
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

تخصیص ظرفیت مطلوب منابع خورشیدی به منظور 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](mailto: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 پروفایل 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 خاکستری 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 به منظور 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 پروفایل ولتاژ را در حد قابل قبولی نگه داشته و تلفات را به صورت 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 بهبود یافته 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.

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. دولت‌های کشورهای توسعه‌یافته اهداف مطلوبی را برای کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای نظیر CO₂ 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 تأمین‌کنندگان صورت می‌پذیرد. متمرکزسازی به رفاه اجتماعی نیز مرتبط است، زیرا تولید توان غیرمتمرکز موجب ناهمبندی پدیده‌های پرسرو صدا و موجبات 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 تأمین‌کننده و مصرف‌کننده ایجاد نموده است. انتقال برق در شبکه در ولتاژهای مختلف به تلفات مقدار زیادی انرژی و انتشارات گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. 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 مورد نظر 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 می‌توان از انرژی‌های 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 بهره‌برداری 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 تجدیدپذیر 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 تمام‌نشده به دست می‌آورند. فواید 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 به صورت مقدار توان تزریقی توسط سیستم فوتوولتائیک به فیدر تعریف می‌شود. اخیراً محققین روش‌هایی را برای بررسی اثرات سطح نفوذهای بالای سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه بر روی کیفیت ولتاژ شبکه توزیع ارائه نموده‌اند [۵-۹]. روش‌های بهینه‌سازی 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 تجدیدپذیر و بار جهت تعیین میزان مجاز نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع ارائه شده است. در این مقاله کمینه‌سازی 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

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] بهینه‌سازی و جمع‌سیستم‌های انرژی هیبریدی شامل سلول سوختی هیدروژنی ارائه شده است. ارزیابی بحرانی مبتنی بر روش‌های مختلف برای سیستم هیبریدی در این روش ارائه شده است. به منظور 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 حریمانه
[۲۳]	نفوذ بالای منابع فوتولتائیک 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

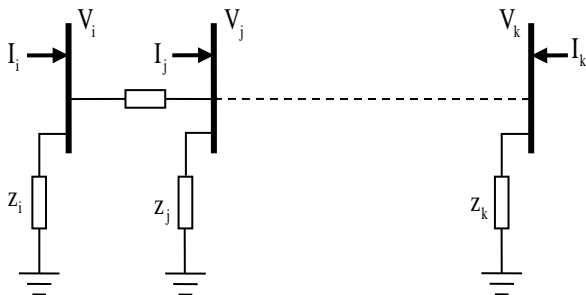
روی مدیریت شبکه توزیع فعال بررسی شده است. در [۱۸] روشی برای تنظیم ولتاژ بهینه شبکه‌های توزیع با رگلاتورهای ولتاژ آبخاری در حضور منابع فوتولتائیک با نفوذ بالا ارائه شده است. در این مرجع هدف کاهش قطع خروجی اینورتر خورشیدی نیز بوده است. در [۱۹] روش تنظیم ولتاژ هماهنگ مبتنی بر مدل کنترل پیش‌بین در شبکه توزیع 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 حریمانه نیز برای ارتقای قابلیت توان راکتیو اینورترها استفاده شده است. در [۲۲] روش تنظیم ولتاژ زمان حقیقی شبکه‌های توزیع با جمع‌توان 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 منبع 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 فوتولتائیک 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 فوتولتائیک در شبکه‌های جریان مستقیم به منظور 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 فوتولتائیک برای تخمین خط پایه پاسخ تقاضا ارائه شده است. این مرجع از روش مجزا سازی بار-تولید فوتولتائیک 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

تمامی شاخه‌ها با مقادیر امیدانسان در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. برای امیدانس Z_{ij} ارتباط بین دو باس i و j خواهد بود. ولتاژ در هر باس i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

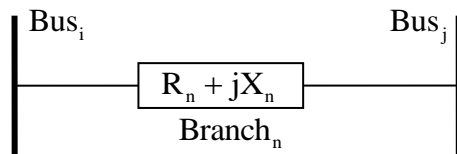
$$V_i = \sum_{j=1}^k Z_{ij} I_j \quad (2)$$

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 $P_{loss}(n)$ و $Q_{loss}(n)$ نمایش داده می‌شود [۳۳]:

$$P_{loss}(n) = R(n) \cdot ((P^2 + Q^2) / |V_j|^2) \quad (3)$$

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

$$P_{Total_loss} = \sum_{n=1}^k P_{loss}(n) \quad (4)$$

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:

$$P_{pv} = \frac{\sqrt{V_i^2} P_{pvloss} - (P_i^2 + Q_i^2) + (Q_{pv}^2 - 2P_i P_{pv} - 2Q_i Q_{pv})}{L} \quad (5)$$

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:

$$P_{NLR} = \frac{R_i}{V_i^2} (P_{pv}^2 + Q_{pv}^2 - 2P_i P_{pv} - 2Q_i Q_{pv}) \left(\frac{G}{L}\right) \quad (6)$$

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

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 بهینه‌سازی چندهدفه گرگ خاکستری ترکیبی استفاده خواهد شد که روشی نوین برای حل 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 به صورت 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 بخش‌های 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 ظرفیت‌های بهینه سیستم فوتوولتائیک برای تمامی باس‌های متصل در شبکه توزیع است. راه‌حل بهینه مسئله بهینه‌سازی چندهدفه موارد ذیل را در نظر خواهد گرفت: سطح نفوذ منابع تولید خورشیدی، بهبود پروفایل ولتاژ و کاهش تلفات توان اکتیو.

