Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 57-70

Vol. 12/ No. 2/ Summer 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Optimal capacity allocation of solar resources in order to maximize penetration level and improve voltage profile of distribution system

Seyed Ali Hosseini Kordkheili, M.Sc Student, Ali Ghasemi-Marzbali *, Assistant Professor

Department of Electrical and Biomedical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran
ali.ghasemi@ustmb.ac.ir

Abstract:
The problem of determining the optimal capacity and location of distributed generation resources is one of the important topics in the design and operation of power systems. To address this issue, this paper proposes a multi-objective developed model for optimal allocation of solar resources in radial distribution systems based on objective functions such as improving voltage profile, reducing losses, and maximizing penetration level. The optimal values, in other words, the capacity of solar resources to meet the optimal voltage profile and minimize losses under high penetration levels of these resources, have been obtained. Since these objectives are conflicting, a multi-objective developed algorithm called Gray Wolf Optimizer has been proposed to solve them simultaneously. Compared to other multi-objective problem-solving methods, the proposed Gray Wolf Optimizer demonstrates a high capability in solving multi-objective problems and finding Pareto fronts, while avoiding local optima. Additionally, in order to enhance the capabilities of the Gray Wolf Optimizer, a social hierarchy-based modified method has been employed to reduce solution time and improve the allocation matrix. Finally, the proposed method and the intended model have been evaluated on a standard system under various operating conditions. The obtained results show that the proposed method has been able to maintain an acceptable voltage profile and significantly reduce losses compared to other multi-objective algorithms. For low to medium penetration levels, losses tend to decrease until reaching a minimum value, and for penetration levels above 100%, losses increase. Furthermore, at a penetration level of 300%, the efficiency of the system has improved by about 12% in terms of voltage profile using the optimal allocation, indicating the excellent efficiency of the proposed method even at high penetration levels. Additionally, it has been demonstrated that in comparison to other multi-objective optimization methods, the proposed method has performed well in terms of the inverted generational distance parameter.

Keywords: Penetration level, solar system, transmission line losses, voltage profile, optimization.

Submit date: 2022/0910
Accepted date: 2023/04/25

Corresponding author's name: Ali Ghasemi-Marzbali
Corresponding author's address: Department of Electrical and Biomedical Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۷۰-۵۷

Vol. 13 / No. 2/ Summer 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

تخصیص ظرفیت مطلوب منابع خورشیدی به‌منظور دستیابی به حداکثر سطح نفوذ و بهبود پروفایل ولتاژ در سیستم توزیع

نوع مطالعه: پژوهشی

سید علی حسینی کردخیلی، کارشناسی ارشد، علی قاسمی مرزبالی*، استادیار

گروه مهندسی برق و پزشکی- دانشگاه علوم و فنون مازندران- بابل- ایران
*ali.ghasemi@ustmb.ac.ir

چکیده:

مسئله تعیین ظرفیت و موقعیت بهینه منابع تولید پراکنده یکی از موضوعات بااهمیت در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است. برای پوشش دادن به این موضوع، در این مقاله یک مدل توسعه‌یافته چندهدفه برای تخصیص بهینه منابع خورشیدی در سیستم‌های توزیع شعاعی مبتنی بر توابع اهدافی مانند بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات و حداکثرسازی سطح نفوذ پیشنهاد شده است. مقادیر بهینه به عبارتی، ظرفیت منابع خورشیدی جهت برآورده نمودن پروفایل ولتاژ بهینه و تلفات کمینه تحت سطوح نفوذ بالای این منابع به دست آمده است. نظر به اینکه، این توابع در تضاد یکدیگر بوده، برای حل هم‌زمان آن‌ها یک الگوریتم توسعه‌یافته چندهدفه گرگ خاکستری پیشنهاد شده است. نسبت به سایر روش‌های حل مسائل چندهدفه، روش بهینه‌سازی چندهدفه گرگ خاکستری پیشنهادی قابلیت بسیار بالایی در حل مسائل چندهدفه و یافتن جبهه‌های پارتو دارد و از قرار گرفتن در بهینگی‌های محلی جلوگیری می‌نماید. علاوه بر این به‌منظور ارتقای قابلیت‌های روش گرگ خاکستری از روش سلسله مراتبی اجتماعی تصحیح شده برای کاهش زمان حل و بهبود ماتریس تخصیص استفاده شده است. در نهایت، روش پیشنهادی و مدل موردنظر بر روی یک سیستم استاندارد در شرایط کاری مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داده که روش پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌های چندهدفه توانسته پروفیل ولتاژ را در حد قابل قبولی نگه داشته و تلفات را به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. برای سطوح نفوذ کم تا متوسط، تلفات تمایل به کاهش یافتن تا رسیدن به مینیمم مقدار را داشته و برای سطوح نفوذ بالاتر از ۱۰۰ درصد، تلفات افزایش می‌یابد. همچنین در سطح نفوذ ۳۰۰ درصد کارایی سیستم از منظر پروفایل ولتاژ با استفاده از تخصیص بهینه حدود ۱۲ درصد بهبودیافته است که این نشانگر کارایی بسیار مناسب روش پیشنهادی حتی در سطوح نفوذ بالا می‌باشد. علاوه بر این اثبات گردید در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه روش پیشنهادی دارای عملکرد مناسبی از منظر پارامتر فاصله نسل معکوس بوده است.

واژه‌های کلیدی: سطح نفوذ، سیستم خورشیدی، تلفات خطوط انتقال، پروفایل ولتاژ، بهینه‌سازی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۲/۰۲/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول : علی قاسمی مرزبالی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : مازندران، بابل، دانشگاه علوم و فنون مازندران.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

۱- مقدمه

چالش‌های زیست محیطی، کاهش رزروهای سوخت فسیلی و افزایش وابستگی به نواحی ناپایدار از لحاظ سیاسی برای تأمین انرژی فسیلی سبب افزایش اهمیت استفاده کارآمدتر از انرژی فسیلی شده است. دولت های کشورهای توسعه‌یافته اهداف مطلوبی را برای کاهش انتشارات گاز های گلخانه‌ای نظیر CO_2 و مصرف انرژی را انتشار داده‌اند. تولید توان الکتریکی ابتدا توسط تولیدکنندگان غیرمتمرکز و پراکنده صورت می‌گرفته است. متمرکزسازی شبکه‌های برق با هدف بهره‌برداری اقتصادی از تولید و اهداف اقتصادی تأمین کنندگان صورت می‌پذیرد. متمرکزسازی به رفاه اجتماعی نیز مرتبط است، زیرا تولید توان غیرمتمرکز موجب ناحیه‌ی پرسرو صدا و موج بات آزار و اذیت شهروندان می‌شود و بهره‌برداری از تولید نیازمند افرادی متخصص می‌باشد [۱]. چالشی که در ارتباط با شبکه‌های متمرکز وجود دارد به تغییرات آب و هوایی مرتبط می‌شود. متمرکزسازی شبکه فاصله قابل توجهی میان تأمین کننده و مصرف‌کننده ایجاد نموده است. انتقال برق در شبکه در ولتاژهای مختلف به تلفات مقدار زیادی انرژی و نیز انتشارات گازهای گلخانه‌ای منجر می شود. نگرانی دیگر از انتقال گازهای طبیعی پرفشار بر روی خطوط انتقال است که در اثر تلفات انرژی ایجاد می‌شود [۲]. ناکارآمدی شبکه‌های انرژی متمرکز امری است که در دهه‌های اخیر موردنظر محققین قرار گرفته است. امکان تولید انرژی در سمت تقاضا با عنوان تولید پراکنده مزایای بسیاری از جمله افزایش بازده انرژی، کاهش تلفات خطوط انتقال، ارتقای ظرفیت رزرو تولید را دارد. علاوه بر این می توان از انرژی های حرارتی حین تولید برقی در واحدهای تولید همزمان استفاده نمود. زمینه‌های اصلی در نصب ژنراتورهای تولید پراکنده در نزدیکی مصارف شامل کاهش یا حذف وابستگی به خطوط انتقال و توزیع و بهره برداری از انرژی حرارتی برای استفاده در سیستم‌های حرارتی می‌باشد [۳].

توسعه منابع انرژی نو طی سالیان اخیر به طور چشمگیری افزایش یافته است. امروزه در سیستم‌های قدرت، منابع انرژی تجدید پذیر که شامل انرژی‌های برق‌آبی، باد، خورشیدی، هیدروژن، زیست‌توده، جذر و مد و زمین‌گرمایی می‌باشند، محبوبیت بسیاری یافته‌اند. تکنولوژی‌های انرژی نو می‌توانند انرژی پاک و پایدار از منابع تجدیدپذیر تولید کنند. این تکنولوژی‌ها دارای پتانسیل برآورده کردن سهم عظیمی از تقاضای انرژی کشورها، بهبود کیفیت محیط‌زیست و ایجاد یک اقتصاد قوی انرژی را هستند. منابع انرژی ابتدا از طریق ژنراتور الکتریکی به برق تبدیل می‌شوند. انرژی خورشیدی می‌تواند مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل شود. توان خورشیدی بر روی سطح زمین تنها یک کسر از توان خورشیدی خارج جو است که این به دلایل تلفات انعکاس، پراکندگی و جذب است [۴]. بازده خورشیدی از یک مکان به مکان دیگر تغییر می‌کند. سیستم‌های فوتوولتائیک در دهه‌های اخیر به دلیل مزایای متعدد آن‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها انرژی الکتریکی را از طریق انرژی خورشیدی رایگان و تمام نشدنی به دست می‌آورند. فوایدِ اصلی سیستم‌های PV شامل موارد زیر هستند:۱) طبیعت انرژی خورشیدی به‌عنوان یک سوخت،۲) تأثیرات محیطی اندک، ۳) کاهش در قبض برق مشتریان به علت دسترسی رایگان به نور خورشید ۴) طول عمر بالای ۳۰ سال با کمترین حفاظت، ۵) عملکرد خاموش. یکی از مفاهیم مهم در سیستم‌های خورشیدی سطح نفوذ فوتوولتائیک می‌باشد که به‌صورت مقدار توان تزریقی توسط سیستم فوتوولتائیک به فیدر تعریف می‌شود. اخیراً محققین روش‌هایی را برای بررسی اثرات سطح نفوذ های بالای سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه بر روی کیفیت ولتاژ شبکه توزیع ارائه نموده‌اند [۹-۵]. روش های بهینه سازی بسیاری برای تخصیص بهینه سیستم‌های خورشیدی در شبکه توزیع با اهداف مختلف نظیر حداکثرسازی سطح نفوذ ارائه شده است. اهداف مختلف می‌تواند شامل اهداف اقتصادی، تلفات توان، پروفایل ولتاژ و یا مباحث توان راکتیو باشد. در [۱۰] یک استراتژی ترکیبی احتمالاتی برای مدل‌سازی منابع تجدید پذیر و بار جهت تعیین میزان مجاز نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در این مقاله کمینه سازی تلفات اکتیو و راکتیو و تضمین پایداری ولتاژ با لحاظ کردن تغییرات بار و موقعیت‌های مختلف و ضریب توان‌های مختلف منابع تولید پراکنده مورد هدف قرار گرفته است. در [۱۱] روشی برای تعیین حداکثر ظرفیت مجاز منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ استاتیک ارائه شده است. در این مقاله ساختار شبکه توزیع و مدل محاسباتی پخش بار مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۱۲] روشی برای تعیین حداکثر سطح نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با در نظر گرفتن قیود هارمونیک و حفظ طرح‌های هماهنگی حفاظتی ارائه شده است. در [۱۳] روشی برای تعیین حداکثر سطح نفوذ میکروگریدها در سیستم‌های قدرت از منظر پایداری فرکانس ارائه شده است. در [۱۴] روشی مبتنی بر یک راه‌حل پخش بار و یک عملیات ماتریسی ارائه گردیده است که به طور مستقیم حداکثر توانی را تعیین می‌کند که توسط ژنراتورهای پراکنده به هر باس سیستم قابل تزریق می‌باشد. در [۱۵] اثرات افزایش سطح نفوذ منابع تولید پراکنده بر روی ولتاژ در شبکه توزیع مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مقاله چگونگی اثرگذاری سایز هر واحد تولید پراکنده بر روی حداکثر سطح نفوذ مجاز منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با حفظ قیود ولتاژ را مورد بررسی قرار داده است. در [۱۶] حداکثر سطح نفوذ منابع تولید پراکنده در یک شبکه توزیع تعیین شده است و در این مقاله یک روش مبتنی بر آنالیز حساسیت قیود بهره‌برداری ولتاژ و جریان در راستای تعیین حداکثر سطح نفوذ منابع تولید پراکنده ارائه کرده است. در [۱۷] روشی برای طراحی شبکه‌های توزیع فعال با در نظر گرفتن اثرات منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در این مقاله اثر آرایش تولیدات پراکنده بر

