



Designing a Convex Optimization Model for Self-healing of a Smart Distribution Network

Mohammad Hassan Yeganehkia¹, Mohammad Mahdi Rezaei^{2*}, Mehrdad Abedi³

¹PhD Student, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

²Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.

³Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 02.20.2021

Revised: 04.17.2021

Accepted: 05.17.2021

Keyword:

Convex optimization

Self – healing

Load shedding

Distributed generation sources

Islanding

***Corresponding Author:**

Mohammad Mahdi Rezaei

Email: rezaei_mm@yahoo.com

ABSTRACT

Self-healing is used to automatically repair the distribution system in the event of a fault. One way to reduce without service customers is to operate the faulty area as an island. However, the island is formed optimally when the island is formed online after the fault. If the island is determined before the fault, the optimal margin of the island will not be formed and the number of customers without electricity might increase. In this article, island building is carried out online after the fault. One of the most important problems after a fault occurs is the quick solution of the problem. Since nonlinear models greatly increase the solving time, in the proposed method, the problem is transformed from a non-convex MINLP model to a convex model. As a result, the proposed model can be answered in a very short time. The second point in the problem of self-healing optimization is to achieve the optimal global solution. The optimization problem is carried out by the convex optimization method. Because in convex problems there is only one optimal, the proposed method ensures the achievement of the optimal global solution. A variety of dispatchable and non-dispatchable distributed generation sources were used. Load and production modeling was also undertaken in a probabilistic space because considering the uncertainty, it can be said that the proposed model can be resistant to such events. After determining the optimal microgrid, the optimal production of distributed generation resources and load shedding was carried out to balance the system power. The IEEE 33-bus system was used to demonstrate the efficiency of the proposed method.





دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تکنولوژی و مهارت

کارافان

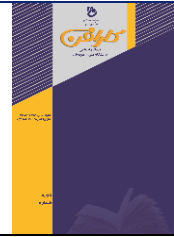
فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۰، دوره ۱۸، شماره ۳، ۵۳-۳۵

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi:10.48301/KSSA.2021.130684

20.1001.1.23829796.1400.18.3.25



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقاله پژوهشی

طراحی یک مدل بهینه‌سازی محدب برای خودترمیمی یک شبکه توزیع هوشمند

محمد حسن یگانه کیا^۱، محمد مهدی رضایی^{۲*}، مهرداد عابدی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.
- ۳- استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده برق، دانشگاه امیر کبیر، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

خودترمیمی برای ترمیم خودکار سیستم توزیع در هنگام خطا به کار می‌رود. یکی از روش‌های کاهش مشترکین بدون برق، بهره‌برداری منطقه خطادار به صورت جزیره‌ای است اما زمانی جزیره به صورت بهینه تشکیل می‌شود که این جزیره به صورت آنلاین بعد از خطا شکل گیرد. در صورتی که جزیره قبل از خطا تعیین شده باشد، مرز بهینه جزیره تشکیل نمی‌شود و ممکن است تعداد مشترکین بدون برق افزایش یابد. در این مقاله جزیره‌سازی به صورت آنلاین پس از خطا انجام می‌شود. یکی از مهم‌ترین مشکلات پس از وقوع یک رخداد خطا، حل سریع مسئله است. از آنجایی که مدل‌های غیرخطی، زمان حل را به شدت زیاد می‌کنند؛ در روش پیشنهادی، مسئله خودترمیمی از مدل MINLP نامحدب به یک مدل محدب تبدیل شده است. در نتیجه مدل پیشنهادی با زمان بسیار کمی می‌تواند به جواب برسد. نکته دوم در مسئله بهینه‌سازی خودترمیمی رسیدن به جواب بهینه سراسری است. چون در مسائل محدب تنها یک راه‌حل بهینه وجود دارد؛ بنابراین روش پیشنهادی رسیدن به جواب بهینه سراسری را تضمین می‌کند. همچنین مدل‌سازی بار و تولید در یک فضای احتمالاتی صورت می‌گیرد. پس از تعیین ریزشکبه بهینه، تولید بهینه منابع تولید پراکنده و برداشت بار برای متعادل کردن توان سیستم انجام می‌شود. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی از سیستم ۳۳ باس IEEE استفاده شده است.

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

کلید واژگان:

بهینه‌سازی محدب
خودترمیمی
برداشت بار
منابع تولید پراکنده
جزیره‌سازی

*نویسنده مسئول: محمد مهدی رضایی

پست الکترونیکی:

rezaei_mm@yahoo.com



©2021 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

یکی از موضوعات بسیار مهم در شبکه هوشمند خودترمیمی است. هدف از خودترمیمی در شبکه توزیع برق این است که در زمان خطا، سیستم آن را تشخیص دهد و سپس آن را به صورت بهینه رفع کند. شکل بهینه خودترمیمی زمانی اتفاق می افتد که حداقل مشترکین بدون بار را با برآوردن تمامی محدودیت‌های سیستم داشته باشیم. برای این منظور ابتدا باید خطا ایزوله شود و منطقه خطادار به شکل بهینه بازآرایی شود. در این حالت، سیستم تبدیل به یک یا چند ریزش شبکه جزیره‌ای می شود و با استفاده از منابع تولید پراکنده قابل توزیع و غیرقابل توزیع، بارهای موجود در منطقه خطادار را تغذیه می کند. تعداد و مرز ریزش شبکه‌ها می تواند از قبل تعیین شده باشد که در این صورت با وجود خطا به سرعت سیستم به آرایش تعیین شده تغییر می کند ولی چنانچه تعداد و مرز ریزش شبکه به صورت آنالین پس از خطا تعیین شود می توان برداشت یا قطع بار را در سیستم به کمترین میزان ممکن رساند. در [۱] یک الگوریتم دو لایه مبتنی بر فراابتکاری برای عملیات بهینه شبکه توزیع هوشمند در حالت خودترمیمی با در نظر گرفتن ریزش شبکه در حضور میکروتوربین و ذخیره‌ساز انرژی در شبکه توزیع ارائه شده است. در لایه اول، یک روش جدید مبتنی بر نظریه گراف برای یافتن شکل مطلوب ریزش شبکه‌ها پیشنهاد شده است، در حالی که در لایه دوم، مدیریت انرژی مطلوب ریزش شبکه‌ها، با در نظر گرفتن حالت خودترمیم تعیین شده است. در [۲] یک روش دو مرحله‌ای به منظور حل طرح خودترمیم متمرکز برای سیستم‌های توزیع الکتریکی ارائه شده است. مرحله اول، مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را به منظور به دست آوردن متغیرهای تصمیم دودویی همانند وضعیت سوئیچ‌ها برای طرح خودترمیم حل می کند. در مرحله دوم، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی به منظور تنظیم نقطه عملیاتی حالت پایدار از توپولوژی پیدا می شود. در مرحله اول، یعنی تصحیح متغیرهای الکتریکی پیوسته و بهینه‌سازی حذف بار حل می گردد. در [۳] یک سیستم توزیع با ژنراتورهای پراکنده بهینه به دسته‌ای از ریزش شبکه‌ها با خودکفایی بالا با اختصاص دادن منابع ذخیره انرژی پراکنده و منابع راکتیو پراکنده تقسیم شده است. در [۴] استراتژی خودترمیمی برای یک سیستم توزیع با هر دوی تولیدات پراکنده قابل کنترل و غیرقابل کنترل ارائه شده است. در وضعیت خودترمیمی، بخش قطع شده سیستم توزیع به ریزش شبکه‌های خودکفا شبکه تقسیم خواهد شد و به این شکل، منبع توان مطمئن برای ماکزیمم بارها به طور مداوم فراهم می شود. در [۵] یک معماری قابل توسعه برای بهره‌برداری عادی و خودترمیمی ریزش شبکه‌های شبکه‌ای پیشنهاد شده است. ریزش شبکه‌ها می‌توانند برق را با یکدیگر در زیرساخت‌های پیشنهادی مبادله کنند. هنگامی که کمبود تولید یا خطا در ریزش شبکه اتفاق می‌افتد، مدل به حالت خودترمیم سوئیچ می‌شود و ظرفیت‌های تولید محلی ریزش شبکه‌های دیگر می‌تواند برای پشتیبانی از بخش اضطراری سیستم استفاده شود. در [۶] یک استراتژی کنترل مبتنی بر طبقه‌بندی ایالت برای پشتیبانی تصمیم‌گیری خودترمیمی سیستم توزیع ارائه شده است. در [۷] بهینه‌سازی سیستم توزیع با مجموعه‌ای از ریزش شبکه‌های مجازی، خصوصیات واحدهای تولید پراکنده، واحدهای ذخیره‌سازی انرژی پراکنده و همچنین منابع راکتیو توزیع شده انجام شده است. در [۸] یک چارچوب بازایی خدمات تریبی برای تولید راه‌حل‌های بازایی برای سیستم‌های توزیع و ریزش شبکه‌ها در رخداد قطع برق مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است. راه‌حل بازایی حاوی یک مرتبه‌ای از اقدامات کنترل است که به درستی سوئیچ‌ها، ژنراتورهای پراکنده و بارهای قابل سوئیچ را برای ایجاد ریزش شبکه‌های مستقل چندگانه هماهنگ می‌کنند. در [۹] یک استراتژی بازایی سیستم توزیع مبتنی بر گراف که شامل ریزش شبکه‌هایی است که بار بازسازی شده را حداکثر می‌کند و تعداد عملیات سوئیچینگ را به حداقل می‌رساند. در [۱۰] یک روش جدید یادگیری ماشین توزیع شده مبتنی بر انتخاب ویژگی برای تشخیص تأثیرات دینامیکی وقایع مختلف سیستم قدرت پیشنهاد شده است. هدف، آسان کردن فرایند تصمیم‌گیری پس از خطا برای بازگرداندن یک ریزش شبکه مستقل بدون دخالت یک پست مرکزی است. در [۱۱] روش‌های نظام‌مند و بهینه‌سازی برای خوشه‌بندی سیستم توزیع به مجموعه‌ای از ریزش شبکه‌های مجازی با خودکفایی بهینه ارائه می‌شود. مزایای نصب هر دو منابع ذخیره‌سازی انرژی پراکنده و منابع راکتیو توزیع شده برای بهبود خودکفایی

