنهادی علاوه بر جایابی همزمان خازن های ثابت و سوئیچ شونده، زمان وارد شدن و خارج شدن خازن های سوئیچ شونده با توجه به تغییرات سطوح بار نیز مدل شده است.

تشکیل جمعیت اولیه

در الگوریتم پیشنهادی، اعضای جمعیت اولیه کاملاً به صورت تصادفی تشکیل می شوند. مقدار خازن موجود در هر شین توسط یک عدد تصادفی که در محدوده کدگذاری خازن های در دسترس مابین صفر و M (ماکزیمم کد خازن در دسترس) می باشد، تعیین شده است. در این روش، جمعیت های کاملاً تصادفی به وجود می آیند که تنوع خوبی در جمعیت اولیه ایجاد می کند. از طرفی، با توجه به تصادفی بودن مقادیر، هیچ گونه جهت دهی خاصی برای الگوریتم صورت نمی گیرد.

عملگر تقاطع (Crossover)

در الگوریتم ژنتیک نسل های جدید عمدتاً به وسیله عملگر تقاطع تولید می شوند. در این مقاله، دو نوع عملگر تقاطع

متفاوت معرفی و در روند الگوریتم مورد استفاده قرار گرفته است.

عملگر تقاطع سطری

در این روش، پس از انتخاب دو کروموزوم، دو عدد تصادفی در محدوده تعداد سطرهای کروموزوم تولید می‌شوند. بر این اساس، اطلاعات دوسطر انتخاب شده از جمعیت اول با اطلاعات دوسطر انتخاب شده از جمعیت دوم جابجا می‌شود و قسمت‌های دیگر ثابت باقی می‌مانند. شکل (۴) چگونگی عملگر تقاطع سطری را نشان می‌دهد.

parent				offspring			
$x_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$	$x_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$
$x_{S_{21}}$	$x_{S_{22}}$	$x_{S_{23}}$	$x_{S_{24}}$	$y_{S_{21}}$	$y_{S_{22}}$	$y_{S_{23}}$	$y_{S_{24}}$
$x_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$x_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$	$x_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$x_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$
$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$	$y_{S_{41}}$	$y_{S_{42}}$	$y_{S_{43}}$	$y_{S_{44}}$
$y_{F_{11}}$	$y_{F_{12}}$	$y_{F_{13}}$	$y_{F_{14}}$	$y_{F_{11}}$	$y_{F_{12}}$	$y_{F_{13}}$	$y_{F_{14}}$
$y_{S_{21}}$	$y_{S_{22}}$	$y_{S_{23}}$	$y_{S_{24}}$	$x_{S_{21}}$	$x_{S_{22}}$	$x_{S_{23}}$	$x_{S_{24}}$
$y_{S_{31}}$	$y_{S_{32}}$	$y_{S_{33}}$	$y_{S_{34}}$	$y_{S_{31}}$	$y_{S_{32}}$	$y_{S_{33}}$	$y_{S_{34}}$
$y_{S_{41}}$	$y_{S_{42}}$	$y_{S_{43}}$	$y_{S_{44}}$	$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$

شکل ۴) نحوه انجام عمل تقاطع سطری برای یک شبکه توزیع چهار شینه با سه سطح بار فرضی

عملگر تقاطع سطری - آرایه‌ای

در تقاطع سطری - آرایه‌ای همانند روش قبل، علاوه بر اینکه اطلاعات دوسطر جابجا می‌شوند، چند ژن نیز به صورت کاملاً تصادفی از دو کروموزوم انتخاب شده و اطلاعات آن ژن‌ها نیز جابجا می‌شوند. شکل (۵) چگونگی عملگر تقاطع سطری - آرایه‌ای را نشان می‌دهد.