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

روی مدیریت شبکه توزیع فعال بررسی شده است. در [۱۸] روشی برای تنظیم ولتاژ بهینه شبکه‌های توزیع با رگلاتورهای ولتاژ آبشاری در حضور منابع فوتوولتائیک با نفوذ بالا ارائه شده است. در این مرجع هدف کاهش قطع خروجی اینورتر خورشیدی نیز بوده است. در [۱۹] روش تنظیم ولتاژ هماهنگ مبتنی بر مدل کنترل پیش‌بین در شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در این مقاله سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده مدنظر قرار گرفته است. در [۲۰] روش کنترل ولتاژ مبتنی بر استفاده بهینه از منابع ذخیره‌گر در حضور منابع خورشیدی با نفوذ بالا ارائه شده است. در [۲۱] تنظیم ولتاژ در شبکه توزیع با استفاده از اینورترهای هوشمند خورشیدی انجام شده است. روش حریصانه نیز برای ارتقای قابلیت توان راکتیو اینورترها استفاده شده است. در [۲۲] روش تنظیم ولتاژ زمان حقیقی شبکه‌های توزیع با تجمیع توان بادی ارائه شده است. در این مرجع یک روش تنظیم ولتاژ زمان حقیقی برای شبکه‌های توزیع ارائه شده است که این استراتژی قادر به تعیین طرح کنترلی شامل توان راکتیو منابع بادی توان ژنراتورها و کنترلرهای ولتاژ سنتی می‌باشد. در [۲۳] یک روش تنظیم ولتاژ هماهنگ مبتنی بر OLTC و اینورتر برای شبکه توزیع با نفوذ بالای منابع فوتوولتائیک ارائه شده است. در این مقاله اشاره شده است که نوسانات ولتاژی ایجاد شده در اثر حضور منابع خورشیدی پایداری سیستم توزیع را به مخاطره می‌اندازد. در [۲۴] تعیین موقعیت و ظرفیت منابع فوتوولتائیک در شبکه‌های جریان مستقیم به‌منظور کاهش انتشارات گازی دیزل ژنراتورها مورد هدف قرار گرفته است. در این مرجع منحنی بارهای متغیر با زمان و تولیدات تجدیدپذیر در حل مسئله مدنظر قرار گرفته است. در [۲۵] روشی برای طراحی بهینه منابع انرژی تولید تجدیدپذیر نظیر خورشیدی و حداکثرسازی نفوذ این منابع در سیستم‌های قدرت ارائه شده است. آرایش بهینه سیستم‌های انرژی در این پژوهش مورد هدف قرار گرفته است. در [۲۶] کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع با وجود سطح نفوذ بالای منابع تولید پراکنده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مرجع تولید خودکار در مدل‌های شبکه فشار ضعیف در نواحی وسیع سرویس‌دهی ارائه شده است. در [۲۷] روش تخمین توان خروجی و ظرفیت سیستم‌های فوتوولتائیک برای تخمین خط پایه پاسخ تقاضا ارائه شده است. این مرجع از روش مجزا سازی بار-تولید فوتوولتائیک برای تعیین دقیق مدل بار و تولید مقطعی خورشیدی استفاده شده است. در [۲۸] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی غیرخطی برای حل مسئله تخصیص بهینه منابع تولید پراکنده نظیر منابع خورشیدی در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در [۲۹] روشی برای تخصیص بهینه احتمالاتی سیستم‌های خورشیدی و بادی ارائه شده است. در این مرجع یک روش بهینه‌سازی تصادفی چندهدفه برای حل مسئله ارتقای کارایی سیستم توزیع استفاده شده است. در این مرجع ارتقای قابلیت اطمینان مبتنی بر اندیس انرژی تأمین نشده و کاهش تلفات مورد هدف قرار گرفته است. در [۳۰] روشی برای تخصیص بهینه منابع عدم قطعی خورشیدی با لحاظ نمودن حضور خودروهای برقی پلاگین در شبکه توزیع ارائه شده است. در [۳۱] الگوریتم جدید بیگ بنگ برای تعیین سایز بهینه سیستم هیبریدی مستقل متشکل از سیستم بادی-خورشیدی و بادی استفاده شده است. بهینه‌سازی این مرجع به طور پیوسته برای برآورده نمودن تقاضا با کمینه نمودن هزینه کنونی سیستم ارائه شده است. در [۳۲] بهینه سازی و تجمیع سیستم‌های انرژی هیبریدی شامل سلول سوختی هیدروژنی ارائه شده است. ارزیابی بحرانی مبتنی بر روش‌های مختلف برای سیستم هیبریدی در این روش ارائه شده است. به‌منظور جمع‌بندی از مقالات منتشرشده در این زمینه، جدول ۱ دسته‌بندی از این مقالات براساس نوآوری و نکات برجسته آن‌ها ارائه می‌دهد.

جدول ۱- مقایسه و بررسی مقالات منتشرشده در زمینه تحقیقاتی موردنظر

مرجع	مزیت و جنبه برجسته
[۱۰]	مدل احتمالاتی منابع تجدیدپذیر کمینه‌سازی تلفات اکتیو و راکتیو پایداری ولتاژ
[۱۱]	پایداری ولتاژ
[۱۲]	قیود هارمونیک و حفظ طرح‌های هماهنگی حفاظت
[۱۳]	حداقل انحرافات فرکانسی
[۱۴]	پایداری ولتاژ
[۱۵]	پایداری ولتاژ
[۱۶]	آنالیز حساسیت
[۱۷]	آرایش تولیدات پراکنده
[۱۸]	کاهش قطع خروجی اینورتر خورشیدی پایداری ولتاژ
[۱۹]	پایداری ولتاژ آنالیز حساسیت
[۲۰]	روش دروپ تطبیقی مبتنی بر سیستم ذخیره‌گر پایداری ولتاژ روش حریصانه
[۲۳]	نفوذ بالای منابع فوتوولتائیک پایداری ولتاژ حضور OLTC و اینورتر
[۲۵]	منابع انرژی تولید تجدیدپذیر آرایش بهینه سیستم‌های انرژی
[۲۹]	تخصیص بهینه احتمالاتی روش بهینه‌سازی تصادفی چندهدفه ارتقای قابلیت اطمینان کمینه‌سازی تلفات اکتیو
[۳۱]	الگوریتم بیگ بنگ منابع انرژی تولید تجدیدپذیر کمینه نمودن هزینه سیستم
[۳۲]	سوختی هیدروژنی

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

در اکثر پژوهش‌های پیشین محققین روش‌هایی برای تخصیص بهینه منابع فوتوولتائیک با اهداف مختلف ارائه کرده‌اند. در روش‌های پیشین کمتر به بحث پیرامون سطح نفوذ منابع تولید پراکنده پرداخته شده است و این موضوع هدف اصلی این پژوهش قرار داده خواهد شد. در اکثر روش‌های پیشین از روش‌های معمول بهینه‌سازی نظیر ژنتیک و ازدحام ذرات برای مسئله تخصیص استفاده شده است. در این راستا نیز این پژوهش به دنبال بهره‌گیری از روش بهینه سازی چندهدفه گرگ خاکستری ترکیبی استفاده خواهد شد که روشی نوین برای از بین بردن مشکلاتی نظیر قرار گرفتن در بهینگی‌های محلی می‌باشد. در این روش از روش سلسله مراتبی اجتماعی تصحیح شده برای بهبود کارایی روش چندهدفه گرگ خاکستری استفاده می‌شود که به ندرت در مقالات استفاده شده است. در اکثریت مسائل تخصیص منابع تولید پراکنده روش حل به‌صورت تک هدفه و یا دو هدفه بوده است که در این راستا نیز در این پژوهش مسئله به صورت چندهدفه حل شده است. الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر ارتقای پروفایل ولتاژ و کاهش تلفات می‌باشد. در حقیقت به مقادیر بهینه ظرفیت منابع خورشیدی جهت برآورده نمودن پروفایل ولتاژ بهینه و تلفات کمینه را تحت سطوح نفوذ بالای این منابع دست خواهد یافت.

در ادامه مقاله در بخش های زیر قابل پیگیری است. در بخش دوم مدل‌سازی مسئله با ریاضیات مورد نیاز ارائه شده است. در بخش سوم الگوریتم چندهدفه پیشنهادی بیان گردیده است. در بخش چهارم نحوه اعمال الگوریتم بر مسئله مورد مطالعه ارائه گردیده است. در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی و آنالیزهای مربوطه در سناریوهای متعددی ارائه گردیده است. در نهایت، بخش ششم به نتیجه‌گیری از مقاله اختصاص یافته است.

۲- فرمول‌بندی مسئله

در این بخش هدف ارائه فرمول‌بندی مسئله تعیین ظرفیت های بهینه سیستم فوتوولتائیک برای تمامی باس‌های متصل در شبکه توزیع است. راه‌حل بهینه‌ی مسئله بهینه سازی چندهدفه موارد ذیل را در نظر خواهد گرفت: سطح نفوذ منابع تولید خورشیدی، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان اکتیو.

