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

علیرضا صالحی‌نیا*[۱]، محمودرضا حقی‌فام[۲]، مجید شهابی[۳]

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

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 مدل‌سازی 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 عنوان تابع 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.

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

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

مقدمه

خازن ها در شبکه های توزیع فشار متوسط به طور گسترده ای جهت جبران توان راکتیو استفاده می شوند. خازن ها می‌توانند تلفات توان و انرژی را در شبکه کاهش داده و با بهبود ولتاژ، کیفیت برق‌رسانی را ارتقا دهند . مسأله خازن‌گذاری 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 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 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[۴و۵]. 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 و ظرفیت های 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 تحت بررسی قرار می گیرد. 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 خازن ها و اندازه آنها باتوجه 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.

مدل‌سازی ریاضی مسأله

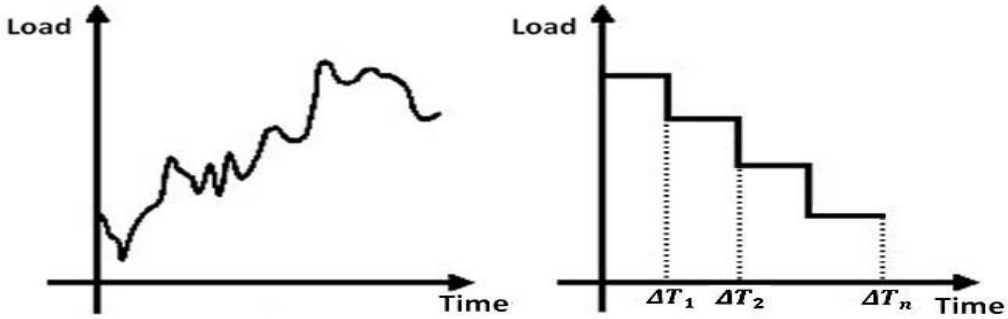
در این بخش، مدل بار، تولیدات پراکنده ، تابع هدف و قیود به کار گرفته شده جهت تعیین مکان، نوع، تعداد و اندازه خازن های ثابت و سوئیچ شونده در شبکه های توزیع مجهز به منابع تولید پراکنده بیان می شوند.

الف) مدل‌سازی بار

همان‌گونه که می دانیم 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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 می‌گردد [۶].



شکل۱) نمودار تغییرات زمانی و سطح بندی بار

ب) مدل‌سازی منابع تولید پراکنده

به طورکلی، منابع تولید پراکنده ای که به شبکه های توزیع متصل می شوند، به دلیل کوچک بودن ظرفیت تولیدیشان نمی‌توان 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 می‌شود که منبع DG قادر باشد، توان راکتیو بارهای مصرفی متصل به آن شین را تامین کند.

به صورت مدلPQ

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 می‌باشد، با این تفاوت که جریان به داخل شین تزریق می‌گردد. 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

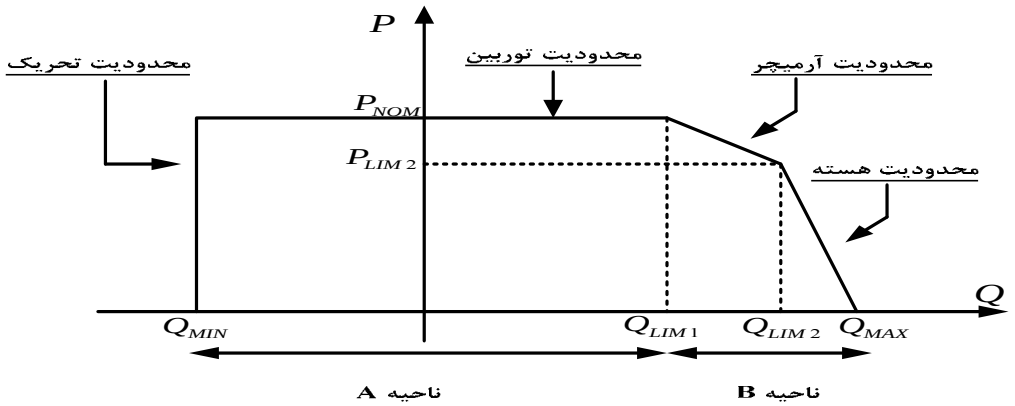
در نظر گرفتن هر کدام از مدل های یاد شده بستگی به فلسفه و چگونگی بهره برداری از DG در شبکه توزیع خواهد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

داشت . باید توجه داشت که مدلPV 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 مینیمم ثابت می شود و این شین از حالت PV به PQ تبدیل می‌گردد.

