مکانیابی همزمان پستهای فوق‌توزیع و واحدهای تولید پراکنده در طراحی شبکه‌های توزیع

حمید فلقی[1]، محمودرضا حقی‌فام[2*]، محسن پارسا مقدم[3]

۱- دانشجوی دکترای مهندسی برق و کامپیوتر،دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد بخش مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشیار بخش مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

*** تهران، صندوق پستی ۱۴۳- ۱۴۱۱۵**
haghifam@modares.ac.ir
(دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: آبان ۱۳۸۶)

چکیده- حضور واحدهای تولید پراکنده در سیستمهای توزیع انرژی الکتریکی، گزینه‌های جدیدی را در طراحی و توسعهٔ این بخش از سیستم قدرت فراهم ساخته است. در این مقاله مسألهٔ مکانیابی پستهای فوق‌توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده به‌عنوان گزینه‌ای دیگر برای تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم به‌صورت استاتیکی برای یک دورهٔ زمانی، مدلسازی و حل شده است. در مدل ریاضی تابع هدف مسأله انواع هزینه‌های ثابت و متغیر طرح فرمولبندی شده است. همچنین محدودیتهای مرتبط با شبکه و بهره‌برداری از پستها و واحدهای تولید کننده در مدلسازی منظور شده است. از مدل و روش پیشنهادی می‌توان در تعیین تعداد، مکان، ظرفیت و حوزهٔ سرویس‌دهی بهینهٔ پستها در کنار واحدهای تولید پراکنده استفاده کرد. تابع هدف پیشنهاد شده و قیود مرتبط با آن، نوعی مدل غیرخطی را تشکیل می‌دهند که برای بهینه‌سازی آن از روشی مبتنی بر الگورتیم ژنتیک استفاده شده است. در انتها با انجام آزمایشهایی کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

کلید واژگان: شبکه‌های توزیع، پست فوق‌توزیع، تولید پراکنده، طراحی.

۱- مقدمه

هدف اصلی طراحی و توسعهٔ شبکه‌های توزیع، پاسخ به رشد مصرف برق با حداکثر کارایی اقتصادی به‌نحوی است که محدودیتهای حاکم بر سیستم رعایت شود. وجود عناصر متعدد در شبکه‌های توزیع که متغیرهای تصمیم متعددی را ایجاد می‌کنند، مسألهٔ طراحی و توسعهٔ این شبکه‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌سازد. از سوی دیگر حجم بالای سرمایه‌گذاری و افزایش قیمت انرژی و تجهیزات، ریسک اقتصادی را به‌خصوص در محیطهای تجدیدساختار شده افزایش داده و موجب شده که طراحان شبکه‌های توزیع به روشهای دقیق‌تر و مناسبتری برای طراحی این شبکه‌ها روی آورند.

مرور تحقیقات و مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که در طراحی شبکه‌های توزیع، بیشترین تمرکز بر مکانیابی بهینهٔ پستهای توزیع و فوق‌توزیع، مسیریابی بهینهٔ فیدرها و

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

تعیین سطح مقطع هادیها بوده است [۱، ۲]. به‌سبب پیچیدگی مسأله، معمولاً دستیابی به پاسخ مناسب در تمامی مراحل و در قالب مجموعه‌ای واحد به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو مسألهٔ طراحی شبکه‌های توزیع به چند بخش تقسیم می‌شود که تعیین مکان بهینهٔ پستهای فوق‌توزیع یکی از این بخشها است.

پستهای فوق‌توزیع در واقع نقاط تزریق انرژی از سیستم انتقال به شبکه‌های توزیع به‌شمار می‌روند و نقش پل ارتباطی میان این دو بخش از سیستم قدرت را ایفا می‌کنند. بنابراین تعیین مکان مناسب یا نامناسب این پستها می‌تواند طراحی دیگر بخشهای شبکهٔ توزیع مانند پستهای توزیع و فیدرهای فشار متوسط را تحت تأثیر قرار دهد. به بیان دیگر در صورتی‌که در مکانیابی پستهای فوق‌توزیع دقت کافی مبذول نشود، روبه‌رو شدن با مشکلات فنی و اقتصادی در طراحی فیدرهای فشار متوسط و دیگر قسمتهای سیستم توزیع دور از انتظار نخواهد بود [۲].

پیدایش واحدهای کوچک تولیدکننده موسوم به تولیدکننده‌های پراکنده (Distributed Generation-DG) در سیستمهای توزیع که نتیجهٔ پیشرفت تکنولوژی و تجدیدساختار در صنعت برق است، گزینه‌های جدیدی را در طراحی و توسعهٔ این سیستمها فراهم ساخته است [۳]. از سوی دیگر با توجه به قیود مکانی به‌ویژه در مناطق شهری با تراکم بالا و نیز محدودیتهای مالی شرکتها در احداث پستهای فوق‌توزیع، بهره‌گیری از واحدهای DG در فرایند طراحی و توسعهٔ شبکه برای شرکتهای برق جذابیت خاصی یافته است. از این‌رو مسألهٔ طراحی شبکه‌های توزیع باید به‌منظور ملحوظ کردن احداث DG به‌عنوان گزینه‌ای جدید، بازبینی و متناسب با آن فرمولبندی شود.

تاکنون مطالعات متعددی در زمینهٔ طراحی و توسعهٔ سیستمهای توزیع انجام شده است. در [۱، ٤] دسته‌بندی و مرور مدلهای ارائه شده در این زمینه یافت می‌شود. تحقیقات متنوعی نیز با موضوع مکانیابی پستها انجام شده که در آنها فقط پستهای فوق‌توزیع به‌عنوان متغیرهای تصمیم مطرح شده است. در [۵] روش توانمندی برای ظرفیت‌یابی پستها ارائه شده که در آن افت ولتاژ به‌عنوان یکی از معیارها در احداث پست جدید مورد توجه قرار گرفته است. الگوریتمی مبتنی بر حل مسألهٔ حمل و نقل برای تعیین مکان، ظرفیت و حوزهٔ سرویس‌دهی پستها در [٦] آورده شده است. در تابع هدف این الگوریتم از تغذیهٔ بارهای بزرگ به‌وسیله پستهای دور از آن جلوگیری می‌شود. در [۷] روشی مبتنی بر شاخه و کران برای حل مسألهٔ جایابی پستها در قالب کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و متغیر ارائه شده است. در [۸] تعیین مکان، ظرفیت، حوزهٔ سرویس‌دهی و نیز برنامهٔ زمانبندی توسعه پستهای فوق‌توزیع در قالب یک تابع هدف و قیود مربوط، به‌صورت مدلی غیرخطی و پیوسته فرمولبندی شده است. در آن مطالعه هزینه‌های شبکهٔ پایین‌دستی (فشار متوسط) در مدلسازی ملحوظ نشده است. تحقیقات دیگری نیز در زمینهٔ جایابی پستها انجام شده که در بیشتر آنها کاهش هزینه‌های جاری و سرمایه‌گذاری به‌عنوان هدف طراحی موردنظر بوده است [۹] – [۱۱] اما در بیشتر آنها مسألهٔ موردنظر به‌طور کامل و دقیق با جزئیات لازم مدلسازی نشده است و با انجام ساده‌سازیهایی از واقعیت دور شده‌اند.

در سالهای اخیر مطالعات نسبتاً متنوعی در زمینهٔ مکانیابی واحدهای DG در شبکه‌های توزیع انجام شده است که در اکثر قریب به اتفاق آنها با فرض وجود شبکهٔ موجود، مکان و ظرفیت بهینهٔ احداث واحدهای DG در نقاط این شبکه با هدف کاهش تلفات [۱۲، ۱۳، ۱۵] بهبود پروفیل ولتاژ [١٤] و ارتقای قابلیت اطمینان [۱۵] جستجو می‌شود. به‌کارگیری DG در مسألهٔ طراحی شبکه‌های توزیع نیز در [١٦] مورد توجه قرار گرفته است. در آن تحقیق سعی شده تا حضور DG به‌عنوان گزینه‌ای علاوه بر پست و فیدر در مسألهٔ توسعهٔ شبکه بررسی شود. اگر چه روش

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

و مدل پیشنهاد شده در نوع خود جالب است، اما جامعیت لازم را برای جستجوی حالات متنوع احداث پستهای فوق‌توزیع ندارد.

لذا با وجود مدلهای مختلف در زمینهٔ مکانیابی پستهای فوق‌توزیع و نیز جایابی واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، تاکنون مدل کاملی در زمینهٔ طراحی توأم پستها و واحدهای DG در طراحی سیستمهای توزیع ارائه نشده است. این در حالی است که با حضور تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، ارزیابی اقتصادی گزینه‌های مرتبط با احداث واحدهای DG در کنار احداث یا توسعهٔ پستهای فوق‌توزیع به‌منظور تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم، ضروری و اجتناب‌ناپذیر به‌نظر می‌رسد.

در این مقاله تعیین مکان، ظرفیت و حوزهٔ سرویس‌دهی پستهای فوق‌توزیع در حضور واحدهای DG به‌عنوان گزینه‌ای جدید به‌منظور تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم به‌صورت استاتیکی جهت یک دورهٔ زمانی مدلسازی و حل شده است. این مسأله از دیدگاه شرکتهای توزیع مورد توجه قرار گرفته و سعی شده است در تابع هدف پیشنهادی، تا حد امکان، هزینه‌های ثابت و متغیر مرتبط با احداث پستها و واحدهای تولیدی، هر چه نزدیکتر به واقعیت مدلسازی شود؛ ضمن آنکه محدودیتهایی مانند افت ولتاژ، ظرفیت بارگذاری پستها و واحدهای DG، تغذیهٔ شعاعی بارها به‌وسیله پستها مورد توجه قرار گرفته است. تابع هدف پیشنهادی و محدودیتهای مرتبط با آن، نوعی مدل ریاضی غیرخطی را تشکیل می‌دهد که برای بهینه‌سازی آن از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده شده است.