ساختار ریزشیکه‌ها بررسی شده است. در [۱۲] چارچوبی جامع برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری بهینه روز پیش برای سیستم‌های توزیع هوشمند با در نظر گرفتن شرایط عادی و اضطراری ارائه شده است. در حالت اضطراری، استراتژی پیشنهادی خودترمیمی، منطقه جدا شده از سیستم توزیع را با تقسیم‌بندی‌های جزیره‌ای برای ارائه منبع تغذیه قابل‌اعتماد برای بارهای بحرانی پیوسته مجزا خواهد کرد. در [۱۳] یک طرح سیستم مدیریت خروج سلسله‌مراتبی برای ارتقای قابلیت تاب‌آوری یک سیستم توزیع هوشمند مبتنی بر ریزشیکه‌های چندگانه‌ها در برابر حوادث غیرمنتظره فاجعه‌بار پیشنهاد می‌کند. ریزشیکه‌ها منابع موجود خود را در مرحله اول با استفاده از یک الگوریتم مدل پیش‌بین جدید مبتنی بر کنترل، برنامه‌ریزی میکنند. در مرحله دوم، اپراتور سیستم توزیع، توان انتقالی ممکن را در میان ریزشیکه‌ها هماهنگ می‌کند و از ظرفیت‌های استفاده نشده منابع ریزشیکه برای تغذیه بارهای قطع شده در مرحله ۱، استفاده می‌کند. در [۱۴] یک روش مبتنی بر تاب‌آوری ارائه شده است که ریزشیکه‌ها را برای بازیابی بارهای بحرانی فیدرهای توزیع پس از یک اختلال عمده استفاده می‌کند. با توجه به ظرفیت محدود ژنراتورهای پراکنده (DGها) در ریزشیکه‌ها، عملکرد دینامیکی DGها در روند بازیابی ضروری است. در [۱۵] یک ساختار کنترل سلسله‌مراتبی برای اتصال ریزشیکه‌های خودکفای مجاور برای مبادله بار سیستم در شرایط اضطراری ارائه شده است. در [۱۶] یک روش براساس سیستم چندعامله برای خودترمیمی با ریزش بار براساس اولویت و حالت جزیره‌ای براساس منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در [۱۷] یک روش بهره‌برداری سیستم توزیع جدید به‌وسیله شکل‌گیری ریزشیکه‌های چندگانه با منابع تولید پراکنده برای بازیابی بار بحرانی ارائه شده است. در [۱۸] یک روش خودترمیمی جدید برای دو ریزشیکه جزیره‌ای مجاور پیشنهاد شده است. هر ریزشیکه، کمبود توان دیگری را پشتیبانی می‌کند. در [۱۹] یک استراتژی جامع برای خودترمیمی یک ریزشیکه با مصیبت‌های مختلف پیشنهاد شده است. استراتژی پیشنهادی توزیع مجدد تولید، تجدید پیکربندی شبکه و ریزش بار را برای خودترمیمی توسعه داده است. در [۲۰] بازیابی محلی با استفاده از ریزشیکه‌ها انجام شده است. روش پیشنهادی برای تاب‌آوری یک سیستم توزیع در مقابل با خطاها به کار رفته است. در [۲۱] به کمک تخمین‌زن فازی محل مناسب ادوات فکتس را معلوم می‌کنیم تا پایداری استاتیکی ولتاژ در باس‌ها را افزایش دهیم. در [۲۲] برای سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع کنترل‌گر مقاوم تأخیرداری طراحی شده است که در آن تأثیر عدم قطعیت‌ها و اغتشاش‌ها طی فرایند طراحی بررسی شده است.

نوآوری و ترکیبات اصلی مقاله

در مسئله خودترمیمی، دو نکته رسیدن به جواب بهینه سراسری و زمان حل بسیار مهم است. برای تضمین بهینه بودن باید مسئله محدب باشد و برای کاهش زمان حل باید مسئله به فرم خطی تبدیل شود. مسئله خودترمیمی، یک مسئله MINLP نامحدب است؛ بنابراین باید برای رسیدن به بهینه سراسری، مسئله به فرم محدب تبدیل شود. همچنین برای کاهش زمان حل مسئله به فرم خطی تبدیل شود. به‌طور مثال در مدل‌سازی محدودیت ظرفیت میکروتوربین‌ها که محدب است اگر خطی‌سازی نشود زمان شبیه‌سازی بسیار زیاد می‌شود. در [۹؛ ۱۱؛ ۱۲؛ ۱۵] مسئله به فرم خطی تبدیل شده است و رسیدن به جواب بهینه سراسری تضمین شده است اما در هیچ‌یک از این مقالات، مدل کامل و مناسبی ارائه نشده است که بتوان در مسئله خودترمیمی از آن استفاده کرد. در مقاله حاضر علاوه بر ارائه یک مدل ریاضی جدید و محدب برای میکروتوربین، منابع تجدیدپذیر و توابع توزیع احتمالاتی برای تولید و بار در نظر گرفته شده است. ترکیبات اصلی مقاله به شرح زیر است:

- ✓ ارائه یک مدل‌سازی ریاضی جدید و کامل برای حل مسئله خودترمیمی
- ✓ ارائه یک مدل بهینه‌سازی محدب برای کاهش زمان حل مسئله خودترمیمی
- ✓ استفاده از مدل محدب و خطی برای تضمین رسیدن به بهینه سراسری
- ✓ تبدیل سیستم توزیع به ریزشیکه‌های خودکفا

✓ در نظر گرفتن انواع منابع تولید پراکنده قابل توزیع و غیرقابل توزیع در ادامه، فرمول‌سازی مسئله خودترمیمی در بخش ۲ ارائه شده است. در بخش ۳ مدل‌سازی ریاضی ارائه شده تبدیل به یک مدل محدب شده است. در بخش ۴ نتایج عددی روی یک سیستم ۳۳ باس آزمون شده و در بخش آخر، نتیجه‌گیری و تحلیل نتایج ارائه شده است.