براین اساس، در این مقاله فرض می‌شود 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، می‌توان هزینه تولید توان راکتیو در این ناحیه را صفر درنظر گرفت. اخذ توان راکتیو از مولد در ناحیه B، موجب کاهش تولید توان اکتیو می‌گردد.

براساس اطلاعات موجود، هزینه تولید هر واحد توان راکتیو در این ناحیه توسط مولد بیشتراز هزینه تولید توان راکتیو توسط خازن می‌باشد. از طرف دیگر، هدف از نصب و بهره‌برداری از مولدهای تولید پراکنده تولید توان اکتیو می باشد. از این رو، بهره‌برداری 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 می‌گردد که این هزینه با توجه به تعیین سوخت و هزینه‌های تولید در هر کشور متفاوت می‌باشد. به منظور محاسبه هزینه تلفات انرژی شبکه، باید مجموع انرژی تلفاتی در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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

$$CE_{Loss} = C_e \left(\sum_{j=1}^{M} \sum_{i=0}^{N-1} P_{Loss(i,i+1)}^{\Delta T_j} . \Delta T_j \right) \qquad (۱)$$

که در آن :

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 ودر مدت زمان ΔT_j

C_e : قیمت هر کیلووات ساعت انرژی

N : : تعداد شین های شبکه

M : تعداد سطوح بار

هزینه خازن‌گذاری

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 وسوئیچ 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 می‌باشد (هزینه خرید). رابطه (۳) نشان دهنده نحوه محاسبه هزینه خازن گذاری می باشد.

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

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 کیلووار خازن ثابت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

C_{vs}: هزینه هر کیلووار خازن سوئیچ شونده

در نهایت، تابع هزینه کل به منظور جایابی و اندازه یابی بهینه خازن های ثابت وسوئیچ 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 مساله عبارتند از:

۱- رعایت محدوده مجاز ولتاژ گره ها :

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

۲- رعایت محدوده جریان مجاز خطوط :

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

۳- رعایت قید حداکثر جبران در شبکه :

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

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

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

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

معرفی روش بهینه‌سازی پیشنهادی

با توجه به اینکه میزان مصرف توان در شبکه های توزیع با تغییرات فصلی، ماهانه و ساعتی تغییر می‌کند، 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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 خازن‌های 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 (١) در نهایت مجموعه ای به دست می‌آید 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 وا قعیت 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 . $C_1,...C_K,...,C_M$ مجموعه خازن های دردسترس برای نصب در هر یک از شین های شبکه می باشند.

جدول١) 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 می‌باشد که در آن، n نشان دهنده تعداد شین های شبکه می‌باشد. 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 (٣) ساختار کروموزوم و ژن های پیشنهادی در مسأله را نشان می‌دهد، چنین ساختاری را کروموزوم سطحی می نامیم[١].

١) Surface Chromosome

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

	Bus1			.....	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 ٣) ساختار کروموزوم پیشنهادی(کروموزوم سطحی)

که در آن :

$$x_{F_{1,j}}, x_{S_{i,j}} = \begin{cases} 0 & i = 2,3,...m \\ k & j = 1,2,...,n \end{cases} \qquad (٩)$$

با استفاده از ساختار کروموزوم پیشنهادی علاوه بر جایابی همزمان خازن های ثابت وسوئیچ شونده، زمان وارد شدن وخارج 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 (ماکزیمم کد خازن دردسترس) می‌باشد، 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)

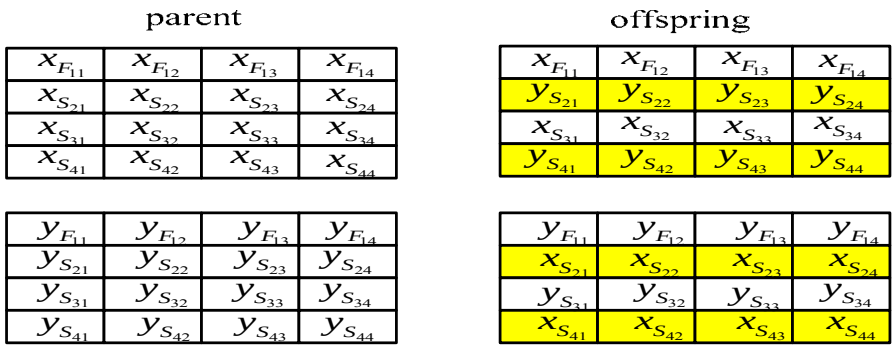
در الگوریتم ژنتیک نسل های جدید عمدتاً به وسیله عملگر تقاطع تولید می شوند. در این مقاله، دو نوع عملگر تقاطع