در ادامه، نحوهٔ مدلسازی و بهینه‌سازی مسأله در قالب الگوریتم ژنتیک تشریح می‌شود و در انتها با انجام چند آزمایش و تحلیل نتایج به‌دست آمده، کارایی مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

۲- تشریح مسأله

۲-۱- اجزای هزینهٔ طرح

هدف از مکانیابی توأم پستهای فوق‌توزیع و واحدهای DG، تأمین ظرفیت مورد نیاز به‌منظور تغذیهٔ بار شبکه به‌وسیله این تجهیزات به‌نحوی است که ضمن رعایت محدودیتهای حاکم، هزینه‌های احداث و بهره‌برداری سیستم کمینه شود. در این مقاله، مسألهٔ موردنظر برای طراحی در یک مرحلهٔ زمانی به‌صورت استاتیکی مدلسازی می‌شود. با توسعهٔ مدل پیشنهادی در قالب روش شبه‌دینامیک [۱۷] می‌توان برنامهٔ توسعه و احداث پستها و واحدهای تولیدی را طی چند دورهٔ زمانی به‌دست آورد.

متغیرهای تصمیم در مسأله عبارتند از: مکان، تعداد، ظرفیت و حوزهٔ سرویس‌دهی به تفکیک برای پستها و واحدهای تولیدی.

هزینه‌های طرح را می‌توان به دو دستهٔ کلی تقسیم کرد: اولین بخش هزینه‌های سرمایه‌گذاری است که ثابت بوده و فقط یک بار در هنگام احداث پستها و واحدهای تولیدی مصرف می‌شود و به میزان بارگذاری در دورهٔ بهره‌برداری بستگی ندارد. بخش دوم هزینه‌های متغیر را شامل می‌شود که به نحوهٔ بهره‌برداری و بارگذاری واحدهای DG و پستها بستگی دارد [۲]. هزینه‌های ثابت طرح عبارتند از:

- هزینهٔ زمین و اتصال پستها به خطوط فوق‌توزیع؛
- هزینهٔ ترانسفورماتور و تجهیزات پستها؛
- هزینهٔ احداث واحدهای تولید پراکنده؛
- هزینهٔ احداث شبکهٔ فشار متوسط (شبکهٔ پایین‌دستی).
- هزینه‌های متغیر طرح موارد زیر است:
- هزینهٔ بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده؛
- هزینهٔ تأمین توان مورد نیاز شبکه به‌وسیله پستهای فوق‌توزیع؛
- هزینهٔ تلفات در شبکهٔ فشار متوسط؛

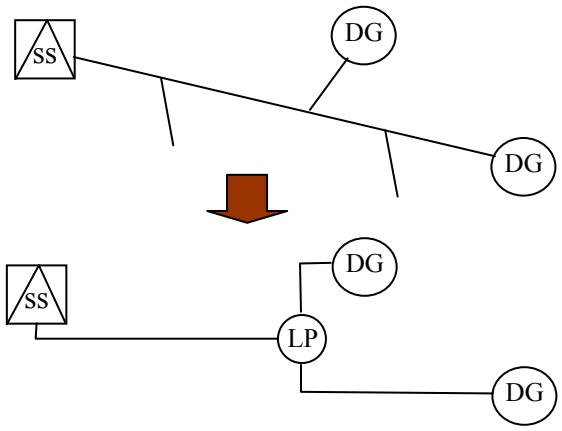
[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

در بخش سوم، مدلسازی ریاضی اجزای هزینه و نحوهٔ ترکیب آنها در قالب تابع هدف طرح آورده است.

۲-۲- نقاط مصرف

برای در نظر گرفتن سیستم پایین‌دست، باید بار و نحوهٔ تغذیهٔ آنها مدلسازی شود. برای مدلسازی بار در مسألهٔ مکانیابی پستها و واحدهای تولیدی، ابتدا محدودهٔ جغرافیایی منطقهٔ مورد مطالعه، به نواحی کوچکتری (نواحی برقی) تقسیم‌بندی می‌شود. هر ناحیهٔ برقی به همراه بار مصرفی متناظر در مرکز ثقل آن، به‌عنوان نقطهٔ بار تعریف می‌شود. میزان مصرف آتی در نقاط بار را می‌توان با یکی از روشهای موجود برای پیش‌بینی بار به‌دست آورد [۱۸]. از آنجاکه برطبق مدلسازی ارائه شده در این مقاله هر یک از نقاط بار در واقع نماینده‌ای از مصرف توان در نواحی متناظر است که به‌وسیله یک فیدر فشار متوسط تغذیه خواهد شد، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات پیش‌بینی بار نواحی برقی به‌نحوی انتخاب شوند که میزان پیک توان مصرفی آنها، در محدودهٔ معمول بارگذاری یک فیدر فشار متوسط باشد.

اگر چه در مسألهٔ مکانیابی پستها و واحدهای DG، طراحی دقیق شبکهٔ فشار متوسط مدنظر نیست، اما باید توجه داشت که به‌منظور مدلسازی تلفات و افت ولتاژ شبکهٔ پایین‌دستی و نیز حصول اطمینان از امکان طراحی صحیح در مرحلهٔ مسیریابی فیدرهای فشار متوسط - که پس از حل مسألهٔ حاضر انجام می‌شود - باید شبکهٔ فشار متوسط به‌نوعی در مطالعه جایابی پستها و واحدهای تولیدی شبیه‌سازی شود. از این‌رو در این مقاله از مجموع فواصل عمودی و افقی میان نقاط بار تا واحدهای DG و پستهای فوق‌توزیع مانند شکل ۱ برای شبیه‌سازی فیدرهای فشار متوسط استفاده شده است. باید توجه داشت که نقاط بار دارای ماهیتی فرضی بوده و این مدل به‌عنوان یک فیدر مجازی مطرح می‌شود که نماینده‌ای از فیدر واقعی است [۱۱].



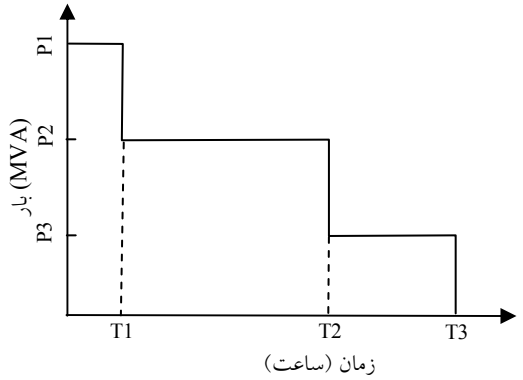
شکل ۱ مدلسازی فیدرهای فشار متوسط در مطالعه

با توضیح بالا، فاصلهٔ میان پست (یا واحد تولیدی) j با مختصات (X_i , Y_i) تا نقطهٔ بار j با مختصات (X_j, Y_j) از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود:

$$L_{ij} = |X_i - X_j| + |Y_i - Y_j| \qquad (۱)$$

با حضور واحدهای تولید پراکنده به‌عنوان گزینه‌ای علاوه بر پستهای فوق‌توزیع برای تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم، ضمن تعیین مکان و ظرفیت این واحدها، باید نحوهٔ بهره‌برداری از آنها نیز مشخص و متناسب با آن اجزای هزینه‌های بهره‌برداری طرح ارزیابی شود. به این‌ترتیب دیگر منظور کردن میزان مصرف در نقاط بار فقط به‌صورت پیک، کافی و مناسب نیست و باید سطوح مختلف بار آنها در مدلسازی ملحوظ شود. در این مقاله اطلاعات بار نقاط مصرف به‌صورت منحنی تداومی بار چندسطحی مانند شکل ۲، در محاسبات منظور شده است. در مطالعات پیش‌بینی بار برای هر یک از نواحی برقی با توجه به نوع کاربری اراضی و سابقهٔ مصرف، این منحنی تداومی بار را نیز می‌توان پیش‌بینی کرد [۱۸].

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]



شکل ۲ منحنی تداومی مصرف برای نقاط بار

۳- مدلسازی ریاضی

در این قسمت فرمولبندی ریاضی مسألهٔ مکانیابی استاتیکی پستهای فوق‌توزیع و واحدهای DG تشریح می‌شود. در این مدلسازی فرض بر این است که شرکتهای توزیع وظیفهٔ تأمین انرژی مشترکین، مدیریت، طراحی و بهره‌برداری از سیستم توزیع را به‌عهده دارند.

۳-۱- متغیرهای تصمیم

با توجه به ساختار شبکهٔ توزیع، هر فیدر فشار متوسط باید به‌وسیله یک پست فوق‌توزیع تغذیه شود و واحدهای تولید پراکنده نیز می‌توانند در تأمین توان مصرفی آن فیدر مشارکت کنند. در مدل پیشنهادی نیز هر نقطهٔ بار که نمایندهٔ یک فیدر فشار متوسط است، به یکی از پستهای فوق‌توزیع متصل می‌شود و یک یا چند واحد DG نیز می‌تواند در تغذیهٔ آن سهیم باشد. در این مسأله علاوه بر تعیین اتصال نقاط بار به پستها، اتصال واحدهای DG به نقاط بار و میزان مشارکت آنها در تأمین توان مصرفی این نقاط نیز باید مشخص شود. بنابراین در مدلسازی پیشنهادی، متغیرهای مستقل تصمیم‌گیری در مسأله عبارتند از:

- اتصال نقاط بار به پستهای فوق‌توزیع (α_{ij})؛
- اتصال هر واحد تولیدی به نقاط بار و نسبتی از توان این نقاط مصرف که در هر سطح بار به‌وسیله واحد تأمین می‌شود ($\beta_{ij,d}$).