parent				offspring			
$x_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$	$y_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$
$x_{S_{21}}$	$x_{S_{22}}$	$x_{S_{23}}$	$x_{S_{24}}$	$y_{S_{21}}$	$y_{S_{22}}$	$y_{S_{23}}$	$y_{S_{24}}$
$x_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$x_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$	$y_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$y_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$
$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$	$y_{S_{41}}$	$y_{S_{42}}$	$y_{S_{43}}$	$y_{S_{44}}$
$y_{F_{11}}$	$y_{F_{12}}$	$y_{F_{13}}$	$y_{F_{14}}$	$x_{F_{11}}$	$y_{F_{12}}$	$y_{F_{13}}$	$y_{F_{14}}$
$y_{S_{21}}$	$y_{S_{22}}$	$y_{S_{23}}$	$y_{S_{24}}$	$x_{S_{21}}$	$x_{S_{22}}$	$x_{S_{23}}$	$x_{S_{24}}$
$y_{S_{31}}$	$y_{S_{32}}$	$y_{S_{33}}$	$y_{S_{34}}$	$x_{S_{31}}$	$y_{S_{32}}$	$x_{S_{33}}$	$y_{S_{34}}$
$y_{S_{41}}$	$y_{S_{42}}$	$y_{S_{43}}$	$y_{S_{44}}$	$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$

شکل ۵) نحوه انجام عمل تقاطع سطری - آرایه‌ای برای یک شبکه توزیع چهار شینه با سه سطح بار فرضی

عملگر جهش (Mutation)

این عملگر برای جلوگیری از همگرایی زودرس الگوریتم ژنتیک و نیز جلوگیری از توقف الگوریتم در نقاط بهینه محلی انجام می‌گیرد. در واقع، با استفاده از جهش تنوع در فضای جستجو بیشتر شده و نقاط بیشتری از فضا جستجو می‌شود. در این مقاله از دو نوع جهش به شرح زیر استفاده شده است:

عملگر جهش سطری

در این روش، یک عدد تصادفی در محدوده تعداد سطرها (تعداد سطوح بار) تولید می‌شود، سپس به تعداد ژن‌های موجود در آن سطر (تعداد شین‌های شبکه) در محدوده کدگذاری توضیح داده شده در جدول (۱) چند عدد تصادفی تولید می‌شود و محتوی ژن‌های مشخص شده به مقدار جدید تغییر پیدا می‌کنند. شکل (۶) چگونگی این عملگر را نشان می‌دهد.

$x_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$	$x_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$
$x_{S_{21}}$	$x_{S_{22}}$	$x_{S_{23}}$	$x_{S_{24}}$	$x'_{S_{21}}$	$x'_{S_{22}}$	$x'_{S_{23}}$	$x'_{S_{24}}$
$x_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$x_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$	$x_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$x_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$
$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$	$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$

شکل ۶) نحوه انجام عمل جهش سطری برای یک شبکه توزیع چهار شینه با سه سطح بار فرضی

عملگر جهش سطری - آرایه‌ای

در این روش، علاوه بر اینکه اطلاعات موجود در یک سطر به مقدار جدید تغییر پیدا می‌کند، چند ژن نیز به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شده و اطلاعات موجود در آن در محدوده کدگذاری توضیح داده شده در جدول (۱) به مقدار جدید تغییر پیدا می‌کند. چگونگی این عملگر در شکل (۷) نشان داده شده است.

$x_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$	$x'_{F_{11}}$	$x_{F_{12}}$	$x_{F_{13}}$	$x_{F_{14}}$
$x_{S_{21}}$	$x_{S_{22}}$	$x_{S_{23}}$	$x_{S_{24}}$	$x'_{S_{21}}$	$x'_{S_{22}}$	$x'_{S_{23}}$	$x'_{S_{24}}$
$x_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$x_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$	$x'_{S_{31}}$	$x_{S_{32}}$	$x'_{S_{33}}$	$x_{S_{34}}$
$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$	$x_{S_{41}}$	$x_{S_{42}}$	$x_{S_{43}}$	$x_{S_{44}}$

شکل ۷) نحوه انجام عمل جهش سطری - آرایه‌ای برای یک شبکه توزیع چهار شینه با سه سطح بار فرضی

تابع برازندگی

در روش ارائه شده، با توجه به اینکه هدف کمینه سازی تابع هزینه می باشد، لذا برازندگی را می توان به عنوان عکس تابع هزینه هر کروموزوم تعریف کرد. بنابراین، با کاهش یافتن تابع هزینه، مقدار برازندگی آن افزایش می یابد.

$$FitnessFunction = \frac{1}{CostFunction} \quad (10)$$

مراحل الگوریتم پیشنهادی

با در نظر گرفتن مطالب ذکر شده، برای حل مسأله جایابی همزمان خازن های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه های توزیع بار متغیر مجهز به منابع تولید پراکنده، مراحل الگوریتم را می توان به صورت زیر بیان کرد:

۱- خواندن اطلاعات شبکه شامل اطلاعات پخش بار، خازن های در دسترس، تولیدات پراکنده، بودجه در دسترس برای خرید و نصب خازن و ضرایب اقتصادی تابع هدف.