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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

عملگر تقاطع سطری

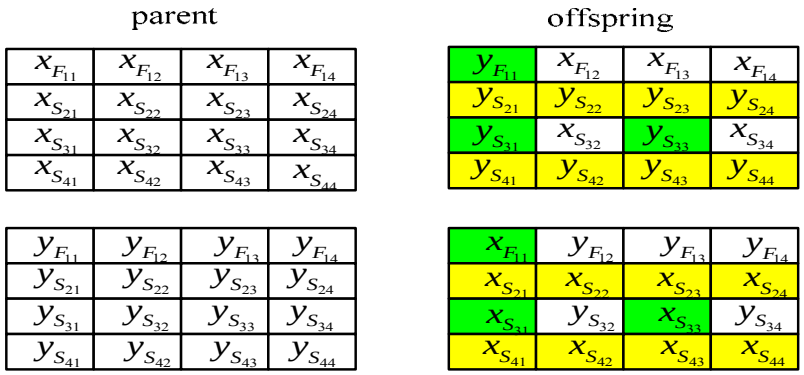
در این روش، پس از انتخاب دو کروموزوم، دو عدد تصادفی در محدوده تعداد سطر های کروموزوم تولید می شوند. بـر این اساس، اطلاعات دوسطر انتخاب شده از جمعیت اول با اطلاعات دوسطر انتخاب شده از جمعیت دوم جابجا می شـود و قسمت های دیگر ثابت باقی می مانند. شکل (۴) چگونگی عملگر تقاطع سطری را نشان می‌دهد.



شکل٤) نحوه انجام عمل تقاطع سطری برای یک شبکه توزیع چهار شینه با سه سطح بار فرضی

عملگر تقاطع سطری ـ آرایه‌ای

در تقاطع سطری- آرایه ای همانند روش قبل، علاوه براینکه اطلاعات دوسطر جابجا می‌شوند، چند ژن نیز به صورت کاملاً تصادفی از دو کروموزوم انتخاب شده واطلاعات آن ژن‌ها نیز جابجا می شوند. شکل (۵) چگونگی عملگر تقاطع سطری- آرایه ای را نشان می دهد.



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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

عملگر جهش (Mutation)

این عملگر برای جلوگیری از همگرایی زودرس الگوریتم ژنتیک و نیز جلوگیری از توقف الگوریتم در نقاط بهینه محلی انجام می گیرد. در واقع، با استفاده از جهش تنوع در فضای جستجو بیشتر شده و نقاط بیشتری از فضا جستجو می شود. 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 می شود، سپس به تعداد ژن‌های موجود در آن سطر (تعداد شین های شبکه) در محدوده کدگذاری توضیح داده شده در جدول (١) چند عدد تصادفی تولید می شود و محتوی ژن های مشخص شده به مقدار جدید تغییر پیدا می کنند. 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 ٦) نحوه انجام عمل جهش سطری برای یک شبکه توزیع چهار شینه با سه سطح بار فرضی

عملگر جهش سطری ـ آرایه‌ای

در این روش، علاوه بر اینکه اطلاعات موجود در یک سطر به مقدار جدید تغییر پیدا می کند، چند ژن نیز به صورت کاملاً تصادفی انتخاب شده و اطلاعات موجود در آن در محدوده کدگذاری توضیح داده شده در جدول (١) به مقدار جدید تغییر پیدا می کند. چگونگی این عملگر در شکل (٧) نشان داده شده است.

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

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

شکل٧) نحوه انجام عمل جهش سطری- آرایه ای برای یک شبکه توزیع چهارشینه با سه سطح بار فرضی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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.

$$FitnessFunction = \frac{1}{CostFunction} \qquad (۱۰)$$

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 دردسترس، تولیدات پراکنده، بودجه دردسترس برای خرید ونصب خازن و ضرایب اقتصادی تابع هدف.

۲- تشکیل جمیعت 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، مرتب‌سازی کروموزوم ها براساس مقدار برازندگی آنها صورت می‌گیرد. سپس، تعداد مشخصی از کروموزوم ها براساس 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 می‌گردد. در غیر این صورت، الگوریتم به مرحله ۵ بازگشته و این فرایند ادامه پیدا می کند تا شرایط توقف فراهم شود .

