

Optimal reconfiguration and load recovery of the distribution system following the faults considering the uncertainties of distributed generations and loads and using electric vehicle parking lots to improve the system reliability

Shabnam Rezaei, Alireza Saffarian*, Hossein Farzin

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
E-mails: Sh.rezaei9372@gmail.com; a.saffarian@scu.ac.ir; farzin@scu.ac.ir

Short Abstract

One of the most important goals in the planning and operation of distribution systems is to provide adequate and suitable reliability for networks. Renewable energy sources can contribute to the consumers' demand and optimal operation of the system. However, the uncertainty of the output power of these resources can make it difficult to meet the demand following the faults. On the other hand, in post-fault conditions electric vehicle parking lots can help improve the reliability of the system by injecting the excess energy stored in the electric vehicles. In this paper, a stochastic framework is considered for the generation of distributed energy resources and load demand of a radial distribution system, and an algorithm is presented for optimal reconfiguration and load recovery after the occurrence of a fault in the system. In addition, the energy stored in electric vehicle parking lots is used to improve the load recovery strategy to reduce the load shedding amount. Therefore, the optimization problem is formulated by addressing the common uncertainties of renewable energy resources and electric loads, and to solve the problem of load recovery and reconfiguration of the system in post-fault condition, the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm with the TRIBE concept is used. Also, an encoding scheme is used to ensure that the solution is optimal. Simulation results of the proposed scheme show that system reconfiguration and load recovery after the fault along with the use of electric vehicle parking lots can improve the reliability of the system.

Keywords

Renewable energy sources, Electric vehicle parking, TRIBE-PSO, Distribution system reliability.

4- Short Paper (4-5 lines)

The use of distributed generations on the consumer side in distribution networks can help to meet the electrical demand of consumers. However, the fluctuations of output power of renewable energy sources as distributed generations should be considered in detailed planning of the power system. When a fault occurs in a distribution network, the loads can be recovered by reconfigurations. By reconfiguration, the amount of load shedding at the time of failure is reduced and the reliability of the system is increased. Also, the presence of electric vehicle parking lots in the distribution system can help to improve the reliability of the grid. The electric vehicles in the parking lots reduce the amount of load shedding by injecting their excess energy into the power grid when a fault occurs.

5- Proposed Work and Methodology (including comparison, simulation/experimental results, and discussion)

In the proposed framework, the Particle Swarm Algorithm (PSO) with the TRIBE concept is used for system reconfiguration and optimal load recovery. Also, an encryption scheme is used to ensure that the solution is optimal. In this paper, feeder failure is considered as the system failure. To evaluate the reliability of the system, the sequential Monte Carlo simulation technique is used. First, scenarios related to time-varying load demand, and generation power of wind turbines and solar panels are determined based on past data. In the next step, the probability of a fault event in different feeders of the system is considered. If a fault is detected in one of the feeders, the duration of the system interruption is evaluated. Next, reconfiguration and load recovery are performed, and reliability is increased by injecting excess energy from electric vehicles into the network.

6- Conclusion (4-5 lines)

In this paper, an algorithm is proposed for optimal system reconfiguration and load recovery when a fault occurs in the distribution system. The proposed method is based on the PSO algorithm with the TRIBE concept combined with an encryption scheme and makes use of the electric vehicle parking lots to reduce the load shedding amount and improve the system reliability. Meanwhile, the uncertainties of renewable energy sources and electric loads are considered. Numerical results obtained for various fault conditions reveal that the proposed method is effective and the electric vehicle parking lots improve the SAIDI and SAIFI reliability indexes of the system.

پیکربندی مجدد و بازیابی بهینه بار سیستم توزیع پس از وقوع خطا با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تولید پراکنده و بارها و استفاده از پارکینگ خودروهای الکتریکی برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم

شبنم رضائی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

علیرضا صفاریان

دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

حسین فرزین

دانشیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

چکیده

یکی از مهمترین اهداف در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های توزیع، ایجاد قابلیت اطمینان کافی و مناسب برای شبکه‌ها است. منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان منابع تولید پراکنده می‌توانند به تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان و بهره‌برداری بهینه سیستم کمک زیادی کنند. با این حال، عدم قطعیت توان خروجی این منابع می‌تواند تأمین تقاضا پس از وقوع خطا را با مشکل روبه‌رو سازد. از سوی دیگر، پس از وقوع خطا در سیستم، پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی می‌توانند با تزریق انرژی مازاد ذخیره شده در خودروهای الکتریکی به بهبود قابلیت اطمینان سیستم کمک کنند. در این مقاله، یک چارچوب تصادفی برای تولید منابع تولید پراکنده و تقاضای بار یک سیستم توزیع در نظر گرفته شده و الگوریتمی برای پیکربندی مجدد و بازیابی بهینه بار پس از وقوع خطا در سیستم ارائه شده است. علاوه بر این، امکان استفاده از انرژی ذخیره شده در پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی برای بهبود استراتژی بازیابی بار و کاهش قطع بار در نظر گرفته شده است. بدین منظور، مسئله بهینه‌سازی با پرداختن به عدم قطعیت‌های رایج منابع تجدیدپذیر و بار الکتریکی فرموله شده است و برای حل مسئله بازیابی بار و پیکربندی مجدد سیستم بعد از وقوع خطا، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) با مفهوم TRIBE استفاده شده است. همچنین، از یک طرح رمزگذاری برای اطمینان از بهینه بودن راه‌حل استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی طرح پیشنهادی نشان می‌دهند که پیکربندی مجدد سیستم و بازیابی بار پس از وقوع خطا به همراه استفاده از پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی می‌تواند سبب بهبود قابلیت اطمینان سیستم شوند.

کلمات کلیدی

منابع انرژی تجدیدپذیر، پارکینگ خودروهای الکتریکی، TRIBE-PSO، قابلیت اطمینان سیستم توزیع.

نام نویسنده مسئول: علیرضا صفاریان

ایمیل نویسنده مسئول: a.saffarian@scu.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

۱- مقدمه

اطمینان سیستم انجام شده است. در [۵] مشارکت واحدها در یک شبکه انتقال با در نظر گرفتن محدودیت‌های انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان در حضور منابع تجدیدپذیر و ذخیره‌سازی انرژی، بررسی شده است. در [۶] قابلیت اطمینان یک ریزشبکه در حضور توربین‌های بادی و فتوولتائیک به‌عنوان منابع انرژی تجدیدپذیر با تعریف شاخص‌های جدید قابلیت اطمینان براساس در دسترس بودن انرژی‌های تجدیدپذیر برای بازیابی قطعی‌های سیستم، بررسی شده است. مرجع [۷] یک مدل جدید خطی مبتنی بر توپولوژی متغیر شبکه‌های توزیع عملی، با در نظر گرفتن واحدهای تولید پراکنده تجدیدپذیر برای بازیابی بخشی از بارهای قابل بازیابی در حالت جزیره‌ای به‌منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم ارائه کرده است. در [۸] شاخص‌های مختلف قابلیت اطمینان سیستم براساس مکانیزم جستجوی بهینه‌سازی با روش‌های پارامترسازی توپولوژیکی برای متغیرهای غیربهینه مقایسه شده‌اند. در [۹] یک رویکرد مبتنی بر شبیه سازی مونت کارلو برای بررسی تأثیر ماهیت تصادفی سلول‌های خورشیدی و

عوامل بی‌شماری از جمله افزایش بی‌سابقه تقاضای توان، آزادسازی بازارهای انرژی، کمبود منابع انرژی، اتلاف توان در انتقال انرژی از طریق خطوط طولانی، همراه با نگرانی‌های زیست‌محیطی و نیاز به تولید کم کربن، باعث تجدیدنظر در روش تولید و توزیع انرژی بین مصرف‌کنندگان شده است. امروزه تولید انرژی پراکنده به روندی جدید در فناوری‌های تولید انرژی تبدیل شده است [۱]. با افزایش تدریجی نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر، تصادفی بودن و نوسانات توان خروجی این منابع، سبب عملکرد نامطمئن شبکه توزیع می‌شود [۲-۳]. توانایی سیستم‌های قدرت برای تأمین برق کافی و با کیفیت مناسب برای مصرف‌کنندگان عموماً قابلیت اطمینان نامیده می‌شود [۴]. وجود منابع تولید پراکنده در شرایط عادی، سیستم را پشتیبانی می‌کند. همچنین، در زمان‌های احتمالی رخداد خطا، قابلیت اطمینان سیستم را افزایش می‌دهند. مطالعات مختلفی برای بررسی تأثیر منابع تولید پراکنده بر قابلیت