۲- تشکیل جمعیت اولیه

۳- انجام پخش بار شبکه و محاسبه ولتاژ شین ها، جریان خطوط و تلفات شبکه برای هر کروموزوم

۴- محاسبه تابع هدف و تابع برازندگی برای هر کروموزوم با استفاده از نتایج مرحله قبل

۵- انجام عملگرهای تقاطع سطری و سطری - آرایه ای

۶- انجام عملگرهای جهش سطری و سطری - آرایه ای

۷- انجام پخش بار، محاسبه تابع هدف و برازندگی کروموزوم های جدید تولید شده

۸- در این مرحله، مرتب سازی کروموزوم ها بر اساس مقدار برازندگی آنها صورت می گیرد. سپس، تعداد مشخصی از کروموزوم ها بر اساس میزان برازندگی آنها به ترتیب به عنوان جمعیت نخبه انتخاب می شوند.

۹- اگر تعداد تکرار مجاز به اتمام رسیده باشد، الگوریتم پایان یافته و نتایج ارائه می گردد. در غیر این صورت، الگوریتم به مرحله ۵ بازگشته و این فرایند ادامه پیدا می کند تا شرایط توقف فراهم شود.

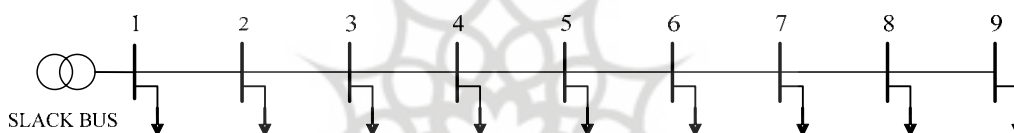
مطالعات عددی

برای مشخص شدن کارایی الگوریتم ارائه شده در جایابی خازن های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه های توزیع بار متغیر در حضور منابع تولید پراکنده، در ابتدا الگوریتم ارائه شده بر روی شبکه ۹ شینه معرفی شده در مرجع [۱۰] اعمال گردیده و با نتایج دو روش ارائه شده در مراجع [۳ و ۸] مقایسه می گردد. سپس جایابی خازن های ثابت و سوئیچ شونده بر روی شبکه محلی ۱۸ شینه انجام می گیرد. تلفات، پروفیل ولتاژ و

هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای سه سطح بار در نظر گرفته شده و تاثیر حضور منابع تولید پراکنده و نحوه مدل‌سازی آنها در مکان و حجم خازن‌های جایابی شده مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که الگوریتم ارائه شده در محیط MATLAB برنامه‌نویسی شده و بر روی شبکه‌های تست اعمال گردیده است.

شبکه تست ۹ شینه

برای سنجش میزان کارایی الگوریتم، از شبکه ۹، ۲۳ kV، شینه که دیاگرام تک خطی آن در شکل (۸) نشان داده شده، استفاده گردیده است. اطلاعات مربوط به این شبکه در مرجع [۱۰] آورده شده است. برای این شبکه سه سطح بار به صورت زیر در نظر گرفته شده است:



شکل ۸) شبکه ۹ شینه مورد مطالعه

۱. بار پایه (S_1) با مدت زمان تداوم $T_1 = 1000$ ساعت

۲. بار متوسط (S_2) با مدت زمان تداوم $T_2 = 6760$ ساعت

۳. بار ماکزیمم (S_3) با مدت زمان تداوم $T_3 = 1000$ ساعت

برای انجام یکسان‌سازی با دو مرجع [۳ و ۸] تابع هدف را به صورت زیر تغییر می‌دهیم

$$\text{Min.} F = C_p \cdot P_{\text{Loss}}^{\text{Peak}} + C_e \sum_{i=1}^N P_i \cdot \Delta T_i + \sum_{i=1}^N K_c \cdot Q_i \quad (11)$$

به طوری که $\sum_{i=1}^N Q_i$ مجموع خازن‌های نصب شده در شبکه می‌باشد. پله‌های خازنی موجود ۳۰۰ kVar بوده و

