

ارائه استراتژی پویا برای تجدید آرایش شبکه توزیع با توجه به اهمیت قابلیت اطمینان و امنیت سیستم

حسین لطفی^(۱) - رضا قاضی^(۲) - محمد باقر نقیبه سیستانی^(۳)

(۱) دانشجوی دکترا - گروه مهندسی برق، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران

(۲) استاد - گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(۳) دانشیار - گروه مهندسی برق، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۸/۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۸/۹/۱۰

خلاصه: تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع یک مسئله بهینه‌سازی در سیستم قدرت است که با تغییر وضعیت سوئیچینگ در شبکه توزیع برای برآورده کردن توابع هدف خاصی انجام می‌شود. در این مقاله، مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی در قالب پویا مدل‌سازی و حل شده است. با توجه به اینکه در مطالعات تجدید آرایش به قابلیت اطمینان و امنیت شبکه توجه کمتری شده است، از این رو شاخص انرژی توزیع‌نشده در کنار شاخص پایداری ولتاژ و تلفات انرژی به عنوان توابع هدف مسئله در نظر گرفته شده‌اند. تجدید آرایش فیدرهای توزیع به طور ذاتی مسئله پیچیده‌ای است، در نظر گرفتن تاثیر منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی در شبکه توزیع مسئله را پیچیده‌تر از قبل می‌کند. به همین منظور از الگوریتم بهبودیافته جهش قورباغه مبتنی بر یک استراتژی جدید جهش استفاده شده است. روش پیشنهادی تکاملی بر روی یک شبکه تست ۳۳ باسه اعمال گردیده و نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج سایر روش‌ها مقایسه می‌شود.

کلمات کلیدی: تجدید آرایش فیدرهای توزیع، منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی، انرژی توزیع نشده.

Providing a Novel Approach for Dynamic Feeder Reconfiguration Considering Importance of Reliability and Grid's Security

Hossein Lotfi⁽¹⁾ - Reza Ghazi⁽²⁾ - Mohammadbagher Naghibi Sistani⁽³⁾

(1) Phd Student - Department of Electrical Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

hossein_lotfi95@yahoo.com

(2) Professor - Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Rghazi@ferdowsi.um.ac.ir

(3) Associate Professor - Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

naghib@yahoo.com

Abstract: Distribution feeder reconfiguration is a problem in the distribution network which is done by altering switches' status for satisfying certain objective functions. This paper presents, a novel method for dynamic feeder reconfiguration at the presence of distributed generators (DGs), energy storage (ES) units. According to in the feeder reconfiguration studies less attention has been paid to the reliability and security indexes as objective functions. For this reason, the energy not supplied (ENS) along with the voltage stability index (VSI) and energy loss are used as objective functions in this study. Feeder reconfiguration is complex inherently, considering impacts of distributed generators and energy storage makes the problem more be complex than before. For this reason, a modified shuffled frog leaping algorithm is provided in this paper based on new mutation strategy. In order to show the efficiency and supremacy of the proposed method, a 33-node test system is used and proposed approach's results are compared with other methods.

Index Terms: Feeder reconfiguration; distributed generators; energy not supplied; energy storage system.

۱. مقدمه

شبکه‌های توزیع معمولاً برای افزایش سطح قابلیت اطمینان و کاهش خاموشی‌ها به صورت حلقوی طراحی می‌شوند ولی برای پایین آوردن سطح اتصال کوتاه و هماهنگی سیستم‌های حفاظتی به صورت شعاعی بهره‌برداری می‌شوند، همین موضوع باعث افزایش تلفات در شبکه توزیع می‌شود. به همین منظور عملیات تجدید آرایش فیدرهای توزیع برای کاهش تلفات، بهبود قابلیت اطمینان و ... با مدیریت کلیدزنی در شبکه توزیع اجرا می‌شود. در فرایند تجدید آرایش، آرایش فیدرهای توزیع با توجه به وضعیت کلیدها برای رسیدن به اهداف مختلفی تجدید می‌شود.

در تجدید آرایش باید یک سری قیود از قبیل حفظ ساختار شعاعی شبکه پس از تجدید آرایش، تغذیه تمام بارها، حفظ ولتاژ باس‌ها در محدوده مشخص و بارگذاری خطوط حتما رعایت شود. مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع یک مسئله غیر خطی و نامحدب است. بنابراین روش‌های ریاضی به دلیل محدودیت‌های مربوط به توابع هدف و قیود این مسئله از قبیل ناپویستگی و مشتق‌پذیری، مناسب نیستند [۱]. بر این اساس محققین روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های اکتشافی برای حل این مسئله بهینه‌سازی ارائه کرده‌اند که در ادامه به بررسی آنها پرداخته شده است:

در مقاله [۲]، الگوریتم بهینه‌سازی علف هرز برای مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع با اهداف کاهش تلفات و تعداد سوئیچینگ ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته زنبور عسل برای حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع به منظور کاهش تلفات و انحراف ولتاژ باس‌ها ارائه شده است [۳]. در مقاله [۴]، یک روش ترکیبی متشکل از الگوریتم بهینه‌سازی سیستم ایمنی بدن و نظریه گراف برای حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع با هدف کاهش تلفات ارائه شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بر اساس یک کدگذاری جدید برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع معرفی شده است [۵]. در مقاله [۶]، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی برای حل مسئله تجدید آرایش در شبکه توزیع نامتعادل با اهداف کاهش تلفات و بهبود شاخص پایداری ولتاژ ارائه شده است. الگوریتم اجتماع ذرات برای حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع با هدف کاهش سطح اتصال کوتاه بکار گرفته شده است [۷]. در مقاله [۸]، از یک الگوریتم جدید مبتنی بر مفاهیم کیهان‌شناسی برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات توان و آلاینده‌ها استفاده شده است. در مقاله [۹]، یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی مبتنی بر کاهش فضای جستجو برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع با اهداف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ معرفی شده است. الگوریتم بهبودیافته باینری اجتماع ذرات به منظور حل مسئله تجدید آرایش در شبکه توزیع با هدف کاهش تلفات استفاده شده است [۱۰].