سیستم‌های توزیع معمولی در عمل، با حاشیه کافی بین ظرفیت عرضه و حداکثر تقاضای بار برای تأمین مصرف‌کنندگان، بدون در نظر گرفتن هیچ‌گونه پشتیبانی از طرف منابع تولید پراکنده طراحی می‌شوند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به‌عنوان منابع تولید پراکنده، می‌تواند به بازیابی بار و افزایش قابلیت اطمینان شبکه بعد از وقوع خطا کمک کند. تولیدات منابع انرژی تجدیدپذیر دارای عدم قطعیت هستند. در نظر نگرفتن عدم قطعیت خروجی منابع تجدیدپذیر و تقاضا در شبکه‌های توزیع و تأثیر آن‌ها بر کلیدزنی‌ها، منجر به راه‌حل‌های غیر واقعی و کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. راه‌حل‌های غیر واقعی سبب می‌شود در زمان خطا مصرف‌کنندگان کم‌تری بازیابی شوند یا مصرف‌کنندگان بازیابی شده ممکن است به دلیل عدم تطابق بین تولید واقعی و تقاضای بار، وقفه‌های بیشتری را تجربه کنند. علاوه بر منابع انرژی تجدیدپذیر،

در این مقاله، فرمول‌بندی بهینه‌سازی فرآیند بازیابی با هدف به حداقل رساندن کل مدت وقفه و خاموشی مصرف‌کننده انجام شده‌است. اگر مدت خاموشی مصرف‌کننده در هر رویداد خطا به حداقل برسد، قابلیت اطمینان در سمت مصرف‌کننده حداکثر می‌شود. بنابراین، میانگین مدت وقفه سیستم (SAIDI) به‌عنوان شاخصی برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم محاسبه می‌شود. در این مقاله، به حداقل رساندن مدت وقفه از طریق بازیابی بار انجام می‌شود. سیستم مورد مطالعه یک سیستم ۳۳ شینه (مطابق شکل ۱) است که بازیابی بارهای آن پس از وقوع خطا، از طریق کلیدزنی بهینه‌شده‌های ۲۱-۸،

این مقاله	[۱۷]	[۱۶]	[۱۵]	[۱۴]	[۱۳]	[۱۲]	[۱۱]	[۱۰]	[۹]	[۸]	[۷]	[۶]	[۵]	چارچوب‌ها
✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	پیکربندی مجدد و بازیابی بار پس از خطا
✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	در نظر گرفتن حضور منابع تجدیدپذیر در شبکه
✓	-	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	✓	-	✓	در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر
✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	در نظر گرفتن عدم قطعیت بار الکتریکی
✓	-	-	-	✓	✓	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی
✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان
✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	بررسی تأثیر وجود پارکینگ خودروی الکتریکی بر قابلیت اطمینان سیستم
✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی TRIBE-PSO

خودرو، برنامه‌ریزی نشده در نظر گرفته می‌شود، که با $Q_{ev_i}^r$ نشان داده شده‌است. بنابراین، با توجه به توضیحات ذکر شده رابطه (۵) را می‌توان برای باتری خودروهای الکتریکی در نظر گرفت [۱۸].

$$Q_{ev_i} = Q_{ev_i}^v + Q_{ev_i}^d + Q_{ev_i}^r \quad (۵)$$

در این مقاله، وضعیت انرژی باتری یک خودرو برای ما اهمیتی ندارد، بلکه مجموع انرژی باتری‌های خودروهای الکتریکی یک پارکینگ (نظیر پارکینگ j ام) برای ما مهم است، که توسط رابطه (۶) محاسبه شده‌است.

$$Q_{PEV_j} = \sum_{i=1}^I Q_{ev_i} \quad (۶)$$

براساس داده‌های نظرسنجی ملی خانواده‌های آمریکا، خودروهای الکتریکی روزانه مسافت d را با توجه به تابع توزیع نرمال لگ به صورت رابطه (۷) طی می‌کنند [۱۸].

$$f(d) = \frac{1}{d\sigma_v\sqrt{\pi}} e^{-\left(\frac{(\ln d - \mu_v)}{\sigma_v}\right)^2} \quad (۷)$$

که در آن، μ_v و σ_v به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد هستند. همچنین، روابط (۸) و (۹) مربوط به شارژ و دشارژ هر پارکینگ خودروهای الکتریکی در سیستم با گام زمانی یک ساعته هستند.

$$\sum_{t=1}^T \frac{P_{PEV_j,t}^{dch}}{\eta_{PEV_j}^{dis}} = \sum_{t=1}^I Q_{ev_i}^d \quad (۸)$$

$$\sum_{t=1}^T \eta_{PEV_j}^{ch} P_{PEV_j,t}^{ch} = \sum_{i=1}^I (Q_{ev_i}^v + Q_{ev_i}^d + Q_{ev_i}^r) \quad (۹)$$

راندمن شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی هر پارکینگ به ترتیب به صورت $0 < \eta_{ch} < 1$ و $0 < \eta_{dis} < 1$ است.

در رابطه (۱۰)، $SOC_{PEV_j,t}$ نشان‌دهنده مقدار انرژی ذخیره شده در هر پارکینگ در زمان t است و $SOC_{PEV_j,t}^v$ انرژی مورد استفاده برای سفر در زمان t است:

$$SOC_{PEV_j,t} = SOC_{PEV_j,t-1} + \eta_{PEV_j}^{ch} \times P_{PEV_j,t}^{ch} - SOC_{PEV_j,t}^v - \frac{1}{\eta_{PEV_j}^{dis}} \times P_{PEV_j,t}^{dis} \quad (۱۰)$$

۲-۵ - محدودیت ظرفیت مربوط به DG ها و پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی در فرآیند بازیابی

مجموع بارهای بازیابی شده توسط DG ها و پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی نباید از ظرفیت آن‌ها در هر مرحله زمانی t تجاوز کند. این محدودیت توسط رابطه (۱۱) نشان داده شده‌است.

$$P_{DG,t} + P_{PEV_j,t}^{dis} \geq \sum_{n \in \beta_t} B_{t,n} P_{t,n} \quad (۱۱)$$

که در آن، β_t مجموعه‌ای از نقاط بار است که در مرحله زمانی t بازیابی می‌شود و $P_{t,n}$ ظرفیت مورد نیاز در نقطه بار n در هر مرحله زمانی t است. لازم به ذکر است، در صورتی که مجموع توان خروجی DG ها و میزان دشارژ پارکینگ خودروهای الکتریکی نسبت به بار نقطه n در دوره زمانی t بیشتر باشد، از این مازاد توان برای بازیابی استفاده می‌شود.