حداکثر ۱۵۰۰ kVar خازن می‌تواند در هریک از شین‌های شبکه قرار گیرد. ضرایب اقتصادی تابع هدف به صورت زیر می‌باشند:

$$C_e = 0.06 \text{ \$/kWh}$$

• هزینه هر کیلووات ساعت انرژی

- هزینه تلفات توان اکتیو در زمان بار پیک $C_p = 168 \text{ \$/kW-year}$
- هزینه هر کیلووات خازن $K_c = 4.9 \text{ \$/kVar}$

جدول (۲) مکان و مقدار خازن های پیشنهاد شده به روش ارائه شده در مقاله و الگوریتم های پیشنهادی در دو مرجع [۸ و ۳] را نشان می دهد.

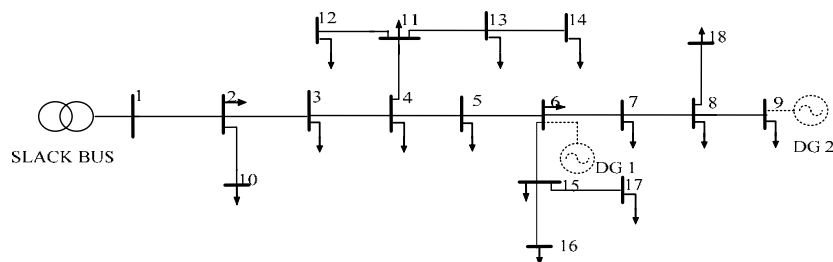
جدول (۲) مقایسه مکان و ظرفیت خازن های پیشنهادی شبکه ۹ شینه

Bus No	Without capacitors	GA based [8]			Tabu search [3]			Our proposed Switched			
		S_1	S_2	S_3	S_1	S_2	S_3	Fixed	S_1	S_2	S_3
1		0	0	0	0	0	300	0	0	0	0
2		0	300	600	0	300	300	0	0	0	0
3		300	600	1500	0	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	300	0	300	300	0	0	300
5		0	0	0	0	600	600	600	0	0	300
6		0	0	0	900	1200	1200	0	0	0	300
8		0	0	0	0	0	0	300	0	0	300
9		0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
\$Cost	329,039	309,757			307,586			307,520			

با مقایسه نتایج ارائه شده در جدول (۲) مشاهده می گردد که اولاً: در دو روش ارائه شده در مراجع [۸ و ۳] برای جابجایی خازن، الگوریتم باید به تعداد سطوح بار در نظر گرفته شده تکرار گردد. سپس مینیمم خازن بدست آمده در هر شین را به عنوان خازن ثابت و مابقی خازن ها را به عنوان خازن سوئیچ شونده در آن سطح بار در نظر می گیرند، در حالی که در روش ارائه شده در این تحقیق در سطوح مختلف بار جابجایی خازن های ثابت و سوئیچ شونده به طور همزمان صورت می گیرد. ثانیاً: مقدار تابع هزینه در روش ارائه شده نسبت به دو روش دیگر کمتر می باشد.

شبکه تست ۱۸ شینه

شبکه مورد مطالعه، یک شبکه ۲۰KV، ۱۸ شینه می باشد که دیاگرام تک خطی آن در شکل (۹) نشان داده شده است. اطلاعات خطوط و بار حداکثر در مرجع [۱] ارائه شده است.



شکل (۹) شبکه ۱۸ شینه مورد مطالعه

در این مطالعه، فرض شده است که تغییرات بار شبکه قابل تقسیم به سه سطح بار پایه، متوسط و پیک می باشد. شکل (۱۰) نمودار سطح بندی شده تغییرات بار و مدت زمان تداوم هر یک را نشان می دهد. جدول (۳) اطلاعات هزینه ای مورد نیاز برای محاسبه تابع هدف را نشان می دهد. انحراف ولتاژ مجاز برای تمام شین ها $(\Delta V = \pm 5\%)$ می باشد و هر پله خازنی معادل ۱۵۰ kVar، و حداکثر تعداد این پله ها برابر ۴ در نظر گرفته شده است. برای بررسی تأثیر حضور منابع تولید پراکنده بر جایابی خازن در شبکه مورد نظر و مقایسه آن با جایابی خازن در صورت عدم حضور منابع تولید پراکنده، دو حالت زیر در نظر گرفته شده است و تلفات، پروفیل ولتاژ و هزینه های سرمایه گذاری از جمله مواردی است که در نتایج به بررسی و مقایسه آن پرداخته شده است.

