

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

علیرضا صالحی‌نیا^{۱*}، محمود رضا حقیقی‌فام^۲، مجید شهابی^۳

چکیده:

ورود منابع تولید پراکنده به شبکه توزیع، نحوه بهره برداری و طراحی این شبکه‌ها را دستخوش تغییر کرده است. تاثیر بر مدیریت توان راکتیو و خازن گذاری در شبکه های توزیع از این دسته می باشد. وجود انواع فناوری منابع تولید پراکنده (DG)، نحوه مدل سازی و ظرفیت گوناگون آنها در شبکه می تواند خازن گذاری بهینه را در شبکه توزیع تحت تاثیر قرار دهد. در این مقاله، تأثیر حضور منابع تولید پراکنده در مکان و ظرفیت خازن های ثابت و سوئیچ شونده مورد بررسی قرار می گیرد. هزینه تلفات انرژی، هزینه تولید توان در شرایط پیک بار و هزینه های خرید و نصب خازن های ثابت و سوئیچ شونده به عنوانتابع هدف درنظر گرفته شده است. الگوریتم ژنتیک بهبود یافته به همراه کدگذاری و اپراتورهای جدید به عنوان ابزار بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مهمترین مشخصه الگوریتم ارائه شده فراهم کردن جدول کلیدزنی خازن های سوئیچ شونده در سطوح مختلف بار می باشد.

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۰/۴/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۰/۶/۵

کلمات کلیدی:

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

alireza.saleinia@gmail.com
hagifam@modares.ac.ir
shahabi.m@nit.ac.ir

(۱) دانشکده مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
(۲) دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت مدرس
(۳) دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
* نویسنده مسئول

مقدمه

خازن‌ها در شبکه‌های توزیع فشار متوسط به طور گستردۀ ای جهت جبران توان راکتیو استفاده می‌شوند. خازن‌ها می‌توانند تلفات توان و انرژی را در شبکه کاهش داده و با بهبود ولتاژ، کیفیت برق رسانی را ارتقا دهند. مسأله خازن‌گذاری بهینه عبارت است از یافتن مکان، ظرفیت و کنترل خازن‌ها جهت ماکریزم کردن منافع ناشی از نصب خازن‌ها در مقابل هزینه آنها. این مسأله مدت‌های موضع تحقیق و پژوهش بوده و روش‌های گوناگونی جهت خازن‌گذاری بهینه پیشنهاد گردیده است که کاهش تلفات در هر کدام از آنها یکی از اصول اساسی است. مسأله خازن‌گذاری بهینه می‌تواند از طریق آنالیز عددی، هوش مصنوعی و یا روش‌های ابتکاری حل شود^[۲]. در سیستم‌های قدرت مرسوم منابع تولید به طور متتمرکز در شبکه گستردۀ قدرت و در فاصله ای 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 می‌باشند. یکی از مزایای نزدیکی به مصرف کننده کاهش هزینه‌های انتقال است^[۴ و ۵]. استفاده از DG در شبکه‌های توزیع طی سال‌های اخیر به یک موضوع مهم تبدیل شده است و نحوه بهره برداری و طراحی این شبکه‌ها را تحت تاثیر خود قرار داده است. تاثیر بر خازن‌گذاری بهینه در شبکه‌های توزیع از این دسته می‌باشد. وجود انواع فناوری DG، تنوع مکانی و ظرفیت‌های گوناگون آنها در شبکه می‌تواند خازن‌گذاری بهینه را در شبکه توزیع تحت تاثیر قرار دهد. در این مقاله، تاثیر حضور منابع تولید پراکنده در مکان و ظرفیت خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده تحت بررسی قرار می‌گیرد. الگوریتم ژنتیک بهبود یافته ای به همراه کدگذاری و اپراتورهای جدید به عنوان ابزار بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است، به کمک کدگذاری، معرفی شده جایابی خازن‌ها و اندازه آنها با توجه به تغییرات بار در یک مرحله صورت می‌پذیرد. به عنوان نوآوری این مقاله می‌توان 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.