۲-۶ - محدودیت ظرفیت یک فیدر

ظرفیت $S_{fd_i} (kVA)$ یک فیدر در هر مرحله زمانی t ، نباید از ظرفیت نامی آن $S_{fd_i} (kVA)$ تجاوز کند [۱۹]. این محدودیت توسط معادله (۱۲) نشان داده شده‌است.

$$S_{fd_i} \leq S_{fd_i} \quad (۱۲)$$

۲-۷ - محدودیت زمانی برای کلیدزنی

در این مقاله، مدت زمان هر کلیدزنی 0.4 ثانیه در نظر گرفته شده - است. بنابراین، تفاوت زمانی بین دو کلیدزنی متوالی نباید کمتر از حداقل

0.4 ثانیه باشد. تابع هدف f که منجر به پیکربندی مجدد و کلیدزنی بهینه می‌شود، به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$f = \min \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N (1 - B_{t,n}) L_n \quad (۱)$$

که در آن، T کل ساعات وقفه ناشی از یک رویداد خطای سیستم، N تعداد کل گره‌های خارج از مدار سیستم، و $B_{t,n}$ یک عدد باینری است که وضعیت بازیابی نقطه بار n در زمان t را نشان می‌دهد. اگر $B_{t,n}$ برابر یک باشد، به این معنی است که نقطه بار n بازیابی شده‌است، در غیر این صورت $B_{t,n} = 0$ است. L_n تعداد مشترکین در نقطه بار n است. تعداد کل کلید-های خارج از مدار را می‌توان با M نشان داد. بر این اساس، SW یک ماتریس $M \times T$ است، که وضعیت کلیدها را در هر مرحله زمانی t نشان می‌دهد. ماتریس SW به صورت رابطه (۲) است:

$$SW = \begin{bmatrix} SW_{1,1} & SW_{1,2} & \dots & SW_{1,T} \\ SW_{2,1} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & SW_{m,t} & \vdots \\ SW_{M,1} & SW_{M,2} & \dots & SW_{M,T} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

برای بازیابی سیستمی که واحدهای DG و پارکینگ خودروهای الکتریکی را در بر می‌گیرد، محدودیت‌های موجود در فرمول بهینه‌سازی به صورت زیر است:

۲-۲ - محدودیت توپولوژی سیستم

یک نقطه بار زمانی می‌تواند بازیابی شود که گره مرتبط با آن بازیابی شود و کلید بین نقطه بار و گره مورد نظر بسته شود. محدودیت ذکر شده را می‌توان به صورت رابطه (۳) بیان کرد:

$$B_{n,t} \leq SW_{j,t} B_{m,t} \quad (۳)$$

که در آن، $SW_{j,t}$ وضعیت باینری کلید j ام در مرحله زمانی t است.

۲-۳ - محدودیت ظرفیت‌های DG غیر تجدیدپذیر

در این مقاله، ۴ نوع DG در نظر گرفته شده‌است، که DG های ۱ و ۲ به ترتیب از نوع توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی هستند، درحالی که DG های ۳ و ۴ از نوع انرژی‌های غیر تجدیدپذیر هستند. بنابراین ظرفیت تولیدی آن‌ها باید در یک محدوده مشخص باشد و از این بازه تجاوز نکنند. این امر توسط قید ذکر شده در رابطه (۴) تضمین می‌شود:

$$0 \leq P_{DG,t} \leq P_{DG}^{\max} \quad \forall DG \in \{3, 4\} \quad (۴)$$

۲-۴ - مدل‌سازی رفتار حمل‌ونقل و باتری پارکینگ خودروهای الکتریکی

هدف اصلی صاحبان خودروهای الکتریکی از خرید این خودروها، تجربه سفر راحت است. صاحبان خودروهای الکتریکی می‌توانند براساس ظرفیت باتری و انرژی اضافی خود بعد از حمل‌ونقل، در مورد استفاده از این انرژی اضافی تصمیم‌گیری کنند. انرژی اضافی خودروهای الکتریکی را می‌توان در زمان وقوع خطا در سیستم و ایجاد خاموشی برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم استفاده کرد. فرض کنید صاحب خودروی الکتریکی i یک EV با ظرفیت باتری Q_{ev_i} دارد و یک روز کامل در جاده انرژی $Q_{ev_i}^v$ را مصرف می‌کند. اگر انرژی اضافی در باتری خودروی الکتریکی وجود داشته‌باشد، این انرژی از طریق پارکینگ می‌تواند در سیستم مصرف و تخلیه شود. فرض کنید انرژی اضافی تخلیه شده در افق زمانی برنامه‌ریزی برابر $Q_{ev_i}^d$ باشد. علاوه بر این، درصدی از انرژی باتری به‌منظور جلوگیری از تخلیه کامل باتری

در این رابطه v سرعت باد بوده و پارامترهای c و k به ترتیب پارامتر مقیاس و ضریب شکل تابع نامیده می‌شوند. $f(v)$ احتمال وقوع توان مربوط به سرعت v می‌باشد.

۲-۱۲ - مدل سازی عدم قطعیت توان PV

مدل سازی توان PV بر اساس تابع توزیع بتا است [۲۲]. تابع توزیع احتمال چگالی توان خورشیدی بر اساس روابط (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شود.

$$f(P_i^{PV}) = \frac{1}{B(y_i, z_i)} \left(\frac{P_i^{PV}}{P_{max}^{PV}} \right)^{y_i-1} \left(1 - \frac{P_i^{PV}}{P_{max}^{PV}} \right)^{z_i-1} \quad (16)$$

$$\begin{cases} B(y_i, z_i) = \frac{\Gamma(y_i)\Gamma(z_i)}{\Gamma(y_i+z_i)} \\ y_i = \mu_i^{PV} \cdot \left(\frac{\mu_i^{PV} \cdot (1 - \mu_i^{PV})}{\sigma_{i,PV}^2} - 1 \right) \\ z_i = (1 - \mu_i^{PV}) \cdot \left(\frac{\mu_i^{PV} \cdot (1 - \mu_i^{PV})}{\sigma_{i,PV}^2} - 1 \right) \end{cases} \quad (17)$$

در این روابط، $B(y_i, z_i)$ تابع بتا برای تابش خورشید با پارامترهای y_i و z_i است و μ_i^{PV} مقدار میانگین و $\sigma_{i,PV}^2$ واریانس تابش خورشید در زمان t می‌باشد. $f(P_i^{PV})$ نیز احتمال تولید توان P در زمان t است.

۲-۱۳ - مدل سازی عدم قطعیت بار

تابع توزیع احتمال (PDF) با توزیع نرمال به صورت رابطه (۱۸) تعریف می‌شود. با استفاده از این رابطه می‌توان احتمال وقوع هر سناریو را محاسبه کرد [۲۲].

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (18)$$

در این رابطه $f(x)$ نشان‌دهنده احتمال وقوع سطح بار x بوده و همچنین μ و σ^2 به ترتیب مقدار میانگین و واریانس توزیع نرمال می‌باشند.

۳- ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم

در این مقاله، خرابی فیدرها به عنوان خرابی‌های سیستم در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، برای هر کدام از خرابی‌ها یک احتمال خرابی و یک زمان تعمیر در نظر گرفته می‌شود. برای ارزیابی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم از تکنیک شبیه‌سازی مونت کارلو ترتیبی زمانی استفاده شده است. یکی از مزیت‌های اصلی شبیه‌سازی مونت کارلو نسبت به روش‌های ارزیابی تحلیلی این است، که این تکنیک می‌تواند به‌طور مؤثر قابلیت اطمینان سیستم را برای طیف وسیعی از شرایط با ارزیابی تعداد محدودی از حالات سیستم، تخمین بزند. این ویژگی، شبیه‌سازی مونت کارلو را برای تخمین قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع در مقیاس بزرگ، با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای سیستم، مناسب می‌کند. در این مقاله، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو ترتیبی زمانی، در مرحله اول سناریوهای تقاضای بار متغیر با زمان، توان تولیدی توربین‌های بادی و توان تولیدی پنل‌های خورشیدی برای یک دوره مشخص براساس داده‌های گذشته مشخص می‌شود. در مرحله دوم احتمال رویداد خطا در فیدرهای مختلف سیستم در نظر گرفته می‌شود. در مرحله سوم، اگر نقصی در یک جز سیستم شناسایی شود، مدت زمان قطع سیستم ناشی از این خرابی ارزیابی می‌شود. در مرحله چهارم، روند ارزیابی سیستم اجرا می‌شود. فرض بر این است، که واحدهای DG موجود در سیستم بدون هیچ تأخیری پس از جداسازی یک خط مجدداً به سیستم متصل می‌شوند. در صورت ناکافی بودن ظرفیت DG ها برای ارزیابی تمام نقاط بار بعد از انتخاب مجموعه ارزیابی بهینه و هماهنگ

زمان هر کلیدزنی باشد. این محدودیت توسط رابطه (۱۳) نشان داده شده است.

$$SW_{m,t_i} = SW_{m,t_i} \quad \forall |t_i - t_i| < t_{min} \quad (13)$$

• محدودیت انرژی سیستم

نقطه باری که در مرحله اولیه ارزیابی می‌شود، نباید در مرحله بعدی قطع شود. رابطه (۱۴) این امر را تضمین می‌کند.

$$B_{t,n} \geq B_{t-n,n} \quad (14)$$

که در آن، $B_{t,n}$ متغیر باینری است، که وضعیت ارزیابی بار در هر نقطه بار n و مرحله زمانی t را نشان می‌دهد.