جدول (۳) اطلاعات هزینه ای مورد استفاده

پارامترها	واحد	مقدار
C_P	\$/kW-year	120
C_e	\$/kWh	0.1
C_{If}	\$	20
C_{vf}	\$/kVar-year	3
C_{Is}	\$	30
C_{vs}	\$/kVar-year	9



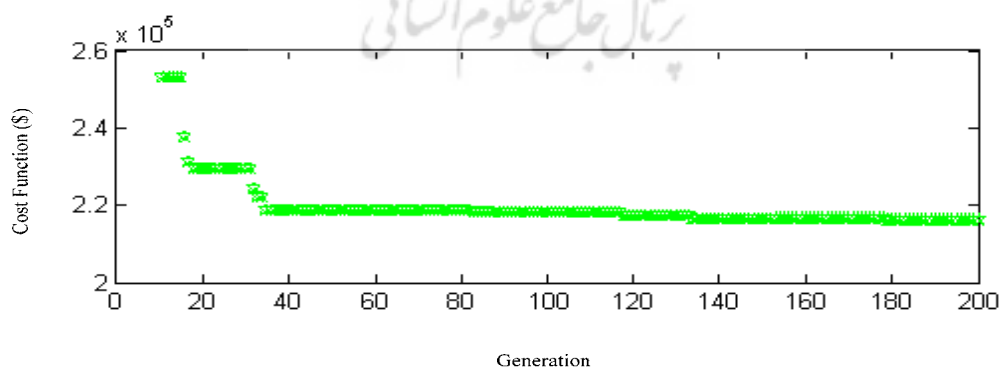
شکل (۱۰) نمودار سطح بندی شده تغییرات بار

آزمایش ۱ (مطالعه شبکه بدون در نظر گرفتن DG)

در این آزمایش، مکان یابی خازن های ثابت و سوئیچ شونده در حالی انجام می شود که هیچ منبع تولید پراکنده ای در شبکه وجود نداشته باشد. مکان و ظرفیت خازن های ثابت و سوئیچ شونده پیشنهادی در سطوح مختلف بار در جدول (۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود به علت ارزان تر بودن خرید و نصب خازن های ثابت، تعداد این خازن ها در شبکه بیشتر می باشد اما در سطح بار، ماکزیمم به علت توان راکتیو بالای بارهای شبکه (حدود ۶ MVar) و افت ولتاژ شدید در این سطح بار، تعداد خازن های سوئیچ شونده بیشتری نسبت به سطوح دیگر بار جایابی شده اند. تغییرات مقدار تابع هزینه در مقابل افزایش تعداد نسل الگوریتم ژنتیک در شکل (۱۱) نشان داده شده است. بیشترین کاهش مقدار تابع هزینه در ۳۰ نسل ابتدایی صورت گرفته است اما برای رسیدن به مقدار بهینه الگوریتم تا ۲۰۰ نسل ادامه پیدا کرده است.

جدول ۴) مکان و ظرفیت خازن های پیشنهادی برای شبکه ۱۸ شینه

مقدار خازن سوئیچ شونده (kVar)			مقدار خازن ثابت (kVar)	شماره شین
بار حداکثر	بار متوسط	بار پایه		
۳۰۰	۰	۰	۳۰۰	۷
۶۰۰	۰	۰	۰	۸
۱۵۰	۰	۰	۱۵۰	۹
۰	۰	۰	۴۵۰	۱۳
۴۵۰	۰	۰	۱۵۰	۱۵
۰	۰	۰	۱۵۰	۱۶
۶۰۰	۰	۰	۶۰۰	۱۷
۴۵۰	۴۵۰	۰	۰	۱۸



شکل (۱۱) همگرایی الگوریتم ژنتیک در آزمایش ۱

مقایسه نتایج قبل و بعد از خازن گذاری در سطوح مختلف بار در جدول (۵) نشان داده شده است. اطلاعات جدول دور از انتظار نبوده است و مشاهده می شود که با افزایش سطح بار، میزان تلفات و افت ولتاژ در شین های شبکه افزایش یافته و به دنبال آن هزینه کل سیستم افزایش می یابد، به طوری که مقدار تابع هدف قبل از جبران سازی ۲۶۱۴۵۰ دلار می باشد اما بعد از جبران سازی، این مقدار به ۲۱۶۳۶۰ دلار می رسد که ۴۵۰۹۰ دلار منفعت ایجاد می کند.