فرمولاسیون مسئله

هنگام وقوع خطا، طرح پیشنهادی، خطا را در نواحی معین شبکه ایزوله می‌کند و منطقه بدون برق را به سریع‌ترین شکل ممکن و با استفاده از برداشت بار یا جزیره‌ای کردن، بازیابی می‌کند. در مسائل بهینه‌سازی تنها زمانی می‌توانیم به جواب بهینه برسیم که مدل مسئله محدب باشد. در مسائل محدب تنها یک بهینه وجود دارد. مسئله تاب‌آوری یک مسئله پیچیده MINLP نامحدب است؛ بنابراین مسئله از حالت MINLP نامحدب به MILP تبدیل می‌شود و رسیدن به جواب بهینه سراسری تضمین می‌شود. تابع هدف همانند زیر بیان شده است:

$$\text{Min } \sum_t (\sum_i c^G p_{i,t}^G + \sum_i c^{\text{emi}} \sigma_i p_{i,t}^G - \sum_i c^D p_{i,t}^D + (c^B \eta_{1,t} - c^S \mu_{1,t}) + \sum_i (1 - \text{CDF}_{i,t}(\text{LCL}_{i,t})) \quad (1)$$

در تابع هدف ترم اول، هزینه تولید میکروتوربین‌ها را بیان می‌کند. هزینه بهره‌برداری واحدهای تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است [۴]؛ چون این واحدها هزینه بهره‌برداری ندارند. ترم دوم، هزینه آلودگی میکروتوربین‌ها را نشان می‌دهد. ترم سوم، درآمد ناشی از فروش برق به مشتریان را بیان می‌کند. ترم چهارم و پنجم، هزینه‌های ناشی از تبادل توان سیستم توزیع و شبکه بالادست را نشان می‌دهد. ترم ششم، هزینه‌های قطع بار را در حالت خطا نشان می‌دهد. این قید، نحوه تبادل توان بین سیستم توزیع و شبکه بالادست را نشان می‌دهد. با استفاده از این قید می‌توان خرید/فروش توان از/به شبکه بالادست را تعیین کرد.

$$P_{1,t} = \eta_{1,t} - \mu_{1,t}, \eta, \mu \geq 0 \quad (2)$$

در شبکه قدرت لازم است که محدوده ولتاژ همیشه در بازه معینی قرار گیرد تا مشترکین در تغذیه بارهای خود دچار مشکل نشوند و پایداری ولتاژ نیز حفظ شود. این قید نیز مربوط به همین مسئله است.

$$1 - \epsilon \leq V_{i,t} \leq 1 + \epsilon \quad (3)$$

توان خروجی اکتیو و راکتیو هر منبع تولیدی باید متناسب با ظرفیت نامی آن باشد. این محدودیت مطابق با محدودیت (۴) بیان شده است:

$$(p_{i,t}^G)^2 + (q_{i,t}^G)^2 \leq S_i^{\text{max}2} \quad (4)$$

یکی از مهم‌ترین قیود شبکه، برابری بار - تولید است که در قالب معادلات پخش بار^۱ مطابق با معادلات ۵ و ۶ بیان شده است:

$$P_{i,t} = V_{i,t} \sum_j V_{j,t} (G_{i,j} \cos \theta_{ij,t} + B_{i,j} \sin \theta_{ij,t}) \quad (۵)$$

$$Q_{i,t} = V_{i,t} \sum_j V_{j,t} (G_{i,j} \sin \theta_{ij,t} - B_{i,j} \cos \theta_{ij,t}) \quad (۶)$$

معادلات (۷) و (۸) توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه را از باس i با در نظر گرفتن بار محلی آن باس، نشان می‌دهد.

$$P_{i,t} = p_{i,t}^G + p_{i,t}^E - p_{i,t}^D + \sum_{n \in N} p_{i,n,t}^R \quad (۷)$$

$$Q_{i,t} = q_{i,t}^G + q_{i,t}^E - q_{i,t}^D + \sum_{n \in N} q_{i,n,t}^R \quad (۸)$$

معادله (۹) بیان می‌کند که مجموع توان‌های تولیدی اکتیو می‌تواند برابر یا بیشتر از مجموع بارهای مصرفی باشد.

$$\sum_i (p_{i,t}^G + p_{i,t}^E + \sum_{n \in N} p_{i,n,t}^R) \geq \sum_i p_{i,t}^D \quad (۹)$$

ذخیره‌سازها نقش مهمی در شبکه‌های توزیع هوشمند دارند. منابع خورشیدی و بادی می‌توانند به‌عنوان منابع قابل توزیع در نظر گرفته شوند؛ زیرا انرژی در حالت عادی بهره‌برداری شبکه ذخیره می‌شود و در موارد اضطراری به شبکه تزریق می‌شوند. محدودیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز توسط معادله (۱۰) تعیین می‌شود.

$$-P_i^{ch,max} \lambda_{i,t} \leq p_{i,t}^E \leq P_i^{dch,max} \phi_{i,t} \quad (۱۰)$$

وضعیت ذخیره‌سازی در هر زمان ممکن است به‌صورت زیر شارژ یا دشارژ شود:

$$\lambda_{i,t} + \phi_{i,t} \leq 1 \quad (۱۱)$$

در معادله (۱۱)، $\lambda_{i,t}$ و $\phi_{i,t}$ به‌ترتیب متغیرهای باینری مربوط به وضعیت شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز هستند. وضعیت شارژ (SOC) ذخیره‌سازها به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} - \frac{T}{EC_i} (\phi_{i,t} p_{i,t}^E \pi_d^{-1} + \lambda_{i,t} p_{i,t}^E \pi_c) \quad (۱۲)$$

محدوده نامی SOC مطابق با (۱۳) است. مطابق (۱۳)، SOC می‌تواند صفر باشد. با این حال، بهتر است از شارژ و دشارژ کامل باتری جلوگیری کنید تا عمر آن بیشتر شود.

$$0 \leq SOC_{i,t} \leq SOC_i^{max} \quad (۱۳)$$

^۱ Load Flow

بهینه‌سازی محدب

محدب بودن مدل باعث می‌شود که رسیدن به بهینه سراسری تضمین شود؛ بنابراین برای رسیدن به بهینه سراسری باید مسائل نامحدب به محدب تبدیل شود. شروط مهم برای محدب بودن مسائل این است که تابع هدف و قیود نامساوی محدب باشند. همچنین قیود مساوی باید افاین باشند. معادلات ۵ و ۶ قیود مساوی هستند. این قیود به دلیل غیرخطی بودن و نامحدب بودن باعث می‌شوند که حل‌کننده به جواب بهینه نرسد. معادله ۴ یک قید غیرخطی نابرابر و به دلیل دایره بودن محدب است ولی چون بعضی از قیود مسئله باید خطی شوند، این قید نیز باید خطی شود. ترم آخر تابع هدف نیز به دلیل ضرب یک متغیر باینری و یک متغیر پیوسته غیرخطی است؛ بنابراین تابع هدف نیز باید خطی‌سازی شود.