بنابراین برای هر نقطهٔ بار j، میزان توانی را که به‌وسیله واحدهای DG و پست فوق‌توزیع تأمین می‌شود می‌توان به‌ترتیب از روابط (۲) و (۳) به‌دست آورد:

$$P_{j,d}^{(DG)} = \sum_{i=1}^{ndg} \beta_{ij,d}\, P_{j,d} \quad , j = 1,2,...,nlp\,, \quad d = 1,2,...,nld \qquad (۲)$$

$$P_{j,d}^{(SS)} = (1 - \sum_{i=1}^{ndg} \beta_{ij,d})\, P_{j,d} \quad , j = 1,2,...,nlp, d = 1,2,...,nld \qquad (۳)$$

۳-۲- تابع هدف

مدل ریاضی تابع هدف پیشنهادی برای مکانیابی استاتیکی پستهای فوق‌توزیع و واحدهای DG به‌صورت زیر است.

$$\text{Min } F = AC_{SS} + IC_{SS} + IC_{DG} + OC_{SS} + OC_{DG} + AC_{LP} \qquad (٤)$$

در تابع مذکور، ارزیابی اقتصادی مبتنی بر مقایسهٔ ارزش کنونی طرحها انجام می‌شود. بنابراین هزینه‌های ثابت اولیه بدون تغییر در تابع هزینه وارد می‌شوند، اما هزینه‌های جاری در دورهٔ مطالعه، به‌صورت معادل ارزش کنونی در تابع هزینه منظور می‌شوند. تابع هدف (٤) دارای شش قسمت است که در ادامه به تفکیک تشریح می‌شود.

۱) هزینهٔ دسترسی به پستهای فوق‌توزیع – AC_{SS}

این بخش از تابع هدف، هزینه‌های خرید زمین پستها و نیز اتصال آنها را به خطوط فوق‌توزیع (شبکهٔ بالادستی) دربردارد که می‌تواند با توجه به موقعیت جغرافیایی مکان کاندیدای احداث پست متفاوت باشد. طبیعی است که برای پستهای موجود، این بخش از تابع هدف تقریباً برابر صفر خواهد بود. این هزینه در قالب ریاضی به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$AC_{SS} = \sum_{i=1}^{nss} AC_i (1 - e^{M P_{SS,i}}) \qquad (٥)$$

$$P_{SS,i} = \max_{d=1,2,...,nld} \left(\sum_{j=1}^{nlp} \alpha_{ij} P_{j,d}^{SS} \right) \quad , i = 1,2,...,nss \qquad (٦)$$

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

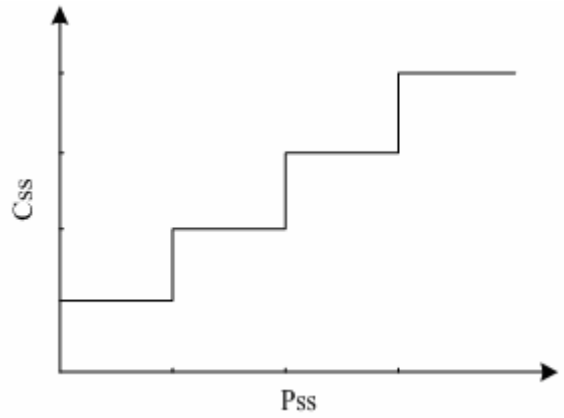
در این روابط $P_{SS,i}$ حداکثر بارگذاری پست فوق‌توزیع i را نشان می‌دهد. لذا اگر پیک بارگذاری پست مقداری غیرصفر باشد به این معنا است که پست موردنظر برای احداث انتخاب شده و در نتیجه، هزینهٔ دسترسی به آن نیز باید در تابع هدف ملحوظ شود. از سوی دیگر اگر هیچ باری به‌وسیله پست تأمین نشود، آن پست نباید احداث شود و هزینهٔ دسترسی به آن نیز برابر صفر خواهد بود. این مفهوم در رابطهٔ (۵) با استفاده از عبارت $(1-e^{-MP_{SS,i}})$ مدلسازی شده که در آن M عددی بزرگ است.

۲) هزینهٔ احداث پستهای فوق‌توزیع – IC_{SS}

هزینهٔ ترانسفورماتور و دیگر تجهیزات مرتبط با پستهای فوق‌توزیع در این بخش از تابع هدف منظور شده که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$IC_{SS} = \sum_{i=1}^{nss} C_{SS}(P_{SS,i}) \qquad (۷)$$

ظرفیت پستها دارای ماهیتی گسسته بوده و اعداد خاصی را می‌تواند اختیار کند. در رابطهٔ (۷) ماهیت پله‌ای هزینهٔ احداث هر پست به‌وسیله تابع $C_{SS}(P_{SS,i})$ با توجه به میزان بارگذاری آن تعیین می‌شود.



شکل ۳ تغییرات پله‌ای هزینهٔ احداث پست نسبت به بارگذاری آن

منحنی تغییرات این تابع در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل هر پله نشانگر تغییر ظرفیت پست می‌باشد. برای پستهای موجود در سیستم، هزینهٔ ظرفیتهای نصب شده برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

۳) هزینهٔ احداث واحدهای تولید پراکنده – IC_{DG}

با توجه به ظرفیت واحدهای DG که معمولاً کمتر از ۱۰مگاولت‌آمپر است، این واحدها مساحت کمتری را در مقایسه با پستهای فوق‌توزیع اشغال می‌کنند. بنابراین برخلاف پستها که زمین مورد نیاز یکی از پارامترهای مهم در هزینهٔ احداث آنها را تشکیل می‌دهد، درخصوص احداث واحدهای DG این پارامتر چندان مؤثر نیست و تنها هزینهٔ قابل توجه، به خرید و نصب تجهیزات واحد تولیدی مربوط است. این بخش از تابع هدف به‌صورت روابط زیر قابل تعریف است.

$$IC_{DG} = \sum_{i=1}^{ndg} C_{DG}(P_{DG,i}) \qquad (۸)$$

$$P_{DG,i} = \max_{d=1,2,...,nld}\left(\sum_{j=1}^{nlp}\beta_{ij,d}P_{j,d}\right), \quad i=1,2,...,ndg \qquad (۹)$$

معمولاً واحدهای DG به‌صورت ماژولهایی از یک ظرفیت خاص (برای مثال یک مگاولت‌آمپر) احداث می‌شوند. تابع $C_{DG}(P_{DG,i})$ در رابطهٔ (۸) همین موضوع را نشان می‌دهد. منحنی تغییرات این تابع نیز مشابه شکل ۳ است.

٤) هزینهٔ بهره‌برداری از پستهای فوق‌توزیع – OC_{SS}

در بازار رقابتی برق، شرکتهای توزیع باید هزینهٔ انرژی الکتریکی مورد نیاز در شبکهٔ تحت پوشش خود را که از طریق پستهای فوق‌توزیع از سیستم انتقال دریافت می‌کنند، بپردازند. توان اکتیو دریافتی از طریق پستهای فوق‌توزیع شامل

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

دو بخش است: یک بخش بـار شـبکهٔ توزیـع و بخـش دیگـر تلفات اهمی فیدرهای فـشار متوسـط. از طـرف دیگـر قیمـت توان اکتیو می‌تواند در سطوح مختلف بارگذاری متفاوت باشـد و معمولاً در سـاعات پیـک بیـشتر و در دیگـر سـاعات کمتـر است. معادل ارزش کنونی هزینهٔ بهره‌برداری از پـستها (تـأمین توان سیستم) در دورهٔ مطالعه از رابطهٔ (۱۰) حاصل می‌شود.

(۱۰)

$$OC_{SS}=\sum_{t=1}^{ny}\left(PW^{t}\sum_{i=1}^{nss}\sum_{j=1}^{nlp}\sum_{d=1}^{nld}\alpha_{ij}[(P_{j,d}^{SS}\cdot pf_{j}+RL_{ij}(\frac{P_{j,d}^{SS}}{V})^{2}]T_{d}\,K_{SSi,d}\right)$$

که در آن:

$$PW=\frac{1+InfR}{1+IntR} \qquad (11)$$

باید توجه داشت که نقـاط مـصرف و ارتبـاط آنهـا بـا پستهای فوق‌توزیع بـه‌صـورت تقریبـی مدلـسازی شـده و بنابراین عبـارت مربـوط بـه تلفـات در رابطـه (۱۰) دارای تقریب است.

۵) هزینهٔ بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده – OC_{DG}
تولید توان در واحد DG نیازمند صرف هزینـه بـرای تـأمین منبـع انرژی ورودی به آن و نیز هزینهٔ تعمیرات و نگهداری واحد اسـت. میزان تولید در هر یک از سطوح بار و نقطه باری که به‌وسـیله هـر یک از واحدهای DG تغذیـه مـی‌شـود، بـا متغیـر $\beta_{ij,d}$ مـشخص می‌شود، بنابراین ارزش کنونی هزینهٔ بهره‌برداری از واحـد تولیـدی در دورهٔ مطالعه را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$OC_{DG}=\sum_{t=1}^{ny}\left(PW^{t}\sum_{i=1}^{ndg}\sum_{j=1}^{nlp}\sum_{d=1}^{nld}\beta_{ij,d}[(P_{j}\cdot pf_{j}+RL_{ij}(\frac{P_{j}}{V})^{2}]T_{d}\,K_{DG}\right) \qquad (12)$$

در این رابطه نیز مانند رابطهٔ (۱۰) با توجـه بـه تقریبـی بودن مدلسازی اتصال نقاط بار به واحـدهای DG، عبـارت مربوط به تلفات دارای تقریب است.