جدول ۵) مقایسه نتایج قبل و بعد از جبران سازی در آزمایش-۱

قبل از جبران سازی	بعد از جبران سازی		
۲۶۱.۴۵۰	۲۱۶.۳۶۰	مجموع تابع هزینه (\$))	
۲۶۱.۴۵۰	۱۸۳.۶۳۰	مجموع هزینه تلفات (\$))	
۰	۳۲.۷۳۰	مجموع هزینه خازن گذاری (\$))	
۰/۹۲۱۴	۰/۹۵۰۲	$V_{min}^{18} *$	سطح بار ماکزیمم
۴۷۸/۷۸۷۸	۳۲۷/۵۱۵۸	تلفات (kW)	
۰/۹۴۶۲	۰/۹۶۰۳	V_{min}^{18}	سطح بار متوسط
۲۲۵/۱۲۵۲	۱۶۰/۸۱۷۱	تلفات (kW)	
۰/۹۷۷۶	۰/۹۸۶۹	V_{min}^{18}	سطح بار پایه
۳۹/۲۹۳۷	۲۸/۵۹۹۸	تلفات (kW)	

* کمترین ولتاژ شبکه در سطح بار مورد مطالعه

آزمایش ۲) مطالعه شبکه با جبران سازی توسط خازن و DG

بدین منظور، در شبکه ۱۸ شینه مورد بررسی، دو منبع تولید پراکنده را که مشخصات آنها در جدول (۶) آمده است در بسایر ۶ و ۹ به طور جداگانه قرار می دهیم و جایابی خازن های ثابت و سوئیچ شونده را در این حالت انجام می دهیم.

جدول ۶) مشخصات واحد های تولید پراکنده

DG1	DG2	
۴۰۰	۶۰۰	توان اکتیو (kW)
۱۰۰	۵۰۰	ماکزیمم توان راکتیو (kVar)
۱۰۰	-۵۰۰	ماکزیمم توان راکتیو (kVar)
PQ	PV	مدل شینه سازی

مکان و ظرفیت خازن های پیشنهادی در جدول (۷) نشان داده شده است. مقایسه نتایج قبل و بعد از خازن گذاری در سطوح مختلف بار در حضور منابع تولید پراکنده در جدول (۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود تلفات

به طور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده که نتیجه آن کاهش قابل ملاحظه مقدار تابع هزینه می باشد. مقدار تابع هدف از ۱۹۱۸۷۰ دلار به ۱۳۱۷۸۰ دلار رسیده که ۴۶۳۷۰ دلار منفعت ایجاد شده در طول دوره بهره برداری یکساله را نشان می دهد.

جدول (۷) مکان و ظرفیت خازن های پیشنهادی در حضور منابع تولید پراکنده

مقدار خازن سوئیچ شونده (kVar)			مقدار خازن ثابت (kVar)	باس
بار حداکثر	بار متوسط	بار پایه		
۰	۰	۰	۶۰۰	۸
۱۵۰	۰	۰	۴۵۰	۹
۰	۰	۰	۱۵۰	۱۳
۰	۰	۰	۱۵۰	۱۴
۱۵۰	۱۵۰	۰	۰	۱۶
۰	۰	۰	۴۵۰	۱۷
۴۵۰	۰	۰	۰	۱۸

جدول (۸) مقایسه نتایج قبل و بعد از جبران سازی در آزمایش ۲

بعد از جبران سازی	قبل از جبران سازی		
۱۴۵۵۰۰	۱۹۱۸۷۰	مجموع تابع هزینه (\$)	
۱۳۱۷۸۰	۱۹۱۸۷۰	مجموع هزینه تلفات (\$)	
۱۳۷۲۰	۰	مجموع هزینه خازن گذاری (\$)	
۰/۹۵۶۲	۰/۹۴۵۸	V_{min}^{18}	سطح بار ماکزیمم
۲۶۲/۹۵۶۴	۳۷۴/۵۷۳۱	تلفات (kW)	
۰/۹۵۹۵	۰/۹۵۶۵	V_{min}^{18}	سطح بار متوسط
۱۰۷/۳۰۹۰	۱۵۹/۳۳۰۵	تلفات (kW)	
۰/۹۹۸۵	۰/۹۹۸۱	V_{min}^{18}	سطح بار پایه
۱۳/۸۳۶۶	۱۷/۵۴۰۷	تلفات (kW)	