استراتژی‌های بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع در دهه گذشته به علت نفوذ زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره انرژی در کنار سیستم‌های اتوماسیون به طور قابل توجهی تغییر کرده است [۱۱]. ادغام منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع اثرات مثبتی در شبکه از قبیل

کاهش تلفات، بهبود قابلیت اطمینان و ... دارد [۱۱]. در ادامه به بررسی مطالعات تجدید آرایش در حضور منابع تولید پراکنده پرداخته شده است. در مقاله [۱]، الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات- جهش قورباغه برای حل مسئله تجدید آرایش شبکه توزیع به منظور کاهش تلفات و بهبود پایداری ولتاژ در حضور منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در مقاله [۱۲]، برای حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با اهداف کاهش تلفات و هزینه بهره‌برداری از الگوریتم ترکیبی اجتماع ذرات-گرگ خاکستری استفاده شده است. الگوریتم بهبودیافته جستجوی گرانشی برای حل مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده به منظور بهبود شاخص پایداری گذرا ارائه شده است [۱۳]. الگوریتم ترکیبی بهبودیافته اجتماع ذرات - جهش قورباغه برای حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع و سوئیچینگ خازنی در حضور منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی معرفی شده است [۱۴]. در مقاله [۱۵]، الگوریتم کلونی مورچه‌ها برای حل مسئله تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع و سوئیچینگ بانک‌های خازنی در حضور منابع تولید پراکنده با هدف کاهش تلفات استفاده شده است. الگوریتم ترکیبی بهبودیافته اجتماع ذرات جهش قورباغه برای حل مسئله تجدید آرایش و سوئیچینگ خازنی در چارچوب پویا با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری شبکه ارائه شده است [۱۶].

بررسی مطالعات گذشته در زمینه تجدید آرایش فیدرهای توزیع نشان می‌دهد که اکثر مراجع [۱-۱۰] مسئله بهینه‌سازی را در یک دوره زمانی ثابت حل کرده‌اند. با توجه به تغییرات بار و قیمت برق در شبکه توزیع این روش نمی‌تواند صحیح و موثر باشد. مراجع [۱۲-۱۶] نیز مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع را در بازه‌های زمانی مختلف با توجه به تغییرات بار حل کرده‌اند. با توجه به رفتار متناوب منابع تولید پراکنده اکثر مراجع عدم قطعیت مربوط به توان این منابع را در نظر نگرفته‌اند. بر این اساس، ویژگی‌هایی مدل ارائه شده در این مطالعه به شرح زیر است:

- تجدید آرایش فیدرهای توزیع در چارچوب پویا، ارائه طرح بهینه برای مدیریت انرژی در حضور یکپارچه منابع تولید پراکنده با واحدهای ذخیره انرژی، پاسخگویی به تقاضا در یک سطح مناسبی از قابلیت اطمینان و امنیت شبکه با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت در خروجی توان منابع تولید پراکنده.

- حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در حضور منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی نیاز به یک روش حل دقیق و قدرتمند دارد. برای این منظور، الگوریتم بهبودیافته جهش قورباغه برای مقابله با پیچیدگی‌های مسئله بهینه‌سازی در این مطالعه ارائه شده است. الگوریتم جهش قورباغه یکی از الگوریتم‌های فرااکتشافی مبتنی بر زندگی اجتماعی قورباغه‌ها است [۱۷]. این الگوریتم بدلیل سادگی در اجرا و حجم کم محاسبات در حل بسیاری از مسایل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه فرایند تکاملی الگوریتم جهش قورباغه مبتنی بر جمعیت اولیه تصادفی است این الگوریتم با مشکل همگرایی زودرس یا گیرافتادن در

هستند. متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله بهینه‌سازی در روابط (۲-۶) ارائه شده است.

$$X = [X_{SW} \ X_{Tie} \ X_{DG} \ X_{ES}] \quad (2)$$

$$X_{SW} = [SW_1^1, SW_2^2, \dots, SW_{N_{Tie}}^{24}] \quad (3)$$

$$X_{Tie} = [Tie_1^1, Tie_2^2, \dots, Tie_{N_{Tie}}^{24}] \quad (4)$$

$$X_{P_{DG}} = [P_{Dg1}^1, P_{Dg2}^2, \dots, P_{DgN_{Dg}}^{24}] \quad (5)$$

$$X_{P_{ES}} = [P_{ES1}^1, P_{ES2}^2, \dots, P_{ESN_{ES}}^{24}] \quad (6)$$

X بردار متغیرهای کنترلی مسئله است. N_{ES} و N_{Dg} به ترتیب، تعداد منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی می‌باشند. Tie_i بیانگر وضعیت سوئیچ آم است. SW_i و N_{Tie} بیانگر شماره سوئیچ‌های بسته و تعداد سوئیچ‌های بسته هستند. $P_{Dg,i}^{24}$ و $P_{ES,j}^{24}$ به ترتیب، مقدار توان اکتیو واحد تولید پراکنده آم و توان اکتیو واحد ذخیره انرژی آم در بیست و چهار ساعت می‌باشند.

۲-۱-۲- انرژی توزیع نشده

انرژی توزیع نشده باس آم در زمان t ام به شرح زیر می‌باشد.

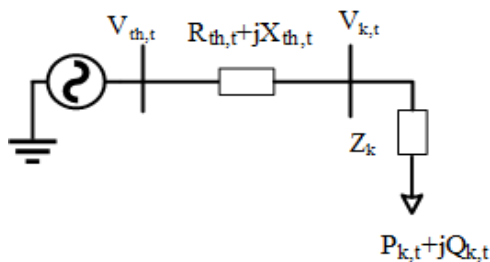
$$ENS_{i,t} = P_{i,t} \sum_{i,j \in V, i \neq j} (U_{i,j} + U'_{i,j}) \quad (7)$$

در رابطه فوق V مجموعه باس‌هایی است که از یک فیدر تغذیه می‌شوند و شامل باس i می‌باشند. $U_{i,j}$ و $U'_{i,j}$ به ترتیب، مدت زمان تعمیر (ساعت در سال) و مدت زمان مربوط به جبران خسارت (ساعت در سال) شاخه‌های مرتبط با باس i هستند. $\lambda_{i,j}$ و $d_{i,j}$ بیانگر نرخ خرابی و طول خط می‌باشند. $t_{i,j}$ و $t'_{i,j}$ به ترتیب، میانگین مدت زمان تعمیر و میانگین مدت زمان بازایی خط بین باس‌های آم و آم هستند. رابطه کلی انرژی توزیع نشده شبکه با در نظر نگرفتن گره مرجع از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$f_2(x) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=2}^{N_{Bus}} ENS_{i,t} \quad (8)$$

۲-۱-۳- شاخص پایداری ولتاژ

یکی از اهداف مهم این مطالعه، بهبود پایداری ولتاژ [۱۸] از طریق تجدید آرایش فیدرهای شبکه توزیع است. به همین سبب شاخص پایداری ولتاژ به عنوان تابع امنیت شبکه تعریف شده است. این شاخص بر اساس مدار معادل تونن بیان و فرموله شده است. در شکل (۱) مدار معادل تونن برای تمام باس‌ها از دید باس K نشان داده شده است.