٦) هزینهٔ دسترسی به نقاط بار– AC_{LP}
در نظر گرفتن شبکهٔ فشار متوسط با تمام جزئیـات در مدلسازی ارائه شده مدنظر نیست؛ اما همانگونه کـه در بخش ۲-۲ گفته شد، مدل ساده شـدهٔ فیـدرهای فـشار متوسط برای ارزیابی هزینه‌هـای احـداث شـبکهٔ فـشار متوسط در مدلسازی معرفی شده اسـت. بـا توجـه بـه اینکه نقاط بار از طریق پستها یا واحدهای تولیدکننـده تغذیه می‌شوند، می‌توان هزینهٔ دسترسی به نقاط بار یـا به بیان دیگـر هزینـهٔ احـداث شـبکهٔ فـشار متوسـط را به‌صورت زیر تعریف کرد:

(۱۳)

$$AC_{LP}=\left(\sum_{i=1}^{nss}\sum_{j=1}^{nlp}L_{ij}(1-e^{-M\alpha_{ij}})+\sum_{i=1}^{ndg}\sum_{j=1}^{nlp}L_{ij}(1-e^{-M\sum_{d=1}^{nld}\beta_{ij,d}})\right)\cdot K_{F}$$

در نظر گرفتن ایـن هزینـه در تـابع هـدف طـرح بـا ممانعت از طولانی شـدن فیـدرها، دسترسـی بـه پاسـخ عملی را آسان‌تر می‌سازد.

۳-۳- محدودیتها

تابع هدف (٤) همراه بـا مجموعـه‌ای از محـدودیتها، مـدل کلی مکانیابی توأم پستهای فوق‌توزیـع و واحـدهای تولیـد پراکنده را تشکیل می‌دهد. با توجه بـه لـزوم رعایـت قیـود حاکم بر شبکه و نیـز بهـره‌بـرداری از تجهیـزات، ملحـوظ کردن محدودیتهای زیر در مدل بهینه‌سازی ضروری است.

۱) محدودیت بارگذاری پستهای فوق‌توزیع
به‌منظور ملحوظ کردن قید قابلیت اطمینـان، بـرای پـستهای فوق‌توزیع حد بارگذاری در نظر گرفته می‌شود به‌طوری‌کـه بارگـذاری هـر پـست بایـد در محـدودهٔ مجـاز آن باشـد. به‌صورت ریاضی این قید با رابطهٔ زیر تعریف می‌شود.

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

$$0 \le P_{SS,i} \le K_L \cdot S_{SS,i} \qquad i = 1,2,...,nss\ ,\ S_{SS,i} \in \Omega_i \quad (14)$$

که در آن K_L درصد مجاز بارگذاری پستها و H_i مجموعه ظرفیتهای قابل احداث در مکان iام است.

۲) محدودیت بهره‌برداری از واحدهای DG

میزان بارگذاری هر واحد تولیدی باید کمتر از ظرفیت آن واحد باشد:

$$0 \le P_{DG,i} \le S_{DG,i} \qquad i = 1,2,...,ndg \quad (15)$$

۳) محدودیت افت ولتاژ

افت ولتاژ در نقاط بار در هر یک از سطوح بار باید در محدودهٔ مجاز باشد [۱۹]. از آنجاکه در مدل پیشنهادی درصورت حضور واحدهای تولیدی، هر نقطهٔ بار به‌وسیله یک پست فوق‌توزیع و یک یا چند واحد DG تغذیه می‌شود، برای محاسبهٔ میزان افت ولتاژ در نقاط مصرف، از پخش بار [۲۰] استفاده شده است. در محاسبات پخش بار پست فوق‌توزیع به‌صورت باس Slack و واحدهای DG به‌صورت باس PV مدلسازی شده است. نقاط بار نیز به‌صورت باسهای PQ مدلسازی شده است. محاسبات پخش بار برای هر یک از سطوح بار انجام می‌شود. بنابراین اگر $\Delta V_{j,d}$ میزان افت ولتاژ نقطهٔ بار j در سطح بار d باشد داریم:

$$0 \le \Delta V_{j,d} \le \Delta V_{MAX} \quad j = 1,2,...,nlp,\ d = 1,2,...,nld \quad (16)$$

لازم است توضیح دهیم که این قید از آن‌رو در مدل گنجانده شده تا از اتصال نقاط بار به پست‌ها یا واحدهای DG دور از آنها جلوگیری شود. به بیان دیگر وجود این قید در مرحله جایابی پست‌های فوق‌توزیع (مرحله اول) موجب می‌شود که در مرحله مسیریابی و طراحی فیدرهای توزیع (مرحله دوم) که با استفاده از نتایج مرحله اول انجام می‌شود، با مشکلات کمتری از نظر افت ولتاژ مواجه شویم. از آنجاکه طراحی دقیق فیدرها مدنظر نیست لذا بار منطقه به‌صورت نقاط بار موردنظر مطابق قسمت ۲-۲ مدلسازی می‌شود. این نقاط بار در واقع بیانگر چند نقطه بار اصلی در ناحیه برقی موردنظر است و بار هر یک از آنها مطابق روابط (۲) و (۳) با توجه به متغیرهای تصمیم α_{ij} و $\beta_{ij,d}$ به پست‌های فوق‌توزیع و واحدهای DG تخصیص داده می‌شود. سپس با توجه به میزان توان اختصاص داده شده و اتصال حاصل میان نقاط بار و پست‌های فوق‌توزیع و نیز واحدهای DG، پخش بار انجام و قید افت ولتاژ (۱۶) بررسی می‌شود.

باید توجه داشت که پارامتر ΔV_{max} در مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای کنترل حداکثر فاصلهٔ نقاط بار متصل به پست‌ها و واحدهای DG به‌کار رود، به‌صورتی که با انتخاب مقادیر کمتر برای ΔV_{max} حداکثر فواصل مذکور کاهش پیدا خواهد کرد.

۴) محدودیت تغذیهٔ نقاط بار به‌وسیله واحدهای تولیدی

در طراحی شبکه‌های توزیع در حضور واحدهای DG سعی می‌شود که بیشتر بار شبکه از طریق پستهای فوق‌توزیع به‌عنوان منابع اصلی تأمین توان تأمین شود و واحدهای DG محوریت تأمین توان شبکه را به‌عهده نداشته باشد [۱۶]. به‌همین منظور در مسألهٔ حاضر، محدودیت حداکثر توانی که از هر نقطهٔ بار می‌تواند به‌وسیله DG تأمین شود به‌صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\sum_{i=1}^{ndg} \beta_{ij,d} \le 0.35 \qquad j = 1,2,...,nlp;\quad d = 1,2,...,nld \quad (17)$$

۵) محدودیت شعاعی بودن شبکهٔ فشار متوسط

تغذیهٔ تمامی نقاط بار یکی از قیود اساسی در طراحی و توسعهٔ شبکه‌های توزیع به‌شمار می‌رود. علاوه بر این هر نقطهٔ بار باید فقط از یک پست فوق‌توزیع تغذیه شود که قید شعاعی بودن شبکه فشار متوسط را در بر دارد. از

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

طرف دیگر هر نقطهٔ بار می‌تواند به‌وسیله یک یا چند واحد تولیدی نیز تغذیه شود. اما اتصال واحدهای DG بـه نقـاط بار در تمامی سطوح بار باید یکسان باشد. ایـن محـدودیت را می‌توان در قالب دو رابطهٔ زیر بیان کرد:

$$\sum_{i=1}^{nss}\alpha_{ij}=1 \qquad ,j=1,2,...,nlp \tag{18}$$

$$\sum_{i=1}^{nss}(1-e^{-M\sum_{d=1}^{nld}\beta_{ij,d}})\le 1 \qquad ,j=1,2,...,nlp \tag{19}$$

٦) محـدودیت احـداث پـست و DG در مکانهـای کاندیدا شده

معمولاً احداث پست در یک مکان کاندیدا شـده یـا توسـعهٔ پـستهای موجـود بـا توجـه بـه قیـود فنـی و جغرافیـایی بـا محدودیت روبه‌رو اسـت بـه‌طـوری‌کـه نمـی‌تـوان بـیش از ظرفیت خاصی در آنها پست احداث کرد یا پستهای موجـود را توسعه داد. این قید با رابطهٔ (۲۰) مدلسازی شده است:

$$0\le S_{SS,i}\le S_{SS,i}^{MAX} \qquad ,i=1,2,...,nss \tag{20}$$

اگر چه احـداث واحـدهای DG در مقایسـه بـا پـستها ازنظر مکانی با محدودیتهای کمتری روبه‌رو اسـت، امـا در هر مکان کاندیدا برای احداث واحـد تولیدکننـده نیـز حـد بیشینه‌ای ازنظر ظرفیت DG قابـل نـصب وجـود دارد کـه می‌توان آن را به‌صورت رابطهٔ زیر نشان داد:

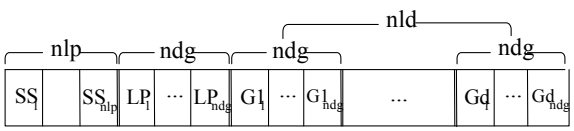
$$0\le S_{DG,i}\le S_{DG,i}^{MAX} \qquad i=1,2,...,ndg \tag{21}$$