مقایسه نتایج

برای بررسی تأثیر ورود منابع تولید پراکنده به شبکه توزیع و نقش آن در کنترل توان راکتیو و کاهش تلفات در شبکه های توزیع با توجه به نتایج بدست آمده در قسمت های قبل، مقایسه ای در چهار حالت ۱- بدون جبران سازی، ۲- جبران سازی توسط خازن، ۳- جبران توسط نصب منابع تولید پراکنده و ۴- استفاده توأم از خازن و تولید پراکنده انجام شده و نتایج آن در جدول (۹) نشان داده شده است. برای این مقایسه، دو شاخص صرفه اقتصادی ناشی از جبران سازی و درصد متوسط انحراف ولتاژ از محدوده مجاز، که روابط آن در ذیل آمده است، تعریف شده اند.

$$= \frac{\Delta F}{F_0} * 100 \text{ Global Saving (\%)} \quad (12)$$

که در آن :

ΔF : تفاضل مقدار تابع هزینه قبل و بعد از جبران سازی می باشد

F_0 : مقدار تابع هزینه قبل از جبران سازی می باشد

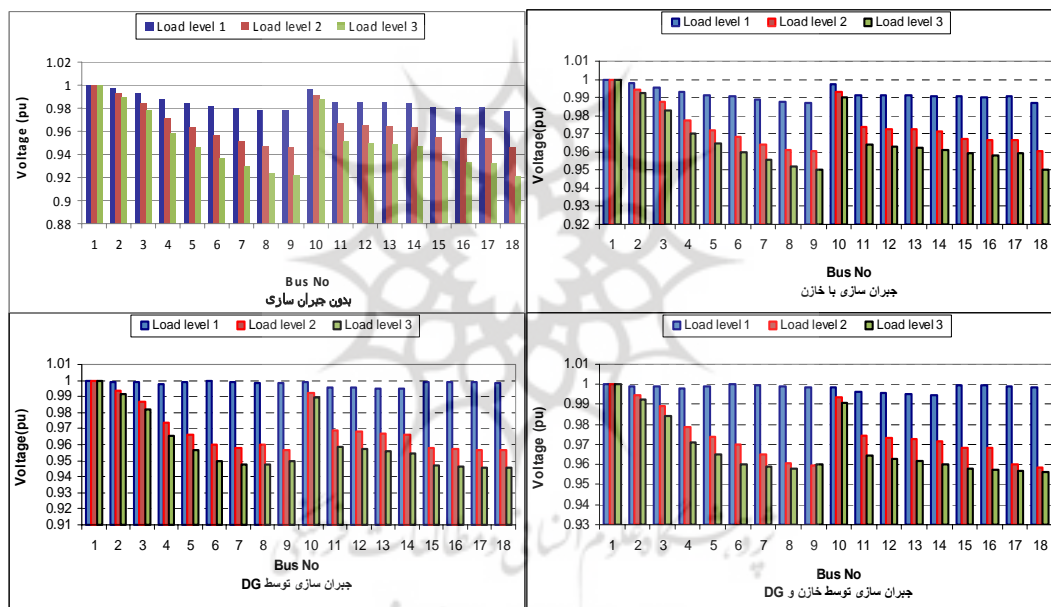
$$I_V = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}{n} * 100 \text{ (Voltage deviation index)} \quad (13)$$

$$\Delta V_i = \begin{cases} 0 & \text{if } V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \\ |V_i - V_{i \min/\max}| & \text{otherwise} \end{cases}$$

جدول (۹) مقایسه نتایج جبران سازی در حالات مختلف

نصب خازن و DG	نصب DG	نصب خازن	بدون جبران سازی	
۱۴۵.۵۰۰	۱۹۱.۸۷۰	۲۱۶.۳۶۰	۲۶۱.۴۵۰	هزینه سالیانه (\$/year)
۱۳۱.۷۸۰	۱۹۱.۸۷۰	۱۸۳.۶۳۰	۲۶۱.۴۵۰	هزینه تلفات (\$/year)
۲۷۰۰	.	۴۸۰۰	.	مجموع خازن نصب شده (kVar)
۴۴/۳۴	۲۶/۶۱	۱۷/۲۴	.	صرفه اقتصادی ناشی از جبران سازی (%)
.	-/۱۱	.	۱/۰۲	متوسط انحراف ولتاژ از مقدار مجاز (%)