شکل (۱): مدار معادل تونن از دید باس k ام

Fig. (1): Thevenin equivalent system of bus k

بهینه‌های محلی روبرو است. به همین منظور در این مطالعه، یک عملگر جدید جهش در الگوریتم بهبودیافته برای بهبود قابلیت جستجو، تنوع جمعیت و جلوگیری از همگرایی زودرس ارائه شده است.

در این مطالعه، انرژی توزیع نشده، تلفات انرژی و شاخص پایداری ولتاژ به عنوان توابع هدف مسئله تعریف شده‌اند، به همین منظور برای حل مسئله چندهدفه در الگوریتم پیشنهادی از مفهوم بهینگی پارتو استفاده شده است، زیرا در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به جای یک جواب بهینه با مجموعه‌ای از جواب‌ها (جبهه پارتو) روبرو هستیم.

مشارکت اصلی این مطالعه به شرح زیر است:

ارائه طرح بهینه‌ای برای فیدرهای توزیع در یک سطح قابل قبول از قابلیت اطمینان و امنیت شبکه با حل مسئله تجدید آرایش در شبکه توزیع.

در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره انرژی در ارزیابی توابع هدف مسئله بهینه‌سازی.

در نظر گرفتن شاخص انرژی توزیع نشده به عنوان تابع هدف قابلیت اطمینان در این مطالعه و بهبود این شاخص توسط حل مسئله تجدید آرایش در شبکه توزیع.

در نظر گرفتن پایداری ولتاژ به منظور ارزیابی امنیت شبکه، از مدار معادل تونن برای مدل‌سازی و فرمول‌بندی این شاخص استفاده شده است. از ویژگی‌های این روش اجرا در شبکه‌های مش و شعاعی است.

ارائه الگوریتم بهبودیافته جهش قورباغه مبتنی بر استفاده از یک عملگر جدید جهش به منظور حل مسئله بهینه‌سازی تجدید آرایش فیدرهای توزیع به صورت تک و چندهدفه.

در نظر گرفتن عدم قطعیت مربوط به توان خروجی واحدهای خورشیدی در ارزیابی توابع هدف مسئله بهینه‌سازی.

این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم تعریف مسئله شامل توابع هدف و قیود، مدل‌سازی عدم قطعیت و استراتژی حل مسئله چندهدفه ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری در بخش‌های سوم و چهارم بیان شده است.

۲. فرمول‌بندی مسئله

در این بخش توابع هدف، قیود مسئله، مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت و استراتژی پیشنهادی مورد نظر برای حل مسئله چندهدفه در این مطالعه ارائه شده است.

۲-۱-۲- توابع هدف

توابع هدف مسئله تجدید آرایش شامل حداقل‌سازی تلفات انرژی، انرژی توزیع نشده و حداکثرسازی شاخص پایداری ولتاژ شبکه است.

۲-۱-۱- تلفات انرژی

تلفات انرژی در بازه زمانی بیست و چهار ساعته از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$f_1(X) = \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^{N_{brch}} R_j \times |I_{j,t}|^2 \quad (1)$$

R_j و $I_{j,t}$ به ترتیب، امپدانس و جریان حقیقی خط j ام در زمان t ام هستند. N_{brch} و t بیانگر تعداد خطوط شبکه و بازه زمانی حل مسئله

$$P_{i,t} = \sum_{j=1}^{N_{Bus}} V_{i,t} V_{j,t} Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_{i,t} + \delta_{j,t}) \quad (23)$$

$$Q_{i,t} = \sum_{j=1}^{N_{Bus}} V_{i,t} V_{j,t} Y_{ij} \sin(\theta_{ij} - \delta_{i,t} + \delta_{j,t}) \quad (24)$$

$P_{i,t}$ و $Q_{i,t}$ به ترتیب، توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی شبکه به باس i ام در زمان t ام هستند. $V_{i,t}$ و $\delta_{i,t}$ بیانگر دامنه و زاویه ولتاژ باس i ام در زمان t ام هستند. Y_{ij} و θ_{ij} به ترتیب، اندازه و زاویه ادمیتانس شاخه بین باس‌های i و j هستند.

۳-۲-۲- محدودده مربوط به ولتاژ باس‌ها

$$V_{min} \leq V_{i,t} \leq V_{max} \quad (25)$$

V_{min} و V_{max} بیانگر حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز باس i ام در زمان t ام هستند.

$$|I_{f,i,t}| \leq I_{f,i}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{feeder} \quad (26)$$

$I_{f,i,t}$ و $L_{f,i,t}$ به ترتیب، دامنه جریان در زمان t ام و حداکثر جریان فیدر i ام می‌باشند.

۴-۲-۲- محدودیت ترانسفورماتور

$$|I_{trans,i,t}| \leq I_{tms,i}^{Max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{transformer} \quad (27)$$

$I_{trans,i,t}$ و $I_{tms,i}^{Max}$ به ترتیب، دامنه جریان در زمان t ام و حداکثر جریان قابل قبول ترانسفورمر i ام می‌باشند.

۵-۲-۲- مدل‌سازی مربوط به تولید پراکنده

منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع به دو صورت PV و PQ مدل می‌شوند. از آنجا که سیستم‌های توزیع سه فاز نامتعادل است، منابع تولید پراکنده به دو روش کنترل می‌شوند. زمانی که این منابع به روش PV مدل می‌شوند، به منظور حفظ ولتاژ در محدوده مجاز باید توان راکتیو تولید کنند. در این مطالعه از PQ برای مدل‌سازی منابع تولید پراکنده استفاده شده است [۱۹، ۱۲]:

۶-۲-۲- محدودیت مربوط به واحدهای ذخیره انرژی

در کنار استفاده از منابع تولید پراکنده، اثر واحدهای ذخیره انرژی نیز در مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع لحاظ شده است. طبیعتاً یک مدیریت مناسب بهره‌برداری باعث می‌شود نه پایداری شبکه به خطر بیفتد و نه عمر تجهیزات کاهش یابد [۱۱]. قیود مربوط به واحدهای ذخیره انرژی به شرح زیر می‌باشند.

$$E_{x,h} = E_{x,h-1} + \sigma_{ch,x} P_{ch,x,h} \times \Delta h - \frac{1}{\sigma_{dis,x}} P_{dis,x,h} \times \Delta h \quad (28)$$

$$\Delta h = 1 \text{ hour} \quad x = 1, 2, \dots, N_{ES}$$

$$E_x^{min} \leq E_x^h \leq E_x^{max} \quad (29)$$

$$P_{ch,x,h} \leq P_{ch,x}^{max} \quad (30)$$

$$P_{dis,x,h} \leq P_{dis,x}^{max} \quad (31)$$

$E_{x,h}$ مقدار انرژی ذخیره شده واحد x ام در زمان h ام می‌باشد. $P_{ch,x,h}$ و $P_{dis,x,h}$ بیانگر میزان شارژ و دشارژ واحد x ام در زمان h ام هستند. E_x^{min} و E_x^{max} به ترتیب، حداکثر و حداقل انرژی واحد x ام در زمان