۲-۱- آنالیز پخش بار

به طور کلی ماتریس امپدانس برای سیستم با k باس به‌صورت زیر می‌باشد:

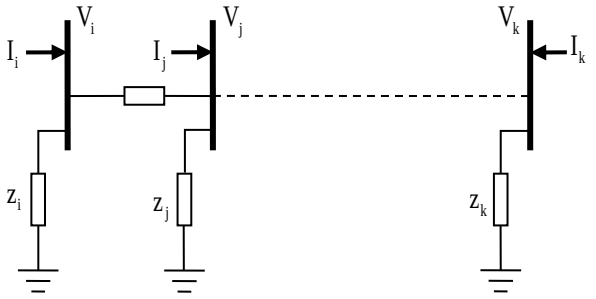
$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_1 & \cdots & -Z_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -Z_{1k} & \cdots & Z_{kk} \end{bmatrix} \quad (۱)$$

تمامی شاخه‌ها با مقادیر امپدانسشان در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. برای امپدانس Zij ارتباط بین دو باس i و j خواهد بود. ولتاژ در هر باس i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

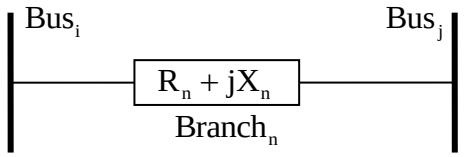
$$V_i = \sum_{i=1}^{k} Z_{ij} I_i \quad (۲)$$

۲-۲- تلفات توان

بخشی از شبکه توزیع در شکل ۲ نمایش داده شده است که در آن دو باس i و j از طریق یک خط به هم متصل شده‌اند و خط n از طریق راکتانس X(n) و مقاومت R(n) نمایش داده شده است.



شکل ۱- شبکه توزیع نمونه برای باس‌های i-k



شکل ۲- بخشی از شبکه توزیع

تلفات توان اکتیو و راکتیو در خط n با Ploss(n) و Qloss(n) نمایش داده می‌شود [۳۳]:

$$P_{loss}(n) = R(n).((P^2 + Q^2)/|V_j|^2) \quad (۳)$$

مجموع تلفات توان اکتیو برای سیستم قدرت شامل k باس را می‌توان از مجموع تلفات تمامی خطوط آن به دست آورد:

$$P_{Total_loss} = \sum_{n=1}^{k} P_{loss}(n) \quad (۴)$$

توان اکتیو برای یک نیروگاه فوتوولتائیک در شبکه توزیع در رابطه ۳-۵ نمایش داده شده است که براساس روابط مرجع [۳۳] و [۳۴] می‌باشد:

$$P_{pv} = \sqrt{\frac{V_i^2}{R_i} P_{pvloss} - (P_i^2 + Q_i^2) + (Q_{pv}^2 - 2P_i P_{pv} - 2Q_i Q_{pv}(\frac{G}{L})} \quad (۵)$$

که در این رابطه P_{PV} بیانگر توان حقیقی تغذیه شده توسط فوتوولتائیک می‌باشد و Q_{PV} توان راکتیو تزریق شده توسط فوتوولتائیک می‌باشد. همچنین G و L به ترتیب فاصله از منبع فوتوولتائیک برحسب کیلومتر و مجموع طول فیدر از منبع به باس i می‌باشد. بنابراین، کاهش تلفات توان برابر است با:

$$P_{NLR} = \frac{R_i}{V_i^2}\left(P_{PV}^2 + Q_{PV}^2 - 2P_i P_{pv} - 2Q_i Q_{pv}\right)(\frac{G}{L}) \quad (۶)$$

علامت مثبت P_{NLR} بیانگر کاهش تلفات سیستم در اثر حضور منابع فوتوولتائیک و علامت منفی آن نشانگر افزایش تلفات می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

۲-۳- بهبود پروفیل ولتاژ

تابع هدف دوم مسئله به دنبال بهبود پروفایل ولتاژ می‌باشد که بدین منظور از اندیس VPI% استفاده خواهیم نمود که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۵]:

$$VPI\% = \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^{k} V_i L_i\right)_{PV} - \left(\sum_{i=1}^{k} V_i L_i\right)_0}{\left(\sum_{i=1}^{k} V_i L_i\right)_0}\right) * 100 \quad (۷)$$

که در این رابطه k تعداد گره‌های (باس‌های) شبکه توزیع و Vi ولتاژ هر گره و Li میزان بار موجود در گره iام می‌باشد. زیرنویس 0 به معنی پیش از پیاده‌سازی فوتوولتائیک و زیرنویس PV به پس از نصب منابع فوتوولتائیک اشاره دارد.

۲-۴- سطح توان فوتوولتائیک

در رابطه زیر تابع هدف سوم که مربوط به سطح نفوذ توان منابع فوتوولتائیک می‌باشد آورده شده است:

$$F_{3,i} = CF * P_{installed}/C_{bus} \quad (۸)$$

در رابطه فوق CF فاکتور ظرفیت، $P_{installed}$ میزان ظرفیت نصب‌شده و C_{bus} ظرفیت باس مربوطه می‌باشد. در حقیقت این میزان نسبت انرژی تزریقی تولید پراکنده به شبکه به میزان ظرفیت فیدر یا باس مربوطه می‌باشد.

۲-۵- قیود مسئله

قید حداکثر ظرفیت مجاز تولید پراکنده در هر باس به شرح زیر می‌باشد:

$$0 \le P_{DGi} \le P_{iDG}^{max} \quad (۹)$$

در این رابطه P^{max}_{iDG} ماکزیمم ظرفیت مجاز در هر باس، PDGi توان تولیدی واحد خورشیدی می‌باشد. قیود پخش بار به شرح زیر می‌باشد:

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j\in Ni} V_j \left[G_{ij}\cos(\theta_{ij}) + B_{ij}\sin(\theta_{ij})\right) = 0 \quad (۱۰)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j\in Ni} V_j [G_{ij}\sin(\theta_{ij}) - B_{ij}\cos(\theta_{ij})) = 0 \quad (۱۱)$$

در روابط فوق P_{Gi} توان اکتیو تولیدی روی باس i، P_{Li} توان اکتیو بار روی باس i، V_i ولتاژ باس i، V_j ولتاژ باس j، θ_{ij} زاویه بین باس i و j، Q_{Gi} توان تولیدی راکتیو روی باس i، Q_{Li} توان راکتیو بار روی باس i می باشند.

۳- الگوریتم چندهدفه گرگ خاکستری

در این بخش مفاهیم و روابط اساسی الگوریتم گرگ خاکستری ارائه شده است، خواننده علاقه‌مند برای جزییات بیشتر به [۳۶] مراجعه کند. گرگ‌های مجموعه ω نیز این سه گرگ را به امید پیدا کردن پاسخ بهینه دنبال می‌کنند:

$$\vec{D} = \left|\vec{C}\,\overrightarrow{X_P}(t) - \vec{X}(t)\right| \quad (۱۲)$$

$$\vec{X}(t+1) = \overrightarrow{X_P}(t) - \vec{A}\vec{D} \quad (۱۳)$$

که t نمایشگر تکرار کنونی است و A و C به ترتیب بردارهای ضرایب بوده و X_p نشانگر بردار موقعیت طعمه و X نشانگر موقعیت بردار گرگ خاکستری است. بردارهای A و C به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a}\,\vec{r_1} - \vec{a} \quad (۱۴)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r_2} \quad (۱۵)$$

که در این روابط a به‌صورت خطی از ۲ تا صفر در تکرارها کاهش می‌یابد و r1 و r2 بردارهای تصادفی در بازه صفر تا یک می‌باشد. در طی بهینه‌سازی به‌منظور شبیه‌سازی شکار و یافتن نواحی مطلوب در فضای جستجو خواهیم داشت [۳۶]:

$$\overrightarrow{D_\alpha} = |\overrightarrow{C_1}\,\overrightarrow{X_\alpha} - \vec{X}| \quad (۱۶)$$

$$\overrightarrow{D_\beta} = \left|\overrightarrow{C_1}\,\overrightarrow{X_\beta} - \vec{X}\right| \quad (۱۷)$$

$$\overrightarrow{D_\delta} = \left|\overrightarrow{C_1}\,\overrightarrow{X_\delta} - \vec{X}\right| \quad (۱۸)$$

$$\overrightarrow{X_1} = \overrightarrow{X_\alpha} - \overrightarrow{A_1}\,\overrightarrow{D_\alpha} \quad (۱۹)$$

$$\overrightarrow{X_2} = \overrightarrow{X_\beta} - \overrightarrow{A_1}\,\overrightarrow{D_\beta} \quad (۲۰)$$

$$\overrightarrow{X_3} = \overrightarrow{X_\delta} - \overrightarrow{A_1}\,\overrightarrow{D_\delta} \quad (۲۱)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_2} + \overrightarrow{X_3}}{3} \quad (۲۲)$$

به‌کارگیری بردار A با مقادیر تصادفی بزرگ‌تر از یک یا کوچک‌تر از منفی یک تضمین می‌کند که عامل جستجو از ناحیه شکار واگرا نشود. دیگر مؤلفه بهینه‌سازی گرگ خاکستری بردار C می‌باشد. بردار C مقادیر تصادفی را در بازه صفر تا منفی ۲ تولید می‌کند که در آن وزن‌های تصادفی برای شکار فراهم شده است تا به‌صورت تصادفی بر روی C>1 تأکید کند و از C<1 جلوگیری نموده تا از اثرات شکار در تعریف فاصله مربوطه جلوگیری نماید.

به‌منظور اجرای بهینه‌سازی چندهدفه توسط بهینه‌سازی گرگ خاکستری، دو مؤلفه جدید علاوه بر مؤلفه‌های خود بهینه‌سازی گرگ خاکستری در نظر گرفته می‌شود. اولین مورد یک آرشیو است که برای مرتب‌سازی جبهه‌های پارتوی غیرغالب استفاده می‌شود. دومین مورد استراتژی انتخاب رهبر است که به یافتن آلفا و بتا و دلتا کمک می‌کند تا در رویه شکار از میان موقعیت‌های آرشیو جستجو آسان‌تر شود. برای تعیین بهترین آرشیو از بهترین راه‌حل‌ها، انتخاب توسط روش چرخ رولت انجام می‌شود که با احتمال زیر برای هر هایپرکیوب صورت می‌گیرد:

$$P_i = \frac{c}{N_i} \quad (۲۳)$$

که در این رابطه c یک مقدار ثابت بزرگ‌تر از یک است و N تعداد به دست آمده‌ی راه‌حل‌های پارتو در بخش i است. به‌منظور ارتقای عملکرد روش بهینه‌سازی چندهدفه گرگ خاکستری از روش سلسله مراتبی اجتماعی بهبودیافته استفاده خواهد شد و روش HMOGWO* را برای حل مسئله تخصیص بهینه استفاده خواهیم نمود. در ادامه پیرامون این روش بحث خواهد شد. رویه رمزگذاری و کد کردن رویه‌ای مهم پیش از اعمال روش HMOGWO است. رویه

* hybrid multi-objective grey wolf optimizer

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

شامل دو بخش $X=[\pi,N]$ می‌باشد که بخش اول به کدگذاری تخصیص بهینه $X(\pi)$ مربوط می‌شود و بخش دوم به ماتریس سطح نفوذ فوتوولتائیک $X(N)$ مربوط می‌شود.

مبتنی بر رویه‌های کدگذاری، هر راه حل توسط بردار جایگشت و ماتریس تخصیص ایجاد می‌شود. برای تضمین کیفیت بالای راه‌حل‌ها، یک‌سوم از جمعیت اولیه متناظر با ماتریس‌های تخصیص متفاوت ایجاد می‌شوند که توسط روش NEH برگرفته از مرجع [۳۷] می‌باشد. افراد دیگر نیز به‌صورت تصادفی براساس رویه کدگذاری ایجاد می‌شوند.