خطی‌سازی ضرب متغیر باینری و پیوسته

در تابع هدف ضرب متغیر باینری $CS_{i,t}$ در یک متغیر پیوسته $LG_{i,t}$ وجود دارد. برای خطی‌سازی تابع هدف، معادلات زیر جایگزین معادله ۱ می‌شود:

$$\text{Min } \sum_t (\sum_i c^G p_{i,t}^G + \sum_i c^{\text{emi}} \sigma_i p_{i,t}^G - \sum_i c^D p_{i,t}^D + (c^B \eta_{1,t} - c^S \mu_{1,t}) \quad (14)$$

$$|L_{i,t}| \leq M_I CS_{i,t} \quad (15)$$

$$|LG_{i,t} - L_{i,t}| \leq M_I (1 - CS_{i,t}) \quad (16)$$

خطی‌سازی محدودیت توان ظاهری

معادله ۴ یک معادله با متغیرهای مربع و محدب است ولی به دلیل اینکه تعدادی از محدودیت‌ها باید خطی شوند، این محدودیت که محدب است نیز باید خطی‌سازی شود. روش خطی‌سازی مبتنی بر پولیگون برای تقریب ترم‌های مربعی به کار می‌رود. شعاع دایره از پولیگون S انتخاب می‌شود:

$$S_i = S_i^{\max} \sqrt{(2\pi/n) / \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right)} \quad (17)$$

جایی که n تعداد لبه‌ها از پولیگون استفاده شده برای خطی‌سازی است. در اینجا محدودیت‌های خطی‌سازی با $n=6$ فرمول‌سازی می‌شود. معادلات خطی شده ۱۸ تا ۲۰ جایگزین معادله غیرخطی ۴ می‌شود.

$$-\sqrt{3}(p_{i,t}^G + S_i) \leq q_{i,t}^G \leq -\sqrt{3}(p_{i,t}^G - S_i) \quad (18)$$

$$-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot S_i \leq q_{i,t}^G \leq \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot S_i \quad (19)$$

$$\sqrt{3}(p_{i,t}^G - S_i) \leq q_{i,t}^G \leq \sqrt{3}(p_{i,t}^G + S_i) \quad (20)$$

خطی‌سازی محدودیت‌های پخش بار

محدودیت‌های ۵ و ۶ مدل را به‌شدت به یک مدل غیرخطی نامحدب تبدیل می‌کند. خطی‌سازی معادلات پخش بار براساس سری‌های تیلور و فرضیات زیر انجام می‌شود:

۱. اندازه‌های ولتاژ هر باس همیشه یک عدد نزدیک به یک است.
 ۲. تفاوت زاویه در امتداد یک خط بسیار کوچک است؛ به‌طوری که می‌توان $\sin\theta_k = \theta_k$ و $\cos\theta_k = 1$ را در نظر گرفت.
- براساس فرض اول، اندازه ولتاژ باس را می‌توان همانند زیر در نظر گرفت:

$$V_{i,t} = 1 + \Delta V_{i,t} \quad (21)$$

جایی که انتظار می‌رود $\Delta V^{min} \leq \Delta V_i \leq \Delta V^{max}$ بسیار کوچک باشد. با استفاده از فرضیات فوق داریم:

$$P_{i,t} = \sum_j (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}) (G_{i,j} + B_{i,j} \cdot \theta_{ij,t}) \quad (22)$$

$$Q_{i,t} = \sum_j (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}) (G_{i,j}\theta_{ij,t} - B_{i,j}) \quad (23)$$

اما دقت کنید که همچنان معادلات ۲۲ و ۲۳ غیرخطی هستند. از آنجایی که انتظار می‌رود $\Delta V_{i,t}$ ، $\Delta V_{j,t}$ و $\theta_{ij,t}$ کوچک باشند. ضرب $\Delta V_{i,t}\theta_{ij,t}$ و $\Delta V_{j,t}\theta_{ij,t}$ را می‌توان به‌عنوان یک عبارت مرتبه دوم در نظر گرفت؛ بنابراین به دلیل کوچک بودن، این عبارات در نظر گرفته نمی‌شوند. معادلات خطی‌سازی شده نهایی برای پخش بار همانند زیر به‌دست می‌آید:

$$P_{i,t} = \sum_j ((1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}) G_{i,j} + B_{i,j} \cdot \theta_{ij,t}) \quad (24)$$

$$Q_{i,t} = \sum_j (G_{i,j}\theta_{ij,t} - (1 + \Delta V_{i,t} + \Delta V_{j,t}) B_{i,j}) \quad (25)$$

بنابراین مدل محدب برای مسئله MINLP نامحدب ارائه شد. این مدل محدب توسط حل‌کننده CPLEX در نرم‌افزار گمز حل شده است.

ایجاد ریزشکبه‌های بهینه

در این مقاله، نظریه گراف برای ایجاد امکان تشکیل MGها در شرایط وقوع خطا استفاده می‌شود. با توجه به این نظریه، هر شبکه با یک گراف معادل نشان داده می‌شود. هر لبه این گراف شامل سوئیچ‌های قابل کنترل شبکه و گره منبع شامل فیدرهایی که به شبکه بالادست متصل هستند یا واحد MT با قابلیت کنترل فرکانس هستند. سپس حلقه‌های اساسی گراف مشخص می‌شوند. حلقه اساسی شامل کوچک‌ترین حلقه ممکن و حلقه‌های مستقل است. هریک از حلقه‌های اساسی با یک بردار توصیف شده است که اعضای آن لبه‌های حلقه تشکیل‌دهنده هستند که به نام بردارهای حلقه اساسی (FLVها) نامیده می‌شوند. هریک از این حلقه‌ها شامل مجموعه‌ای از سوئیچ‌های قابل کنترل به شرح زیر است: حلقه‌های اساسی می‌توانند به حلقه‌های اساسی واقعی و مجازی تقسیم شوند که به ترتیب از ساختار شبکه و واحد MT با قابلیت کنترل فرکانس حاصل می‌شود؛ بنابراین اضافه کردن هر واحد MT در شبکه باعث ایجاد یک حلقه اساسی

مجازی جدید می‌شود. پس از تعیین FLVهای گراف، الگوریتم تولید درخت / جنگل پوشا برای تولید یک ساختار MG ممکن با در نظر گرفتن محدودیت شعاعی شبکه و ضرورت تأمین تمام بارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک درخت پوشا یک زیرگراف است که شامل تمام گره‌های گراف با حداقل تعداد ممکن لبه‌ها می‌باشد. این بدان معنی است که یک لبه از یک درخت پوشا، در حداقل یک زوج گره که در ابتدا متصل شده‌اند، قطع شده است. در این مقاله، جنگل پوشا معادل پیکربندی ممکن شبکه است. از آنجایی که برخی از شاخه‌ها یا لبه‌های حلقه‌های اساسی در برخی حلقه‌ها مشترک هستند، با انتخاب هر لبه مشترک، تمام لبه‌هایی که در مسیر لبه انتخاب شده و در حلقه قرار گرفته‌اند باید از کاندیدهای انتخاب لبه در حلقه‌های مشترک بعدی حذف شوند.