۲-۱- آنالیز پخش بار

به طور کلی ماتریس امیدانس برای سیستم با k باس به صورت زیر می‌باشد:

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & -Z_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -Z_{1k} & \dots & Z_{kk} \end{bmatrix} \quad (1)$$

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 به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳۵]:

$$VPI\% = \left(\frac{(\sum_{i=1}^k V_{iLi})_{PV} - (\sum_{i=1}^k V_{iLi})_0}{(\sum_{i=1}^k V_{iLi})_0} \right) * 100 \quad (7)$$

که در این رابطه k تعداد گره‌های (باس‌های) شبکه توزیع و V_i ولتاژ هر گره و L_i میزان بار موجود در گره i ام می‌باشد. زیرنویس 0 به معنی پیش از پیاده‌سازی فوتولتائیک و زیرنویس PV به پس از نصب منابع فوتولتائیک اشاره دارد.

۲-۴- سطح توان فوتولتائیک

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

$$F_{3,i} = CF * P_{installed} / C_{bus} \quad (8)$$

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:

$$0 \leq P_{DGi} \leq P_{iDG}^{max} \quad (9)$$

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

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j [G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})] = 0 \quad (10)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j [G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})] = 0 \quad (11)$$

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 می‌باشند.

۳- الگوریتم چندهدفه گرگ خاکستری

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

$$\vec{D} = |\vec{C} \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (12)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{AD} \quad (13)$$

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 به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2\vec{a} \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (14)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (15)$$

که در این روابط a به صورت خطی از ۲ تا صفر در تکرارها کاهش می‌یابد و r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در بازه صفر تا یک می‌باشد. در طی بهینه‌سازی به منظور شبیه‌سازی شکار و یافتن نواحی مطلوب در فضای جستجو خواهیم داشت [۳۶]:

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (16)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_1 \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (17)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_1 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (18)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \vec{D}_\alpha \quad (19)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_1 \vec{D}_\beta \quad (20)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_1 \vec{D}_\delta \quad (21)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (22)$$

به کارگیری 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 به صورت تصادفی بر روی $C > 1$ تأکید کند و از $C < 1$ جلوگیری نموده تا از اثرات شکار در تعریف فاصله مربوطه جلوگیری نماید.

به منظور 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:

$$P_i = \frac{c}{N_i} \quad (23)$$

که در این رابطه c یک مقدار ثابت بزرگ‌تر از یک است و N تعداد به دست آمده راه‌حل‌های پارتو در بخش i است. به منظور 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

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 فوتولتائیک $X(N)$ مربوط می‌شود.

مبتنی بر رویه‌های کدگذاری، هر راه حل توسط بردار جایگشت و ماتریس تخصیص ایجاد می‌شود. برای تضمین کیفیت بالای راه‌حل‌ها، یک سوم از جمعیت اولیه متناظر با ماتریس‌های تخصیص متفاوت ایجاد می‌شوند که توسط روش NEH برگرفته از مرجع [۳۷] می‌باشد. افراد دیگر نیز به صورت 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 به صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شوند. ب) اگر جمعیت کنونی فقط دو رتبه داشته باشد، α و β به صورت 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، α ، β 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 به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

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 فوتولتائیک $X(N)$ مربوط می‌شود.

مبتنی بر رویه‌های کدگذاری، هر راه حل توسط بردار جایگشت و ماتریس تخصیص ایجاد می‌شود. برای تضمین کیفیت بالای راه‌حل‌ها، یک سوم از جمعیت اولیه متناظر با ماتریس‌های تخصیص متفاوت ایجاد می‌شوند که توسط روش NEH برگرفته از مرجع [۳۷] می‌باشد. افراد دیگر نیز به صورت 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 به صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شوند. ب) اگر جمعیت کنونی فقط دو رتبه داشته باشد، α و β به صورت 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، α ، β 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 به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

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 فوتولتائیک $X(N)$ مربوط می‌شود.