با توجه به روش پخش بار، روابط (۹-۱۰) بدست می‌آیند. سپس رابطه (۱۱) از روابط قبل محاسبه می‌شود:

$$I_{k,t} = \frac{V_{th,t} - V_{k,t}}{R_{th,t} + jX_{th,t}} \quad (9)$$

$$P_{k,t} - jQ_{k,t} = V_{k,t} \times I_{k,t} \quad (10)$$

$$P_{k,t} - jQ_{k,t} = V_{k,t} \times \frac{V_{th,t} - V_{k,t}}{R_{th,t} + jX_{th,t}} \quad (11)$$

رابطه (۱۲) با توجه به روابط قبل بیان می‌شود. ضرایب $B_{k,t}$ و $C_{k,t}$ در روابط (۱۳-۱۴) تعریف شده است. با برقراری شرط $B_{k,t}^2 - 4C_{k,t} \geq 0$ رابطه VSI به صورت رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود.

$R_{th,t}$ و $X_{th,t}$ بیانگر مقاومت و راکتانس تونن از دید باس k ام در زمان t ام هستند. $P_{k,t}$ و $Q_{k,t}$ به ترتیب، توان اکتیو و راکتیو باس k ام در زمان t ام هستند. $V_{k,t}$ و $I_{k,t}$ به ترتیب، ولتاژ و جریان باس k ام در زمان t ام می‌باشند. $V_{th,t}$ بیانگر ولتاژ تونن از دید باس k ام در زمان t ام است.

$$|V_{k,t}|^4 - B_{k,t} |V_{k,t}|^2 + C_{k,t} = 0 \quad (12)$$

$$B_{k,t} = |V_{th,t}|^2 - 2P_{k,t}R_{th,t} - 2Q_{k,t}X_{th,t} \quad (13)$$

$$C_{k,t} = (P_{k,t}^2 + Q_{k,t}^2) \cdot (R_{th,t}^2 + X_{th,t}^2) \quad (14)$$

$$vsi_{k,t} = (|V_{th,t}|^2 - 2P_{k,t}R_{th,t} - 2Q_{k,t}X_{th,t})^2 - 4 \cdot (P_{k,t}^2 + Q_{k,t}^2) \cdot (R_{th,t}^2 + X_{th,t}^2) \quad (15)$$

به منظور برقراری شرط بهره‌برداری پایدار، شاخص VSI باید برای تمام گره‌ها بزرگتر از صفر باشد که در روابط زیر شرح داده شده است. پارامتر N یک عدد بزرگ است (مثلاً ۱۰۰۰۰۰) که به عنوان تابع جریمه (penalty factor) در نظر گرفته شده است.

$$vsi_t = [vsi_{2,t}, vsi_{3,t}, \dots, vsi_{N_{bus_t}}] \quad (16)$$

$$Cvsi_{k,t} = \begin{cases} 0 & vsi_{k,t} > 0 \\ 1 & vsi_{k,t} \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$Cvsi_{k,t} = [Cvsi_{2,t}, cvsi_{3,t}, \dots, Cvsi_{N_{bus_t}}] \quad (18)$$

$$\text{Penalty factor} = N \times \sum (Cvsi_{k,t}) \quad (19)$$

نهایتاً تابع هدف پایداری ولتاژ به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌شود:

$$VSI_t = \frac{1}{\min(vsi)} + \text{penalty factor} \quad (20)$$

$$f_3(x) = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} VSI_t \quad (21)$$

۲-۲-۲- قیود مسئله

۱-۲-۲- شرط شعاعی بودن

قید مربوط به شعاعی بودن شبکه از رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود.

$$N_{branch} = N_{Bus} - N_{source} \quad (22)$$

N_{bus} و N_{source} به ترتیب، بیانگر تعداد باس‌ها و پست‌های شبکه می‌باشند. N_{branch} بیانگر تعداد خطوط شبکه است.

۲-۲-۲- معادلات پخش بار

قید معادلات پخش بار از روابط (۲۳-۲۴) محاسبه می‌شود:

ام می‌باشند. $P_{ch,x}^{max}$ و $P_{dis,x}^{max}$ بیانگر حداکثر میزان شارژ و دشارژ واحد x در زمان h هستند.

۳-۲- مدل‌سازی عدم قطعیت

در این بخش، اثر عدم قطعیت مربوط به توان خروجی واحدهای خورشیدی به‌منظور حل مسئله بهینه‌سازی بررسی شده است:

مدل‌سازی توان واحدهای خورشیدی

از تابع توزیع بتا در رابطه (۳۲) برای مدل‌سازی تابش خورشید با توجه به داده‌های گذشته استفاده شده می‌شود.

$$f_b(s) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot s^{\alpha-1} \cdot (1-s)^{\beta-1} & 0 \leq s \leq 1, \alpha, \beta \geq 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (32)$$

$f_b(s)$ تابع توزیع بتا است، α و β با توجه به داده‌های گذشته تابش خورشید تعیین می‌شوند. در این مطالعه از روش تولید سناریو به منظور مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت [۱۹] استفاده شده است. در این روش شبیه به مونت‌کارلو، با توجه به تعداد پارامترهای عدم قطعیت اعداد تصادفی تولید کرده‌ایم و سپس با استفاده از مکانیزم چرخ گردان رولت متناظر با هر یک از اعداد تصادفی تولیدشده مقدار خطا و احتمال مربوط به هر یک از منابع عدم قطعیت را محاسبه می‌کنیم. با توجه به تعداد بالای سناریوهای ایجادشده در روش تولید سناریو، سرعت حل مسئله کاهش و حجم محاسبات بیشتر می‌شود. به همین منظور مجموعه سناریوها را به گونه‌ای کاهش می‌دهیم که مشخصات مسئله تغییر زیادی نکند. الگوریتم کاهش عقب‌گرد در این مطالعه به منظور حذف برخی از سناریوهای با احتمال‌های نزدیک به هم استفاده شده است [۱۹].