مطالعات عددی

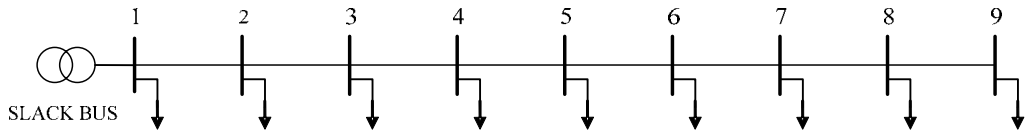
برای مشخص شدن کارایی الگوریتم ارائه شده در جایابی خازن های ثابت وسوئیچ شونده در شبکه های توزیع بار متغیر در حضور منابع تولید پراکنده، در ابتدا الگوریتم ارائه شده بر روی شبکه ۹ شینه معرفی شده در مرجع[۱۰] اعمال گردیده و با نتایج دو روش ارائه شده در مراجع[۳ و ۸] مقایسه می گردد. سپس جایابی خازن های ثابت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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

هزینه‌های سرمایه گذاری برای سه سطح بار در نظر گرفته شده و تاثیر حضور منابع تولید پراکنده و نحوه مدل‌سازی آنها در مکان و حجم خازن های جایابی شده مورد بررسی قرارگرفته است. لازم به ذکر است که الگوریتم ارائه شده در محیط MATLAB برنامه نویسی شده و بر روی شبکه های تست اعمال گردیده است.

شبکه تست ۹ شینه

برای سنجش میزان کارایی الگوریتم، از شبکه ۲۳ kV، ۹ 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 یکسان سازی با دو مرجع [۳و ۸] تابع هدف را به صورت زیر تغییر می دهیم

$$Min.F = C_p.P_{Loss}^{Peak} + C_e\sum_{i=1}^{N}P_i.\Delta T_i + \sum_{i=1}^{N}K_c.Q_i \qquad (۱۱)$$

به طوری که $\sum_{i=1}^{N}Q_i$ مجموع خازن های نصب شده در شبکه می باشد. پله های خازنی موجود ۳۰۰kVar بوده و حداکثر ۱۵۰۰ kVar خازن می تواند در هریک از شین های شبکه قرار گیرد. ضرایب اقتصادی تابع هدف به صورت زیر می‌باشند :

- هزینه هر کیلووات ساعت انرژی $C_e = 0.06$ \$/kWh

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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

جدول (۲) مکان و مقدار خازن های پیشنهاد شده به روش ارائه شده در مقاله و الگوریتم های پیشنهادی در دو مرجع [۳و۸] را نشان می دهد.

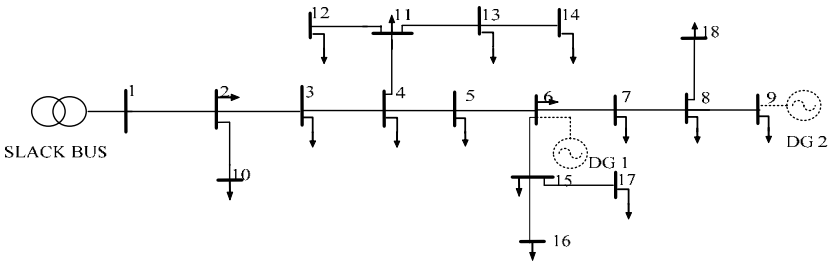
جدول۲) مقایسه مکان و ظرفیت خازن های پیشنهادی شبکه ۹ شینه

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 [۳و۸] 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 وسوئیچ 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، ۱۸شینه 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.