۲-۸ - فرآیند رمزگذاری برای الگوریتم بهینه‌سازی

زمانی که تعداد DG ها در یک سیستم بیش از یک عدد باشد، ارزیابی بار از طریق منابع مختلف انجام می‌شود. در واقع، کل شبکه به چند بخش مجزا از هم تقسیم می‌شود. بنابراین، باید وضعیت بار یا بسته بودن کلیدها مشخص شود و مجموعه‌های ارزیابی سیستم تعیین شوند تا مشخص شود شینه‌های متصل به هر فیدر از طریق کدام منابع تأمین می‌شود. به عبارت دیگر، باید مجموعه ارزیابی فیدرها توسط منابع، مشخص شود. اگر چند مجموعه ارزیابی با هم همپوشانی داشته باشند، آن‌ها را یک مجموعه در نظر گرفته و گره DG موجود در بزرگ‌ترین مجموعه را به عنوان گره اصلی در نظر می‌گیریم. اگر مجموعه‌های ارزیابی به صورت مستقل باشند، در این صورت هر منبع یک جزیره منحصر به فرد را در شبکه توزیع مورد نظر ارزیابی می‌کند. مجموعه‌های ارزیابی که غیر قابل اجرا باشند، توسط الگوریتم بهینه‌سازی ارزیابی TRIBE-PSO حذف می‌شوند.

۲-۹ - بهینه‌سازی ارزیابی با استفاده از الگوریتم TRIBE-PSO

مسئله ارزیابی در این مقاله با استفاده از الگوریتم PSO و مفهوم TRIBE [۲۰] حل شده است. عناصر اصلی این الگوریتم شامل ذرات، اطلاع‌دهنده و قبیله است. در این الگوریتم یک تعداد ذره داریم که موقعیت بعدی آن‌ها براساس موقعیت فعلی و اطلاعات به دست آمده از ذرات دیگر است. ذره‌ها در موقعیت‌های مختلفی قرار می‌گیرند و به ازای موقعیت‌های مختلف و مسیرهای مختلفی که طی می‌کنند، بهترین نقطه در این مسیرها را به دست می‌آورند و آن را در حافظه خود ثبت می‌کنند و در حرکات بعدی خود می‌توانند از این اطلاعات استفاده کنند. اطلاع‌دهنده ذره‌ای است، که می‌تواند بهترین راه‌حل خود را به ذره مشخص دیگری اطلاع دهد. قبیله گروهی از ذرات هستند که اطلاعات درون گروه را به اشتراک می‌گذارند. مکانیزم عملکرد الگوریتم TRIBE-PSO در [۲۱] به طور مفصل توضیح داده شده است.

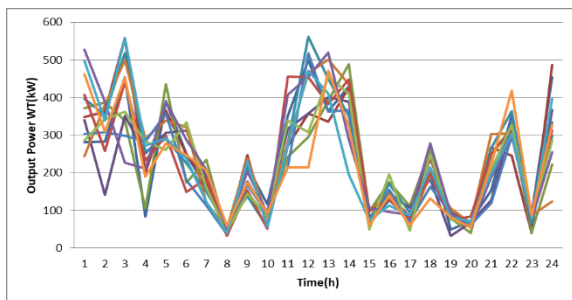
۲-۱۰ - مدل سازی عدم قطعیت‌های سیستم

سناریوهای تولیدی برای عدم قطعیت توان توربین بادی و پنل‌های خورشیدی و تقاضای بار به روش مونت کارلو تولید شده‌اند. برای هر عدم قطعیت ۱۲ سناریو تولید شده است، که این ۱۲ سناریو مربوط به روزهای ۱۲ ماه از سال هستند، به این معنی که هر سناریو مربوط به روزهای یک ماه از سال است.

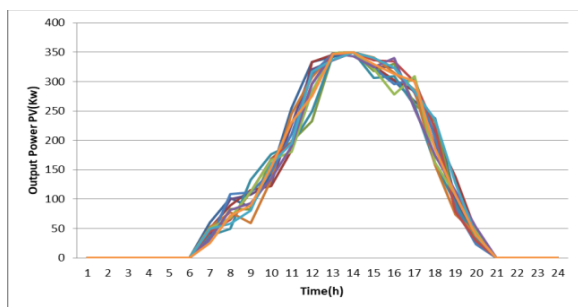
۲-۱۱ - مدل سازی عدم قطعیت توان توربین بادی

مدل سازی توان توربین بادی براساس تابع توزیع ویبول انجام می‌شود [۲۲]. تابع توزیع چگالی احتمال ویبول به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شود:

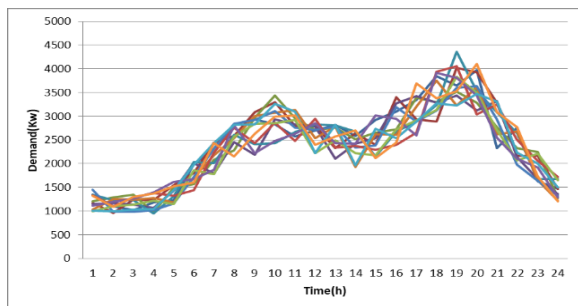
$$f(v) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{v}{c} \right)^{(k-1)} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (15)$$



شکل ۳: سناریوهای توان خروجی توربین بادی



شکل ۴: سناریوهای توان خروجی پنل‌های خورشیدی

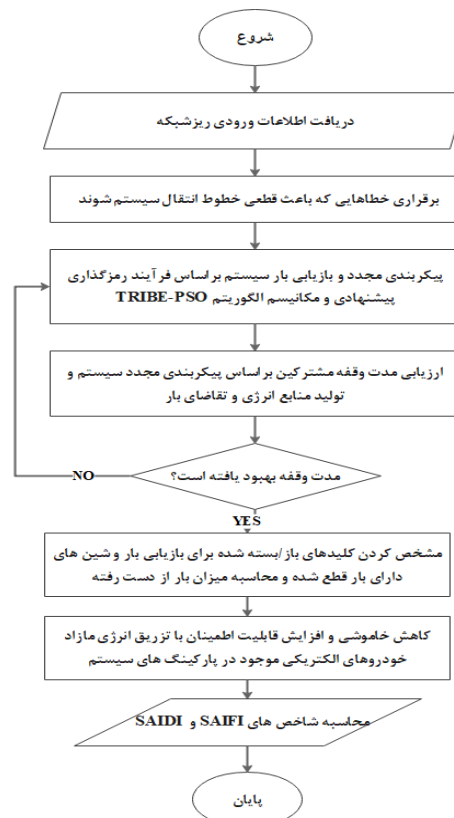


شکل ۵: سناریوهای تقاضای بار سیستم

جدول ۲: اطلاعات پارکینگ خودروهای الکتریکی

شماره پارکینگ	شماره شینه	تعداد خودرو	ساعات شارژ	ساعات دشارژ
PEV _۱	۱۰	۲۰	۱-۶ ۸-۱۰ ۱۷ ۲۴	۷ ۱۶ ۱۸-۲۱
PEV _۲	۱۴	۲۵	۱-۶ ۹ ۱۱-۱۲ ۱۴-۱۵	۷ ۱۸-۱۹ ۲۳-۲۴
PEV _۳	۳۳	۱۵	۱-۶ ۸ ۱۳ ۲۱-۲۴	۹-۱۲ ۱۴-۱۸ ۲۰

کردن عملیات کلیدزنی، بازیابی بار برای به حداقل رساندن مدت زمان وقفه و خاموشی مشترکین با استفاده از انرژی مازاد پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی انجام می‌شود. در نهایت، قابلیت اطمینان سیستم براساس شاخص‌های SAIDI و SAIFI ارزیابی می‌شود. شکل ۱ فلوچارت بازیابی بار و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم را نشان می‌دهد.