٤- روش حل مبتنی بر الگوریتم ژنتیک

در این مقاله برای دستیابی به پاسـخ بهینـه از الگـوریتم ژنتیک استفاده شده است. در این روش که مطابق اصول تکامل طبیعی مدلسازی شده، مبنای کار «شـانس بیـشتر بـرای انتخـاب اعـضای بـا بـرازش بـالاتر» اسـت [۲۱]. الگوریتم ژنتیک روشی ساده و کارامـد بـرای مدلـسازی ریاضـی حقیقـت فیزیکـی مـسأله بـدون هیچگونـه ساده‌سازی است [۲۲]. از دیگر مزایای این روش، ارائـهٔ چندین پاسخ مناسب به‌جای یک راه حل واحد است که این به طراح این امکان را می‌دهـد تـا بهتـرین پاسـخ را برای اجرا و پیاده‌سازی انتخاب نماید. در این الگوریتم، متغیرهای تصمیم مـسأله معمـولاً در قالـب رشـته‌هـایی موسوم به کروموزوم کدگذاری می‌شود. این الگوریتم با جمعیت اولیه‌ای که به‌صورت تصادفی یا به‌وسیله کـاربر تولید شده، آغاز می‌شود سپس با توجه به محـدودیتها و قیود مسأله، امکان‌پذیری هـر یـک از اعـضای جمعیـت بررسی می‌شود و برای آن دسته از اعضایی که با توجـه به تابع هدف بهینه‌سازی کیفیـت بـالاتری دارنـد، عمـل تقاطع (ترکیـب رشـته‌هـای دو والـد) و جهـش (تغییـر تصادفی یک یا چند بیـت از هـر رشـته) انجـام شـده و فرزندان تولید می‌شوند، این روند تا رسـیدن بـه پاسـخ مطلوب ادامه می‌یابد. در ادامـه نحـوهٔ انطبـاق الگـوریتم ژنتیک با مسألهٔ مورد بحث آورده شده است.

٤-۱- کدگذاری متغیرهای تصمیم

در این مقاله، هر کروموزوم کـه عـضوی از یـک جمعیـت است، اتصال نقاط بار به پستها و واحدهای تولیـدی و نیـز درصد بارگذاری واحدهای تولیدی در سطوح بار مختلـف را نشان می‌دهد. ساختار کروموزوم پیشنهادی حـاوی چنـد زیررشته به‌صورت شکل ٤ است.



شکل ٤ ساختار کروموزوم پیشنهادی

بخـش اول کرومـوزوم (SS) دارای nlp ژن بـوده و اتصال نقاط بار بـه پـستها را نـشان مـی‌دهـد. هـر ژن i از زیررشتهٔ SS معرف شمارهٔ پستی است کـه بـار iام بـه آن

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

متصل است. به‌عنوان مثال اگر ژن سوم این زیررشته برابر ۷ باشد به این معنا است که نقطهٔ بار شمارهٔ ۳ به پست شمارهٔ ۷ متصل است و $\alpha_{۷,۳}=۱$.

در زیررشتهٔ دوم کروموزوم (LP) به تعداد ndg ژن وجود دارد که نشان‌دهندهٔ اتصال واحدهای DG به نقاط بار هستند. هر ژن j از این زیررشته معرف شمارهٔ نقطه باری است که واحد تولیدی iام به آن متصل است. بقیهٔ کروموزوم شامل تعداد nld زیررشته است که هر یک از آنها به تعداد ndg ژن دارد. هر ژن j از زیر رشتهٔ dام این مجموعه می‌تواند اعداد اعشاری کوچکتر از یک را اختیار کند و نشان می‌دهد که واحد تولیدی iام چه نسبتی از توان نقطهٔ بار متناظر با ژن iام در زیررشتهٔ LP در سطح بار dام را تأمین می‌کند. برای مثال اگر ژن سوم زیررشته‌های LP و G2 به‌ترتیب برابر ۷ و ۰/۲ باشد به این مفهوم است که واحد تولیدی ۳ به نقطهٔ بار ۷ متصل است و ۰/۲ بار آن را در سطح بار دوم تأمین می‌کند و $\beta_{۲,۷,۳}=۰/۲$ اگر ژن مربوط به یک مکان کاندیدای تولید پراکنده در زیررشتهٔ LP برابر صفر باشد به این‌معنا است که واحد مربوط به آن ژن انتخاب نشده و در نتیجه ژن‌های متناظر با آن در زیررشته‌های G1 تا Gd نیز صفر در نظر گرفته می‌شوند.

٤-٢- جمعیت اولیه

ابتدا تعدادی از کروموزمهای مورد بحث به‌صورت تصادفی به‌عنوان جمعیت اولیه تولید می‌شود. انتخاب تعداد اعضای جمعیت اولیه نخستین گامی است که طراح باید انجام دهد. هر چه تعداد اعضای جمعیت اولیه بیشتر باشد، احتمال یافتن پاسخ بهینهٔ مطلق افزایش پیدا می‌کند اما به‌عکس حجم محاسبات نیز بالا می‌رود که این سرعت رسیدن به جواب را کاهش می‌دهد.

٤-٣- عملگر تقاطع

در این مرحله با استفاده از عملگر تقاطع دو کروموزم از بین جمعیت اولیه به‌عنوان والد به‌طور تصادفی انتخاب و سپس با احتمال P_c ($۰< P_c<۱$) عمل تقاطع بین آنها انجام می‌شود. انجام عمل تقاطع می‌تواند به‌روشهای متفاوتی انجام می‌شود.

در این مقاله، از دو روش یک و چندنقطه‌ای برای تقاطع استفاده شده است. در روش یک‌نقطه‌ای دو رشته انتخابی از جمعیت اولیه، از یک نقطه تصادفی، اطلاعات خود را مبادله می‌کنند. روش تقاطع یک‌نقطه‌ای این خاصیت را دارد که پرشهای بلندتری را در مجموعه جواب ایجاد می‌کند و برای مراحل اولیه‌ای که می‌خواهیم جمعیت اولیه را بسط دهیم، مناسب است اما در مراحل نهایی - که الگوریتم به‌سوی پاسخ همگرا می‌شود - از روش تقاطع چندنقطه‌ای استفاده می‌شود. در این روش عمل تقاطع برای هر زیررشته از کروموزومها جداگانه اعمال می‌شود به‌طوری‌که در دو زیررشتهٔ SS و LP تقاطع به‌صورت جابه‌جایی و در دیگر زیررشته‌ها به‌صورت ریاضی [۱۱] انجام می‌شود.

٤-٤- عملگر جهش

عملگر جهش در ساده‌ترین حالت عبارت است از تغییر تصادفی یک یا چند ژن از یک کروموزوم. در عملگر جهش برای هر کروموزوم با احتمال P_m ($۰< P_m<۱$) یک یا چند ژن از رشته انتخاب شده از جمعیت موجود در محدودهٔ مجاز خود تغییر می‌کنند و رشتهٔ جدیدی تولید می‌شود. البته در این مقاله عمل جهش در هر بخش از کروموزوم به‌صورت جداگانه انجام می‌شود.

٤-٥- تابع برازش

برازش، کیفیت هر کروموزوم را با توجه به مقدار تابع هدف و قید مسأله نشان می‌دهد. از آنجاکه

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

کمینه‌سازی تابع هدف مطلوب است و نیز به‌منظور ملحوظ کردن قیود مدل، تابع برازندگی به‌صورت زیر تعریف شده است که عبارت دوم آن نشان‌دهندهٔ جریمهٔ مرتبط با هر عضو با توجه به عبور از قیود مدل است [۱۱]:

$$\mathrm{Fit(Chr)} = [\mathrm{F(Chr)} + C_P \cdot \mathrm{Inf(Chr)} + a]^{-1} \qquad (۲۲)$$

میزان غیرعملی بودن هر کروموزوم به این طریق به‌دست می‌آید که اگر $G_i(Chr_k) \le b_i$ قید iام مدل مسأله باشد، در این‌صورت تعریف می‌کنیم:

$$d_i = \begin{cases} 0 & ;G_i(\mathrm{Chr}) \le b_i \\ (G_i(\mathrm{Chr}) - b_i)/b_i & ;\mathrm{Otherwise} \end{cases} \qquad (۲۳)$$

$$\mathrm{Inf(Chr)} = \sum_{i \in I_C} d_i \qquad (۲٤)$$

در این روابط d_i میزان عبور از قید iام و I_C مجموعهٔ محدودیتهایی می‌باشد که به‌وسیله کروموزوم نقض شده است.

به‌علت بزرگ بودن ضریب جریمه C_P، در تکرارهای اول جستجو و تا هنگامی که جوابهای عملی یافت نشده، الگوریتم ژنتیک به‌دنبال جوابهایی با میزان غیرعملی بودن کمتر می‌گردد تا وقتی که عبارت دوم تابع برازش صفر شود و به‌عبارت دیگر جوابهایی یافت شود که قید مسأله را ارضاء می‌نماید. با عبور از این مرحله و پر شدن جمعیت از کروموزومهای عملی، دیگر جوابهای غیرعملی خودبه‌خود انتخاب نشده و از فضای جستجو حذف می‌شوند.

٤-٦- انتخاب

اساساً نحوهٔ اجرا در عملگر انتخاب به‌گونه‌ای است که شاخص حضور کروموزومهای با برازندگی بیشتر در جمعیت جدید بیشتر باشد. در این تحقیق عمل انتخاب به‌روش انتخاب نخبگان انجام می‌شود. در این روش ابتدا بهترین کروموزومهای موجود در جمعیت حاضر با احتمال صددرصد برای نسل جدید انتخاب می‌شوند. سپس از روش چرخ گردان برای انتخاب کروموزومها به تعداد جمعیت اولیه براساس مقدار برازندگی استفاده می‌شود [۲۱].