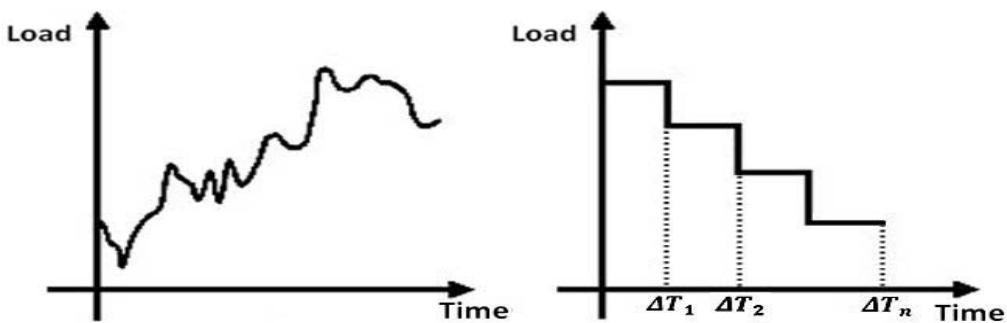
مدل‌سازی ریاضی مسأله

در این بخش، مدل بار، تولیدات پراکنده، تابع هدف و قیود به کار گرفته شده جهت تعیین مکان، نوع، تعداد و اندازه خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه‌های توزیع مجهز به منابع تولید پراکنده بیان می‌شوند.

(الف) مدل‌سازی بار

همان‌گونه که می‌دانیم بار در شبکه‌های توزیع ثابت نیست و همواره متغیر می‌باشد. این تغییرات در طی ساعات شبانه روز به دلیل تغییر نوع مصرف و در طول سال براساس تغییرات فصول مختلف صورت می‌پذیرد. 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 می‌دهد، لذا می‌توان برای کاهش پیچیدگی‌های مسأله این تغییرات را

به سطوح معینی دسته بندی کرد که به منحنی تداومی بار موسوم می باشد همانند شکل (۱). هرچه تعداد سطوح درنظر 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 طورکلی، 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 متتمرکز 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 ولتازی ثابت را تحت زاویه فازی معین تحویل شبکه می دهد. در این حالت، وظیفه منبع تولید انرژی، حفظ دامنه ولتازی 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 راکتیو و راکتیو معینی را به شبکه تزریق می کند و یا از واحدهای DG در یک ضربی 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 تقدیمه شبکه و تأمین بخشی از توان راکتیو و راکتیو مورد نیاز آن است. این حالت، زمانی اتفاق می افتاد که مولد قادر به تولید توان راکتیو مورد نیاز نباشد.