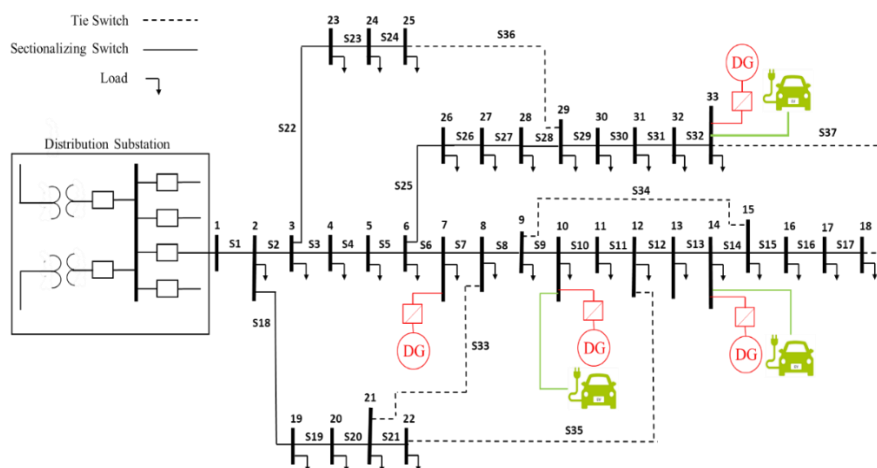


شکل ۱: فلوچارت بازیابی بار و ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم

۴- شبیه‌سازی و نتایج عددی

۴-۱- مشخصات سیستم تست و مفروضات اصلی

شکل ۲ سیستم ۳۳ شینه مورد مطالعه به همراه DG ها و پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب سناریوهای مربوط به توان خروجی توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و تقاضای بار را نشان می‌دهند. اطلاعات بازه زمانی شارژ و دشارژ پیش‌بینی شده هر کدام از پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی در جدول ۲ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که مقادیر جدول ۲ برای تمامی ماه‌های سال مشابه در نظر گرفته شده‌است. همچنین اطلاعات DG های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر در جدول ۳ ارائه شده‌است. لازم به ذکر است که مقدار توان خروجی انرژی‌های تجدیدپذیر در سناریوهای تولیدی، عددی بین صفر و یک است و در حداکثر توان خروجی DG ها که در جدول ۳ ارائه شده، ضرب شده‌است. هر شاخه در سیستم ۳۳ شینه مجهز به یک کلید قابل کنترل از راه دور است، که می‌تواند به طور خودکار در فرآیند بازیابی عمل کند. ولتاژ در شینه متصل به پست، ۱ پریونیت در نظر گرفته شده‌است. مقادیر پایین و بالای ولتاژ تمام شین‌های بار به ترتیب ۰/۹ و ۱/۰۵ تنظیم شده‌است.



شکل ۲: سیستم ۳۳ شینه مورد مطالعه

در شاخه‌های ۲-۳ و ۵-۶ و ۲۸-۲۹ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، با در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی

- مورد ۸: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع سه خطا در شاخه‌های ۲-۳ و ۵-۶ و ۲۸-۲۹ و ۱۰-۱۱ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، با در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی

جدول ۳: اطلاعات DGها

نوع DG	شماره شینه	$P_{DG} (kW)$
توربین بادی	۷	۳۵۰
پنل خورشیدی	۱۰	۴۰۰
منابع غیر تجدیدپذیر	۱۴	۴۵۰
	۳۳	۵۰۰

۴-۲ - مطالعات موردی

برای بررسی عملکرد روش ارائه شده برای بازیابی بهینه بارها در سیستم ۳۳ شینه همراه با DGها و پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی، هشت مورد زیر تعریف شده است:

- مورد ۱: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع یک خطا در شاخه ۲-۳ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، بدون در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی
- مورد ۲: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع دو خطا در شاخه‌های ۲-۳ و ۵-۶ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، بدون در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی
- مورد ۳: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع سه خطا در شاخه‌های ۲-۳ و ۵-۶ و ۲۸-۲۹ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، بدون در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی
- مورد ۴: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع سه خطا در شاخه‌های ۲-۳ و ۵-۶ و ۲۸-۲۹ و ۱۰-۱۱ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، بدون در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی
- مورد ۵: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع یک خطا در شاخه ۲-۳ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، با در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی
- مورد ۶: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع دو خطا در شاخه‌های ۲-۳ و ۵-۶ به همراه عدم قطعیت توربین بادی، پنل خورشیدی و تقاضای بار، با در نظر گرفتن پارکینگ خودروهای الکتریکی
- مورد ۷: بازیابی بهینه بار سیستم مورد مطالعه در زمان وقوع سه خطا

لازم به ذکر است که خطاهای در نظر گرفته در شاخه‌های سیستم ۳۳ شینه به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و خطا در شاخه‌های دیگر هم می‌تواند در نظر گرفته شود. همچنین، برنامه‌نویسی مقاله حاضر بر روی رایانه شخصی با مشخصات Core i7 2.3 GHz CPU و 16GB RAM و نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. زمان حل مطالعات موردی انجام شده کمتر از ۵ دقیقه می‌باشد.

۴-۳ - نتایج شبیه‌سازی

مجموعه بازیابی مربوط به فیدرهای سیستم ۳۳ شینه برای موارد ۱، ۲ و ۳ و ۴ مطالعات موردی پس از وقوع خطا در بهینه‌سازی انجام شده با الگوریتم TRIBE-PSO در جدول ۴ و شکل ۶ قابل مشاهده است. طبق جدول ۴، در مطالعه موردی ۱ که در آن خطا تنها در شاخه ۲-۳ اتفاق افتاده است، فقط یک مجموعه بازیابی وجود دارد که فیدر ۳۲ جزء این مجموعه بازیابی نیست. بنابراین، بار شین ۳۳ جدا از باقی شبکه تأمین می‌شود. همانطور که در شکل ۶-آ) قابل مشاهده است، شین ۳۳ و DG غیرتجدیدپذیر متصل به آن، جدا از شبکه سراسری و به صورت جزیره‌ای هستند و این DG، تنها بار شین ۳۳ را تأمین می‌کند.

طبق جدول ۴ و شکل ۶-ب)، در صورتی که علاوه بر شاخه ۲-۳، همزمان در شاخه ۵-۶ هم خطا رخ دهد (مورد ۲)، دو مجموعه بازیابی وجود دارد. فیدرهای موجود در مجموعه بازیابی ۱، به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری شده و بار شین‌های متصل به این فیدرها از طریق ژنراتورهای موجود در شین ۱۰ و ۱۴ تأمین می‌شوند. بار شین‌های متصل به فیدرهای موجود در مجموعه بازیابی ۲، از طریق ژنراتورهای موجود در شین‌های ۳۳ و ۷ شبکه سراسری، تأمین می‌شوند.