مبتنی بر رویه‌های کدگذاری، هر راه حل توسط بردار جایگشت و ماتریس تخصیص ایجاد می‌شود. برای تضمین کیفیت بالای راه‌حل‌ها، یک سوم از جمعیت اولیه متناظر با ماتریس‌های تخصیص متفاوت ایجاد می‌شوند که توسط روش NEH برگرفته از مرجع [۳۷] می‌باشد. افراد دیگر نیز به صورت 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 به صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شوند. ب) اگر جمعیت کنونی فقط دو رتبه داشته باشد، α و β به صورت 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، α ، β 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 به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$IGD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}}{n} \quad (26)$$

که در این رابطه n تعداد راه حل بهینه پارتو و d_i بیانگر فاصله اقلیدسی بین راه حل بهینه صحیح \bar{a} 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 به صورت زیر می‌باشد:

$$SP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{d} - d_i)^2} \quad (27)$$

که در این رابطه \bar{d} متوسط تمامی d_i ها می‌باشد و n مجموعه راه‌حل‌های به دست آمده پارتو می‌باشد و d_i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i = \text{Min} (|f_1^i(\vec{x}) - f_1^j(\vec{x})|) + (|f_2^i(\vec{x}) - f_2^j(\vec{x})|) + \dots \quad (28)$$

همچنین MS به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$MS = \sqrt{\sum_{i=1}^n (d(a_i, b_i))} \quad (29)$$

† Inverted Generational Distance

‡ Spacing

§ Maximum Spread

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 فوتولتائیک $X(N)$ مربوط می‌شود.

مبتنی بر رویه‌های کدگذاری، هر راه حل توسط بردار جایگشت و ماتریس تخصیص ایجاد می‌شود. برای تضمین کیفیت بالای راه‌حل‌ها، یک سوم از جمعیت اولیه متناظر با ماتریس‌های تخصیص متفاوت ایجاد می‌شوند که توسط روش NEH برگرفته از مرجع [۳۷] می‌باشد. افراد دیگر نیز به صورت 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 به صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شوند. ب) اگر جمعیت کنونی فقط دو رتبه داشته باشد، α و β به صورت 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، α ، β 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 به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

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 فوتولتائیک $X(N)$ مربوط می‌شود.

مبتنی بر رویه‌های کدگذاری، هر راه حل توسط بردار جایگشت و ماتریس تخصیص ایجاد می‌شود. برای تضمین کیفیت بالای راه‌حل‌ها، یک سوم از جمعیت اولیه متناظر با ماتریس‌های تخصیص متفاوت ایجاد می‌شوند که توسط روش NEH برگرفته از مرجع [۳۷] می‌باشد. افراد دیگر نیز به صورت 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 به صورت تصادفی از میان جمعیت انتخاب می‌شوند. ب) اگر جمعیت کنونی فقط دو رتبه داشته باشد، α و β به صورت 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، α ، β 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 به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$X(\pi)_{i+1}^t = \begin{cases} \text{Shift}(X(\pi)_i^t C, (X(\pi)_\alpha^t - X(\pi)_i^t)) & \text{if } \text{rand} < \frac{1}{3} \\ \text{Shift}(X(\pi)_i^t C, (X(\pi)_\beta^t - X(\pi)_i^t)) & \text{else if } \text{rand} < \frac{2}{3} \\ \text{سایر} & \text{سایر} \end{cases} \quad (24)$$

در رابطه فوق $\text{shift}(x, d)$ 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 به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$X(N)_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X(N)_{i,j}^t \in \{(X(N)_{\alpha ij}^t, X(N)_{\beta ij}^t, X(N)_{\gamma ij}^t)\} & \text{if } \text{rand} < a \\ \text{سایر} & \text{سایر} \end{cases} \quad (25)$$

که در این رابطه d تابعی برای محاسبه فاصله اقلیدسی و ai ماکزیمم مقدار تابع هدف در هدف i و bi مینیمم مقدار تابع هدف و 0 تعداد اهداف می‌باشد.