۳-۲-۴- استراتژی حل مسئله چندهدفه و الگوریتم پیشنهادی

۱-۴-۲- استراتژی چندهدفه

در حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، روش بهینگی پارتو به منظور بدست آوردن مجموعه‌ای از جواب‌ها استفاده شده است. مبنای این روش بر اساس مفهوم تسلط است. بردار X_1 بر X_2 غلبه می‌کند، زمانی که شرایط زیر برقرار باشد [۱۳، ۱]:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_i(X_1) \leq f_i(X_2) \quad (33)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{obj}\}, f_j(X_1) < f_j(X_2) \quad (34)$$

از آنجایی که توابع هدف در یک محدوده نیستند مجموعه‌های فازی برای جایگزینی هر تابع هدف با مقدار بین ۰ و ۱ اجرا می‌شوند. تابع عضویت μ_i برای هر تابع هدف به شرح زیر است:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 1 & f_i(X) \leq f_i^{min} \\ 0 & f_i(X) \geq f_i^{max} \\ \frac{f_i^{max} - f_i(X)}{f_i^{max} - f_i^{min}} & f_i^{min} \leq f_i(X) \leq f_i^{max} \end{cases} \quad (35)$$

f_i^{min} و f_i^{max} بیانگر حدود بالا و پایین تابع هدف می‌باشند، این مقادیر با استفاده از بهینه‌سازی هر تابع هدف به‌صورت جداگانه به دست می‌آیند. مقدار تابع عضویت نرمالیزه شده برای هر عضو در مجموعه جواب‌ها از رابطه (۳۶) محاسبه می‌شود [۱۳، ۱۴]:

$$N_{\mu_j} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \beta_k \times \mu_{jk}(x)} \quad (36)$$

n و m به ترتیب تعداد راه‌حل‌های غیر غالب و تعداد توابع هدف هستند. β_k وزن k امین تابع هدف است و بر اساس اهمیت تابع هدف انتخاب می‌شود.

۲-۴-۲- الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه

استراتژی تکاملی در الگوریتم متداول جهش قورباغه [۱۷] بر اساس بهبود موقعیت قورباغه‌هایی با شایستگی پایین است و قورباغه‌هایی با شایستگی بالاتر در فرایند تکاملی شرکت نمی‌کنند. بر همین اساس شانس همگرایی به جواب‌های بهتر کند می‌شود و به اصطلاح الگوریتم در بهینه‌های نسبی گیر می‌کند. حضور قورباغه‌هایی با شایستگی بالاتر در فرایند استراتژی تکاملی موجب بهبود توانایی جستجوی سراسری الگوریتم می‌شود. در الگوریتم بهبود یافته جهش قورباغه، موقعیت قورباغه Δm بر اساس روابط زیر بهبود می‌یابد.

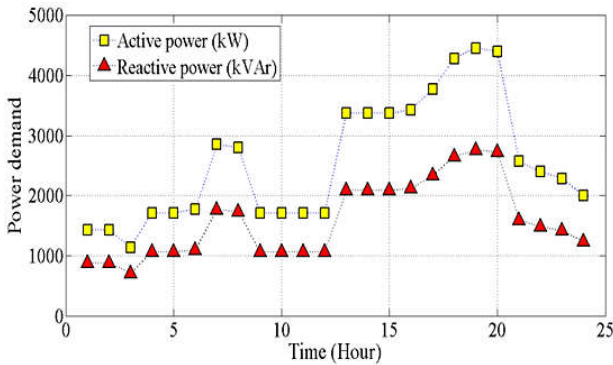
$$D_i^{q+1} = c_1 \cdot r_1^q \cdot d_i^q + c_2 \cdot r_2^q \cdot (X_z^q - X_i^q), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (37)$$

$$X_i^{q+1} = X_i^q + D_i^{q+1} \quad (38)$$

X_z^q قورباغه انتخابی تصادفی از بین قورباغه‌هایی با شایستگی بالا است. r_1 و r_2 اعدادی تصادفی می‌باشند، c_1 و c_2 نیز اعدادی ثابت هستند. D و X در این الگوریتم بیانگر سرعت و موقعیت قورباغه‌ها می‌باشند. فلوجارت الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است.

در ادامه گام به گام الگوریتم پیشنهادی شرح داده شده است:

۱. تولید جمعیت اولیه از قورباغه‌ها با موقعیت تصادفی.
۲. محاسبه مقادیر توابع هدف بر اساس روابط (۱ و ۸ و ۲۱).
۳. محاسبه تابع عضویت برای هر تابع هدف بر اساس رابطه (۳۵).
۴. مقادیر نرمالیزه شده برای تمام ذرات از (۳۶) محاسبه می‌شود.
۵. استفاده از روش بهینگی پارتو به منظور ذخیره جواب‌های غیر غالب در در مخزن مورد نظر برای ذخیره جواب‌ها.
۶. تقسیم ذرات در Q مجموعه بر اساس کاهش برازندگی.
۷. مشخص کردن X_i و X_z در هر مجموعه.
۸. بروزرسانی موقعیت قورباغه Δm بر اساس روابط (۳۷-۳۸)، این کار در تمام مپلکس‌ها انجام می‌شود.
۹. در این مرحله اطلاعات میان تمام مجموعه‌ها رد و بدل می‌شود، از ذرات موجود تمام راه‌حل‌های غیر غالب استخراج و در مجموعه جواب
۱۰. بررسی شرط همگرایی، در این الگوریتم از تعداد ماکزیمم تکرار استفاده شده است.



شکل (۴): پروفیل بار شبکه تست در بیست و چهار ساعت
Fig. (4): Electricity demand of test system in 24-hour

۳-۱- بهینه‌سازی تک‌هدفه

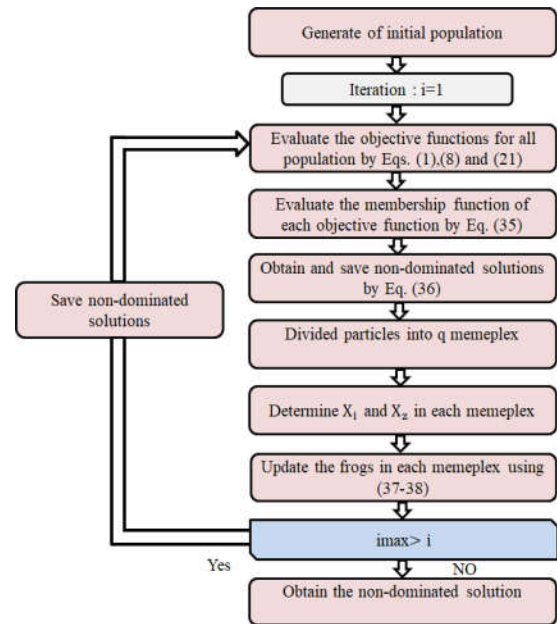
جدول‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل از الگوریتم‌های مختلف برای توابع هدف انرژی توزیع نشده و شاخص پایداری ولتاژ در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی را برای ۲۰ آزمایش بر روی سیستم تست نشان می‌دهد. از مقایسه نتایج جدول ۱ واضح است که الگوریتم پیشنهادی به نتایج بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها رسیده است. همچنین مقدار انرژی توزیع نشده حاصل از الگوریتم پیشنهادی در حدود ۲۱٪ نسبت به مقدار اولیه قبل از تجدید آرایش شبکه کاهش یافته است. با توجه به نتایج جدول ۲ مشخص است که الگوریتم پیشنهادی در بهینه‌سازی شاخص پایداری ولتاژ به نتایج بهتری نسبت به سایر روش‌های تکاملی رسیده است. همچنین مقدار شاخص پایداری ولتاژ حاصل از الگوریتم پیشنهادی در حدود ۱۲٪ نسبت به مقدار اولیه کاهش یافته است. در جدول ۳ مقایسه‌ای بین نتایج هر سه الگوریتم در بهینه‌سازی تابع هدف تلفات انرژی در حضور واحدهای تولید پراکنده و ذخیره انرژی صورت گرفته است. با توجه به نتایج جدول ۳ واضح است که مقدار تلفات انرژی حاصل از روش پیشنهادی در حدود ۳۱٪ نسبت به مقدار اولیه قبل از تجدید آرایش کاهش یافته است.