همچنین طبق جدول ۴ و شکل ۶-پ)، در مورد ۳ که در آن علاوه بر خطا در شاخه‌های ۲-۳ و ۵-۶، در شاخه ۲۸-۲۹ نیز خطا در نظر گرفته شده است، دو مجموعه بازیابی وجود دارد. طبق مجموعه بازیابی ۱، ژنراتور موجود در شین ۳۳ به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری شده و تنها بار موجود

جدول ۴: مجموعه بازیابی سیستم مورد مطالعه برای خطاهای مختلف

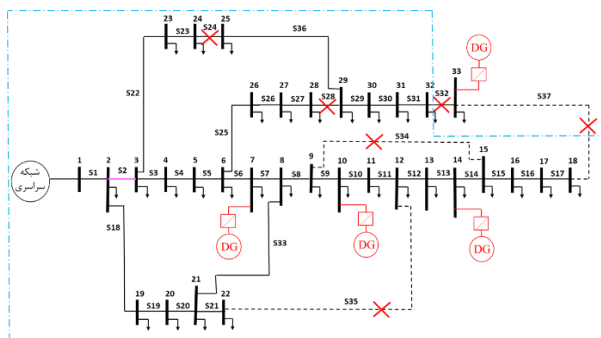
مطالعه موردی	شاخه محل وقوع خطا	مجموعه بازیابی به دست آمده از الگوریتم TRIBE-PSO
مورد ۱	۲-۳	[۲۳-۳۶-۳۱-۳۰-۲۹-۱۸-۹-۱۰-۱۱ ۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۸-۷-۶-۲۱ ۵-۴-۳-۲۳-۲۵-۲۶-۲۷-۲۲-۲۰-۱۹-۱]
مورد ۲	مجموعه ۱	[۹-۱۰-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷]
	مجموعه ۲	[۲۳-۳۶-۳۲-۳۱-۳۰-۲۹-۱۸ ۷-۶-۲۱-۴-۳-۲۳-۲۴-۲۵ ۲۶-۲۷-۲۸-۲۲-۲۰-۱۹-۱]
مورد ۳	مجموعه ۱	[۳۲-۳۱]
	مجموعه ۲	[۳۴-۳۵-۳۶-۲۹-۱۸-۱۰ ۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷ ۸-۷-۶-۲۱-۵-۴-۳-۲۳ ۲۴-۲۵-۲۶-۲۷-۲۲-۲۰-۲۹-۱]
مورد ۴	مجموعه ۱	[۳۲-۳۱]
	مجموعه ۲	[۲۳-۳۵-۳۶-۲۹-۱۸-۹ ۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷ ۸-۷-۶-۲۱-۵-۴-۳-۲۳ ۲۴-۲۵-۲۶-۲۷-۲۲-۲۰-۲۹-۱]

جدول ۵: نتایج بازیابی سیستم مورد مطالعه برای خطاهای مختلف

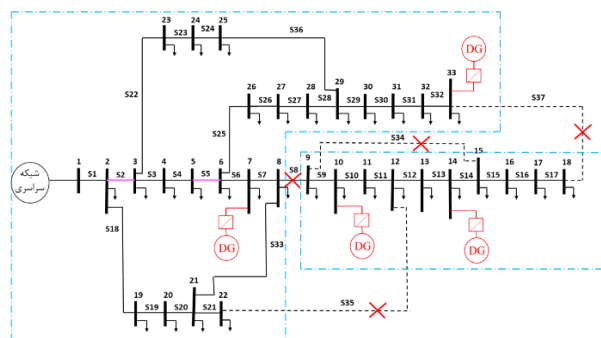
شاخه محل وقوع خطا	کلیدهای بسته شده برای بازیابی بار	کلیدهای باز شده برای بازیابی بار	شین‌های دارای بار قطع شده	درصد قطع بار (%)	مدت زمان محاسبه (ثانیه)
۲-۳	۳۳، ۳۶	۲۴، ۲۸، ۳۲	۲۵، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲	۲۹/۶۱	۷/۲۰۶۸
۲-۳ ۵-۶	۳۳، ۳۶	۸	۳، ۴، ۵، ۲۳، ۲۴، ۲۵	۳۲/۳۰	۷/۰۵۶۳
۲-۳ ۵-۶ ۲۸-۲۹	۳۴، ۳۵، ۳۶	۹، ۳۰	۳، ۴، ۵، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۹، ۳۰	۴۰/۹۱	۶/۷۳۹۳
۲-۳ ۵-۶ ۲۸-۲۹ ۱۰-۱۱	۳۳، ۳۵، ۳۶	۳۰	۳، ۴، ۵، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۹، ۳۰	۴۰/۹۱	۹/۳۷۱۲

در شین‌های ۳۱ و ۳۲ را تأمین می‌کند. باقی فیدرهای موجود در سیستم در مجموعه بازیابی ۲ نشان داده در جدول تغذیه می‌شوند. ژنراتورهای موجود در شین‌های ۷، ۱۰ و ۱۴ و شبکه سراسری بار شین‌های متصل به فیدرهای این مجموعه را تأمین می‌کنند. همانطور که از جدول ۴ و شکل ۶-ت) مشخص است در مورد ۴، که شاخه‌های ۲-۳، ۵-۶، ۲۸-۲۹ و ۱۱-۱۰ قطع شده‌اند، همانند مورد ۳ دو مجموعه بازیابی وجود دارد، که مجموعه بازیابی اول آن دقیقاً مشابه مجموعه بازیابی اول در مورد ۳ است و ژنراتور موجود در شین ۳۳ به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری شده و تنها بار موجود در شین‌های ۳۱ و ۳۲ را تأمین می‌کند. باقی فیدرهای موجود در سیستم در مجموعه بازیابی ۲ قرار دارند و شین‌های متصل به این فیدرها توسط ژنراتورهای موجود در شین‌های ۷، ۱۰ و ۱۴ و شبکه سراسری می‌شوند.

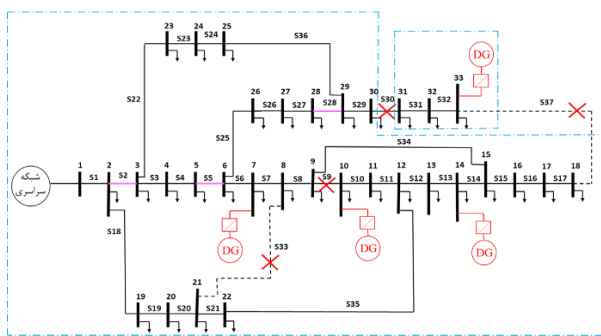
نتایج بازیابی پس از خطا در حالت پایه سیستم براساس مجموعه‌های بازیابی، در جدول ۵ ارائه شده‌است. طبق جدول ۵، هنگامی که خطا تنها در شاخه ۲-۳ اتفاق افتاده‌است (مورد ۱)، کلید ۳۳ (کلید بین دو شین ۸ و ۲۱)



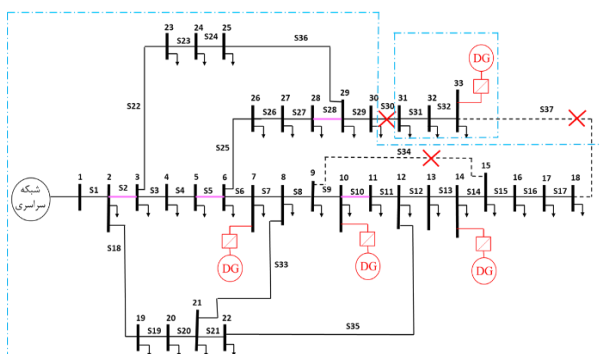
(ا)



(ب)



(پ)



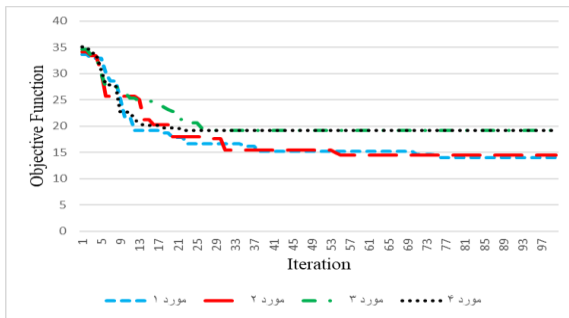
(ت)

× کلید باز — کلید خطا دار — کلید بسته — مجموعه بازیابی

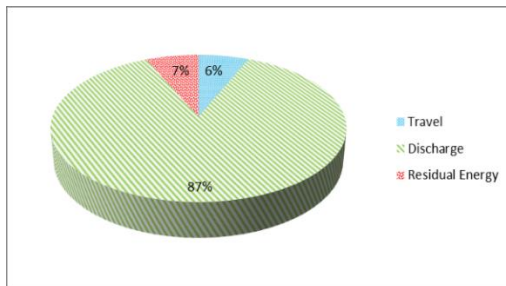
شکل ۶: مجموعه‌های بازیابی بار در مطالعات موردی ۱، ۲، ۳ و ۴

و کلید ۳۶ (کلید بین دو شین ۲۵ و ۲۹) برای انجام بازیابی بار بسته شده‌اند و کلیدهای ۲۴ (کلید شاخه ۲۵-۲۴)، ۲۸ (کلید شاخه ۲۹-۲۸) و ۳۲ (کلید شاخه ۳۳-۳۲) باید باز شوند. در این حالت، شین‌های ۲۵، ۲۹، ۳۰، ۳۱ و ۳۲ دچار قطع بار می‌شوند که مقدار بار از دست رفته ۲۹/۶۱ درصد کل بار سیستم است.