ایده اصلی روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری آن است که رویه جستجو توسط بهترین راه‌حل‌ها یعنی گرگ‌ها هدایت شوند. در هر حال، به واسطه فضای غالب پارتو در روش چندهدفه، نتایج بهینه معمولاً به یک راه حل محدود نمی‌شوند و مجموعه‌ای از راه‌حل‌های غیرغالب با عنوان مجموعه سازشکارانه به دست می‌آید. در راه حل سازشکارانه، بهبود هر تابع هدف ممکن است به بدتر شدن وضعیت تابع هدف دیگر منجر شود. بنابراین هر راه حل به یک رتبه معادل با سطح غیرغالب مرتبط می‌شود. جمعیت را می‌توان به رتبه‌های سطوح مختلف مطابق با رابطه غالب پارتو تقسیم کرد. راه‌حل‌های سطح اول یعنی راه‌حل‌های سازشکارانه یا راه‌حل‌های غیرغالب را می‌توان با مجموعه α نمایش داد و راه‌حل‌های سطوح دوم و سوم را با β و δ نمایش داد. در این روش بهترین مجموعه از میان راه‌حل‌های سه سطح از طریق فرضیات زیر به دست می‌آید. الف) اگر جمعیت کنونی در سطح غیرغالب یا سطح اول است، β، δ و α به‌صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شوند. ب) اگر جمعیت کنونی فقط دو رتبه داشته باشد، α و β به‌صورت تصادفی از رتبه اول و دوم انتخاب شده و δ از راه‌حل‌های رتبه دوم انتخاب می‌شود. ج) اگر جمعیت کنونی بیش از دو رتبه داشته باشد، β، α و δ به ترتیب از رتبه اول، دوم و سوم انتخاب می‌شوند.

برای تضمین امکان‌پذیری راه‌حل‌های به دست آمده، در این پژوهش از اپراتور جستجوی تصحیح شده متشکل از دو بخش استفاده می‌شود. بخش اول مربوط به جایگشت می‌شود که به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$X(\pi)_i^{t+1}=\begin{cases} Shift(X(\pi)_i^t C.(X(\pi)_\alpha^t - X(\pi)_i^t) \ \ if\ rand<\frac{1}{3} \\ Shift(X(\pi)_i^t C.(X(\pi)_\beta^t - X(\pi)_i^t) \ else\ if\ rand<\frac{2}{3} \\ Shift(X(\pi)_i^t C.(X(\pi)_\delta^t - X(\pi)_i^t) \ \ \text{سایر} \end{cases} \quad (۲۴)$$

در رابطه فوق shift(x,d) تابعی است که در آن عنصر x می‌تواند به راست یا چپ به میزان d واحد شیفت کند و این شیفت در باندهای تعریف شده می‌باشد. شایان ذکر است که C بردار کنترل می‌باشد و در این پژوهش برابر با یک قرار داده شده است. برای بخش دوم روش تصحیح شده، ماتریس تخصیص به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

(۲۵)

$$X(\pi)_{i,j}^{t+1}=\begin{cases} X(N)_{i,j}^t \in \{(X(N)_{\alpha ij}^t, X(N)_{\beta ij}^t, X(N)_{\gamma ij}^t) \ \ if\ rand<a \\ X(N)_{i,j}^t \in X(N)^t \ \ \text{سایر} \end{cases}$$

که در این رابطه $X(N)^{t+1}$ از دو اصل ایجاد می‌شود که شامل راه‌حل‌های پیشین مناسب و انتخاب تصادفی می‌باشد. در قاعده اول، عنصر آزمایش از دو عنصر ماتریس تخصیص با احتمال a انتخاب می‌شوند که a= 1-t/Tmax می‌باشد که t تکرار کنونی و Tmax ماکزیمم تکرار هستند. در انتخاب تصادفی نیز X هر مقدار تصادفی می‌تواند باشد.

از دو اپراتور نیز برای ارتقای روش گرگ خاکستری استفاده می‌شود. فاکتور اول می‌تواند نواحی غیرقابل مشاهده از فضای حل را با احتمال Pc به دست آورد. برای بخش اول یعنی (π) فاکتور نگاشت جزئی استفاده می‌شود تا بخش نگاشت به‌روزرسانی شود. برای بخش دوم روش دونقطه برای به‌روزرسانی ماتریس تخصیص استفاده می‌شود. این دو روش برگرفته از مراجع [۳۸] و [۳۹] می‌باشند. اپراتور دیگری نیز برای خارج شدن از فضای بهینگی محلی می‌باشد و بدین منظور از روش عناصر تغییر تصادفی برگرفته از مرجع [۴۰] استفاده می‌شود.

یکی از معیارهای موردنظر برای بررسی عملکرد روش بهینه‌سازی چندهدفه گرگ خاکستری معیار فاصله نسل معکوس (IGD†) برای بررسی عملکرد همگرایی روش می‌باشد. علاوه بر این معیارهای فاصله (SP‡) و ماکزیمم گسترش (MS§) نیز برای ارزیابی همگرایی استفاده می‌شوند. فرمول‌بندی ریاضی IGD شبیه به فاصله نسل می‌باشد. این معیار تصحیح شده به‌صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$IGD=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad (۲۶)$$

که در این رابطه n تعداد راه حل بهینه پارتو و d_i بیانگر فاصله اقلیدسی بین راه حل بهینه صحیح iام و نزدیک‌ترین راه‌حل‌های بهینه به دست آمده در مجموعه مرجع می‌باشد. فاصله اقلیدسی بین راه‌حل‌های به دست آمده و مجموعه مرجع متفاوت می‌باشد. در IGD فاصله اقلیدسی برای هر راه حل صحیح با توجه به نزدیک‌ترین راه‌حل‌های به دست آمده در فضای هدف محاسبه می‌شود.

فرمول‌بندی معیارهای SP و MS به‌صورت زیر می‌باشند:

$$SP=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^n(\bar{d}-d_i)^2} \quad (۲۷)$$

که در این رابطه $\bar{d}$ متوسط تمامی diها می‌باشد و n مجموعه راه‌حل‌های به دست آمده پارتو می‌باشد و di به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i=Min\left(\left|f_1^i(\vec{x})-f_1^j(\vec{x})\right|\right)+\left(\left|f_2^i(\vec{x})-f_2^j(\vec{x})\right|\right)+\cdots \quad (۲۸)$$

همچنین MS به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$MS=\sqrt{\sum_{i=1}^o(d(a_i.b_i))} \quad (۲۹)$$

† Inverted Generational Distance
‡ Spacing
§ Maximum Spread

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

که در این رابطه d تابعی برای محاسبه فاصله اقلید سی و ai ماکزیمم مقدار تابع هدف در هدف i و bi مینیمم مقدار تابع هدف و o تعداد اهداف می‌باشد.

۴- رویه حل مسئله تخصیص منابع فوتوولتائیک

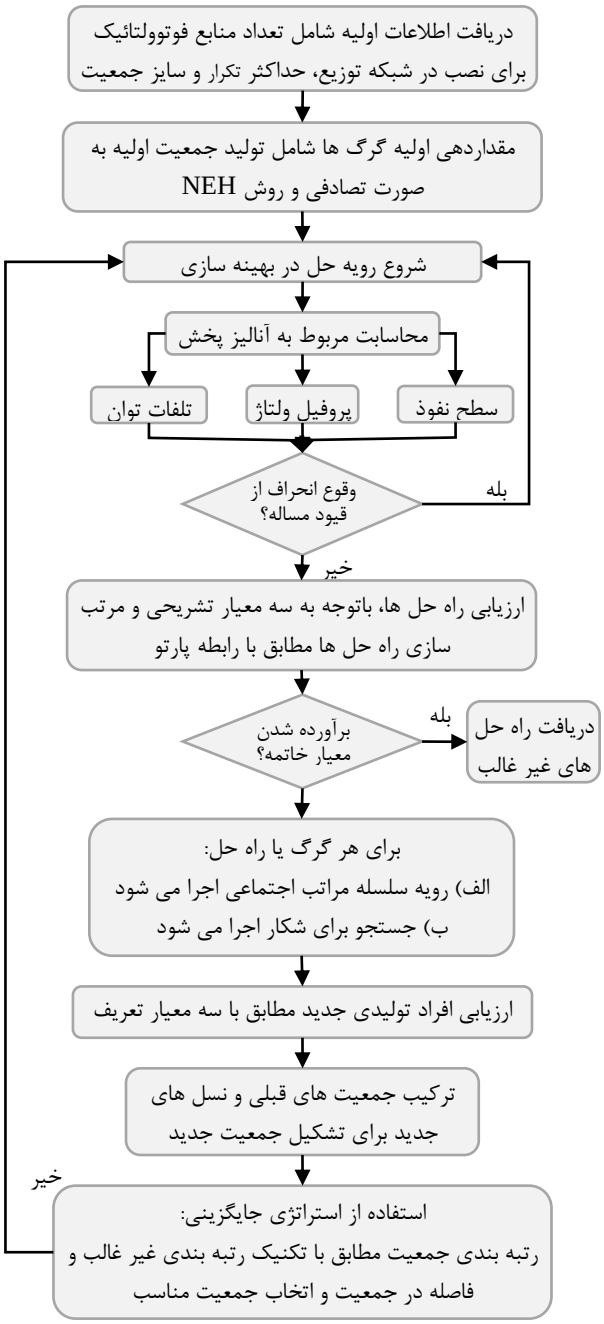
فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۳ نمایش داده شده است. رویه بهینه‌سازی گرگ خاکستری چندهدفه برای حل مسئله تخصیص بهینه منابع فوتوولتائیک به این گونه است که ظرفیت و موقعیت بهینه منابع فوتوولتائیک با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفایل ولتاژ انتخاب می‌شوند. روش پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد. ابتدا جمعیت مطابق با روش بهینه‌سازی گرگ خاکستری و موارد ذکر شده در بخش قبل مقداردهی اولیه می‌شود که شامل تعداد منابع فوتوولتائیک برای نصب در شبکه توزیع، حداکثر تکرار و سایز جمعیت می‌باشد.

پس از آن متغیرهای طراحی تعریف می‌شود. هر منبع فوتوولتائیک نیاز به ظرفیت بهینه‌اش دارد. تعداد متغیر بهینه‌سازی به شرح زیر می‌باشد:

$$V_{ar} = 2N_{pv} \quad (۳۰)$$

اولین باس شبکه توزیع به‌عنوان باس اسلک انتخاب می شود که این باس نمی‌تواند برای انتخاب موقعیت منبع فوتوولتائیک استفاده شود. قیود پایین V_{ar} که دومین باس و ظرفیت مینیمم می‌باشند به صورت $L_{lim}(f)$ نمایش داده می‌شود یعنی اگر باس هایی در شبکه توزیع به صورت 2,3,4….n و Npv=2 باشد آنگاه Llim(f)=[bus2,bus2;Cmin;cmin] خواهد بود و باس دوم اولین باس و Cmin مینیمم ظرفیت وابسته به سطح نفوذ فوتوولتائیک خواهد بود.