پروفیل ولتاژ برای چهار حالت ذکر شده در شرایط بار متوسط و بار حداکثر در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در حالتی که هیچ جبرانی برای شبکه انجام نشده ۱۴ شین شبکه ولتاژ آنها زیر ۰/۹۵ pu قرار گرفته که با ۴۸۰۰ kVar خازن نصب شده در سطوح بار مختلف این مشکل برطرف شده است. با ورود DG به شبکه، این تعداد شین به ۶ شین کاهش پیدا کرده که نشان دهنده این است که با ورود DG سطح ولتاژ شبکه بهبود پیدا کرده و به مقدار مطلوب نزدیکتر شده اما نتوانسته است مشکل ولتاژ شبکه را به طور کامل حل کند که با ۲۷۰۰ kVar خازن نصب شده این مشکل نیز کاملاً برطرف گردیده و به طور قابل ملاحظه ای تلفات شبکه نیز کاهش پیدا کرده است.



شکل (۱۲) پروفیل ولتاژ در چهار حالت عملکرد شبکه

نتیجه گیری

در این مقاله، با معرفی تابع هدف روشی بهینه سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با کدگذاری و اپراتورهای جدید به منظور جایابی خازن های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه های توزیع بار متغیر مجهز به منابع تولید پراکنده ارائه گردید.

در ابتدا برای اطمینان از صحت و کارایی الگوریتم ارائه شده، شبکه تست ۹ شینه انتخاب و نتایج آن با مراجع [۸و۳] مقایسه گردید. بعد از آن، شبکه فشار متوسط ۱۸ شینه به عنوان شبکه تست انتخاب شد، تأثیر مدل سازی بار و ورود منابع تولید پراکنده در جایابی خازن های ثابت و سوئیچ شونده مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که اگرچه منابع تولید

پراکنده باعث کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ می شوند اما ممکن است در مواردی ولتاژ تعدادی از شین ها همچنان زیر حد تعریف شده قرار بگیرند که با جابجایی بهینه خازن ها در کنار منابع تولید پراکنده، می توان دامنه ولتاژ در همه شین ها را به مقدار مطلوب نزدیک تر کرده و موجب کاهش قابل ملاحظه تلفات، به دلیل نزدیکی منابع تولید هر دو نوع توان اکتیو و راکتیو به بارها شد.

منابع

- [1] A. R. Salehinia, et al, 2010, Energy Loss Reduction in Distribution Systems Using GA-Based Optimal Allocation of Fixed and Switched Capacitors, IEEE Energycon, Bahrain.
- [2] D. Das. Optimal capacitor placement in radial distribution system using fuzzy-GA method, 2008, Electrical Power and Energy Systems 361–367A.
- [3] Gallego RA, 2001 et al,. Optimal capacitor placement in radial distribution networks” IEEE Trans Power Syst;16(4):6307.
- [4] G. P. Harrison, 2007 Distributed Generation Capacity Evaluation Using Combined Genetic Algorithm and OPF, International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol. 8: Iss. 2, Article 7.
- [5] M. Begović. et al, 2001, Impact of Renewable Distributed Generation on Power Systems, IEEE Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences.
- [6] M. R. Haghifam. and O. P .Malik, 2007, Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitor placement in distribution system with uncertainty and time varying loads, IET Proc. Proc., Gener. Trans Distrib pp. 244-252.
- [7] R. Caldon, et al, 2002, Reactive power control in distribution networks with dispersed generators : a cost based method Electric, Power System Research.
- [8] Sundhararajan S and Pahwa A. 1994, Optimal selection of capacitors for radial distribution systems using a genetic algorithm”. IEEE Trans Power Syst;9(3):1499–507.
- [9] T. Niknam, et al, 2003, Impact of Distributed Generation on Volt/Var Control in Distribution Network, Proc. IEEE Bologna PowerTech Conference Bologna, Italy.
- [10] V. Miranda, et al, 1996, Genetic algorithm in optimal multistage distribution network planning, IEEE Trans on Power System, 1891-1898.