طبق جدول ۵، در صورتی که علاوه بر شاخه ۲-۳، همزمان در شاخه

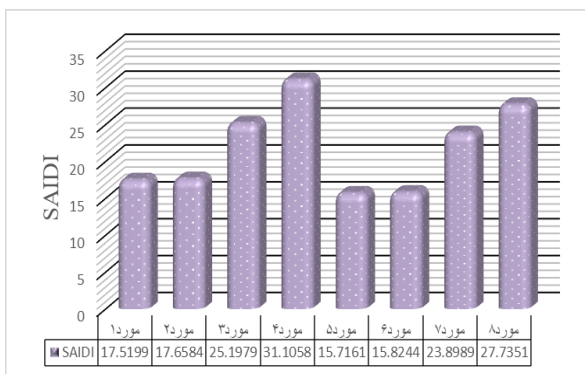


شکل ۷: منحنی همگرایی استراتژی بازیابی پس از خطا

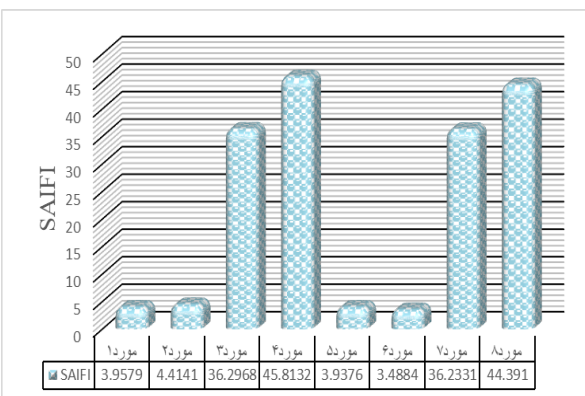


شکل ۸: مقدار دشارژ، انرژی صرف شده در حمل و نقل، و انرژی

باقیمانده تمام خودروهای الکتریکی در موارد ۵، ۶، ۷ و ۸



شکل ۹: متوسط سالانه SAIDI در هشت مورد مطالعاتی



شکل ۱۰: متوسط سالانه SAIFI در هشت مورد مطالعاتی

۳، ۱/۲۹۹ و در مورد ۸ نسبت به مورد ۴، ۳/۳۷۰۷ کاهش یافته است. همچنین، مشاهده می‌کنیم که مقدار SAIDI از مورد ۱ تا مورد ۴ و از مورد ۵ تا مورد ۸ با افزایش خطا رو به افزایش است، که این افزایش نشان‌دهنده کاهش میزان قابلیت اطمینان سیستم با افزایش تعداد خطاها است. طبق نتایج نشان داده شده در شکل ۱۰، در مورد ۵ با وجود خطا در شاخه ۳-۲

۵-۶ هم خطا رخ دهد (مورد ۲)، کلیدهای بسته شده برای انجام بازیابی بار مشابه مورد ۱ است ولی در این مورد تنها کلید ۸ که مربوط به شاخه ۹-۸ است، در زمان بازیابی بار باز می‌شود. با توجه به اینکه تعداد شاخه‌های خطادار نسبت به مورد ۱ افزایش یافته است، در جدول ۵ مشاهده می‌شود که در مورد ۲ شین‌های بیشتری (شین‌های ۳، ۴، ۵، ۲۳، ۲۴ و ۵) دچار ریزش بار شده‌اند. ریزش بار در مورد ۲ نسبت به مورد ۱، ۲/۶۹ درصد افزایش یافته است.

در مورد ۳، علاوه بر خطا در شاخه‌های ۳-۲ و ۵-۶، در شاخه ۲۹-۲۸ نیز خطا در نظر گرفته شده است. در این حالت، کلیدهای ۳۴ (کلید بین دو شین ۹ و ۱۵)، ۳۵ (کلید بین دو شین ۱۱ و ۲۲) و ۳۶ (کلید بین دو شین ۲۵ و ۲۹) به منظور انجام بازیابی بسته شده و کلیدهای ۹ (کلید شاخه ۱۰-۹) و ۳۰ (کلید شاخه ۳۱-۳۰) باز می‌شوند. در مورد ۳، با افزایش شاخه‌های خطادار، تعداد شین‌هایی که دچار قطع بار شده‌اند نسبت به موارد ۱ و ۲ افزایش یافته است. طبق جدول ۵، در مورد ۳ در شین‌های ۴، ۵، ۲۳، ۲۴، ۲۵ و ۲۹ بار از دست رفته وجود دارد. میزان بار از دست رفته در مورد ۳، نسبت به موارد ۱ و ۲ به ترتیب ۱۱/۳ و ۸/۶۱ درصد افزایش یافته است. در مورد ۴، علاوه بر خطا در شاخه‌های ۳-۲ و ۵-۶، در شاخه ۱۱-۱۰ نیز خطا در نظر گرفته شده است. در این حالت، کلیدهای ۳۳ (کلید بین دو شین ۲۱ و ۸)، ۳۵ (کلید بین دو شین ۱۱ و ۲۲) و ۳۶ (کلید بین دو شین ۲۵ و ۲۹) به منظور انجام بازیابی بسته شده و کلید ۳۰ (کلید شاخه ۳۱-۳۰) باز می‌شود. در مورد ۴ شین‌های دارای بار قطع شده دقیقاً با مورد ۳ مشابه است، بنابراین درصد قطع بار نیز همانند مورد ۳ می‌شود. زمان محاسبات برای استراتژی بازیابی بار در موارد ۱، ۲، ۳ و ۴ در ستون آخر جدول ۵ قابل مشاهده است.

شکل ۷، منحنی همگرایی استراتژی بازیابی پس از خطا در حالت پایه سیستم، یعنی موردی بدون پارکینگ خودرو الکتریکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌کنیم، هنگامی که خطا تنها در شاخه ۲-۳ اتفاق افتاده است، تابع هدف دیرتر به همگرایی می‌رسد، ولی مقدار به دست آمده برای تابع هدف نسبت به سه مورد ۲، ۳ و ۴ کم‌تر است. با افزایش تعداد خطاها، مقدار به دست آمده برای تابع هدف بیشتر شده ولی مقدار تابع هدف زودتر به همگرایی می‌رسد.

شکل ۸ میزان درصد دشارژ، انرژی صرف شده در حمل‌ونقل، و انرژی باقی‌مانده در باتری کل خودروهای الکتریکی سیستم را نشان می‌دهد. موارد نشان داده شده در شکل ۷ برای هر سه مورد ۵، ۶، ۷ و ۸ یکسان هستند. دلیل این امر یکسان بودن برنامه‌ریزی خودروهای الکتریکی در هر سه مورد است. خودروهای الکتریکی از طریق دشارژ خود می‌توانند به بازیابی بار در زمان رویداد خطا در موارد ۵، ۶، ۷ و ۸ کمک کنند. در این مقاله، پارکینگ خودروهای الکتریکی در شین‌های دارای DG قرار داده شده‌اند. در این صورت، پارکینگ‌ها در بهترین مکان برای کمک به شبکه در زمان خطا قرار دارند، زیرا خودروها در زمان خطا در هر حالتی می‌توانند بالاترین شارژ خود را از طریق DGها انجام دهند و قطعی شاخه‌ها مانع شارژ خودروها نمی‌شود. بنابراین، پارکینگ‌ها با بیشترین دشارژ مربوط به خودروهای الکتریکی خود می‌توانند به بازیابی بار بیشتر سیستم کمک کنند.

شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب متوسط سالانه SAIDI و SAIFI را برای شش مورد مطالعاتی نشان می‌دهند. طبق شکل ۹، در مورد ۵ با وجود خطا در شاخه ۳-۲ و استفاده از پارکینگ خودروهای الکتریکی نسبت به مورد ۱ که در آن از پارکینگ خودروهای الکتریکی استفاده نشده است، متوسط سالانه SAIDI به میزان $1/8038$ (h/yr) کاهش یافته است. همچنین این مقدار در مورد ۶ نسبت به مورد ۲، $1/834$ ، در مورد ۷ نسبت به مورد

evaluation of radial distribution systems considering renewable DGs", *Applied Energy*, vol. 342, 121153, 2023.

- [8] H. Yin, Z. Wang, Y. Liu, Y. Qudaih, D. Tang, J. Liu, T. Liu, "Operational reliability assessment of distribution network with energy storage systems", *IEEE Systems Journal*, vol. 17, pp. 629 – 639, 2023.
- [9] L. Xiao, K. M. Muttaqi, A. P. Agalgaonkar, "Reliability assessment of modern distribution networks embedded with renewable and distributed resources", *Electric Power Systems Research*, vol. 212, p. 108374, 2022.
- [10] X. He, T. Ding, X. Zhang, Y. Huang, L. Li, Q. Zhang, F. Li, "A robust reliability evaluation model with sequential acceleration method for power systems considering renewable energy temporal-spatial correlation", *Applied Energy*, vol. 340, p. 120996, 2023.
- [۱۱] رامین شریک آبادی، امیر عبدالمهدی، مسعود رشیدی نژاد، مهدی شفیعی، «مدل‌سازی امکانی-احتمالاتی پارکینگ خودروهای برقی با رویکرد بهبود انعطاف‌پذیری در برنامه‌ریزی مشارکت امنیت مقید واحدهای نیروگاهی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۵۳، شماره ۳، صفحات ۲۱۰-۲۲۲، پاییز ۱۴۰۲.
- [12] Y. Huang, H. Masrur, M. Shahadat Hossain Lipu, H. Howlader, R. Howlader, M. M. Gamil, A. Nakadomari, P. Mandal, T. Senjyu, "Multi-objective optimization of campus microgrid system considering electric vehicle charging load integrated to power grid", *Sustainable Cities and Society*, vol. 98, 104778, 2023.
- [13] E. Shokouhmand, A. Ghasemi, "Stochastic optimal scheduling of electric vehicles charge/discharge modes of operation with the aim of microgrid flexibility and efficiency enhancement", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 32, 100929, 2022.
- [14] S. M. B. Sadati, J. Moshtaghi, M. Shafie-khah, A. Rastgou, J. P. S. Catalão, "Operational scheduling of a smart distribution system considering electric vehicles parking lot: A bi-level approach", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 105, pp. 159-178, 2019.
- [۱۵] محمد همتی، سعید قاسم‌زاده، بهنام محمدی ایواتلو، «برنامه‌ریزی بهینه ریزشکه‌های قابل بازآرایی در شرایط عادی و اضطراری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۵۰، شماره ۴، صفحات ۱۸۸۵-۱۸۹۷، زمستان ۱۳۹۹.
- [16] J. C. López, J. F. Franco, M. J. Rider, R. Romero, "Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced three-phase distribution systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, pp. 6058 – 6068, 2018.
- [17] A. A. Hafez, W. A. Omran, Y. G. Hegazy, "A decentralized technique for autonomous service restoration in active radial distribution networks", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, pp. 1911 – 1919, 2018.
- [18] X. Liu, B. Gao, Ch. Wu, Y. Tang, "Demand-side management with household plug-in electric vehicles: a Bayesian game-theoretic approach", *IEEE Systems Journal*, vol. 12, pp. 2894 – 2904, 2018.
- [19] M. Zare-Bahramabadi, M. Ehsan, H. Farzin, "An MILP Model for Switch, DG, and Tie Line Placement to Improve Distribution Grid Reliability", *IEEE Systems Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 1316-1327, 2023.
- [20] M. Clerc, "TRIBES, a parameter free particle swarm optimizer," in *Proc. OEP'03*, Paris, France, 2003.
- [21] Y. D. Song, L. Zhang, P. Han, "An adaptive tribe-particle swarm optimization", Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [22] Y. Wang, X. Ai, Zh. Tan, L. Yan, Sh. Liu, "Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 510 – 519, 2016.
- و استفاده از پارکینگ خودروهای الکتریکی نسبت به مورد ۱ که در آن از پارکینگ خودروهای الکتریکی استفاده نشده است، متوسط سالانه SAIFI به میزان 0.203 (int/yr) کاهش یافته است. همچنین این مقدار در مورد ۶ نسبت به مورد ۲، 0.9257 ، در مورد ۷ نسبت به مورد ۳، 0.637 و در مورد ۸ نسبت به مورد ۴، $1/422$ کاهش یافته است. کاهش میزان متوسط SAIFI و SAIDI در موارد ۵، ۶، ۷ و ۸ نسبت به موارد ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان‌دهنده بهبود قابلیت اطمینان سیستم در اثر استفاده از پارکینگ خودروهای الکتریکی و دشارژ انرژی مازاد خودروها به سیستم برای کمک به بازیابی بار پس از وقوع خطا در سیستم است.
- ### ۸- نتیجه‌گیری
- در این مقاله، ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم توزیع با منابع تولید پراکنده و پارکینگ خودروهای الکتریکی، همراه با در نظر گرفتن پیکربندی مجدد سیستم و استراتژی بازیابی بار بهینه و عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر و بار الکتریکی انجام شده است. یک الگوریتم بهینه‌سازی بازیابی TRIBE-PSO هوشمند با ترکیب یک طرح رمزگذاری برای حل مسئله بازیابی استفاده شده است. در این مقاله، از پارکینگ خودروهای الکتریکی به منظور کمک به بازیابی بار سیستم پس از وقوع خطا استفاده شده است. همچنین، ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم از طریق محاسبه دو شاخص SAIFI و SAIDI برای شش مطالعه موردی با تعداد خطاهای مختلف با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو ترتیبی زمانی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور پارکینگ‌های خودروهای الکتریکی سبب کاهش دو شاخص SAIFI و SAIDI شده و در نتیجه قابلیت اطمینان سیستم در زمان وقوع خطا را بهبود می‌بخشد.
- مطالعه ارتباط بین ریزشکه‌های جزیره‌ای و تأمین انرژی یک جزیره از طریق انرژی مازاد جزایر دیگر و همچنین عدم قطعیت ساعت ورود و خروج خودروهای الکتریکی بر ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت، کارهای آتی هستند که برای پیشبرد این پژوهش در برنامه تحقیقاتی نویسندگان مقاله قرار دارد.
- ### مراجع
- [1] M. Batic, N. Tomasevic, B. Giovanni, T. Demiray, and S. Vranes, "Combined energy hub optimisation and demand side management for buildings," *Energy and Buildings*, Vol. 127, pp. 229–241, 2016.
- [2] Y. Kou, Z. Bie, G. Li, F. Liu, J. Jiang "Reliability evaluation of multi-agent integrated energy systems with fully distributed communication," *Energy*, vol. 224, 120123, 2021.
- [3] S. A. Alavi, V. Ilea, A. Saffarian, C. Bovo, A. Berizzi, S. G. Seifossadat, "Feasible islanding operation of electric networks with large penetration of renewable energy sources considering security constraints," *Energies*, vol. 12, no. 3, 537, 2019.
- [4] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability evaluation of power systems." Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] A. Safari, H. Rahbarimaghham, "Flexible-reliable linear AC security constrained unit commitment considering uncertainties and renewable energy sources", *Energy Reports*, vol. 10, pp 3814-3825, 2023.
- [6] M. Gholami, S. M. Muyeen, S. Abokhamis Mousavi, "Development of new reliability metrics for microgrids: Integrating renewable energy sources and battery energy storage system", *Energy Reports*, vol. 10, pp 2251-2259, 2023.
- [7] M. Alanazi, A. Alanazi, M. A. Akbari, M. Deriche, Z. A. Memon, "A non-simulation-based linear model for analytical reliability