قیود بالای متغیرهای طراحی شامل آخرین باس و حداکثر ظرفیت خواهند بود. یعنی اگر باس‌هایی در شبکه توزیع به‌صورت 2,3,4….n و Npv=2 باشد آنگاه Ulim(f)=[busn,busn;Cmax;cmax] خواهد بود و باس آخر آخرین باس مدنظر و Cmax حداکثر ظرفیت مبتنی بر سطح نفوذ فوتوولتائیک خواهد بود. پس از این مرحله یک ماتریس جمعیت متشکل از ظرفیت و موقعیت تشکیل می شود که S و C به‌عنوان موقعیت و ظرفیت نیروگاه خورشیدی متغیرهای آن می‌باشند. پس از این مرحله اطلاعات سیستم توزیع پیاده سازی می شود و با اجرای پخش بار تلفات و سایر مقادیر مشخص می شود. رویه بهینه‌سازی گرگ خاکستری چندهدفه مبتنی بر سه هدف معرفی شده یعنی کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ و سطح نفوذ اجرا می شود. همچنین در هنگام اجرای شبیه سازی می‌بایست سطح نفوذ فوتوولتائیک مورد ارزیابی قرار گیرد و به‌عنوان یک قید مدنظر قرار گیرد تا سطح نفوذ مناسب به دست بیاید.



شکل ۳- فلوچارت روش پیشنهادی

۵- نتیجه و آنالیز شبیه‌سازی

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی از برنامه متلب استفاده خواهد شد که در این برنامه از پیاده سازی روش تشریحی مبتنی بر روابط تشریحی برای تخصیص منابع فوتوولتائیک، استفاده گردیده است. در حقیقت در این بخش هدف آن است که روش پیشنهادی تخصیص منابع فوتوولتائیک را بر روی یکی از شبکه‌های آزمون پیاده‌سازی کرده و نتایج ارزیابی شود.

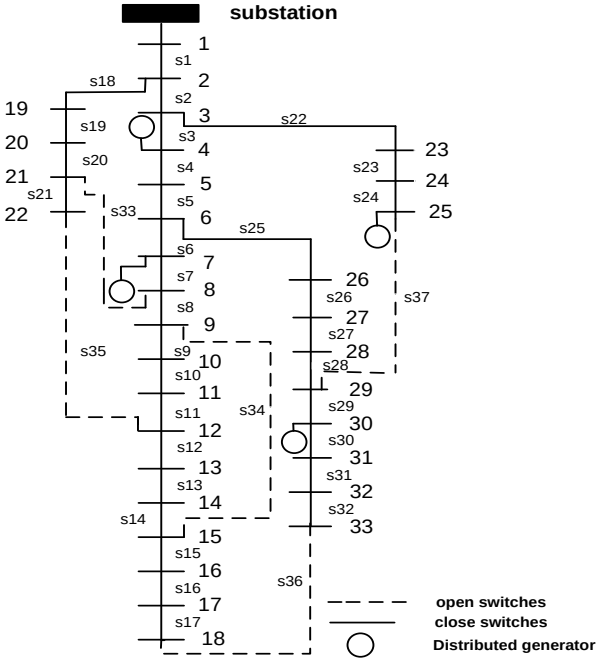
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

۵-۱- سیستم مورد مطالعه

به‌منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادیِ از شبکه توز یع ۳۳ با سه استاندارد استفاده می‌شود. در شکل ۴ د یاگرام تک‌خطی شبکه ۳۳ باسه توزیع ن شان داده شده ا ست [۴۱]. سی ستم فوق دارای ۳۷۱۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار تقاضا می‌باشد. در جدول ۲ اطلا عات شبکه تحت بررسی برای تخصیص بهینه آورده شده است.

جدول ۲- اطلاعات شبکه ۳۳ باسه توزیع.

شماره خط	باس ارسال	باس دریافت	مقاومت (اهم)	راکتانس (اهم)	توان اکتیو بار (kW)	توان راکتیو بار (kVar)
۱	۱	۲	۰/۰۹۲۲	۰/۰۴۷۷	۱۰۰	۶۰
۲	۲	۳	۰/۴۹۳	۰/۲۵۱۱	۹۰	۴۰
۳	۳	۴	۰/۳۶۶۰	۰/۱۸۶۴	۱۲۰	۸۰
۴	۴	۵	۰/۳۸۱۱	۰/۱۹۴۱	۶۰	۳۰
۵	۵	۶	۰/۸۱۹۰	۰/۷۰۷۰	۶۰	۲۰
۶	۶	۷	۰/۱۸۷۲	۰/۶۱۸۸	۲۰۰	۱۰۰
۷	۷	۸	۱/۷۱۱۴	۰/۶۱۸۸	۲۰۰	۱۰۰
۸	۸	۹	۱/۰۳۰	۰/۷۴	۶۰	۲۰
۹	۹	۱۰	۱/۰۴	۰/۷۴	۶۰	۲۰
۱۰	۱۰	۱۱	۰/۱۹۶۶	۰/۰۶۵۰	۴۵	۳۰
۱۱	۱۱	۱۲	۰/۳۷۴۴	۰/۱۲۳۸	۶۰	۳۵
۱۲	۱۲	۱۳	۱/۴۶۸۰	۱/۱۵۵	۶۰	۳۵
۱۳	۱۳	۱۴	۱/۵۴۱۶	۰/۷۱۲۹	۱۲۰	۸۰
۱۴	۱۴	۱۵	۰/۵۹۱۰	۰/۵۲۶۰	۶۰	۱۰
۱۵	۱۵	۱۶	۰/۷۴۶۳	۰/۵۴۵۰	۶۰	۲۰
۱۶	۱۶	۱۷	۱.۲۸۹	۱.۷۲۱۰	۶۰	۲۰
۱۷	۱۷	۱۸	۰/۷۳۲	۰/۵۷۴	۹۰	۴۰
۱۸	۲	۱۹	۰/۱۶۴۰	۰/۱۵۶۵	۹۰	۴۰
۱۹	۱۹	۲۰	۱/۵۰۴	۱/۳۵۵۴	۹۰	۴۰
۲۰	۲۰	۲۱	۰/۴۰۹۵	۰/۴۷۸۴	۹۰	۴۰
۲۱	۲۱	۲۲	۰/۷۰۸۹	۰/۹۳۷۳	۹۰	۴۰
۲۲	۳	۲۳	۰/۴۵۱۲	۰/۳۰۸۳	۹۰	۵۰
۲۳	۲۳	۲۴	۰/۸۹۸۰	۰/۷۰۹۱	۴۲۰	۲۰۰
۲۴	۲۴	۲۵	۰/۸۹۷	۰/۷۰۱۱	۴۲۰	۲۰۰
۲۵	۶	۲۶	۰/۲۰۳۰	۰/۱۰۳۴	۶۰	۲۵
۲۶	۲۶	۲۷	۰/۲۸۴۲	۰/۱۴۴۷	۶۰	۲۵
۲۷	۲۷	۲۸	۱/۰۵۹	۰/۹۳۳۷	۶۰	۲۵
۲۸	۲۸	۲۹	۰/۸۰۴۲	۰/۷۰۰۶	۱۲۰	۷۰
۲۹	۲۹	۳۰	۰/۵۰۷۵	۰/۲۵۸۴	۲۰۰	۶۰۰
۳۰	۳۰	۳۱	۰/۹۷۴۴	۰/۹۶۳۰	۱۵۰	۷۰
۳۱	۳۱	۳۲	۰/۳۱۵۰	۰/۳۶۱۹	۲۱۰	۱۰۰
۳۲	۳۲	۳۳	۰/۳۴۱۰	۰/۵۳۰۲	۶۰	۴۰



شکل ۴- دیاگرام تک‌خطی شبکه ۳۳ باسه

۵-۲- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به تحلیل ن تایج پیاده سازی روش پی شنهادی تخ صیص منابع فوتوولتائیک خواهیم پرداخت. تعریف‌های ب سیاری برای سطح نفوذ منابع فوتوولتائیک ارائه شده است [۴۲]. در ا ین تحق یق، سطح نفوذ فوتوولتائ یک به صورت ن سبت ماکزیمم توان فوتوولتائ یک به ماکزیمم توان ظاهری بار تعریف می‌شود [۴۳]. ن فوذ به صورت در صد مج موع ظرف یت سی ستم فوتوولتائ یک درن ظر گرف ته شده ا ست. به‌کارگیری فوتوولتائ یک در سناریوها شامل بهره برداری در سطح نفوذهای ۱۰۰ و ۳۰۰ درصدی از هر پیک‌بار سالیانه می‌باشد [۴۴].

در این قسمت روش پی شنهادی برای د ستیابی به تخ صیص بهی نه سیستم فوتوولتائیک بر روی شبکه آزمون ۳۳ باس پیاده‌سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به دنبال تائ ید کارایی روش پی شنهادی در کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ می‌باشد. ظرفیت هر سی ستم فوتوولتائ یک ۲/۰۰۵ تا ۳/۱۰۷ مگاوات در موارد مختلف می‌با شد. موقعیت های به دست آمده و ظرفیت‌ها در جدول ۳ ن مایش داده شده ا ست. ن تایج حاکی از عملکرد مناسب روش پیشنهادی گرگ خاکستری بوده ا ست. همچنان که در این جدول مشاهده می‌شود. در سطر اول هنگامی که ۲ عدد فوتوولتائیک مدنظر می‌باشد، باس‌های متصل شامل باس های ۶ و ۱۸ با ظرفیت‌های ۱/۹۳ و ۰/۵۶ می‌باشد و متوسط ولتاژ در این حا لت ۰/۹۷۸ پریونیت بوده و تلفات نیز برحسب م گاوات به م یزان ۰/۰۸۶ می‌باشد. برای حالت سه منب ع فوتوولتائ یک باس های ۱۴، ۲۴ و ۳۰ انتخاب شده و مقادیر ظرفیت آن‌ها به ترت یب برا بر با ۰/۷۵، ۱/۰۹ و ۱/۰۹ بوده و متوسط ولتاژ در این حالت ۰/۹۷۲ پریونیت بوده و تل فات نیز برحسب مگاوات به میزان ۰.۰۷۲ می‌باشد. برای حالت چهار منب ع

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

فوتوولتائیک باس‌های ۶، ۱۸ و ۲۸ و ۱۶ انتخاب شده و مقادیر ظرفیت آن‌ها به ترتیب برابر با ۱/۵۴، ۰/۴۴ و ۰/۳۸ و ۰.۲۹ بوده و متوسط ولتاژ در این حالت ۰.۹۷۷ پریونیت بوده و تلفات نیز برحسب مگاوات به میزان ۰.۰۷۵ می‌باشد. برای حالت پنج منبع فوتوولتائیک باس های ۶ و ۱۸ و ۲۸ و ۱۶ و ۳۱ انتخاب شده و مقادیر ظرفیت آن‌ها به ترتیب برابر با ۱/۴۳، ۰/۳۷ و ۰/۳۴ و ۰/۲۸ و ۰/۳۱ بوده و متوسط ولتاژ در این حالت ۰.۹۷۸ پریونیت بوده و تلفات نیز برحسب مگاوات به میزان ۰/۰۷۵ می‌باشد.