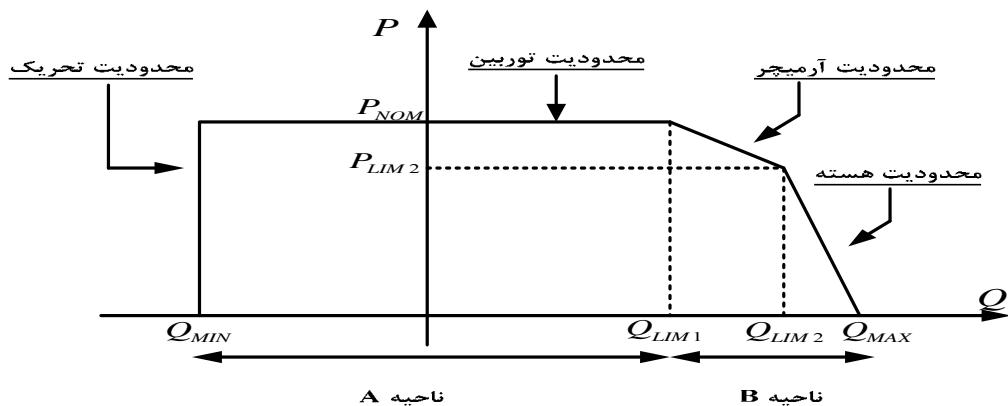
مقایسه و انتخاب مدل

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 راکتیو و راکتیو تحويلی آن از ظرفیت مجاز تولید مولد تجاوز نکند. در غیر این صورت، توان راکتیو و راکتیو در همان حد ماقزیم و یا مینیمم ثابت می شود و این شیئن از حالت PQ به 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 راکتیو مولد ندارد. بنابراین، می توان هزینه تولید توان راکتیو در این ناحیه را صفر درنظر گرفت. اخذ توان راکتیو از مولد در ناحیه B، موجب کاهش تولید توان راکتیو 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 راکتیو می باشد. از این رو، بهره برداری از مولد در ناحیه B اقتصادی و مقرر 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 مسئله

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

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

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

: مجموع هزینه تلفات انرژی CE_{Loss}

ΔT_j : تلفات توان اکتیو در سکشن $(i, i+1)$ در سطح بار j و در مدت زمان

C_e : قیمت هر کیلووات ساعت انرژی

N : تعداد شین های شبکه

M : تعداد سطوح بار

هزینه خازن‌گذاری

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

$$C_{capacitor} = (M_f * C_{If} + \sum_{i=1}^N C_{vf} * Q_{fi}) + (M_s * C_{Is} + \sum_{i=1}^N C_{vs} * Q_{si}) \quad (3)$$

که در آن :

M_f : تعداد خازن‌های ثابت نصب شده در شبکه

M_s : تعداد خازن‌های سوئیچ شونده نصب شده در شبکه

C_{If} : هزینه نصب خازن‌های ثابت

C_{Is} : هزینه نصب خازن‌های 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 کیلووار 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:

$$\text{Min.} F = CE_{Loss} + CP_{Loss}^{Peak} + C_{capacitor} \quad (4)$$

قيود مسائله

قيود و محدودیت های حاکم بر مساله عبارتند از:

۱- رعایت محدوده مجاز ولتاژ گره ها :

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (5)$$

۲- رعایت محدوده جریان مجاز خطوط :

$$I_{(i,i+1)} \leq I_{(i,i+1)\max} \quad (6)$$

۳- رعایت قید حداقل جبران در شبکه :

$$\sum_{i=1}^N (Q_{fi} + Q_{si}) \leq \sum_{i=1}^N Q_{Loadi} \quad (7)$$

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

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

$$C_{capacitor} \leq Budget \quad (8)$$

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 دردسترس 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 هریک 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 .
 $C_1, \dots, C_K, \dots, C_M$

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 مسئله 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 مسئله را نشان می دهد، چنین ساختاری را کروموزوم سطحی می نامیم^۱.

۱) Surface Chromosome

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

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 دردسترس مابین صفر و M (ماکریم کد خازن دردسترس) 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.

عملکر تقطاع (Crossover)

در الگوریتم ژنتیک نسل های جدید عمدهاً به وسیله عملکر تقطاع تولید می شوند. در این مقاله، دو نوع عملکر تقطاع

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

عملگر تقاطع سط्रی

در این روش، پس از انتخاب دو کروموزوم، دو عدد تصادفی در محدوده تعداد سطر های کروموزوم تولید می شوند. بر این اساس، اطلاعات دوسطر انتخاب شده از جمعیت اول با اطلاعات دوسطر انتخاب شده از جمعیت دوم جابجا می شود و قسمت های دیگر ثابت باقی میمانند. شکل (۴) چگونگی عملگر تقاطع سطري را نشان می دهد.

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 سطري برای یک شبکه توزيع چهار شينه با سه سطح بار فرضي

عملگر تقاطع سطري - آرایه اي

در تقاطع سطري - آرایه اي همانند روش قبل، علاوه بر اينکه اطلاعات دوسطر جابجا می شوند، چند زن نيز به صورت کاملاً تصادفي از دو کروموزوم انتخاب شده و اطلاعات آن زنها نيز جابجا می شوند. شکل (۵) چگونگی عملگر تقاطع سطري - آرایه اي را نشان می دهد.