۴- رویه حل مسئله تخصیص منابع فوتولتائیک

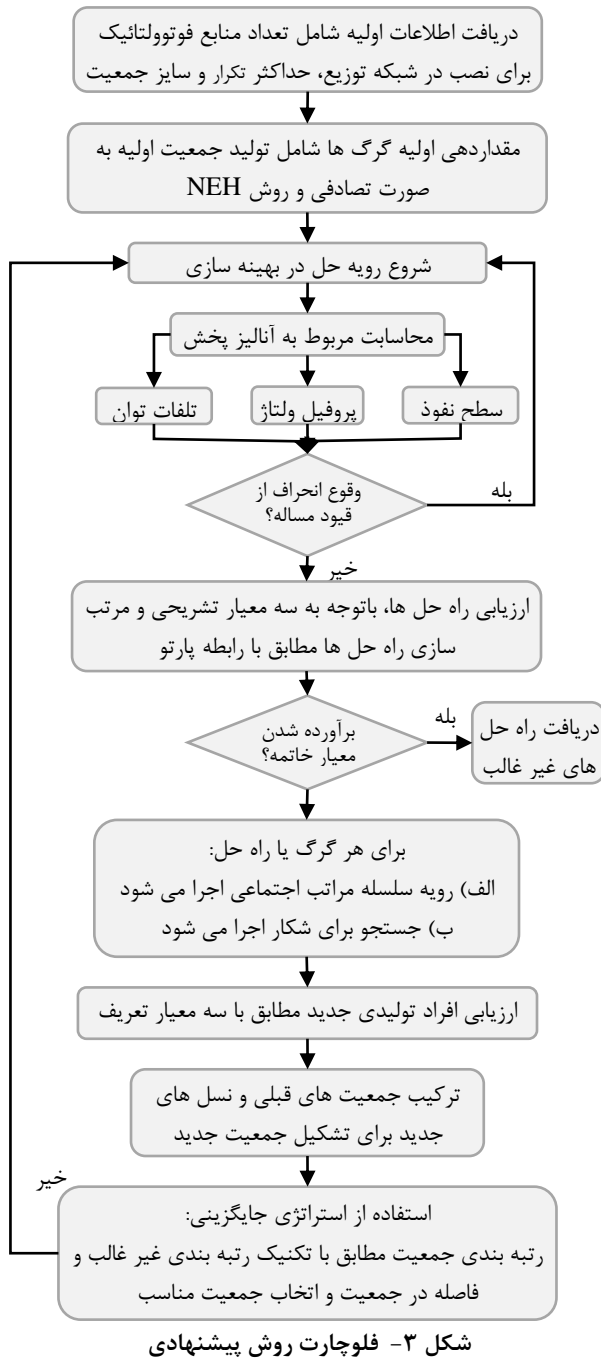
فلوچارت روش پیشنهادی در شکل ۳ نمایش داده شده است. رویه بهینه‌سازی گرگ خاکستری چندهدفه برای حل مسئله تخصیص بهینه منابع فوتولتائیک به این گونه است که ظرفیت و موقعیت بهینه منابع فوتولتائیک با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفایل ولتاژ انتخاب می‌شوند. روش پیشنهادی به شرح زیر می‌باشد. ابتدا جمعیت مطابق با روش بهینه‌سازی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

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

$$V_{ar} = 2N_{pv} \quad (30)$$

اولین باس شبکه توزیع به‌عنوان باس اسلک انتخاب می‌شود که این باس نمی‌تواند برای انتخاب موقعیت منبع فوتولتائیک استفاده شود. قیود پایین V_{ar} که دومین باس و ظرفیت مینیمم می‌باشند به صورت $L_{lim}(f)$ نمایش داده می‌شود یعنی اگر باس‌هایی در شبکه توزیع به صورت $N_{pv}=2, 3, 4, \dots, n$ باشد آن گاه $L_{lim}(f)=[bus2, bus2; C_{min}; c_{min}]$ خواهد بود و باس دوم اولین باس و C_{min} مینیمم ظرفیت وابسته به سطح نفوذ فوتولتائیک خواهد بود.

قیود بالای متغیرهای طراحی شامل آخرین باس و حداکثر ظرفیت خواهند بود. یعنی اگر باس‌هایی در شبکه توزیع به صورت $2, 3, 4, \dots, n$ باشند $N_{pv}=2$ باشد آن گاه $U_{lim}(f)=[busn, busn; C_{max}; c_{max}]$ خواهد بود و باس آخر آخرین باس مدنظر و C_{max} حداکثر ظرفیت مبتنی بر سطح نفوذ فوتولتائیک خواهد بود. پس از این مرحله یک ماتریس جمعیت متشکل از ظرفیت و موقعیت تشکیل می‌شود که S و C به‌عنوان موقعیت و ظرفیت نیروگاه خورشیدی متغیرهای آن می‌باشند. پس از این مرحله اطلاعات سیستم توزیع پیاده‌سازی می‌شود و با اجرای بخش بار تلفات و سایر مقادیر مشخص می‌شود. رویه بهینه‌سازی گرگ خاکستری چندهدفه مبتنی بر سه هدف معرفی شده یعنی کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ و سطح نفوذ اجرا می‌شود. همچنین در هر گام اجرای شبیه‌سازی می‌باید سطح نفوذ فوتولتائیک مورد ارزیابی قرار گیرد و به‌عنوان یک قیود مدنظر قرار گیرد تا سطح نفوذ مناسب به دست بیاید.