منحنی همگرایی تلفات انرژی حاصل از الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ واضح است که الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها زودتر به جواب بهینه همگرا شده است.

Table (1): Optimization results of the energy not supplied considering distributed generators, energy storage units and solar photovoltaic arrays

جدول (۱): بهینه‌سازی تابع هدف انرژی توزیع نشده در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

انرژی توزیع نشده (پریونیت بر روز)				روش‌ها
انحراف معیار	بدترین	میانگین	بهترین	
۰.۱۰۴/۰	۶۷۷/۰	۶۶۴/۰	۶۵۲/۰	اجتماع ذرات
۰.۰۶۲/۰	۶۵۲/۰	۶۴۱/۰	۶۳۸/۰	جهش قورباغه
۰.۰۰/۰	۶۳۸/۰	۶۳۸/۰	۶۳۸/۰	روش پیشنهادی

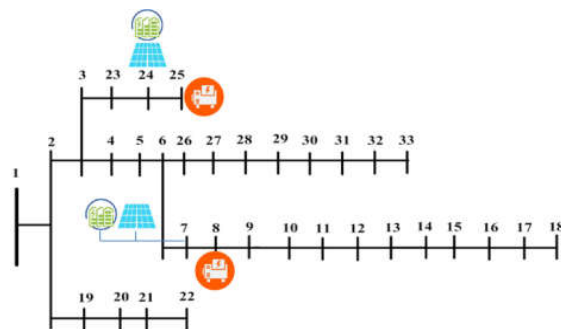


شکل (۲): فلوجارت الگوریتم بهبودیافته جهش قورباغه

Fig. (2): Flowchart of modified shuffled frog leaping algorithm

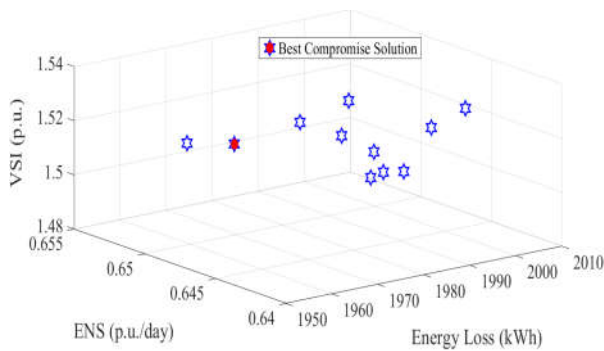
۳- نتایج شبیه‌سازی

برای بهینه‌سازی مسئله تجدید آرایش فیدرهای توزیع در چارچوب پویا از شبکه تست ۳۳ باسه [۲۰] استفاده شده است. در این بخش نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج الگوریتم‌های اجتماع ذرات [۲۱] و جهش قورباغه [۱۷] مقایسه شده است. در سیستم تست ۳۳ باسه ۲ واحد منبع تولید پراکنده با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات در باس‌های ۷ و ۲۴ قرار داده شده است. ۲ واحد خورشیدی با ظرفیت ۳۰۰۰ کیلووات مربوط به واحدهای ذخیره انرژی ۳۰۰ کیلوواتی در باس‌های ۴۱ و ۸۸ نصب شده است. همچنین ۳۰ سناریو به منظور مدل‌سازی عدم قطعیت توان خروجی واحدهای خورشیدی در نظر گرفته شده است. شکل‌های ۳ و ۴، دیاگرام شبکه تست و پروفیل بار را نشان می‌دهد. مقدار تلفات انرژی، شاخص پایداری ولتاژ و انرژی توزیع نشده قبل از تجدید آرایش به ترتیب ۸۵/۲۵۶۹ کیلووات-ساعت، ۶۸۰/۱ پریونیت و ۷۷/۰ پریونیت بر روز می‌باشد. تعداد جمعیت اولیه، مجموعه و حداکثر تعداد تکرار ۱۵۰۰ و ۵ و ۳۰ برای الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده است. مقدار ولتاژ و توان مبنا در شبکه تست به ترتیب ۶۶/۱۲ کیلوولت و ۱۰۰ کیلووات می‌باشد.



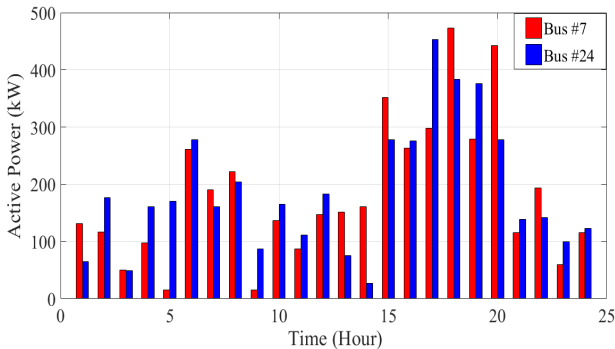
شکل (۳): دیاگرام تک خطی شبکه ۳۳ باسه

Fig. (3): Single-line diagram of 33 bus test system



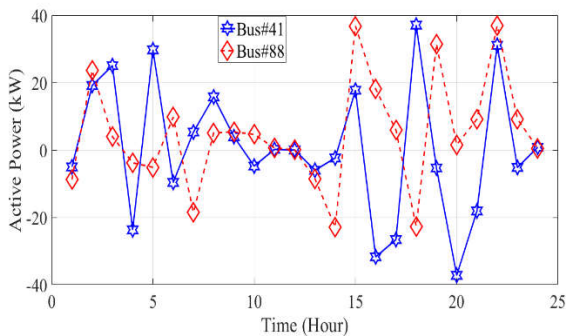
شکل (۶): جبهه بهینه پارتو برای مسئله بهینه سازی ۳ هدفه