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

شکل ۵) نحوه انجام عمل تقاطع سطري - آرایه اي برای یک شبکه توزيع چهار شينه با سه سطح بار فرضي

عملگر جهش (Mutation)

این عملگر برای جلوگیری از همگرایی زودرس الگوریتم ژنتیک و نیز جلوگیری از توقف الگوریتم در نقاط بھینه 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 سطروی

در این روش، یک عدد تصادفی در محدوده تعداد سطروها (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 محتوى ژن‌های مشخص شده به مقدار جدید تغییر پیدا می‌کند. شکل (۶) چگونگی این عملگر را نشان می‌دهد.

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

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

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

عملگر جهش سطروی - 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.

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

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

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

تابع برازنده‌گی

در روش ارائه شده، با توجه به اینکه هدف کمینه سازی تابع هزینه می‌باشد، لذا برازنده‌گی را می‌توان به عنوان عکس تابع هزینه هر کروموزوم تعریف کرد. بنابراین، با کاهش یافتن تابع هزینه، مقدار برازنده‌گی آن افزایش می‌یابد.

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

مراحل الگوریتم پیشنهادی

با در نظر گرفتن مطالب ذکر شده، برای حل مسئله جایابی همزمان خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه‌های توزیع بار متغیر مجذب به منابع تولید پراکنده، مراحل الگوریتم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- خواندن اطلاعات شبکه شامل اطلاعات پخش بار، خازن‌های دردسترس، تولیدات پراکنده، بودجه دردسترس برای خرید و نصب خازن و ضرایب اقتصادی تابع هدف.
- ۲- تشکیل جمیعت اولیه
- ۳- انجام پخش بار شبکه و محاسبه ولتاژ شین‌ها، جریان خطوط و تلفات شبکه برای هر کروموزوم
- ۴- محاسبه تابع هدف و تابع برازنده‌گی برای هر کروموزوم با استفاده از نتایج مرحله قبل
- ۵- انجام عملگرهای تقاطع سطری و سطری-آرایه‌ای
- ۶- انجام عملگرهای جهش سطری و سطری-آرایه‌ای
- ۷- انجام پخش بار، محاسبه تابع هدف و برازنده‌گی کروموزوم‌های جدید تولید شده
- ۸- در این مرحله، مرتب‌سازی کروموزوم‌ها براساس مقدار برازنده‌گی آنها صورت می‌گیرد. سپس، تعداد مشخصی از کروموزوم‌ها براساس میزان برازنده‌گی آنها به ترتیب به عنوان جمعیت نخبه انتخاب می‌شوند.
- ۹- اگر تعداد تکرار مجاز به اتمام رسیده باشد، الگوریتم پایان یافته و نتایج ارائه می‌گردد. در غیر این صورت، الگوریتم به مرحله ۵ بازگشته و این فرایند ادامه پیدا می‌کند تا شرایط توقف فراهم شود.

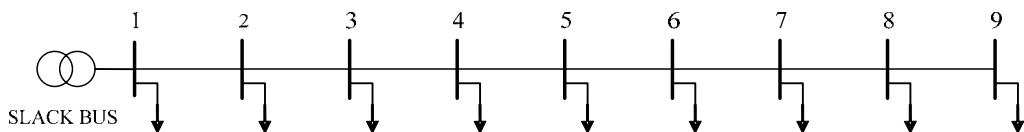
مطالعات عددی

برای مشخص شدن کارایی الگوریتم ارائه شده در جایابی خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه‌های 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 می‌گردد. سپس جایابی خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده بر روی شبکه محلی ۱۸ شینه انجام می‌گیرد. 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 برنامه نویسی شده و بر روی شبکه‌های تست اعمال گردیده است.