۵- مطالعات عددی

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، یک مثال پایه طراحی و سپس آزمایشهایی بر روی آن انجام شده است. منطقهٔ مورد مطالعه در این مثال که در شکل ۵ نمایش داده شده، دارای ۱٦ نقطهٔ بار است که اطلاعات بار پیش‌بینی شدهٔ آنها در قالب سه سطح بار در جدول ۱ آورده شده است. در این منطقه دو پست موجود با ظرفیت ٤۵ مگاولت‌آمپر و چهار مکان کاندیدا برای احداث پستهای فوق‌توزیع جدید وجود دارد که حداکثر بارگذاری مجاز در تمام آنها برابر ۷۰ درصد ظرفیت فرض شده است. سایر مشخصات این پستها در جدول ۳ ارائه شده است. برای احداث واحدهای تولید پراکنده نیز سیزده مکان کاندید در نظر گرفته شده که حداکثر ظرفیت قابل احداث در تمامی آنها برابر ۵ مگاولت‌آمپر است. دیگر اطلاعات مورد نیاز در این مطالعات عددی در جدول ۲ آورده شده است.

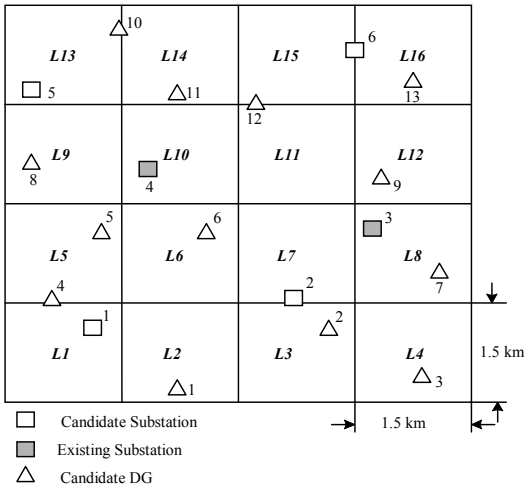
در این مطالعات فرض بر آن است که ظرفیت DG ضریبی از یک مگاولت‌آمپر است. بنابراین حداقل ظرفیتی که در هر مکان کاندیدا می‌تواند احداث شود یک مگاولت‌آمپر است.

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، آزمایشهای زیر طراحی و اجرا شده که در ادامه تشریح و نتایج حاصل از آنها ارائه می‌شود.

آزمایش ۱- در نظر گرفتن حالت پایه‌ای سیستم

آزمایش ۲- بررسی تأثیر حذف مکانهای کاندیدای پست‌ها

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]



شکل ۵ منطقهٔ مورد مطالعه

جدول ۱ اطلاعات بار پیش‌بینی شدهٔ نقاط بار

نقطه بار	بار پیش‌بینی شده [MVA]			ضریب قدرت
	سطح اول T_1=۱۰۰۰	سطح دوم T_2=۲۵۰۰	سطح سوم T_3=۵۲۶۰	
۱	۸	۵/۶	۳/۲	۰/۹
۲	۶	٤/۲	۲/٤	۰/۹
۳	۶	٤/۲	۲/٤	۰/۹
٤	۱۰	۷	٤	۰/۹
۵	۷	٤/۹	۲/۸	۰/۹
۶	۶	٤/۲	۲/٤	۰/۹
۷	۸	۵/۶	۳/۲	۰/۹
۸	۱۰	۷	٤	۰/۹
۹	۹	۶/۳	۳/۶	۰/۹
۱۰	۸	۵/۶	۳/۲	۰/۹
۱۱	۹	۶/۳	۳/۶	۰/۹
۱۲	۸	۵/۶	۳/۲	۰/۹
۱۳	۷	٤/۹	۲/۸	۰/۹
۱٤	۹	۶/۳	۳/۶	۰/۹
۱۵	۱۰	۷	٤	۰/۹
۱۶	۱۰	۷	٤	۰/۹

جدول ۲ اطلاعات فنی و اقتصادی مورد نیاز برای مطالعه

پارامتر	مقدار
هزینهٔ احداث شبکهٔ فشار متوسط [$ /kM]	۳۰۰۰
قیمت برق سیستم انتقال در تمامی پستها در سطح بار اول [$ /MWh]	۵۰
قیمت برق سیستم انتقال در تمامی پستها در سطح بار دوم [$ /MWh]	۳۰
قیمت برق سیستم انتقال در تمامی پستها در سطح بار سوم [$ /MWh]	۲۰
حداکثر افت ولتاژ مجاز در نقاط بار [%]	۵
هزینهٔ احداث DG [$ /MVA]	۲۸۰۰۰۰
هزینهٔ تولید توان DG [$ /MWh]	۲۷
مقاومت واحد طول شبکهٔ فشار متوسط [kM/ اهم]	۰/۱۲۵
راکتانس واحد طول شبکهٔ فشار متوسط [kM/ اهم]	۰/۱۲۷
ولتاژ نامی شبکهٔ فشار متوسط [kV]	۲۰
بازهٔ مطالعه [سال]	۲۵
نرخ سالیانه تورم	۰/۰۷
نرخ سالیانه بهره	۰/۱۲

جدول ۳ مشخصات پستهای موجود و کاندیدا

شماره پست	وضعیت	هزینهٔ دسترسی [$]	ظرفیتهای قابل احداث
۱	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۳۰، ٤۵، ۶۰، ۷۵
۲	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۳۰، ٤۵، ۶۰، ۷۵
۳	موجود	–	٤۵، ۶۰، ۷۵
٤	موجود	–	٤۵، ۶۰، ۷۵
۵	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۳۰، ٤۵، ۶۰، ۷۵
۶	کاندیدا	۱۵۰۰۰۰	۳۰، ٤۵، ۶۰، ۷۵

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

آزمایش ۱- حالت پایه‌ای سیستم

در این آزمایش به‌منظور بررسی اثر DG به‌عنوان گزینه‌ای جدید علاوه بر پستها برای تأمین ظرفیت مورد نیاز سیستم، با در نظر گرفتن منطقهٔ مورد مطالعه و اطلاعات ورودی فوق، مسأله در دو حالت زیر حل شده است.

حالت ۱-۱: با حذف مکانهای کاندیدای احداث DG از منطقهٔ مورد مطالعه، فقط پستهای فوق‌توزیع با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مکانیابی شده است.

حالت ۱-۲: با در نظر گرفتن امکان احداث واحدهای تولیدکننده پراکنده در مکانهای کاندیدا، مسأله برای مکانیابی توأم پستها و واحدهای تولیدی حل شده است. دیگر اطلاعات ورودی و شرایط، مانند حالت ۱-۱ است.

نتایج حاصل از اجرای این آزمایش شامل ظرفیت، میزان بارگذاری و نیز نقاط بار تغذیه شده به‌وسیله پستها و واحدهای تولیدی به‌ترتیب در جدولهای ٤ تا ٦ ارائه شده است. هم‌چنان‌که ملاحظه می‌شود، پاسخ حاصل در دو حالت فوق با یکدیگر متفاوت بوده و مجموع ظرفیت پستهای منتخب در حالت ۱-۲ کمتر از حالت ۱-۱ است. حضور واحدهای DG در تأمین ظرفیت شبکه موجب شده است که پست شمارهٔ ٦ - که در حالت ۱-۱ انتخاب شده بود - در حالت ۱-۲ انتخاب نشود ضمن اینکه ظرفیت پست شمارهٔ ۳ نیز در حالت ۱-۲ کاهش یابد.

اجزای هزینه تابع هدف در این آزمایش در جدول ۱۰ آورده شده است. مشاهده می‌شود که میزان تابع هدف در حالت ۱-۲ کمتر از حالت ۱-۱ بوده و اجرای پاسخ حاصل در حالت اخیر از نظر اقتصادی بیشتر مقرون به‌صرفه خواهد بود.

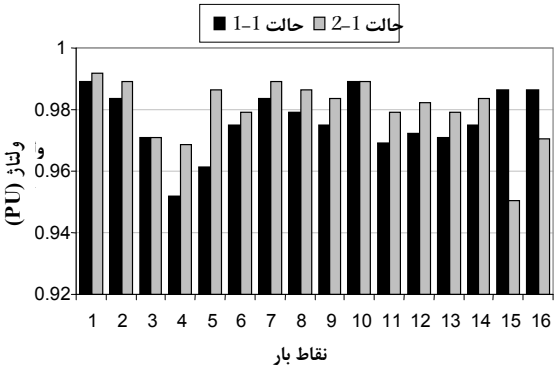
در شکل ٦ نیز ولتاژ نقاط مصرف در پاسخ به‌دست آمده از دو حالت فوق نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که در بیشتر نقاط بار، حضور DG توانسته است افت ولتاژ را کاهش دهد. فقط در نقاط بار ۱۵ و ۱٦ که در حالت ۱-۱ از پست شمارهٔ ٦ تغذیه می‌شده‌اند، افت ولتاژ در حالت ۱-۲ افزایش پیدا کرده است. علت این پدیده، حذف پست مربوط در حالت ۱-۲ است که در نتیجه، نقاط بار مذکور از فواصل دورتر تغذیه شده‌اند.