Fig. (6): Three-dimension Pareto-front for optimization problem



شکل (۷): توان خروجی بهینه منابع تولید پراکنده در بیست و چهار ساعت

Fig. (7): Output power of distributed generators in the 24-hour



شکل (۸): توان خروجی بهینه واحدهای ذخیره انرژی در بیست و چهار ساعت

Fig. (8): Output power of energy storage units in the 24-hour

با توجه به شکل ۴ مقدار به دست آمده برای هر تابع هدف در جواب مصالحه (با رنگ قرمز مشخص شده) به ترتیب ۴۵/۱۹۵۹ کیلووات ساعت، ۵۲۷/۱ پریونیت و ۶۴۵/۰ پریونیت بر روز هستند. با توجه به مقدار هر تابع هدف در جواب مصالحه واضح است که مقدار تلفات انرژی، شاخص پایداری ولتاژ و انرژی توزیع نشده حاصل از روش پیشنهادی در حدود ۳۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ نسبت به مقدار اولیه قبل از تجدید آرایش کاهش یافته‌اند.

Table (2): Optimization results of the voltage stability index considering distributed generators, energy storage units and solar photovoltaic arrays

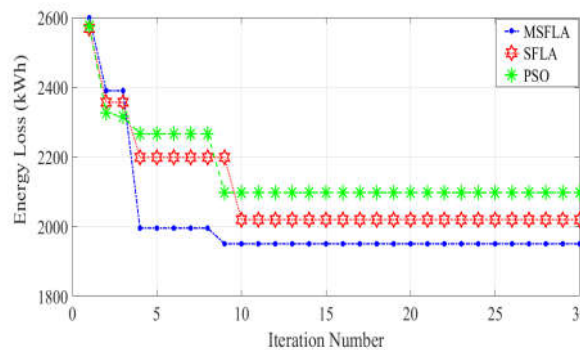
جدول (۲): بهینه‌سازی تابع هدف شاخص پایداری ولتاژ در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

روش‌ها	شاخص پایداری ولتاژ (پریونیت)		
	انحراف معیار	بدترین	بهترین
اجتماع ذرات	۰.۱۱/۰	۵۵۶/۱	۵۴۳/۱
جبهش قورباغه	۰.۰۷۸/۰	۵۴۵/۱	۵۳۲/۱
روش پیشنهادی	۰.۰۶۵/۰	۵۱۹/۱	۵۰۷/۱

Table (3): Optimization results of the energy loss considering distributed generators, energy storage units and solar photovoltaic arrays

جدول (۳): بهینه‌سازی تابع هدف تلفات انرژی در حضور تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی

روش‌ها	تلفات انرژی (کیلووات ساعت)		
	انحراف معیار	بدترین	بهترین
اجتماع ذرات	۸۵/۲۹	۲۳۵/۲۱۸۹	۱۲۰/۲۱۴۴
جبهش قورباغه	۴۳/۲۵	۲۰۰/۲۰۹۵	۱۵/۲۰۶۰
روش پیشنهادی	۸۹/۲۱	۳۴۷/۱۹۹۵	۸۱۹/۱۹۶۵



شکل (۵): منحنی همگرایی بهینه‌سازی برای تلفات انرژی

Fig. (5): Convergence curve for energy loss optimization

۲-۳- بهینه سازی چند هدفه

به منظور بهینه‌سازی مسئله چندهدفه در این مطالعه، جبهه پارتو حاصل از الگوریتم پیشنهادی در شکل ۶ نشان داده شده است. آرایش بهینه سوئیچ‌ها، توان خروجی واحدهای تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی حاصل از الگوریتم پیشنهادی به ترتیب در جدول ۴ و شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. مقادیر منفی و مثبت در شکل به ترتیب دشارژ شدن و شارژ شدن واحدهای ذخیره انرژی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۶ واضح است که بهترین مقدار به دست آمده برای هر تابع هدف در جواب مصالحه (با رنگ قرمز مشخص شده) نزدیک به مقدار بهینه همان تابع هدف در جبهه پارتو مربوط است. اختلاف بین مقدار هر تابع هدف در جواب مصالحه با مقدار بهینه همان تابع هدف در جبهه پارتو کمتر از ۴ درصد است که بیانگر توانایی الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله چندهدفه است.

۴- نتیجه گیری

هدف از این مقاله، حل مسئله بهینه سازی چند هدفه تجدید آرایش پویا فیدرهای توزیع در حضور واحدهای تولید پراکنده و ذخیره انرژی با در نظر گرفتن منابع عدم قطعیت است. روش ارائه شده برای حل مسئله بهینه سازی تک و چندهدفه، الگوریتم بهبود یافته جبهه پارتو است. توابع هدف مورد نظر در این مطالعه شامل انرژی توزیع نشده، تلفات انرژی و شاخص پایداری ولتاژ است. با توجه به نتایج شبیه سازی برتری روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش های تکاملی در بهینه سازی تک و چندهدفه اثبات می شود. نتایج مهم مطالعه را می توان به صورت زیر ارائه کرد:

الگوریتم پیشنهادی قادر به حل مسائل تک و چندهدفه بدون در نظر گرفتن پیچیدگی های آنها است.

اثر منابع تولید پراکنده و ذخیره انرژی منجر به کاهش تلفات، انرژی توزیع نشده و بهبود شاخص پایداری ولتاژ شبکه شده است.

در نظر گرفتن شاخص پایداری ولتاژ در کنار انرژی توزیع نشده به عنوان توابع هدف مسئله یک شرایط ایمن و قابل قبول را برای بهره برداری از شبکه ایجاد می کند.