شکل ۳- فلوچارت روش پیشنهادی

۵- نتیجه و آنالیز شبیه‌سازی

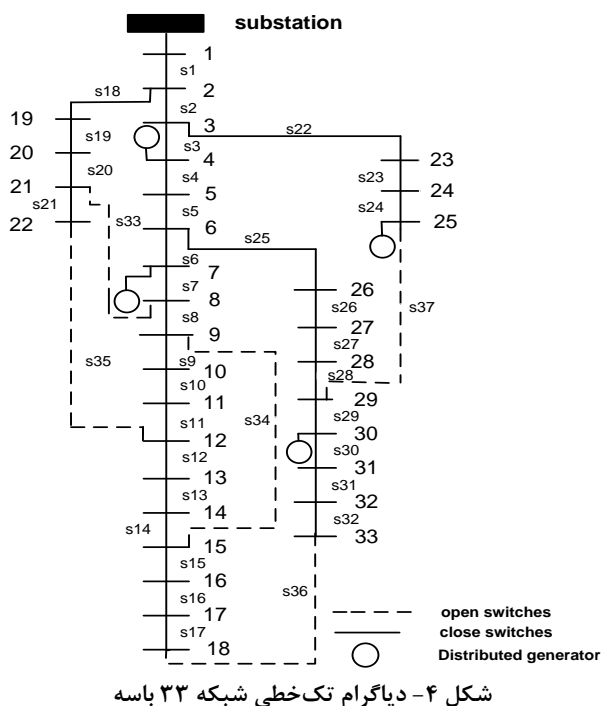
برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی از برنامه متلب استفاده خواهد شد که در این برنامه از پیاده‌سازی روش تشریحی مبتنی بر روابط تشریحی برای تخصیص منابع فوتولتائیک، استفاده گردیده است. در حقیقت در این بخش هدف آن است که روش پیشنهادی تخصیص منابع فوتولتائیک را بر روی یکی از شبکه‌های آزمون پیاده‌سازی کرده و نتایج ارزیابی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

۱-۵- سیستم مورد مطالعه

به منظور بررسی عملکرد روش پیشنهادی از شبکه توزیع ۳۳ با سه استاندارد استفاده می‌شود. در شکل ۴ دیاگرام تک خطی شبکه ۳۳ با سه کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووات تقاضا می‌باشد. در جدول ۲ اطلاعات شبکه تحت بررسی برای تخصیص بهینه آورده شده است.

جدول ۲- اطلاعات شبکه ۳۳ با سه 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	۱/۴۸۸۰	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	۱/۲۲۱۰	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

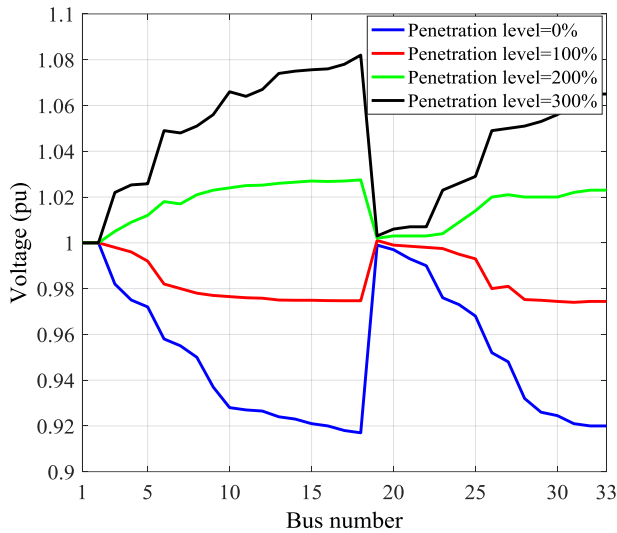


۲-۵- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به تحلیل نتایج پیاده سازی روش پیشنهادی تخصیص منابع فوتوولتائیک خواهیم پرداخت. تعریف‌های بسیاری برای سطح نفوذ منابع فوتوولتائیک ارائه شده است [۴۲]. در این تحقیق، سطح نفوذ فوتوولتائیک به صورت نسبت ماکزیمم توان فوتوولتائیک به ماکزیمم توان ظاهری بار تعریف می‌شود [۴۳]. نفوذ به صورت درصد مجموع ظرفیت سیستم فوتوولتائیک در نظر گرفته شده است. به کارگیری فوتوولتائیک در سناریوها شامل بهره برداری در سطح نفوذهای ۱۰۰ و ۳۰۰ درصدی از هر پیک بار سالیانه می‌باشد [۴۴].

در این قسمت روش پیشنهادی برای دستیابی به تخصیص بهینه سیستم فوتوولتائیک بر روی شبکه آزمون ۳۳ با سه پیاده سازی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی به دنبال تأیید کارایی روش پیشنهادی در کاهش تلفات و بهبود پروفایل ولتاژ می‌باشد. ظرفیت هر سیستم فوتوولتائیک ۲/۰۰۵ تا ۳/۱۰۷ مگاوات در موارد مختلف می‌باشد. موقعیت‌های به دست آمده و ظرفیت‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است. نتایج حاکی از عملکرد مناسب روش پیشنهادی گرگ خاکستری بوده است. همچنان که در این جدول مشاهده می‌شود. در سطر اول هنگامی که ۲ عدد فوتوولتائیک مدنظر می‌باشد، با سه متصل شامل باس‌های ۶ و ۱۸ با ظرفیت‌های ۱/۹۳ و ۰/۵۶ می‌باشد و متوسط ولتاژ در این حالت ۰/۹۷۸ پرینیت بوده و تلفات نیز برحسب مگاوات به میزان ۰/۰۸۶ می‌باشد. برای حالت سه منبع فوتوولتائیک باس‌های ۱۴، ۲۴ و ۳۰ انتخاب شده و مقادیر ظرفیت آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۷۵، ۱/۰۹ و ۱/۰۹ بوده و متوسط ولتاژ در این حالت ۰/۹۷۲ پرینیت بوده و تلفات نیز برحسب مگاوات به میزان ۰/۰۷۲ می‌باشد. برای حالت چهار منبع