شبکه تست ۹ شبینه

برای سنجش میزان کارایی الگوریتم، از شبکه ۹ شبینه 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 شبینه 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

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

به طوری که مجموع خازن‌های نصب شده در شبکه می‌باشد. پله‌های خازنی موجود 300 kVar بوده و حداقل 1500 kVar خازن می‌تواند در هریک از شین‌های شبکه قرار گیرد. ضرایب اقتصادی تابع هدف به صورت زیر می‌باشند:

$$C_e = 0.06 \text{ \$/kWh} \quad \bullet \quad \text{هزینه هر کیلووات ساعت انرژی}$$

$$C_p = 168 \text{ \$/kW-year} \quad \bullet \quad \text{هزینه تلفات توان اکتیو در زمان بار پیک}$$

$$K_c = 4.9 \text{ \$/kVar} \quad \bullet \quad \text{هزینه هر کیلووار خازن}$$

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.

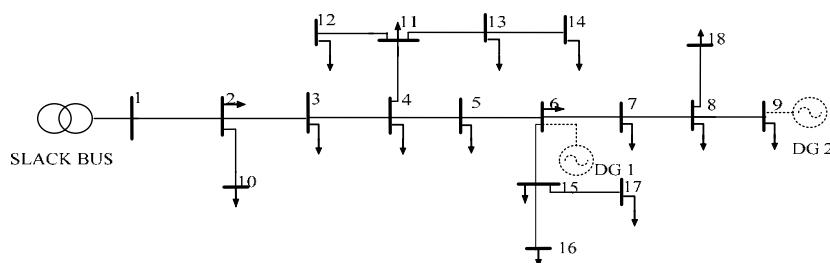
جدول (۲) مقایسه مکان و ظرفیت خازن های پیشنهادی شبکه ۹ شینه

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 [۳] و [۸] برای جایابی 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 جایابی 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 شینه می باشد که دیاگرام تک خطی آن در شکل (۹) نشان داده شده است. اطلاعات خطوط و بار حداقل در مرجع [۱] ارائه شده است.

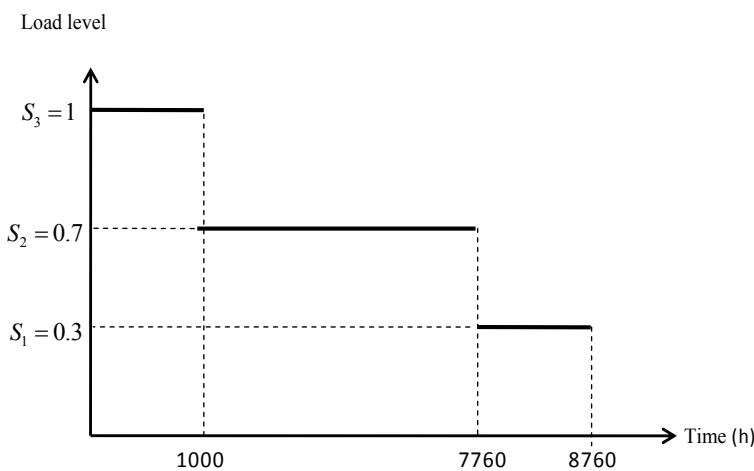


شکل (۹) شبکه ۱۸ شینه مورد مطالعه

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 $\Delta V = \pm 5\%$ باشد و هر پله خازنی معادل 150 kVar و حداکثر تعداد این پله ها برابر ۴ در نظر گرفته 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