جدول ٤ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۱-۱ آزمایش ۱

شماره پست	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزهٔ سرویسدهی
		اول	دوم	سوم	
۱	۳۰	۲۰	۱٤	۸	۱، ۲، ٦
۳	۷۵	۵۱	۳۵/۷	۲۰/٤	۳، ٤، ۷، ۸، ۱۱، ۱۲
٤	٦۰	٤۰	۲۸	۱٦	۵، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱٤
٦	۳۰	۲۰	۱٤	۸	۱۵، ۱٦

جدول ۵ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۱-۲ آزمایش ۱

شماره پست	ظرفیت	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزهٔ سرویسدهی
		اول	دوم	سوم	
۱	۳۰	۲۰	۱۲/٤۸	۱۰/۸	۱، ۲، ۵، ٦
۳	٦۰	٤۱/۹	۲۹/۲۳	۲٤/٤	۳، ٤، ۷، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱٦
٤	٦۰	۳۵	۲۳/۹۹	۱۷/۲	۹، ۱۰، ۱۳، ۱٤، ۱۵



شکل ٦ حداقل ولتاژ نقاط بار در آزمایش ۱

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

جدول ٦ نتایج واحدهای تولید کننده انتخاب شده در حالت ۱-۲ آزمایش ۱

شماره DG	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقطهٔ بار تغذیه‌شونده
		اول	دوم	سوم	
۱	۲	۲	۱/٤۷	-	۲
۲	۳	۲/۸	۱/۹٦	-	۷
۳	٤	۳/٥	۲/٤٥	-	٤
٤	۲	۲	۱/۹٥	-	۱
٥	۲	۲	۲	-	٥
٦	۱	۱	۱	-	٦
۷	٤	۳/٥	۲/٤٥	-	۸
۸	۳	۳	۲/۲	-	۹
۹	۳	۲/۸	۱/۹٦	-	۱۲
۱۰	۲	۲	۱/۷۱	-	۱۳
۱۱	۳	۳	۲/۲	-	۱٤
۱۲	۳	۳	۲/۲	-	۱۱
۱۳	٤	۳/٥	۲/٤٥	-	۱٦

آزمایش ۲- حذف پستهای کاندیدا

این آزمایش برای بررسی اثر حذف مکانهای کاندیدای احداث پست از منطقهٔ مورد مطالعه طراحی شده است. این آزمایش وضعیتی را نشان می‌دهد که به‌علت محدودیتهای جغرافیایی در مناطق شهری با تراکم بالا یا قیمت بسیار زیاد زمین، امکان احداث پست جدید در منطقه وجود ندارد، لذا فقط با توسعهٔ پستهای موجود، ظرفیت مورد نیاز سیستم را می‌توان تأمین کرد. بنابراین مسأله در دو حالت زیر حل شده است:

حالت ۲-۱: با حذف مکانهای کاندیدای احداث پستهای جدید و DG از منطقهٔ مورد مطالعه، مسأله فقط با فرض امکان توسعهٔ پستهای موجود حل شده است. به مجموعهٔ ظرفیتهای قابل احداث در پستهای موجود، ۹۰ و ۱۲۰ مگاولت‌آمپر اضافه شده است. دیگر شرایط و اطلاعات ورودی مانند آزمایش ۱ است.

حالت ۲-۲: تمامی شرایط مانند حالت ۲-۱ است و فقط امکان احداث DG در مکانهای کاندیدای مربوط نیز در حل مسأله منظور شده است.

نتایج حاصل از اجرای این آزمایش شامل ظرفیت، میزان بارگذاری در سطوح مختلف و نیز نقاط بار تغذیه شده به‌وسیله پستها و واحدهای تولیدی به‌ترتیب در جدولهای ۷ تا ۹ نمایش داده شده است. اجزای هزینه تابع هدف در این آزمایش نیز در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۷ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۲-۱ آزمایش ۲

شماره پست	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزهٔ سرویسدهی
		اول	دوم	سوم	
۳	۹۰	٦۱	۳۹/٦٥	۲٤/٤	۳، ٤، ۷، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱٦
٤	۱۲۰	۷۰	٤٥/٥	۲۸	۱، ۲، ٥، ٦، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱٤، ۱٥

جدول ۸ نتایج پستهای انتخاب شده در حالت ۲- آزمایش ۲

شماره پست	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقاط بار حوزهٔ سرویسدهی
		اول	دوم	سوم	
۳	۷٥	٤٥/۷	۳۱/۹۳	۲٤/٤	۳، ٤، ۷، ۸، ۱۱، ۱۲، ۱٦
٤	۷٥	٤۸/۸	۳۳/۷۹	۲۸	۱، ۲، ٥، ٦، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱٤، ۱٥

جدول ۹ نتایج واحدهای تولید کننده انتخاب شده در حالت ۲-۲ آزمایش ۲

شماره DG	ظرفیت [MVA]	بارگذاری در سطوح بار [MVA]			نقطهٔ بار تغذیه‌شونده
		اول	دوم	سوم	
۱	۲	۲	۱/٤۷	-	۲
۲	۲	۲	۱/٤۷	-	۳
۳	٤	۳/٥	۲/٤٥	-	٤
٤	۳	۲/۸	۱/۹٥	-	۱
٥	۳	۲/٤٥	۱/۷٦	-	٥
٦	۲	۲	۱/٤۷	-	٦
۷	٤	۳/٥	۲/٤٥	-	۸
۸	۲	۳	۲/۲	-	۹
۹	۳	۲/۸	۱/۹٥	-	۱۲
۱۰	۳	۲/٤٥	۱/۷۱	-	۱۳
۱۱	۳	۳	۲/۲	-	۱٤
۱۲	٤	۳/٥	۲/٤٥	-	۱٥
۱۳	٤	۳/٥	۲/٤٥	-	۱٦

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

جدول ۱۰ اجزای هزینه حاصل از اجرای آزمایشها

	آزمایش ۱		آزمایش ۲	
	حالت ۱-۱	حالت ۱-۲	حالت ۲-۱	حالت ۲-۲
هزینهٔ دسترسی به پستهای فوق‌توزیع [$]	۳۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰	۰	۰
هزینهٔ احداث پستهای فوق‌توزیع [$]	۳۵۰۰۰۰۰	۱۹۰۰۰۰۰	۲٦۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰۰
هزینهٔ احداث واحدهای تولید پراکنده [$]	۰	۱۰۰۸۰۰۰۰	۰	۱۱۲۰۰۰۰۰
هزینهٔ بهره‌برداری از پستهای فوق‌توزیع در دورهٔ مطالعه [$]	٤۱۲/۳٦٥٥×۱۰^٦	۳۳۲/٦۷۸۲×۱۰^٦	٤۰۳/۹۲۷۷×۱۰^٦	۳۳۰/٤۳۲۸×۱۰^٦
هزینهٔ بهره‌برداری از واحدهای تولیدکننده در دورهٔ مطالعه [$]	۰	۵۷/٦۳۵۷×۱۰^٦	۰	۵۸/۹۹۷۲×۱۰^٦
هزینهٔ دسترسی به نقاط بار [$]	۱۵۷۵۰۰	۲۳۱۷۵۰	۲۲۲۷۵۰	۲۷۲۲۵۰
مقدار کل تابع هدف [$]	٤۱٦/۳۲۳۰×۱۰^٦	٤۰۲/٦۷۵۷×۱۰^٦	٤۰٦/۷۵۰٤×۱۰^٦	٤۰۲/۷۰۲۲×۱۰^٦

همانگونه که مشاهده می‌شود در حالت ۲-۱ - که بدون حضور DG پستها جایابی شده‌اند - ظرفیتهای پستهای ۳ و ٤ به‌ترتیب ۹۰ و ۱۲۰ مگاولت آمپر به‌دست آمده است. این در حالی است که با فرض امکان توسعهٔ ظرفیت پستهای موجود تا ۱۲۰ مگاولت‌آمپر، دستیابی به پاسخ عملی امکان‌پذیر شده است. اما در حالت ۲-۲ که با حضور واحدهای تولید پراکنده طراحی انجام شده است، ظرفیت پستهای ۳ و ٤ برابر ۷۵ مگاولت‌آمپر که کمتر از حالت ۲-۱ است. این نتیجه نشان می‌دهد که حضور واحدهای DG در طراحی ظرفیت مورد نیاز سیستم به‌ویژه در مناطق با محدودیت احداث پستهای جدید، می‌تواند کاربرد داشته باشد. همچنین مجموع ظرفیت واحدهای تولیدی در این آزمایش ۳۹ مگاولت‌آمپر و بیشتر از آزمایش ۱ است. علت این پدیده را می‌توان، تغذیهٔ بارها از فواصل دورتر، یا به بیان دیگر، طولانی‌تر بودن فیدرها در حالت ۲-۲ نسبت به حالت ۱-۲ دانست، زیرا با طولانی‌تر شدن فیدرها تلفات در سیستم بالا رفته و حضور واحدهای تولیدی می‌تواند از این افزایش جلوگیری کند.

٦- نتیجه‌گیری

حضور واحدهای تولیدکننده پراکنده، گزینه‌های جدیدی را در طراحی شبکه‌های توزیع فراهم ساخته است. این می‌تواند منافع اقتصادی قابل‌توجهی را برای شرکتهای توزیع در پی داشته باشد. با توجه به تأثیر عوامل مختلف در تعیین ترکیب بهینهٔ پستهای فوق‌توزیع و واحدهای DG در تأمین ظرفیت شبکه‌های توزیع، حل این مسأله با پیچیدگیهای خاصی توأم می‌شود. در این مقاله مسألهٔ مکانیابی توأم پستهای فوق‌توزیع و واحدهای تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع از دیدگاه شرکتهای توزیع در قالب نوعی مدل ریاضی به‌صورت تابع هدف و قیود مرتبط با آن مدلسازی شد. در این مدل، سعی شد تا حد امکان اجزای هزینهٔ ناشی از احداث DG در کنار پستهای فوق‌توزیع به‌عنوان منابع تأمین توان مورد نیاز سیستم، ملحوظ شود. برای حل مدلهای پیشنهادی از روش الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده گردید و مراحل به‌کارگیری آن تشریح شده است. آزمایشهایی برای بررسی کارایی روش پیشنهادی در یک منطقهٔ نمونه انجام شد. مدل پیشنهادی در این مقاله برای برنامه‌ریزی استاتیکی در یک مرحلهٔ زمانی کاربرد دارد؛ البته با توسعهٔ مدل پیشنهادی در قالب روش شبه‌دینامیک به‌سادگی می‌توان برنامهٔ احداث پستها و واحدهای DG را در طی چند دورهٔ زمانی به‌دست آورد.