توان راکتیو افزایش می‌یابد. به طور معمول ولتاژ بهره‌برداری نر مال در محدوده ۰/۰۵ تا ۱/۰۵ پریونیت می‌باشد. شکل ۵ اثرات سطوح نفوذ بالای فوتولتائیک 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 باس‌های 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 ولتاژ می‌باشند. در حقیقت در حالت سیصد درصدی افزایش ولتاژ بسیار بالا بوده و وضعیت نامناسبی را ایجاد می‌کند که می‌باید 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 فوتولتائیک بر روی پروفایل ولتاژ

۵-۴- 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 می‌شود. همچنان که مشاهده می‌شود 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 فوتولتائیک می‌باشد.

فوتولتائیک 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 فوتولتائیک باس‌های ۶ و ۱۸ و ۲۸ و ۱۶ 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

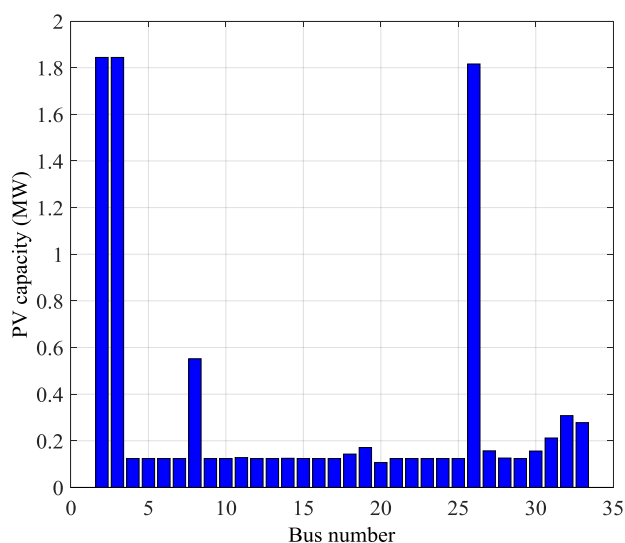
فوتولتائیک

تعداد PV	باس‌های متصل	ظرفیت سیستم فوتولتائیک (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 فوتولتائیک انجام شده است. پس از آن سیستم‌های فوتولتائیک به سیستم اضافه می‌شوند و آنالیز اثرات سطوح نفوذ منابع فوتولتائیک تا ۳۰۰ درصد انجام شده است. در این آنالیز، ظرفیت سیستم فوتولتائیک 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 فوتولتائیک ۳۰۰ درصد باشد، در این صورت ظرفیت سیستم فوتولتائیک یک ۰/۳ مگاوات می‌شود. موقعیت و ظرفیت سیستم فوتولتائیک در جدول ۳ آورده شده است. مجموع توان متصل شده سیستم‌های فوتولتائیک در شبکه برابر با ۱۱/۲ مگاوات می‌باشد.

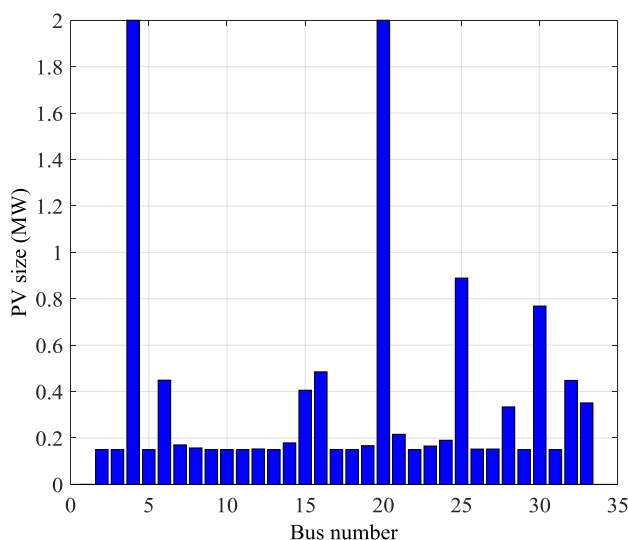
۵-۳- بررسی اثر سطح نفوذ بر روی پروفایل ولتاژ

در این قسمت اثرات نفوذ بالا 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 فوتولتائیک 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 فوتولتائیک، 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 فوتولتائیک 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 در سیستم تغییر دهد. در هر حال، ولتاژهای باس‌های نزدیک به واسطه کم بود