این قانون تضمین می‌کند که ساختارهای ایجاد شده هیچ حلقه‌ای ندارند و تمام بارها به نقطه تولید متصل می‌شوند. علاوه بر این، یکی از ویژگی‌های قابل توجه روش پیشنهادی، قابلیت ایجاد تعداد مطلوب از جزیره‌ها است. در این وضعیت، اگر فقط یک سوئیچ از هر یک از حلقه‌های اساسی انتخاب شده باشند، شبکه در قالب درخت پوشا یکپارچه می‌شود. انتخاب هر سوئیچ از هر حلقه مجازی، معادل ایجاد یک MG در شبکه است؛ بنابراین، با در نظر گرفتن یا نادیده گرفتن حلقه مجازی در فرایند انتخاب تصادفی سوئیچ‌های باز، اپراتور می‌تواند تعدادی از MGهای ایجاد شده را کنترل کند. نکته قابل توجه این است که با در نظر گرفتن بخش جداسازی خطا، یکی از سوئیچ‌های باز شده همیشه به‌عنوان یک مقدار مشخص در نظر گرفته می‌شود و از این رو تعداد متغیرها کاهش می‌یابد. برای دانستن پیکربندی ممکن شبکه، یک الگوریتم PSO برای تعیین بهینه‌نگی استفاده می‌شود.

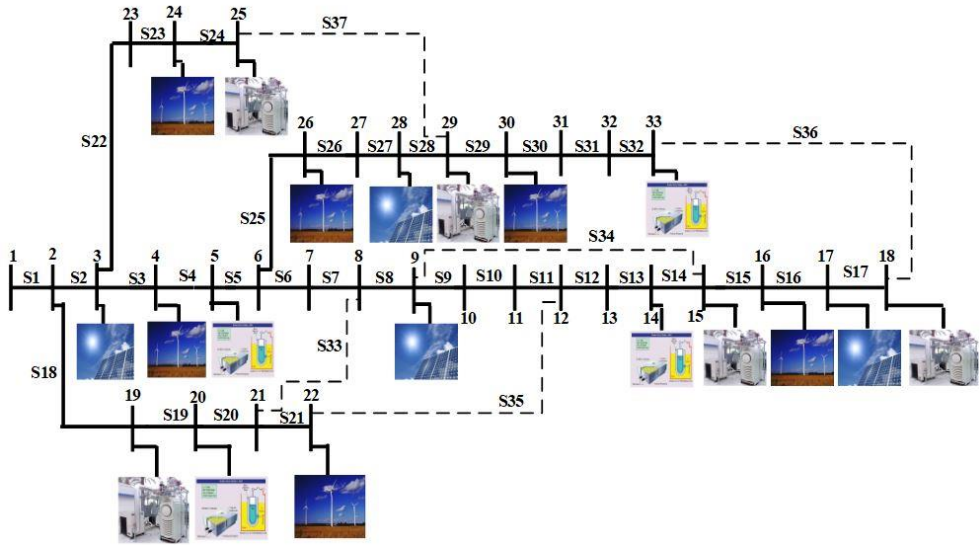
نتایج عددی

در این بخش به منظور اعتبارسنجی، روش پیشنهادی روی یک شبکه تست ۳۳ باس IEEE ارائه شده است. این شبکه در شکل ۱ نشان داده شده است. هزینه تولید میکروتوربین‌ها ۰.۱ دلار / کیلووات ساعت، هزینه آلودگی میکروتوربین‌ها ۰.۰۲ دلار / کیلوگرم، قیمت فروش برق به مشتریان ۰.۳ دلار / کیلووات ساعت، قیمت برای خرید/فروش از/به شبکه بالادست ۰.۱ دلار / کیلووات ساعت است. ضرایب تولید توان توربین بادی، فتوولتائیک و بارها به ترتیب مطابق با شکل‌های ۲ تا ۴ است. اطلاعات ظرفیت توان میکروتوربین‌ها، توربین بادی و فتوولتائیک همانند جدول ۱ است. محدوده ولتاژ مجاز بین ۰.۹۵ تا ۱.۰۵ فرض شده است. الگوریتم پیشنهادی روی یک کامپیوتر با CPU ۲.۵ گیگاهرتز و RAM ۴ گیگا هرتز اجرا شده است. در این مقاله، سه سناریو برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده است:

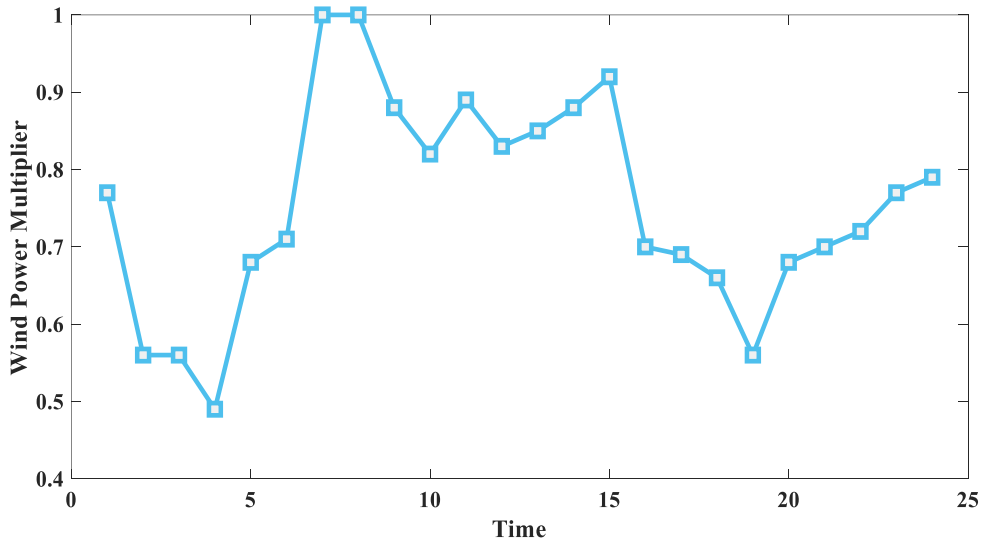
سناریو ۱- در نظر گرفتن تمام بارها بصورت مسکونی: در این سناریو تمام بارها مسکونی هستند و منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها همانند جدول ۱ در سیستم ۳۳ باس حضور دارند.

سناریو ۲- در نظر گرفتن شبکه مورد مطالعه به شکل واقعی: همان‌طور که می‌دانیم در بیشتر سیستم‌های توزیع منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازها با تعداد محدودی وجود دارند. در سناریوی اول در نظر گرفتیم که در سیستم ۳۳ باس، ۵ میکروتوربین، ۵ توربین باد، ۴ PV و ۴ باتری وجود دارد. ولی در سناریو ۲ تعداد منابع تولید پراکنده و باتری را کم کرده تا سیستم به شکل واقعی نزدیک‌تر شود. تعداد و ظرفیت منابع تولید پراکنده در سناریو ۲ همانند جدول ۲ است که تعداد میکروتوربین، توربین باد، PV و باتری به دو عدد تغییر کرده است. همچنین ظرفیت میکروتوربین‌ها را نیز به دلیل عملکرد واقعی‌تر نسبت به سناریو ۱ کاهش داده‌ایم.