Table (4): The optimum switching scheme obtained by proposed algorithm

جدول (۴): آرایش بهینه سوئیچ ها حاصل از الگوریتم پیشنهادی

سطوح بار	سوئیچ های باز شده				
	Sw1	Sw2	Sw3	Sw4	Sw5
۱	۳۳	۳۴	۱۱	۱۵	۲۸
۲	۶	۱۴	۸	۱۷	۲۸
۳	۶	۱۴	۸	۱۷	۳۷
۴	۷	۱۴	۹	۳۶	۳۷
۵	۶	۱۴	۹	۳۶	۲۸
۶	۶	۱۴	۱۰	۱۷	۲۸
۷	۶	۱۴	۹	۱۷	۲۸
۸	۶	۱۴	۱۰	۳۲	۲۸
۹	۷	۱۴	۱۰	۱۷	۲۸
۱۰	۳۳	۱۴	۳۵	۳۲	۲۸
۱۱	۶	۱۴	۳۵	۳۲	۲۸
۱۲	۷	۱۴	۱۰	۱۷	۵
۱۳	۶	۱۴	۱۱	۱۷	۲۸
۱۴	۶	۱۴	۱۱	۳۲	۲۸
۱۵	۳۳	۳۴	۱۰	۳۲	۲۸
۱۶	۷	۳۴	۱۱	۱۷	۲۸
۱۷	۷	۱۴	۸	۳۲	۲۸
۱۸	۳۳	۳۴	۹	۳۲	۴
۱۹	۷	۳۴	۸	۳۶	۲۸
۲۰	۶	۱۴	۱۰	۳۲	۵
۲۱	۶	۱۴	۸	۳۶	۲۸
۲۲	۷	۱۴	۳۵	۱۷	۲۲
۲۳	۶	۱۴	۹	۳۲	۲۸
۲۴	۷	۱۴	۱۰	۳۲	۳۷

References

- [1] A. Azizivahed, H. Narimani, E. Naderi, M. Fathi, M. R. Narimani, "A hybrid evolutionary algorithm for secure multi-objective distribution feeder reconfiguration", Energy, Vol. 138, pp. 355-373, Nov. 2017 (doi: 10.1016/j.energy.2017.07.102).
- [2] D.S. Rani, N. Subrahmanyam, M. Sydulu, "Multi-objective invasive weed optimization—an application to optimal network reconfiguration in radial distribution systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 37, pp. 932-942, Dec. 2015 (doi:10.1016/j.ijepes.2015.06.020).
- [3] T. Niknam, "An efficient hybrid evolutionary algorithm based on PSO and ACO for distribution feeder reconfiguration", European Transactions on Electrical Power, Vol. 20, No. 5, pp. 575-590, July 2010 (doi:10.1002/etep.339).
- [4] F. Alonso, D. Q. Oliveira, A. Z. Souza, "Artificial immune systems optimization approach for multiobjective distribution system reconfiguration", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 30, No. 2, pp. 840-847, March 2015 (doi: 10.1109/TPWRS.2014.2330628).
- [5] V. Roberge, M. Tarbouchi, F. Okou, "New encoding based on the minimum spanning tree for distribution feeder reconfiguration using a genetic algorithm", Proceeding of the IEEE/ICEIT, Tangiers, Morocco May 2016 (doi: 10.1109/EITech.2016.7519574).
- [6] A. Roosta, H.-R. Eskandari, M.-H. Khooban, "Optimization of radial unbalanced distribution networks in the presence of distribution generation units by network reconfiguration using harmony search algorithm", Neural Computing and Applications, Vol. 31, No. 11, pp. 7095-7109, 2019 (doi: 10.1007/s00521-018-3507-0).
- [7] A. Parizad, H. R. Baghaee, A. Yazdani, G. B. Gharehpetian, "Optimal distribution systems reconfiguration for short circuit level reduction using PSO algorithm", Proceeding of the IEEE/PECI, Feb. 2018, Champaign, IL, USA (doi:10.1109/PECI.2018.8334976).

- [8] A. S. Reddy, M. D. Reddy, Y. K. Reddy, "Feeder reconfiguration of distribution systems for loss reduction and emissions reduction using MVO algorithm", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 1-8, 2018.
- [9] A. Landeros, S. Koziel, M. F. Abdel-Fattah, "Distribution network reconfiguration using feasibility-preserving evolutionary optimization", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 7, No. 3, pp. 589-598, 2019 (doi:10.1007/s40565-018-0480-7).
- [10] R. Pegado, Z. Naupari, Y. Molina, C. Castillo, "Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO", *Electric Power Systems Research*, Vol. 169, pp. 206-213, April 2019 (doi:10.1016/j.epsr.2018.12.030).
- [11] A. Azizivahed, E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi, M. R. Narimani, "A new bi-objective approach to energy management in distribution networks with energy storage systems". *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 1, pp. 65-64, Jan. 2018 (doi:10.1109/TSTE.2017.2714644).
- [12] A. Azizivahed, H. Narimani, M. Fathi, E. Naderi, H. R. Safarpour M. R. Narimani, "Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration in automated distribution systems", *Energy*, Vol. 147, pp. 896-914, March 2018 (doi:10.1016/j.energy.2018.01.111).
- [13] E. Mahboubi-Moghaddam, M. R. Narimani, M. H. Khooban, A. Azizivahed, M. J. Sharifi, "Multi-objective distribution feeder reconfiguration to improve transient stability, and minimize power loss and operation cost using an enhanced evolutionary algorithm at the presence of distributed generations", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. pp. 35-43, March 2016 (doi: /10.1016/j.ijepes. 2015.09.007).
- [14] H. Lotfi, R. Ghazi, M. B. Naghibi-Sistani, "Multi-objective dynamic distribution feeder reconfiguration along with capacitor allocation using a new hybrid evolutionary algorithm", *Energy Systems*, pp. 1-31, 2019 (doi: 10.1007/s12667-019-00333-3).
- [15] A. Ameli, A. Ahmadifar, M. H. Shariatkhan, M. Vakilian, M. R. Haghifam, "A dynamic method for feeder reconfiguration and capacitor switching in smart distribution systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 85, pp. 200-211, Feb. 2017 (doi: 10.1016/j.ijepes.2016.09.008).
- [16] A. Azizivahed, A., et al. "Dynamic feeder reconfiguration in automated distribution network integrated with renewable energy sources with respect to the economic aspect", *Proceeding of the IEEE/ISGT, Chengdu, China, China*, May 2019 (doi: 10.1109/ ISGT-Asia.2019.8881503)
- [17] M. Eusuff, K. Lansey, F. Pasha, "Shuffled frog-leaping algorithm: A memetic meta-heuristic for discrete optimization", *Engineering Optimization*, Vol. 38, No. 2, pp. 129-154, Jan. 2007 (doi:10.1080/03052150500384759).
- [18] M. Chakravorty, D. Das, "Voltage stability analysis of radial distribution networks", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 23, No. 2, pp. 29-135, Feb. 2001 (doi:10.1016/S0142-0615(00)00040-5).
- [19] T. Niknam, A. Kavousifard, J. Aghaei, "Scenario-based multiobjective distribution feeder reconfiguration considering wind power using adaptive modified particle swarm optimisation", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 6, No. 4, pp. 236-247, July 2012 (doi:10.1049/iet-rpg.2011.0256).
- [20] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", *IEEE Trans. on Power delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989 (doi:10.1109/61. 25627).
- [21] J. Kennedy, R. Eberhart, "Particle swarm optimization", *Proceeding of the IEEE/ICNN, Perth, WA, Australia, Australia*, Dec. 1995 (doi:10.1109/ICNN.1995. 488968).