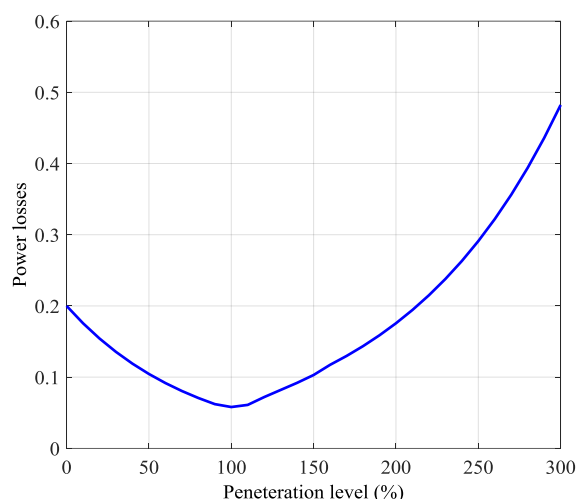


شکل ۷- خروجی بهینه‌سازی برای تخصیص بهینه تحت سطح نفوذ ۳۰۰ درصد

تعیین مقدار مطلوب سطح نفوذ امر پیچیده است و نیاز به تنظیم دقیق C_{min} و C_{max} دارد. با توجه به نتایج و پس از شبیه‌سازی‌ها انت‌خاب مقدار $C_{max}=2$ امری مطلوب برای دستیابی به اهداف مختلف و سطح نفوذ بالاتر می‌باشد. در شکل ۸ نیز نتایج آنالیز شبکه تحت بهینه‌سازی $C_{min}=0.15$ و $C_{max}=2$ آورده شده است. در این شکل ظرفیت فوتولتائیک در باس‌های مختلف به صورت شماتیک آورده شده است. همچنین در شکل ۹ نیز مصرف توان از شبکه بر حسب مگاوات برای باس‌های مختلف نمایش داده شده است و در نهایت ولتاژ بر حسب پریونیت در باس‌های مختلف در شکل ۱۰ برای این حالت نمایش داده شده است.



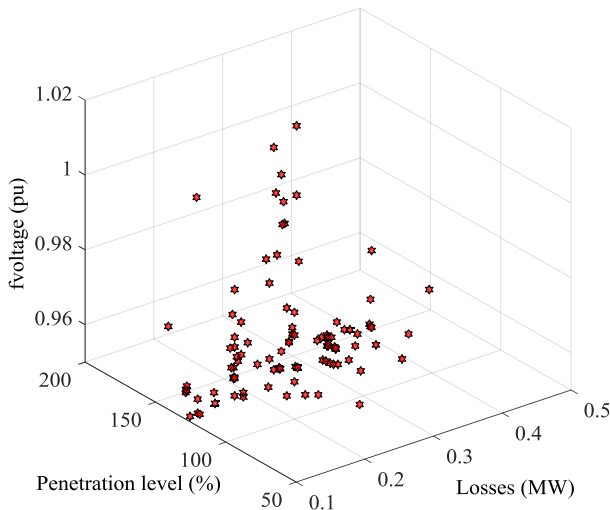
شکل ۸- ظرفیت فوتولتائیک برای حالت آنالیز شبکه تحت بهینه‌سازی $C_{min}=0.15$ و $C_{max}=2$



شکل ۶- تلفات توان در سطوح نفوذ مختلف

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

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 می‌شود. مشکل افزایش ولتاژ به تعداد زیاد منابع فوتولتائیک 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 فوتولتائیک 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 باس‌ها فرض شده که فوتولتائیک در آن‌ها نصب می‌شوند و بر اساس آن و برای موقعیت و ظرفیت ۶۴ متغیر تعریف شده است. می‌بایست سطح نفوذ ۳۰۰ درصد در نظر گرفته شود که بر اساس 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 کمیته‌سازی 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 فوتولتائیک برای بهبود پروفیل ولتاژ باس‌های انتهایی انتخاب می‌شوند. با توجه به نتایج استنباط می‌شود که نرخ سطح نفوذ بالا به اضافه ولتاژ در شبکه منجر می‌شود و برای حفظ پروفیل ولتاژ می‌بایست ظرفیت سیستم فوتولتائیک در باس‌های ابتدایی شبکه نصب شود. ماکزیمم و مینیمم ظرفیت‌ها شامل ۱/۸۴ و ۰/۱۳ مگاوات می‌باشد.

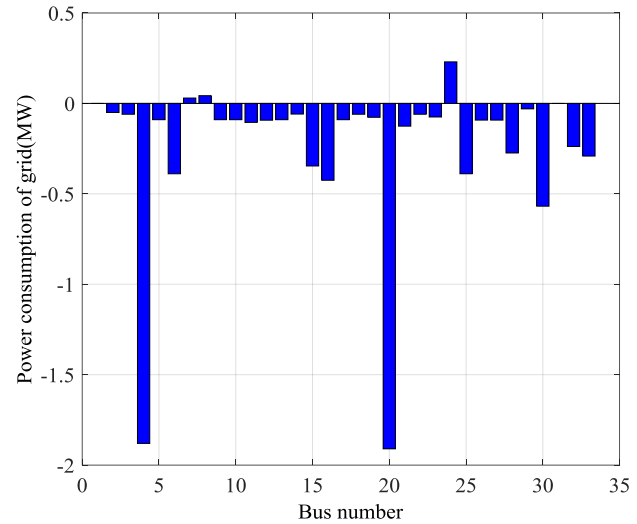


شکل ۱۱- جبهه‌های پارتوی حل مسئله سه هدفه

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 پارامترهای 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.