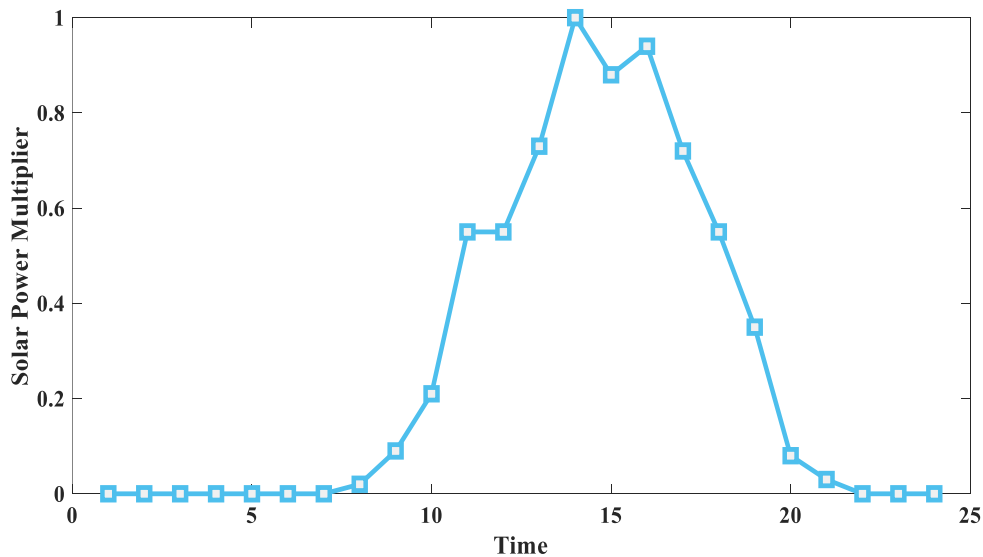
سناریو ۳- در نظر گرفتن بارهای مسکونی و غیرمسکونی: در سناریو ۳، منابع و ذخیره‌سازها همانند سناریو ۲ و مطابق جدول ۲ هستند. اما در این سناریو، بارهای موجود در باس‌های ۵، ۷، ۸، ۲۴، ۲۵، ۳۰ و ۳۲ صنعتی و بقیه بارها مسکونی هستند. هزینه برداشت بار برای بارهای مسکونی ۲.۲ دلار / کیلووات ساعت و برای بارهای غیرمسکونی ۲.۸۲ دلار / کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است.



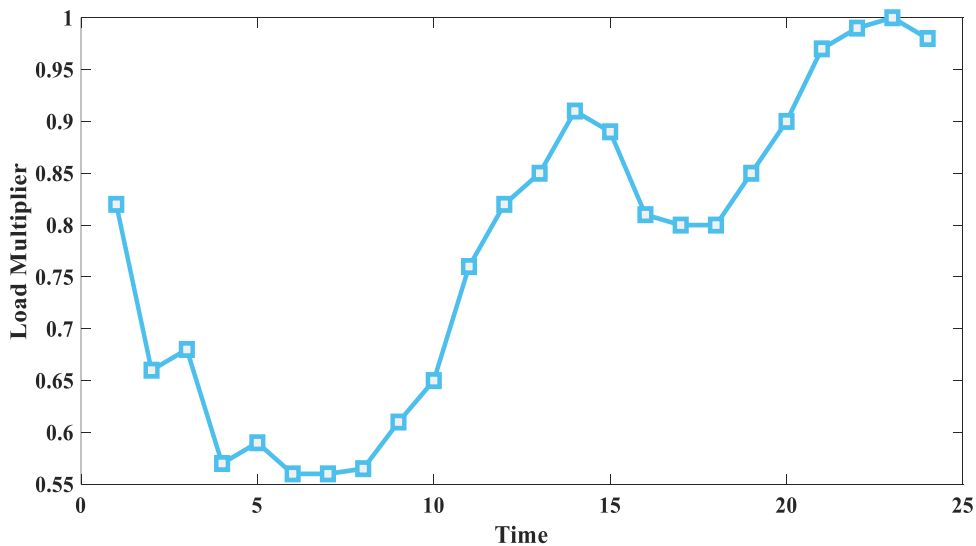
شکل ۱. سیستم مورد مطالعه



شکل ۲. ضرایب توان بادی



شکل ۳. ضرایب توان خورشیدی



شکل ۴. ضرایب بار

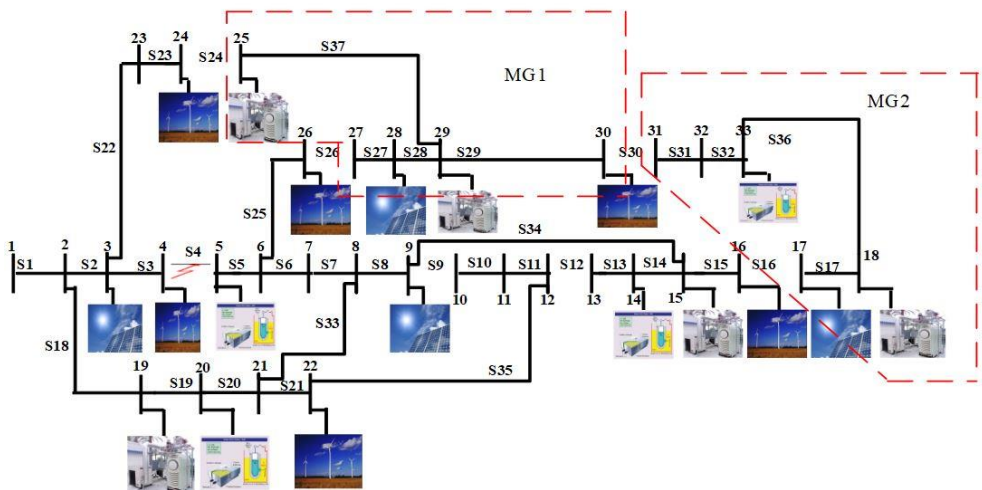
جدول ۱. اطلاعات ذخیره‌ساز، فتوولتائیک، باد و میکروتوربین‌ها در سناریو ۱

میکروتوربین‌ها		باد		فتوولتائیک		ذخیره‌ساز			
کیلووات	باس	کیلووات	باس	کیلووات	باس	شارژ اولیه	کیلووات	حداقل شارژ باتری	باس
۸۰۰	۱۵	۳۰	۴						
۶۵۰	۱۸	۸۵	۱۶	۶۰	۳	۰.۱	۱۵۰	۰.۲	۵
۱۰۰	۱۹	۶۰	۲۲	۶۰	۹	۰.۹	۱۵۰	۰.۲	۱۴
۷۵۰	۲۵	۵۰	۲۴	۴۰	۱۷	۰.۸	۲۰۰	۰.۲	۲۰
۷۵۰	۲۹	۵۰	۲۶	۵۰	۲۸	۰.۵	۲۰۰	۰.۲	۳۳
		۷۰	۳۰						

جدول ۲. اطلاعات ذخیره‌ساز، فتوولتائیک، باد و میکروتوربین‌ها در سناریوهای ۲ و ۳

میکروتوربین‌ها		باد		فتوولتائیک		ذخیره‌ساز			
کیلووات	باس	کیلووات	باس	کیلووات	باس	شارژ اولیه	کیلووات	حداقل شارژ باتری	باس
۳۰۰	۱۸	۳۰	۴	۴۰	۱۷	۰.۱	۱۵۰	۰.۲	۵
۳۵۰	۲۹	۷۰	۳۰	۵۰	۲۸	۰.۸	۲۰۰	۰.۲	۲۰

در مطالعه موردی این مقاله فرض شده است که خطا در خط ۴ قرار دارد. اولین قدم در بحث تاب‌آوری این است که پس از خطا بهترین آرایش تعیین شود. در ابتدا خطا بین باس ۴ و ۵ به وسیله سکشن لایزر S4 ایزوله شده است. برای آرایش بهینه در حالت خودترمیمی، سکشن لایزرهای S9, S4, S12, S16, S24, S26 و S30 و تای سوئیچ‌های S33, S34, S35, S36 و S37 عمل می‌کنند. آرایش بهینه در خطای موردنظر در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. تشکیل ریزشبکه‌های بهینه پس از تجدید پیکربندی شبکه