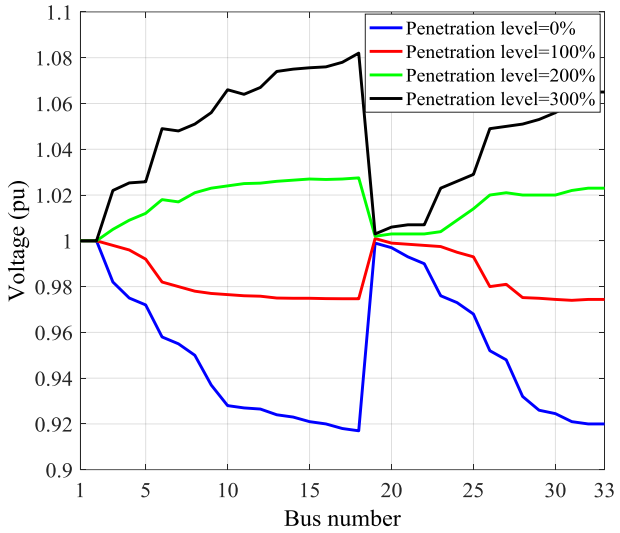
جدول ۳- عملکرد روش پیشنهادی برای حضور سیستم‌های فوتوولتائیک

تعداد PV	باس‌های متصل	ظرفیت سیستم فوتوولتائیک (MW)	متوسط ولتاژ (pu)	تلفات (MW)
۲	6,18	1.93;0.56	0.978	0.086
۳	14,24,30	0.75;1.09;1.09	0.972	0.072
۴	6,18,28,16	1.54;0.44;0.38;0.29	0.977	0.075
۵	6,18,28,16,31	1.43;0.37;0.34;0.28;0.31	0.978	0.075

با استفاده از مجموعه مت پاور، یک آنالیز در شبکه توزیع ۳۳ باس بدون حضور منابع فوتوولتائیک انجام شده است. پس از آن سیستم‌های فوتوولتائیک به سیستم اضافه می‌شوند و آنالیز اثرات سطوح نفوذ منابع فوتوولتائیک تا ۳۰۰ درصد انجام شده است. در این آنالیز، ظرفیت سیستم فوتوولتائیک برای هر باس با توان ظاهری بار تعیین شده است. برای مثال، اگر توان اکتیو در باس ۲ برابر با ۰/۱ مگاوات باشد و نفوذ فوتوولتائیک ۳۰۰ درصد باشد، در این صورت ظرفیت سیستم فوتوولتائیک ۰/۳ مگاوات می شود. موقعیت و ظرفیت سیستم فوتوولتائیک در جدول ۳ آورده شده است. مجموع توان متصل شده سیستم‌های فوتوولتائیک در شبکه برابر با ۱۱/۲ مگاوات می‌باشد.

۳-۵- بررسی اثر سطح نفوذ بر روی پروفایل ولتاژ

در این قسمت اثرات نفوذ بالا را بر روی پروفایل ولتاژ بررسی خواهیم نمود. با نصب منبع تولید پراکنده در سیستم قدرت، افزایش ولتاژ در سیستم توزیع در اثر تغییرات پخش بار در شبکه رخ می‌دهد [۴۵]. زمانی که خروجی توان فوتوولتائیک در اثر افزایش ناگهانی تابش خورشید، به طور چشمگیری افزایش می‌یابد، اضافه ولتاژ در فیدرهای توزیع اتفاق می‌افتد. افزایش ولتاژ ممکن است به تجهیزات صدماتی وارد کند و تجهیزات را دچار عملکرد اشتباه کند. برای شبکه‌های توزیع با نفوذ بالای سیستم فوتوولتائیک، اضافه ولتاژ معمول بوده و می‌بایست در تحلیل‌های برای تضمین بهره‌برداری مطمئن و ایمن سیستم مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این می‌بایست بهره‌برداری با ظرفیت کامل از تولید فوتوولتائیک مورد ارزیابی قرار گیرد. مسائل اضافه ولتاژ می‌بایست به‌عنوان محدودیت‌هایی برای تخمین ماکزیمم سطح نفوذ استفاده شود. نیروگاه‌های خورشیدی فقط توان اکتیو به شبکه تزریق می‌کنند که ممکن است پخش توان راکتیو را در سیستم تغییر دهد. در هر حال، ولتاژهای باس‌های نزدیک به واسطه کم بود توان راکتیو افزایش می‌یابد. به طور معمول ولتاژ بهره‌برداری نرمال در محدوده ۰/۰۵ تا ۱/۰۵ پریونیت می‌باشد. شکل ۵ اثرات سطوح نفوذ بالای فوتوولتائیک بر روی پروفایل ولتاژ سیستم ۳۳ باس را نمایش می‌دهد. پروفایل ولتاژ در رنج قابل قبول در باس‌های ۱ تا ۷ و باس‌های ۱۹ تا ۲۷ می‌باشد. در باس‌های ضعیف سیستم آزمون یعنی باس های ۸ تا ۱۸ و ۲۸ تا ۳۳ ولتاژها در رنج‌های قابل قبول نیست. ماکزیمم ولتاژ در باس ۱۸ برای نفوذ ۳۰۰ در صد برابر با ۱/۰۸۲ پریونیت می‌باشد که ضعیف‌ترین باس در شبکه مورد بررسی است. همچنان که در این شکل مشاهده می‌شود سطح نفوذ ۲۰۰ در صد و ۱۰۰ در صد مناسب‌ترین مقادیر نسبت به سایر مقادیر از منظر پروفایل ولتاژی می‌باشند. در حقیقت در حالت سیصد درصدی افزایش ولتاژ بسیار بالا بوده و وضعیت نامناسبی را ایجاد می‌کند که می‌بایست قطع تولید انجام شود تا شرایط به حالت مناسب برگردد. همچنین در حالت صفر درصد نفوذ نیز افت ولتاژ بالا می‌باشد.



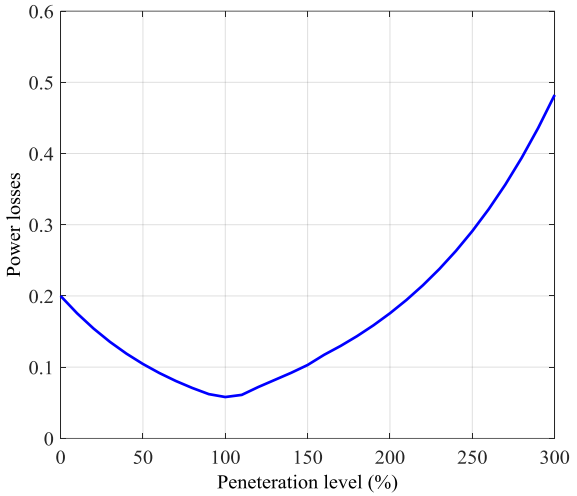
شکل ۵- تأثیر سطح نفوذ منابع فوتوولتائیک بر روی پروفایل ولتاژ

۴-۵- بررسی اثر سطح نفوذ بر روی تلفات

به طور کلی، در صورتی که ظرفیت نصب‌شده نزدیک‌تر به بار باشد، سیستم‌های تولید پراکنده مجموع تلفات را کاهش می‌دهند. مطالعات نشان می‌دهد که تلفات با افزایش سطح نفوذ افزایش می‌یابد [۴۵]. شکل ۶ اثرات سطح نفوذ بر روی تلفات در شبکه ۳۳ باس را نمایش می‌دهد. شکل نمایش می‌دهد که تلفات در مقدار مینیمم است اگر تولید نزدیک‌تر به بار باشد. برای سطوح نفوذ کم تا متوسط، تلفات تمایل به کاهش یافتن تا رسیدن به مینیمم مقدار را دارد. برای سطوح نفوذ بالاتر از ۱۰۰ درصد، تلفات افزایش می‌یابد. افزایش سطح نفوذ تا ۳۰۰ درصد منجر به افزایش تلفات از ۰/۲ به ۰/۴۸ مگاوات می شود. همچنان که مشاهده می شود بهترین وضعیت در سطح نفوذ ۱۰۰ درصدی رخ داده است و شرایط شبکه از ۱۰۰ درصد به بعد با افزایش تلفات روبرو می‌شود که نیاز به اصلاح خروجی فوتوولتائیک می‌باشد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

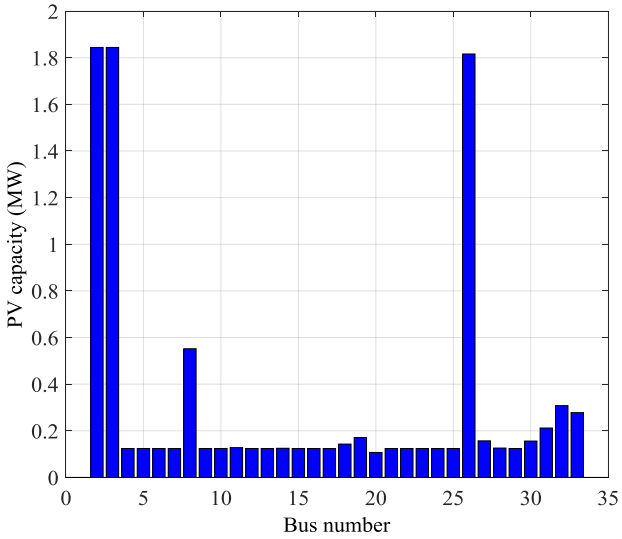
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]



شکل ۶- تلفات توان در سطوح نفوذ مختلف

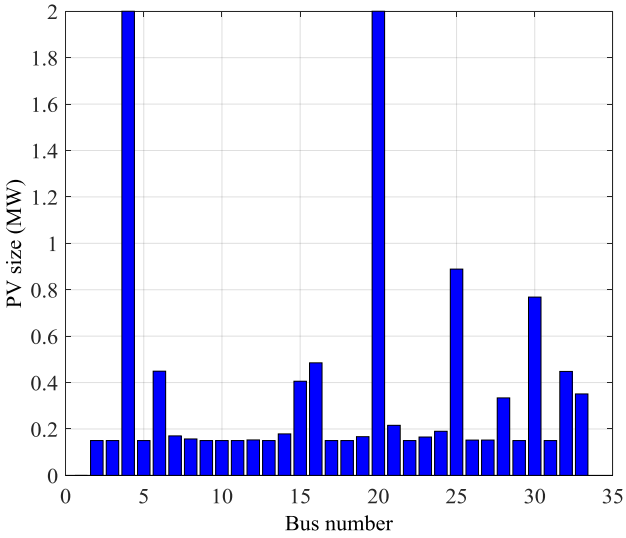
۵-۵- موقعیت و ظرفیت بهینه برای سطوح نفوذ بالای فوتوولتائیک

در بخش قبل ظرفیت منابع با توجه به توان ظاهری بار در هر باس تعیین شد که در نهایت نشان داده شد که حضور منابع منجر به افزایش ولتاژ می شود. مشکل افزایش ولتاژ به تعداد زیاد منابع فوتوولتائیک و حضور آن‌ها باز می‌گردد که نیاز به یافتن ظرفیت بهینه برای هر باس می‌باشد. بنابراین آنالیز نیاز به ۶۴ متغیر برای موقعیت و ظرفیت سیستم‌های فوتوولتائیک دارد. الگوریتم گرگ خاکستری برای یافتن موقعیت و ظرفیت بهینه به کار می‌رود. شکل ۷ نتایج را تحت سطوح نفوذ مختلف نمایش می‌دهد. راه‌حل بهینه می‌بایست اهداف بیان شده را برآورده سازد که شامل بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات می‌باشد. در حقیقت در این بخش کلیه باس ها فرض شده که فوتوولتائیک در آن‌ها نصب می‌شوند و براساس آن و برای موقعیت و ظرفیت ۶۴ متغیر تعریف شده است. می‌بایست سطح نفوذ ۳۰۰ درصد در نظر گرفته شود که براساس آن ۱۱/۱۴۵ مگاوات مجموع توان می‌شود. همچنین بهبود پروفیل ولتاژ که می‌بایست ولتاژ کوچک‌تر از ۱/۰۵ پریونیت شود مدنظر قرار گیرد. علاوه بر این کمینه‌سازی تلفات اکتیو در روابط بهینه‌سازی چندهدفه گرگ خاکستری هدف گذاری شود. نتایج به دست آمده در شکل حاکی از آن است که بالاترین ظرفیت در باس‌های شروع شبکه یعنی باس ۲ و ۳ با ظرفیت ۱/۸۴ مگاوات می‌باشد. در مورد سطوح نفوذ پایین برای نصب ظرفیت سیستم فوتوولتائیک برای بهبود پروفیل ولتاژ باس های انتهایی انتخاب می‌شوند. با توجه به نتایج استنباط می‌شود که نرخ سطح نفوذ بالا به اضافه ولتاژ در شبکه منجر می شود و برای حفظ پروفایل ولتاژ می‌بایست ظرفیت سیستم فوتوولتائیک در باس های ابتدایی شبکه نصب شود. ماکزیمم و مینیمم ظرفیت‌ها شامل ۱/۸۴ و ۰/۱۳ مگاوات می‌باشد.