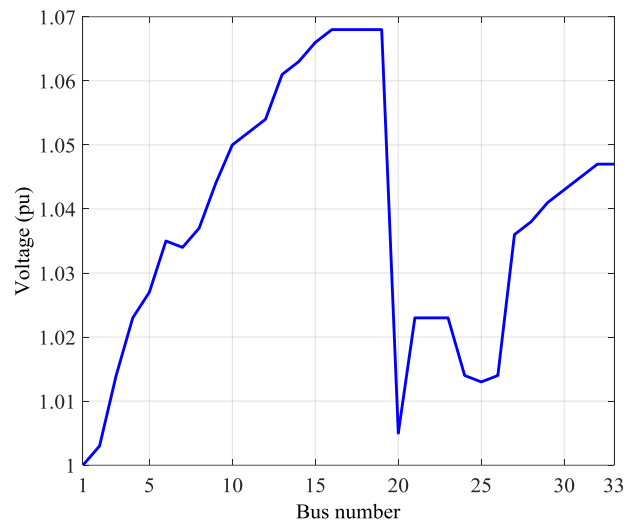
جدول ۴- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های MOPSO و MOEA/D

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



شکل ۹- مصرف توان شبکه برای حالت آنالیز شبکه تحت بهینه‌سازی

Cmin=0.15 و Cmax=2



شکل ۱۰- ولتاژ برحسب پرینیت برای حالت آنالیز شبکه تحت

بهینه‌سازی Cmin=0.15 و Cmax=2

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 سه هدفه از خروجی روش بهینه‌سازی تصحیح شده گرگ خاکستری نمایش داده شده است. شایان ذکر است در این شکل مقدار میانگین ولتاژ واقعی برای f-voltage 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 باس‌ها 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 پروفایل ولتاژ نیز در حدود مناسبی قرار دارند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله از یک روش توسعه یافته چندهدفه برای تخصیص بهینه منابع خورشیدی در سیستم های 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. به منظور حل مسئله موردنظر از روش بهینه سازی چندهدفه گرگ خاکستری استفاده شده است. روش پیشنهادی با استفاده از مجموعه مت پاور، در شبکه توزیع ۳۳ باس پیاده سازی گردید. سیستم های فوتولتائیک به سیستم اضافه شدند و آنالیز اثرات سطوح نفوذ منابع فوتولتائیک تا ۳۰ درصد انجام شده است. در این آنالیز، ظرفیت سیستم فوتولتائیک برای هر باس با توان ظاهری بار تعیین شده است. مبتنی بر نتایج استنباط شده است که پروفایل ولتاژ در محدوده قابل قبول در باس های ۱ تا ۷ و باس های ۱۹ تا ۲۷ بوده است و در باس های ضعیف سیستم آزمون یعنی باس های ۸ تا ۱۸ و ۲۸ تا ۳۳ ولتاژها در محدوده های قابل قبول نیست. حداکثر ولتاژ در باس ۱۸ برای نفوذ ۳۰ درصد برابر با ۱/۰۸۲ پریونیت می باشد که ضعیف ترین باس در شبکه مورد بررسی است. در صورتی که تولید به بار نزدیک تر 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 می یابد. افزایش سطح نفوذ تا ۳۰ درصد منجر به افزایش تلفات از ۰/۲ به ۰/۴۸ مگاوات می شود. مبتنی بر بهینه سازی جهت تخصیص بهینه کلیه باس ها ۶۴ متغیر تعریف شد و سطح نفوذ ۳۰ درصد در نظر گرفته شد که براساس آن ۱۱/۱۴۵ مگاوات مجموع توان می شود. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که بالاترین ظرفیت در باس های شروع شبکه یعنی باس ۲ و ۳ با ظرفیت ۱/۸۴ مگاوات می باشد. در مورد سطوح نفوذ پایین برای نصب ظرفیت سیستم فوتولتائیک برای بهبود پروفیل ولتاژ باس های انتهایی انتخاب می شوند. با توجه به نتایج استنباط می شود که نرخ سطح نفوذ بالا به اضافه ولتاژ در شبکه منجر می شود و برای حفظ پروفیل ولتاژ می بایست ظرفیت سیستم فوتولتائیک در باس های ابتدایی شبکه نصب شود. حداکثر و حداقل ظرفیت ها شامل ۱/۸۴ و ۰/۱۳ مگاوات می باشد.

مراجع

- 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., Taşçıkaraolu, 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

- [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

- 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., Elanchezian, 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

- [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.