در جدول ۳ میزان تولید توان میکروتوربین‌ها را در ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. در ساعت ۲۰ میکروتوربین ۱۹ با تمام ظرفیت و میکروتوربین ۲۵ خاموش است و در ساعت ۲۱ میکروتوربین ۱۹ خاموش شده است. در سناریو ۱ هیچ برداشت باری اتفاق نیفتاده است. همچنین نحوه شارژ و دشارژ باتری‌ها همراه با حالت شارژ باتری‌ها نشان داده شده است. شارژ باتری ۵ در وضعیت اضطراری در ساعت ۲۰ منطقی به نظر نمی‌رسد. ولی به دلیل اینکه شارژ اولیه باتری ۵ (مطابق جدول ۱) ۱۰ درصد است و حداقل شارژ باتری ۲۰ درصد (برای افزایش طول عمر باتری) در نظر گرفته شده است، بنابراین باتری ۵ در ساعت ۲۰ به میزان ۱۵.۷۸۹ کیلووات شارژ شده است تا میزان شارژ باتری به حداقل شارژ باتری که ۲۰ درصد است برسد. باتری‌های ۱۴، ۲۰ و ۳۳ در ساعت ۲۰ دشارژ شده‌اند تا به سیستم در این وضعیت اضطراری کمک کنند. در این ساعت حالت، شارژ باتری‌های ۱۴ و ۲۰ به ترتیب ۷۱ و ۶۴ درصد است. ولی باتری ۳۳ دارای حالت شارژ ۲۰ درصد در ساعت ۲۰ است؛ بنابراین باتری‌های ۱۴ و ۲۰ با توجه به وضعیت شارژشان قابلیت دشارژ شدن مجدد در ساعت ۲۱ را دارند. بنابراین این دو باتری در ساعت ۲۱ به ترتیب با ۶۹ و ۸۰ کیلووات دشارژ شده‌اند ولی باتری ۳۳ قابلیت دشارژ در ساعت ۲۱ را ندارد؛ زیرا به حداقل میزان شارژ باتری (۲۰ درصد) رسیده است. همچنین توان دریافتی از شبکه در ساعت ۲۰ و ۲۱ به ترتیب ۱۱۰۵.۷۳۲ و ۱۱۸۷.۵۵۱ کیلووات است؛ بنابراین طرح پیشنهادی در سناریو اول بدون هیچ قطع باری توانسته است تعادل توان را در سیستم برقرار کند.

جدول ۳. برنامه‌ریزی بهینه میکروتوربین‌ها در حالت تاب‌آوری برای سناریو ۱

برنامه‌ریزی میکروتوربین‌ها	برنامه‌ریزی ذخیره‌سازها		توان مبادله شده از شبکه بالادست		زمان (ساعت)
	کیلووات	باس	حالت شارژ	باس	
۷۵۴.۲۴۳	۱۵	-۱۵.۷۸۹	۰.۲	۵	۲۰
۴۷۵.۷۴۴	۱۸	۲۵.۵	۰.۷۱	۱۴	
۱۰۰	۱۹	۲۸	۰.۶۴	۲۰	
-	۲۵	۵۴	۰.۲	۳۳	۱۱۰۵.۷۳۲
۷۳۵.۳۸	۲۹	-	۰.۲	۵	۲۱
۷۱۸.۷۵۳	۱۵	-	۰.۲	۱۴	
۵۴۵.۹۹۴	۱۸	۶۹	۰.۲	۲۰	
-	۱۹	۸۰	۰.۲	۳۳	
۷.۹۸	۲۵	-	۰.۲	۳۳	
۷۵۰	۲۹	-	-	-	۱۱۸۷.۵۵۱

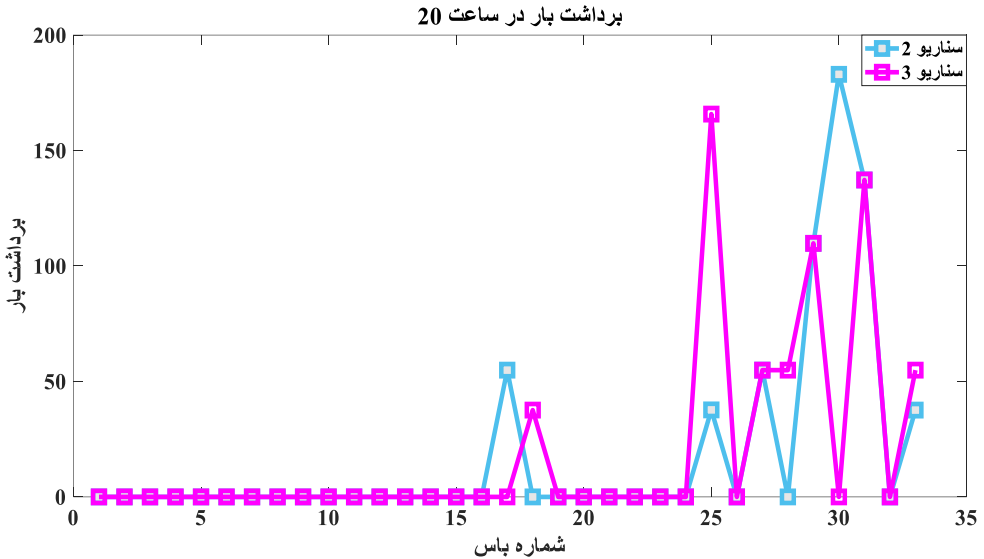
در جدول ۴، برنامه‌ریزی برای ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ برای سناریو ۲ (کاهش تعداد منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای موجود در سیستم) بیان شده است. میکروتوربین‌های موجود در باس ۱۸ و ۲۹ با ۱۰۰ درصد ظرفیتشان عمل می‌کنند که با توجه به کمبود تولید و وضعیت اضطراری سیستم طبیعی است. باتری ۵ همانند سناریو یک عمل می‌کند. اما باتری ۲۰ در ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب با ۶۱.۶۹۳ و ۴۶.۳۰۷ کیلووات دشارژ می‌شود. پس از دشارژ باتری ۲۰ در ساعت ۲۱ مشاهده می‌کنیم که وضعیت شارژ باتری به ۰.۲ رسیده است که نشان می‌دهد باتری ۲۰ با حداکثر ظرفیت در ساعت ۲۱ دشارژ شده است. توان دریافتی از شبکه بالادست هم ۲۱۲۷.۹۶۵ و ۲۱۸۴.۰۸۱ کیلووات به ترتیب برای ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ است. توان دریافتی از شبکه بالادست نسبت به سناریو ۱ افزایش یافته است که به دلیل کمبود تولید طبیعی به نظر می‌رسد. در سناریو ۱ هیچ برداشت باری رخ نداد اما در این سناریو به دلیل کمبود منابع تولید

پراکنده و ذخیره‌ساز در سیستم ۶۱۵.۱۲۴ و ۶۵۳.۹۷۴ کیلووات برداشت بار به ترتیب در ساعت‌های ۲۰ و ۲۱ اتفاق افتاده است. بنابراین در سناریو ۲ و مقایسه آن با سناریو ۱ اهمیت نفوذ بالای منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز و تأثیر آنها در کاهش برداشت بار سیستم مشخص شده است.