پارامتر ها	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



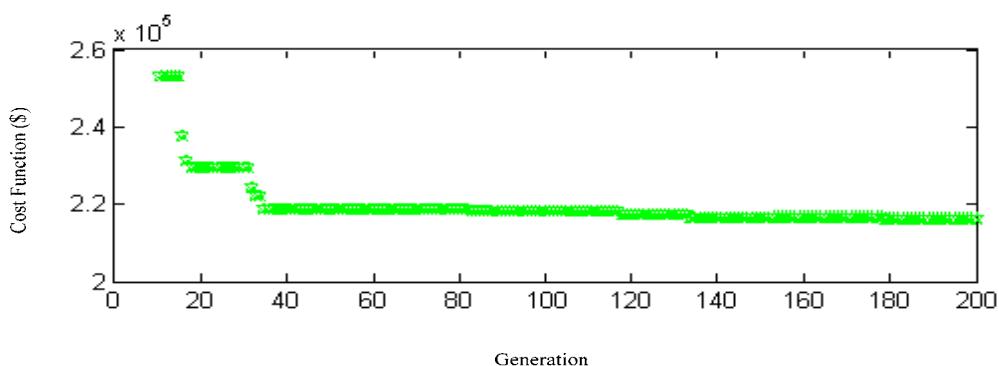
شکل (۱۰) نمودار سطح بندی شده تغییرات بار

آزمایش ۱ (مطالعه شبکه بدون در نظر گرفتن DG)

در این آزمایش، مکان یابی خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده در حالی انجام می‌شود که هیچ منبع تولید پراکنده‌ای در شبکه وجود نداشته باشد. مکان و ظرفیت خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده پیشنهادی در سطوح مختلف بار در جدول (۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود به علت ارزان‌تر بودن خرید و نصب خازن‌های ثابت، تعداد این خازن‌ها در شبکه بیشتر می‌باشد اما در سطح بار، ماکزیمم به علت توان راکتیو بالای بارهای شبکه (حدود ۶ MVar) و افت ولتاژ شدید در این سطح بار، تعداد خازن‌های سوئیچ شونده بیشتری نسبت به سطوح دیگر بار جایابی شده‌اند. 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 خازن‌های پیشنهادی برای شبکه ۱۸ شینه

مقدار خازن سوئیچ شونده (kVar)			مقدار خازن ثابت (kVar)	شماره شینه
بار حداقل	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) همگایی 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 می‌شود که با افزایش سطح بار، میزان تلفات و افت ولتاژ در شین‌های شبکه افزایش یافته و به دنبال آن هزینه کل سیستم افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار تابع هدف قبل از جبران سازی ۲۶۱۴۵۰ دلار می‌باشد اما بعد از جبران سازی، این مقدار به ۲۱۶۳۶۰ دلار می‌رسد که ۴۵۰۹۰ دلار منفعت ایجاد می‌کند.

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

بعد از جبران سازی	قبل از جبران سازی	مجموع تابع هزینه (\$)	
۲۱۶۳۶۰	۲۶۱۴۵۰	مجموع هزینه تلفات (\$)	
۱۸۳۶۳۰	۲۶۱۴۵۰	مجموع هزینه خازن گذاری (\$)	
۳۲۷۷۳۰	.		
۰/۹۵۰۲	۰/۹۲۱۴	$V_{\min}^{18} *$	سطح بار ماکریم
۳۲۷/۵۱۵۸	۴۷۸/۷۷۷۸	تلفات (kW)	
۰/۹۶۰۳	۰/۹۴۶۲	V_{\min}^{18}	سطح بار متوسط
۱۶۰/۸۱۷۱	۲۲۵/۱۲۵۲	تلفات (kW)	
۰/۹۸۶۹	۰/۹۷۷۶	V_{\min}^{18}	سطح بار پایه
۲۸/۵۹۹۸	۳۹/۲۹۳۷	تلفات (kW)	

*کمترین ولتاژ شبکه در سطح بار مورد مطالعه

آزمایش ۲ (مطالعه شبکه با جبران‌سازی 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 باس‌های ۶ و ۹ به طور جداگانه قرار می‌دهیم و جایابی خازن‌های ثابت و سوئیچ شونده را در این حالت انجام می‌دهیم.