باید توجه داشت که DGها انواع مختلفی دارند که ازنظر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و نیز هزینه‌های

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

بهره‌برداری با یکدیگر متفاوت هستند. این امر بی‌شک می‌تواند بر پاسخ مسألهٔ موردنظر تأثیرگذار باشد. از سوی دیگر انواع مختلف DGها علاوه بر هزینه ازنظر محدودیتهای بهره‌برداری نیز می‌توانند متفاوت باشند که این می‌تواند بر مسأله انتخاب مکان و ظرفیت آنها در کنار پست‌های فوق‌توزیع تأثیرگذار باشد. مدل ریاضی ارائه شده در این مقاله می‌تواند با تغییر اطلاعات ورودی هزینه‌ها و محدودیتهای مذکور به‌ازای انواع مختلف موردنظر DG، اجرا شده و پاسخهای نهایی با یکدیگر مقایسه شوند. همچنین مدل و روش بهینه‌سازی پیشنهادی در این مقاله می‌تواند با هدف دستیابی به بهترین ترکیب انواع مختلف DG به‌طور همزمان در کنار پستهای فوق‌توزیع توسعه یابد.

علائم و نشانه‌ها

a	عدد مثبت کوچک
α_{ij}	متغیر تصمیم باینری نشان‌دهندهٔ اتصال یا عدم‌اتصال نقط بار jبه پست i
AC_i	هزینهٔ دسترسی به پست فوق‌توزیع i (برحسب $)
AC_{LP}	هزینهٔ دسترسی به نقاط بار
AC_{SS}	هزینهٔ دسترسی به پستهای فوق‌توزیع
$\beta_{ij,d}$	متغیر اعشاری نشان‌دهندهٔ نسبتی از توان نقطه بار jکه به‌وسیله واحد تولیدی i در سطح بار d تغذیه می‌شود.
$C_{DG}(.)$	هزینهٔ احداث واحد تولیدی به‌صورت تابعی از بارگذاری آن (برحسب $)
$C_{SS}(.)$	هزینهٔ احداث یک پست فوق‌توزیع شامل ترانسفورماتور و تجهیزات به‌صورت تابعی از بارگذاری آن (برحسب $)
C_P	ضریب جریمه (ضریب ثابتی که بزرگ در نظر گرفته می‌شود.)
$F(Chr)$	مقدار تابع هدف متناظر با کروموزوم Chr
IC_{DG}	هزینهٔ احداث واحدهای DG
IC_{SS}	هزینهٔ احداث پستهای فوق‌توزیع
$Inf(Chr)$	میزان غیرعملی بودن کروموزوم Chr
$InfR$	نرخ سالیانه تورم
$IntR$	نرخ سالیانه بهره
K_{DG}	هزینهٔ تولید در واحدهای DG شامل هزینهٔ سوخت، تعمیرات و نگهداری واحد (برحسب $/MWh)
K_F	هزینهٔ احداث شبکهٔ فشار متوسط (برحسب $/kM)
K_L	حداکثر میزان قابل بارگذاری پستهای فوق‌توزیع (برحسب درصدی از ظرفیت نامی)
$K_{SS,i,d}$	قیمت خرید برق از سیستم انتقال در پست فوق‌توزیع i و سطح بار d (برحسب $/MWh)
L_{ij}	فاصلهٔ میان پست فوق‌توزیع یا واحد تولیدی i و نقطه بار j(برحسب kM)
M	عدد مثبت بزرگ
ndg	تعداد مکانهای کاندیدای احداث DG
nld	تعداد سطوح بار سیستم
nlp	تعداد نقاط بار سیستم
nss	تعداد مکانهای کاندیدای احداث پست فوق‌توزیع
ny	بازهٔ مفید عمر تجهیزات (برحسب سال)
OC_{SS}	هزینهٔ بهره‌برداری از پستهای فوق‌توزیع
OC_{DG}	هزینهٔ بهره‌برداری از واحدهای تولیدکننده پراکنده
$P_{j,d}$	میزان توان پیش‌بینی شدهٔ نقطه بار jدر سطح بار d (برحسب MVA)
$P_{SS,i}$	پیک بارگذاری پست فوق‌توزیع i (برحسب MVA)
$P_{j,d}^{(DG)}$	میزانی از توان نقطه بار jدر سطح بار d که

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

به‌وسیله واحدهای DG تأمین می‌شود (برحسب MVA)

$P_{j,d}^{(SS)}$ میزانی از توان نقطه بار j در سطح بار d که به‌وسیله پست فوق‌توزیع تأمین می‌شود (برحسب MVA)

Pf_j ضریب قدرت بار در نقطهٔ مصرف j

$P_{DG,i}$ پیک بارگذاری واحد تولیدی i (برحسب MVA)

R مقاومت شبکهٔ فشار متوسط (برحسب Ohm/kM)

$S_{DG,i}$ ظرفیت واحد تولیدی i (برحسب MVA)

$S_{SS,i}$ ظرفیت پست فوق‌توزیع i (برحسب MVA)

$S_{DG,i}^{MAX}$ حداکثر ظرفیت DG قابل احداث در مکان i (برحسب MVA)

$S_{SS,i}^{MAX}$ حداکثر ظرفیت قابل احداث در مکان پست i (برحسب MVA)

T_d مدت زمان تداوم سطح بار d (برحسب ساعت)

V ولتاژ نامی شبکهٔ فشار متوسط (برحسب kV)

ΔV_{MAX} حداکثر افت ولتاژ مجاز در نقاط بار (برحسب kV)

$\Delta V_{j,d}$ میزان افت ولتاژ نقطهٔ بار j در سطح بار d (برحسب kV)

Ω_i مجموع ظرفیتهای قابل احداث در مکان پست i

۷- منابع

[1] S. K. Khator and L. C. Leung. "Power Distribution Planning: A Review of Models and Issues", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, No. 3, 1997, pp. 1151–1159.

[2] H. L. Willis, Power Distribution Planning Reference Book. NewYork: Marcel Dekker, 1997.

[3] G. W. Ault and J. R. Mc Donald, "Planning for Distributed Generation within Distribution Networks in Restructured Electricity Markets", IEEE Power Engineering Review, vol. 20, Feb. 2000, pp. 52–54.

[4] R. Sempertegui, J. Bautista, R. Grino, J. Pereira, "Models and Procedures for Electric Energy Distribution Planning", A Review", 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.

[5] E. Masud, "An Interactive Procedure for Sizing and Timing Distribution Substations Using Optimization Techniques", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No. 93, 1974, pp. 1281–1286.

[6] D. Crowford, S. Holt, "A Mathematical Optimization Technique for Locating and Sizing Distribution Substations and Deriving Their Optimal Service Areas", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No. 94, 1975, pp. 230–235.

[7] G. L. Thampson and D. L. Wall, "A Branch and Bound Model for Choosing Optimal Substation Location", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, No. 5, 1981, pp. 2683–2687.

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

[8] H. K. Temraz, M. M. A. Salama, "A Planning Model for Sitting, Sizing and Timing of Distribution Substations and Defining the Associated Service Area", Electric Power Systems Research, 62, 2002, pp. 145–151.

[9] Dai Hongwei, Yu Yixin, Huang Chunhua, Wang Chengshan, Ge Shaoyun, "Optimal Planning of Distribution Substation Locations and Sizes-Model and Algorithm", IEEE TENCON' 93 BEIJING, 1993, pp. 351–354.

[10] K. Aoki, K. Nara, T. Satoh, M. Kitagawa, K. Yamanaka, "New Approximate Optimization Method for Distribution System Planning", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, No. 1, Feb. 1990, pp. 126–132.

[11] M. R. Haghifam, M. Shahabi, "Optimal Location and Sizing of HV/MV Substations in Uncertainty Load Environment Using Genetic Algorithm", Electric Power Systems Research, 63, 2002, pp. 37–50.

[12] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, "Placement of dispersed generation systems for reduced losses", in Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Systems Sciences, Maui, HI, 2000.

[13] C. Wang, and M. H. Nehrir, "Analytical Approaches for Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, No. 4, Nov. 2004, pp. 2068–2076.

[14] M. A. Kashem, G. Ledwich, "Multiple Distributed Generators for Distribution Feeder Voltage Support", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, No. 3, Sept. 2005, pp. 676 – 684.

[15] G. Celli, E. Ghaiani, S. Mocci, and F. Pilo, "A Multiobjective Evolutionary Algorithm for the Sizing and Sitting of Distributed Generation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 750–757.

[16] W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, and M. M. A. Salama, "An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 1158–1165.

[17] I. J. Ramirez-Rasudo and T. Gonen, "Pseudodynamic Planning for Expansion of Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 6, No.1, 1991, PP. 245–254.

[18] H. L. Willis, Spatial Electric Load Forecasting: Second Edition. NewYork: Marcel Dekker, 2002.

[19] T. Gonen, Electric Power Distribution System Engineering, McGraw-Hill Book, 1986.

[20] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

with Dispersed Generation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, No. 3, pp. 822-827, 2002.

[21] Goldberg, David E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.

[22] H. Lee Willis, H. Tram, M. V. Engel, and L. Finley, "Optimization Applications to Power Distribution", IEEE Computer Applications in Power, vol. 8, No. 4, 1995, pp. 12–17.

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]

[Downloaded from mjee.modares.ac.ir on 2024-04-29]