شکل ۷- خروجی بهینه‌سازی برای تخصیص بهینه تحت سطح نفوذ ۳۰۰ درصد

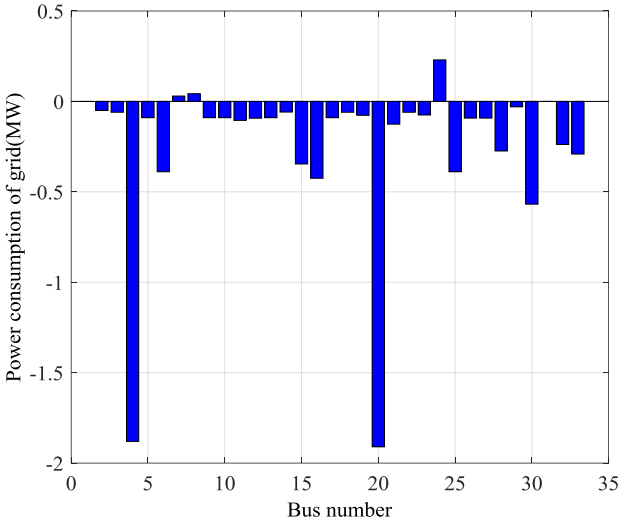
تعیین مقدار مطلوب سطح نفوذ امر پیچیده است و نیاز به تنظیم دقیق Cmin و Cmax دارد. با توجه به نتایج و پس از شبیه‌سازی‌ها انتخاب مقدار Cmax=2 امری مطلوب برای دستیابی به اهداف مختلف و سطح نفوذ بالاتر می‌باشد. در شکل ۸ نیز نتایج آنالیز شبکه تحت بهینه‌سازی Cmax=2 و Cmin=0.15 آورده شده است. در این شکل ظرفیت فوتوولتائیک در باس‌های مختلف به‌صورت شماتیک آورده شده است. همچنین در شکل ۹ نیز مصرف توان از شبکه برحسب مگاوات برای باس‌های مختلف نمایش داده شده است و در نهایت ولتاژ برحسب پریونیت در باس‌های مختلف در شکل ۱۰ برای این حالت نمایش داده شده است.



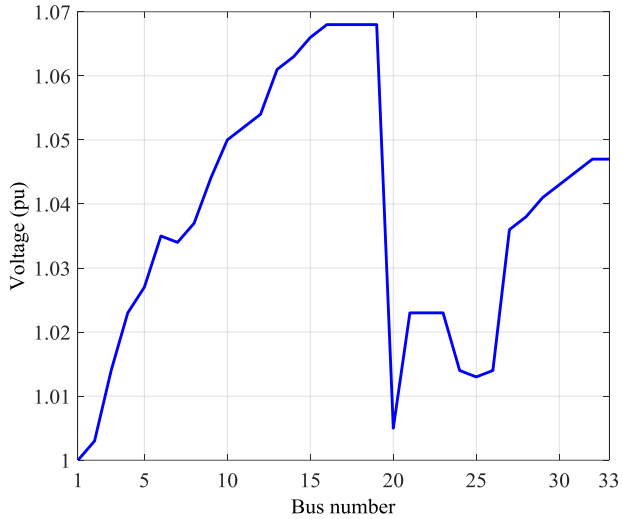
شکل ۸- ظرفیت فوتوولتائیک برای حالت آنالیز شبکه تحت بهینه‌سازی Cmax=2 و Cmin=0.15

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

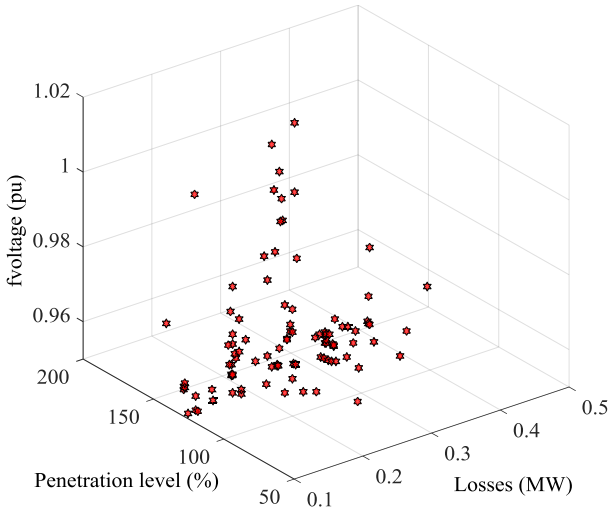


شکل ۹- مصرف توان شبکه برای حالت آنالیز شبکه تحت بهینه‌سازی Cmax=2 و Cmin=0.15



شکل ۱۰- ولتاژ برحسب پریونیت برای حالت آنالیز شبکه تحت بهینه‌سازی Cmax=2 و Cmin=0.15

در این بخش به بحث پیرامون حل سه هدفه مسئله شامل سطح نفوذ، پروفایل ولتاژ و تلفات می‌پردازیم. در شکل ۱۱ جبهه‌های پارتو حل مسئله سه‌هدفه از خروجی روش بهینه سازی تصحیح شده گرگ خاکستری نمایش داده شده است. شایان ذکر است در این شکل مقدار میانگین ولتاژ واقعی برای fvoltage نشان داده شده است تا درک ارتقای پروفایل ولتاژ و نزدیک بودن به مقدار یک پریونیت واضح‌تر شود. همچنین مقصود از ولتاژ در خروجی تابع هدف مربوط به پروفایل ولتاژ میانگین ولتاژ کلیه باس ها می‌باشد. همچنان که در این شکل مشاهده می‌شود اکثریت مجموعه جواب‌ها در سطح نفوذ حدود ۱۰۰ درصد به دست آمده است و جواب‌هایی نیز با سطوح نفوذ بالاتر و یا پایین‌تر نیز وجود دارد. البته اکثریت جواب‌ها در محدوده سطح نفوذ ۱۰۰ درصد است که مقادیر تلفات و پروفیل ولتاژ نیز در حدود مناسبی قرار دارند.



شکل ۱۱- جبهه‌های پارتوی حل مسئله سه هدفه

در نهایت در این قسمت به مقایسه روش پیشنهادی گرگ خاکستری HMOGWO از منظر پارامترهای عملکرد روش‌های چندهدفه با دو روش MOEA/D و MOPSO خواهیم پرداخت. جدول ۴ روش پیشنهادی و دو روش دیگر را از منظر پارامترهای معرفی شده در فصل سوم یعنی پارامتر های IGD و SP مقایسه نموده است. نتایج این جدول حاکی از آن است که روش پیشنهادی HMOGWO قادر است نتایج بهتری نسبت به دو روش دیگر برحسب پارامتر آماری IGD ارائه دهد. در حقیقت روش HMOGWO دارای همگرایی و دقت بالاتری نسبت به دو روش دیگر می‌باشد و قادر است همگرایی برتری را ارائه دهد. علاوه بر این دو پارامتر SP و MS نیز عملکرد قابل قبولی در مقایسه با دو روش دیگر داشته است.

جدول ۴- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های MOPSO و MOEA/D

	HMOGWO	MOPSO	MOEA/D
متوسط IGD	0.226447	0.354635	0.500958
انحراف معیار IGD	0.19644	0.207107	0.210402
بدترین IGD	0.566855	0.618078	0.753663
بهترین IGD	0.11297	0.054715	0.04453
متوسط SP	0.011059	0.007532	0.008331
انحراف معیار SP	0.004451	0.001027	0.000571
بدترین SP	0.019401	0.009472	0.009472
بهترین SP	0.006619	0.006847	0.006962
متوسط MS	0.974119	0.984942	0.950348
انحراف معیار MS	0.021647	0.027059	0.005462
بدترین MS	0.909178	0.930825	0.928501
بهترین MS	1.017413	1.028237	0.957995

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک روش توسعه‌یافته چندهدفه برای تخصیص بهینه منابع خورشیدی در سیستم‌های توزیع شعاعی استفاده گردید. الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات بوده، به نحوی که مقادیر بهینه ظرفیت منابع خورشیدی جهت برآورده نمودن پروفایل ولتاژ بهینه و تلفات کمینه تحت سطوح نفوذ بالای این منابع به دست آمده است. به‌منظور حل مسئله موردنظر از روش بهینه‌سازی چندهدفه گرگ خاکستری استفاده شده است. روش پیشنهادی با استفاده از مجموعه مت پاور، در شبکه توزیع ۳۳ باس پیاده‌سازی گردید. سیستم‌های فوتوولتائیک به سیستم اضافه شدند و آنالیز اثرات سطوح نفوذ منابع فوتوولتائیک تا ۳۰۰ درصد انجام شده است. در این آنالیز، ظرفیت سیستم فوتوولتائیک برای هر باس با توان ظاهری بار تعیین شده است. مبتنی بر نتایج استنباط شده است که پروفایل ولتاژ در محدوده قابل قبول در باس‌های ۱ تا ۷ و باس‌های ۱۹ تا ۲۷ بوده است و در باس‌های ضعیف سیستم آزمون یعنی باس‌های ۸ تا ۱۸ و ۲۸ تا ۳۳ ولتاژها در محدوده‌های قابل قبول نیست. حداکثر ولتاژ در باس ۱۸ برای نفوذ ۳۰۰ در صد برابر با ۱/۰۸۲ پریونیت می‌باشد که ضعیف‌ترین باس در شبکه مورد بررسی است. در صورتی که تولید به بار نزدیک‌تر باشد آنگاه تلفات در مقدار حداقل خود خواهد بود. برای سطوح نفوذ کم تا متوسط، تلفات تمایل به کاهش یافتن تا رسیدن به مینیمم مقدار را داشته و برای سطوح نفوذ بالاتر از ۱۰۰ درصد، تلفات افزایش می‌یابد. افزایش سطح نفوذ تا ۳۰۰ در صد منجر به افزایش تلفات از ۰/۲ به ۰/۴۸ مگاوات می‌شود. مبتنی بر بهینه‌سازی جهت تخصیص بهینه کلیه باس‌ها ۶۴ متغیر تعریف شد و سطح نفوذ ۳۰۰ درصد در نظر گرفته شد که براساس آن ۱۱/۱۴۵ مگاوات مجموع توان می‌شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بالاترین ظرفیت در باس‌های شروع شبکه یعنی باس ۲ و ۳ با ظرفیت ۱/۸۴ مگاوات می‌باشد. در مورد سطوح نفوذ پایین برای نصب ظرفیت سیسم فوتوولتائیک برای بهبود پروفیل ولتاژ باس های انتهایی انتخاب می‌شوند. با توجه به نتایج استنباط می‌شود که نرخ سطح نفوذ بالا به اضافه ولتاژ در شبکه منجر می شود و برای حفظ پروفایل ولتاژ می‌بایست ظرفیت سیستم فوتوولتائیک در باس های ابتدایی شبکه نصب شود. حداکثر و حداقل ظرفیت ها شامل ۱/۸۴ و ۰/۱۳ مگاوات می‌باشد.