جدول (۶) مشخصات واحد‌های تولید پراکنده

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

مکان و ظرفیت خازن‌های پیشنهادی در جدول (۷) نشان داده شده است. مقایسه نتایج قبل و بعد از خازن‌گذاری در سطوح مختلف بار در حضور منابع تولید پراکنده در جدول (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تلفات

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

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

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

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

بعد از جبران سازی	قبل از جبران سازی		
۱۴۵.۵۰۰	۱۹۱.۸۷۰		مجموع تابع هزینه (\$)
۱۳۱.۷۸۰	۱۹۱.۸۷۰		مجموع هزینه تلفات (\$)
۱۳.۷۲۰	.		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

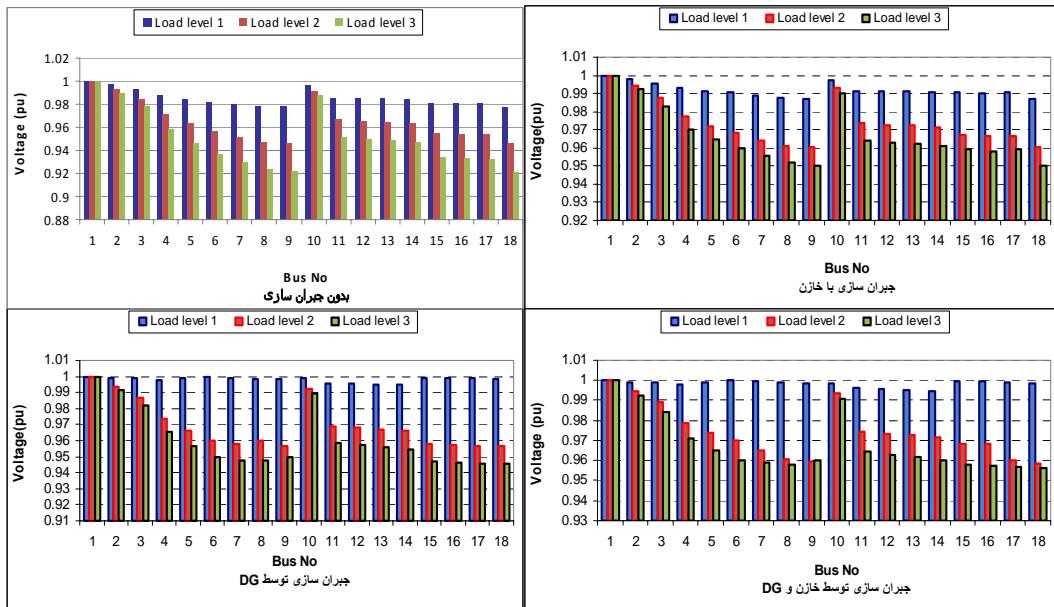
$$I_V = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}{n} * 100 \text{ (Voltage deviation index)} \quad (13)$$

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

جدول (۹) مقایسه نتایج جبران سازی در حالات مختلف

نصب خازن و DG	DG	نصب خازن	بدون جبران سازی	
۱۴۵.۵۰۰	۱۹۱.۸۷۰	۲۱۶.۳۶۰	۲۶۱.۴۵۰	هزینه سالیانه (\$/year)
۱۳۱.۷۸۰	۱۹۱.۸۷۰	۱۸۳.۵۳۰	۲۶۱.۴۵۰	هزینه تلفات (\$/year)
۴۷۰۰	.	۴۸۰۰	.	مجموع خازن نصب (kVar) شده
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 می شود در حالتی که هیچ جبرانی برای شبکه انجام نشده ۱۴ شین شبکه ولتاژ آنها زیر 0.95 pu قرار گرفته که با 4800 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 2700 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 زنگنه 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 [۸۳] 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 می‌شوند اما ممکن است در مواردی ولتاژ تعدادی از شین‌ها همچنان زیر حد تعریف شده قرار بگیرند که با جایابی بهینه خازن‌ها در کنار منابع تولید پراکنده، می‌توان دامنه ولتاژ در همه شین‌ها را به مقدار مطلوب نزدیک‌تر 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 Systems361–367A.
- [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.