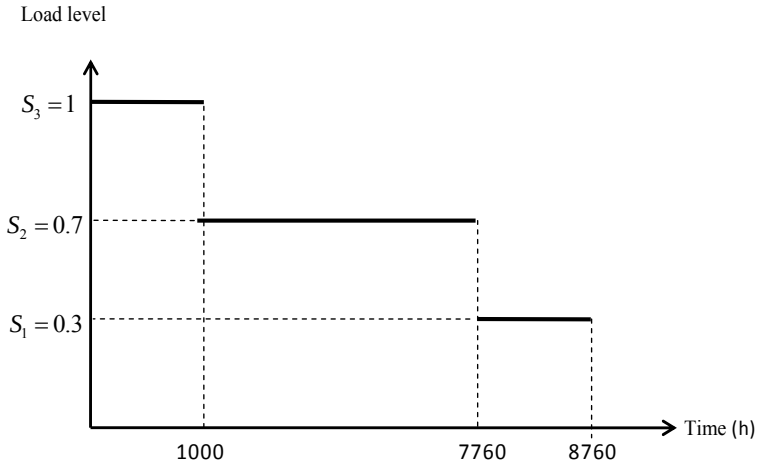
شکل۹) شبکه ۱۸ شینه مورد مطالعه

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

در این مطالعه، فرض شده است که تغییرات بار شبکه قابل تقسیم به سه سطح بار پایه، متوسط وپیک می باشد. شکل (١٠) نمودار سطح بندی شده تغییرات بار و مدت زمان تداوم هر یک را نشان می دهد. جدول (٣) اطلاعات هزینه ای مورد نیاز برای محاسبه تابع هدف را نشان می دهد. انحراف ولتاژ مجاز برای تمام شین ها $(\Delta V = \pm 5\%)$می‌باشد و هر پله خازنی معادل ١٥٠ 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.

جدول٣) 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 ١٠) نمودار سطح بندی شده تغییرات بار

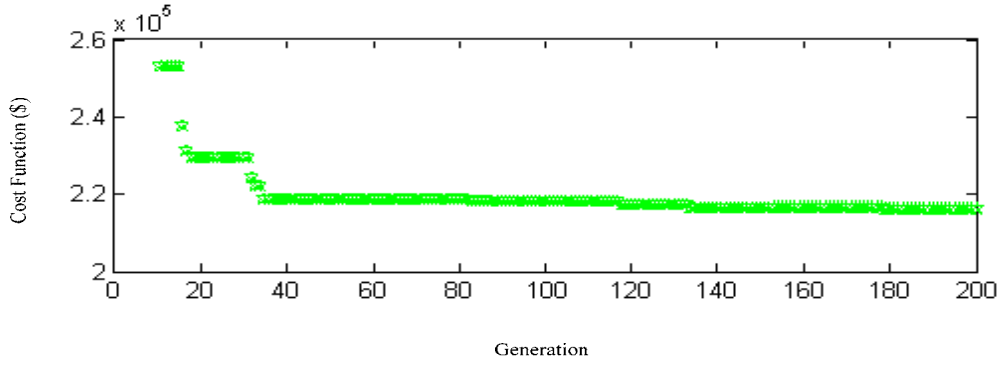
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

آزمایش ١(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 پراکنده‌ای در شبکه وجود نداشته باشد. مکان و ظرفیت خازن های ثابت وسوئیچ شونده پیشنهادی در سطوح مختلف بار در جدول (۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود به علت ارزان تر بودن خرید و نصب خازن‌های ثابت، تعداد این خازن ها 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 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 ٤) مکان و ظرفیت خازن های پیشنهادی برای شبکه ۱۸ شینه

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



شکل۱۱) همگرایی الگوریتم ژنتیک در آزمایش ۱

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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

***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 می دهیم و جایابی خازن های ثابت وسوئیچ شونده را در این حالت انجام می دهیم.

جدول ٦) مشخصات واحد های تولید پراکنده

	DG2	DG1
توان اکتیو(kW)	٦۰۰	٤۰۰
ماکزیمم توان راکتیو(kVar)	۵۰۰	۱۰۰
ماکزیمم توان راکتیو(kVar)	-۵۰۰	۱۰۰
مدل شبیه سازی	PV	PQ

مکان و ظرفیت خازن های 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. همان طور که مشاهده می شود تلفات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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 ۱۳۱۷۸۰دلار رسیده که ۴۶۳۷۰دلار منفعت ایجاد شده در طول دوره بهره برداری یکساله را نشان می‌دهد.

جدول ۷) مکان وظرفیت خازن های پیشنهادی در حضور منابع تولید پراکنده

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

جدول ۸) مقایسه نتایج قبل و بعد از جبران سازی در آزمایش۲

		قبل از جبران سازی	بعد از جبران سازی
مجموع تابع هزینه**($)**		۱۹۱.۸۷۰	۱۴۵.۵۰۰
مجموع هزینه تلفات**($)**		۱۹۱.۸۷۰	۱۳۱.۷۸۰
مجموع هزینه خازن گذاری**($)**		۰	۱۳.۷۲۰
سطح بار ماکزیمم	$V_{\min}^{18}$	۰/۹۴۵۸	۰/۹۵۶۲
	تلفات **(kW)**	۳۷۴/۵۷۳۱	۲۶۲/۹۵۶۴
سطح بـار متوسط	$V_{\min}^{18}$	۰/۹۵۶۵	۰/۹۵۹۵
	تلفات**(kW)**	۱۵۹/۳۳۰۵	۱۰۷/۳۰۹۰
سطح بـار پـایـه	$V_{\min}^{18}$	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۸۵
	تلفات**(kW)**	۱۷/۵۴۰۷	۱۳/۸۳۶۶