مراجع

[1] Ehsan, A., & Yang, Q. (2019). Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations—Part I: Uncertainty modeling and problem formulation. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 11(2), 970-978.

[2] Li, P., Ji, H., Wang, C., Zhao, J., Song, G., Ding, F., & Wu, J. (2017). Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 8(4), 1430-1442.

[3] Argüello, A., Lara, J. D., Rojas, J. D., & Valverde, G. (2017). Impact of rooftop PV integration in distribution systems considering socioeconomic factors. IEEE Systems Journal, 12(4), 3531-3542.

[4] Elkadeem, M. R., Abd Elaziz, M., Ullah, Z., Wang, S., & Sharshir, S. W. (2019). Optimal planning of renewable energy-integrated distribution system considering uncertainties. IEEE Access, 7, 164887-164907.

[5] Zhuang, P., Zamir, T., & Liang, H. (2020). Blockchain for cybersecurity in smart grid: A comprehensive survey. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(1), 3-19.

[6] Erdinç, O., Taşcıkaraolu, A., Paterakis, N. G., Dursun, I., Sinim, M. C., & Catalao, J. P. (2017). Comprehensive optimization model for sizing and siting of DG units, EV charging stations, and energy storage systems. IEEE Transactions on Smart Grid, 9(4), 3871-3882.

[7] Ferruzzi, G., Cervone, G., Delle Monache, L., Graditi, G., & Jacobone, F. (2016). Optimal bidding in a Day-Ahead energy market for Micro Grid under uncertainty in renewable energy production. Energy, 106, 194-202.

[8] Li, P., Ji, J., Ji, H., Jian, J., Ding, F., Wu, J., & Wang, C. (2020). MPC-based local voltage control strategy of DGs in active distribution networks. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 11(4), 2911-2921.

[9] Truong, K. H., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., & Vo, D. N. (2020). A quasi-oppositional-chaotic symbiotic organisms search algorithm for optimal allocation of DG in radial distribution networks. Applied Soft Computing, 88, 106067.

[10] Naghdi, M., Shafiyi, M. A., & Haghifam, M. R. (2019). A combined probabilistic modeling of renewable generation and system load types to determine allowable DG penetration level in distribution networks. International Transactions on Electrical Energy Systems, 29(1), e2696.

[11] Hu, L., Liu, K. Y., Sheng, W., Diao, Y., & Jia, D. (2017). Research on maximum allowable capacity of distributed generation in distributed network under global energy internet considering static voltage stability. The Journal of Engineering, 2017(13), 2276-2280.

[12] Rahmani, R., Aghaee, S. S., Hosseinian, S. H., & Sadeghi, S. H. H. (2017, April). Determining maximum penetration level of distributed generation sources in distribution network considering harmonic limits and maintain protection coordination scheme. In 2017 Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC) (pp. 196-199). IEEE.

[13] Rahmani, R., Aghaee, S. S., Hosseinian, S. H., & Sadeghi, S. H. H. (2017, April). Determining maximum penetration level of distributed generation sources in distribution network considering harmonic limits and maintain protection coordination scheme. In 2017 Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC) (pp. 196-199). IEEE.

[14] Rahmani, R., Aghaee, S. S., Hosseinian, S. H., & Sadeghi, S. H. H. (2017, April). Determining maximum penetration level of distributed generation sources in distribution network considering harmonic limits and maintain protection coordination scheme. In 2017 Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC) (pp. 196-199). IEEE.

[15] Essackjee, I. A., & King, R. T. A. (2016, August). The impact of increasing Penetration Level of Small Scale Distributed Generations on voltage in a secondary distribution network. In 2016 IEEE International Conference on Emerging

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

modeling system approach. Ain Shams Engineering Journal, 11(2), 409-418.
[29] Swief, R. A., & El-Amary, N. H. (2020). Optimal probabilistic reliable hybrid allocation for system reconfiguration applying WT/PV and reclosures. Ain Shams Engineering Journal, 11(1), 109-118.
[30] Ali, A., Raisz, D., Mahmoud, K., & Lehtonen, M. (2019). Optimal placement and sizing of uncertain PVs considering stochastic nature of PEVs. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 11(3), 1647-1656.
[31] Yahiaoui, A., Benmansour, K., & Tadjine, M. (2016). Control, analysis and optimization of hybrid PV-Diesel-Battery systems for isolated rural city in Algeria. Solar Energy, 137, 1-10.
[32] EEriksson, E. L. V., & Gray, E. M. (2017). Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems–A critical review. Applied energy, 202, 348-364.
[33] Rao, R. S., Ravindra, K., Satish, K., & Narasimham, S. V. L. (2012). Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation. IEEE transactions on power systems, 28(1), 317-325.
[34] Tolabi, H. B., Ali, M. H., & Rizwan, M. (2014). Simultaneous reconfiguration, optimal placement of DSTATCOM, and photovoltaic array in a distribution system based on fuzzy-ACO approach. IEEE Transactions on sustainable Energy, 6(1), 210-218.
[35] Aman, M. M., Jasmon, G. B., Bakar, A. H. A., Mokhlis, H., & Karimi, M. (2014). Optimum shunt capacitor placement in distribution system—A review and comparative study. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 429-439.
[36] Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S. M., & Coelho, L. D. S. (2016). Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. Expert Systems with Applications, 47, 106-119.
[37] Emary, E., Zawbaa, H. M., & Hassanien, A. E. (2016). Binary grey wolf optimization approaches for feature selection. Neurocomputing, 172, 371-381.
[38] Jayakumar, N., Subramanian, S., Ganesan, S., Elanchezhian, E.B., 2016. Grey wolf optimization for combined heat and power dispatch with cogeneration systems. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 74, 252–264
[39] Lu, C., Xiao, S., Li, X., Gao, L., 2016. An effective multi-objective discrete grey wolf optimizer for a real-world scheduling problem in welding production. Adv. Eng. Softw. 99, 161–176.
[40]Precup, R.E., David, R.C., Petriu, E.M., 2016b. Grey wolf optimizer algorithm-based tuning of fuzzy control systems with reduced parametric sensitivity. IEEE Trans. Ind. Electron.
[41] Wazir, A., & Arbab, N. (2016). Analysis and optimization of IEEE 33 bus radial distributed system using optimization algorithm. Journal of Emerging Trends in Applied Engineering, 1(2), 17-21.
[42] Nor, N. M., Ali, A., Ibrahim, T., & Romlie, M. F. (2017). Battery storage for the utility-scale distributed photovoltaic generations. IEEE Access, 6, 1137-1154.
[43] Olowu, T. O., Sundararajan, A., Moghaddami, M., & Sarwat, A. I. (2018). Future challenges and mitigation methods for high photovoltaic penetration: A survey. Energies, 11(7), 1782.
[44] Cheng, D., Mather, B. A., Seguin, R., Hambrick, J., & Broadwater, R. P. (2015). Photovoltaic (PV) impact assessment for very high penetration levels. IEEE Journal of photovoltaics, 6(1), 295-300.
Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech) (pp. 245-250). IEEE.
[16] Rahmani, R., Aghaee, S. S., Hosseinian, S. H., & Sadeghi, S. H. H. (2017, April). Determining maximum penetration level of distributed generation sources in distribution network considering harmonic limits and maintain protection coordination scheme. In 2017 Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC) (pp. 196-199). IEEE.
[17] Rahmani, R., Aghaee, S. S., Hosseinian, S. H., & Sadeghi, S. H. H. (2017, April). Determining maximum penetration level of distributed generation sources in distribution network considering harmonic limits and maintain protection coordination scheme. In 2017 Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC) (pp. 196-199). IEEE.
[18] Chamana, M., & Chowdhury, B. H. (2018). Optimal voltage regulation of distribution networks with cascaded voltage regulators in the presence of high PV penetration. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 9(3), 1427-1436..
[19] Guo, Y., Wu, Q., Gao, H., Chen, X., Østergaard, J., & Xin, H. (2018). MPC-based coordinated voltage regulation for distribution networks with distributed generation and energy storage system. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 10(4), 1731-1739.
[20] Jamroen, C., Pannawan, A., & Sirisukprasert, S. (2018, September). Battery energy storage system control for voltage regulation in microgrid with high penetration of PV generation. In 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC) (pp. 1-6). IEEE.
[21] Nguyen, T. A., Rigo-Mariani, R., Ortega-Vazquez, M. A., & Kirschen, D. S. (2018, August). Voltage Regulation in Distribution Grid Using PV Smart Inverters. In 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM) (pp. 1-5). IEEE.
[22] Cui, T., Shen, Y., Liang, L., Zhang, B., Guo, H., & Zuo, J. (2018, November). Real-time voltage regulation of distributed power grids with wind power integration. In 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON) (pp. 2102-2107). IEEE.
[23] Liu, J., Li, Y., Rehtanz, C., Cao, Y., Qiao, X., Lin, G., ... & Sun, C. (2019). An OLTC-inverter coordinated voltage regulation method for distribution network with high penetration of PV generations. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 113, 991-1001.
[24] Montoya, O. D., Grisales-Noreña, L. F., Gil-González, W., Alcalá, G., & Hernandez-Escobedo, Q. (2020). Optimal location and sizing of PV sources in DC networks for minimizing greenhouse emissions in diesel generators. Symmetry, 12(2), 322.
[25] Cheng, Y., Zhang, N., Kirschen, D. S., Huang, W., & Kang, C. (2020). Planning multiple energy systems for low-carbon districts with high penetration of renewable energy: An empirical study in China. Applied Energy, 261, 114390.
[26] Ma, C., Menke, J. H., Dasenbrock, J., Braun, M., Haslbeck, M., & Schmid, K. H. (2019). Evaluation of energy losses in low voltage distribution grids with high penetration of distributed generation. Applied Energy, 256, 113907.
[27] Li, K., Wang, F., Mi, Z., Fotuhi-Firuzabad, M., Duić, N., & Wang, T. (2019). Capacity and output power estimation approach of individual behind-the-meter distributed photovoltaic system for demand response baseline estimation. Applied Energy, 253, 113595.
[28] Montoya, O. D., Gil-González, W., & Grisales-Noreña, L. F. (2020). An exact MINLP model for optimal location and sizing of DGs in distribution networks: A general algebraic

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]

[45] Hraiz, M. D., García, J. A. M., Castañeda, R. J., & Muhsen, H. (2020). Optimal PV size and location to reduce active power losses while achieving very high penetration level with improvement in voltage profile using modified Jaya algorithm. IEEE Journal of Photovoltaics, 10(4), 1166-1174.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-08-01]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1402.12.2.5.6]