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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 ١- بدون جبران سازی، ٢- جبران سازی توسط خازن، ٣- جبران توسط نصب منابع تولید پراکنده و ۴- استفاده توأم از خازن و تولید پراکنده انجام شده و نتایج آن در جدول (٩) 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.

$$\text{Global Saving (\%)} = \frac{\Delta F}{F_0} * 100 \qquad (١٢)$$

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

$$I_V = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta V_i}{n} * 100 \text{ (Voltage deviation index)} \qquad (١٣)$$

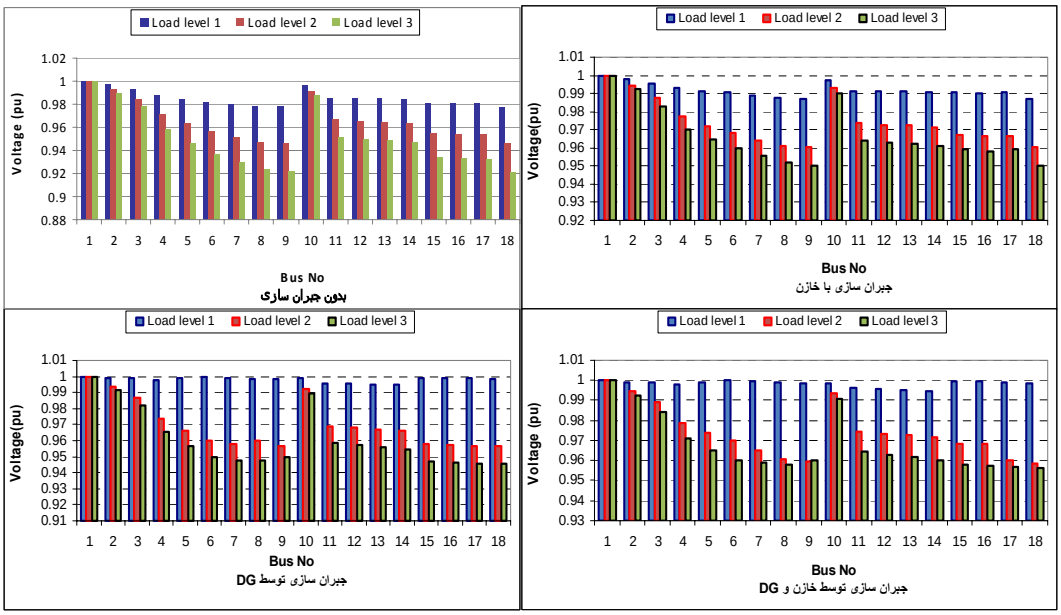
$$\Delta V_i = \begin{cases} 0 & if \quad V_{i\min} \le V_i \le V_{i\max} \\ |V_i - V_{i\min/\max}| & otherwise \end{cases}$$

جدول ٩) مقایسه نتایج جبران سازی در حالات مختلف

	بدون جبران سازی	نصب خازن	نصب DG	نصب خازن و DG
هزینه سالیانه **($/year)**	٢۶١.۴۵٠	٢١۶.٣۶٠	١٩١.٨٧٠	١۴۵.۵٠٠
هزینه تلفات **($/year)**	٢۶١.۴۵٠	١٨٣.۶٣٠	١٩١.٨٧٠	١٣١.٧٨٠
مجموع خازن نصب شده**(kVar)**	٠	۴٨٠٠	٠	٢٧٠٠
صرفه اقتصادی ناشی از جبران سازی**(%)**	٠	١٧/٢۴	٢۶/۶١	۴۴/٣۴
متوسط انحراف ولتاز از مقدار مجاز(%)	١/٠٢	٠	٠/١١	٠

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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 [۳و۸] مقایسه گردید. بعد از آن، شبکه فشار متوسط ۱۸ شینه به عنوان شبکه تست انتخاب شد، تأثیر مدل‌سازی 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]

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 جایابی بهینه خازن ها در کنار منابع تولید پراکنده، می توان دامنه ولتاژ در همه شین ها 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-23]