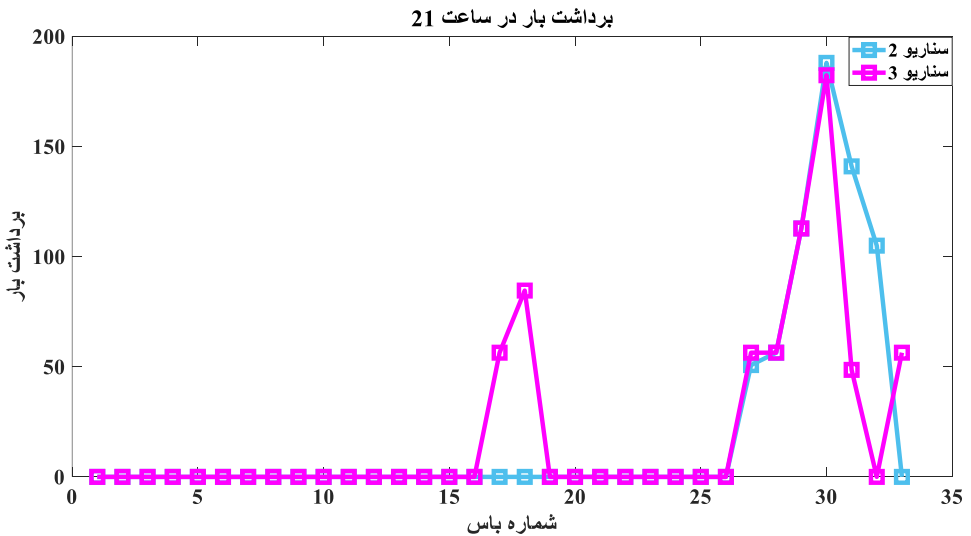
جدول ۴. برنامه‌ریزی بهینه میکروتوربین‌ها در حالت تاب‌آوری برای سناریو ۲

کل میزان برداشت بار (کیلووات)	برنامه‌ریزی میکروتوربین‌ها		برنامه‌ریزی ذخیره‌سازها			توان مبادله شده از شبکه بالادست	زمان (ساعت)
	کیلووات	باس	کیلووات	حالت شارژ	باس		
۶۱۵.۱۲۴	۳۰۰	۱۸	-۱۵.۷۸۹	۰.۲	۵	۲۱۲۷.۹۶۵	۲۰
	۳۵۰	۲۹	۶۱.۶۹۳	۰.۴۶	۲۰		
۶۵۳.۹۷۴	۳۰۰	۱۸	-	۰.۲	۵	۲۱۸۴.۰۸۱	۲۱
	۳۵۰	۱۹	۴۶.۳۰۷	۰.۲	۲۰		

در سناریو ۳ بارها به دو دسته بارهای مسکونی و بارهای صنعتی تقسیم شده‌اند. بارهای صنعتی اهمیت بالاتری نسبت به بارهای مسکونی دارند؛ بنابراین در تابع هدف به‌وسیله اعمال هزینه برداشت بار متفاوت برای بارهای مسکونی و غیرمسکونی تا حد امکان از برداشت بارهای صنعتی جلوگیری شده است. گرچه میزان کل برداشت بار و برنامه‌ریزی میکروتوربین، باطری و توان دریافتی از شبکه در هر دو سناریو یکسان است. اما برای اینکه اهمیت بارها در نظر گرفته شود، الگوریتم برداشت بارهای مختلفی را در باس‌های مختلف سیستم انجام داده است. همان‌طور که گفته شد در سناریو ۳، باس‌های ۵، ۷، ۸، ۲۴، ۲۵، ۳۰ و ۳۲ بارهای صنعتی هستند. در شکل ۶، برداشت بار در ساعت ۲۰ برای سناریو ۲ و ۳ نشان داده شده است. از بین باس‌های صنعتی در هر دو سناریو باس‌های ۲۵ و ۳۰ (جزیره ۱) برداشت شده‌اند. با این تفاوت که در سناریو ۳ میزان ۱۶۵.۷۸ کیلووات از جزیره ۱ برداشت شده است، در حالی که میزان برداشت بار برای سناریو ۲ ۲۲۰.۶۸ کیلووات از جزیره ۱ است. بنابراین الگوریتم به‌خوبی توانسته است میزان برداشت بار در باس‌های صنعتی را با در نظر گرفتن هزینه بیشتر در تابع هدف کاهش دهد و برداشت بار را از باس‌های با اولویت پایین‌تر انجام دهد تا تعادل توان در سیستم برقرار شود. همچنین در شکل ۷ برداشت بار در باس‌های مختلف در ساعت ۲۱ برای سناریوهای ۲ و ۳ نشان داده شده است. در ساعت ۲۱ در سناریو ۲ در باس‌های صنعتی ۳۰ (در جزیره ۱) و ۳۲ (در جزیره ۲)، به ترتیب با برداشت بار ۱۸۸ و ۱۰۴.۹۹۴ کیلووات رخ داده است. در حالی که در سناریو ۳ برداشت بار تنها در باس ۳۰ (در جزیره ۱) با مقدار ۱۸۲.۳۸ کیلووات رخ داده است؛ بنابراین برداشت بار در سناریو ۳ مقدار ۱۱۰.۶۱۴ کیلووات از بارهای صنعتی نسبت به سناریو ۲ کمتر شده است. در سناریو ۳ مقدار تابع هزینه ۹۸۷۰۱.۱۹۰۹ است که اگر اولویت‌بندی در نظر گرفته نشود، مقدار تابع هزینه ۱۴۵۳۷۶.۱۳۸۹ به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه در هزینه بهره‌برداری است.



شکل ۶. برداشت بار برای سناریوهای ۲ و ۳ در ساعت ۲۰



شکل ۷. برداشت بار در سناریوهای ۲ و ۳ در ساعت ۲۱

برای مقایسه روش پیشنهادی، نتایج با روش پیشنهادی رفرنس [۲۳] و [۱] مقایسه شده است. رفرنس [۱] مدل MINLP نامحدب را توسط حل کننده دیکاپت حل کرده است. پس از مدل سازی مدل MINLP نامحدب و حل آن توسط حل کننده دیکاپت به جواب نشدنی می‌رسیم. مدل پیشنهادی در [۱] با هیچ حل کننده‌ای به جواب بهینه نمی‌رسد و در تمام حل کننده‌ها جواب نشدنی دارد. تنها راه رسیدن به جواب بهینه سراسری، استفاده از مدل پیشنهادی در این

مقاله است. علاوه بر این زمان اجرای برنامه در گام دوم (بهره‌برداری) ۰.۰۵ ثانیه است. بنابراین زمان حل نسبت به [۱] که دارای زمان حل بسیار بالایی (۱۱۸ ثانیه) به دلیل داشتن مدل MINLP نامحدب است، به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. روش موجود در [۱] به دلیل استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در فاز بازیابی نمی‌تواند رسیدن به بهینه سراسری را تضمین کند.

دو نکته مهم در مسئله خودترمیمی کم بودن زمان حل مسئله و رسیدن به جواب بهینه سراسری است. در جدول ۵ مشاهده می‌کنیم روش پیشنهادی منجر به بهبود قابل توجهی در نتایج از نظر زمان حل مسئله و رسیدن به جواب بهینه سراسری می‌شود. در روش پیشنهادی زمان حل ۰.۳۵ ثانیه است که نسبت به روش [۱] و [۲۳] به میزان قابل توجهی کمتر است. از نظر تلفات و مینیمم ولتاژ نیز روش پیشنهادی برتری دارد که نشان‌دهنده کارایی روش پیشنهادی در حل مسئله خودترمیمی است.

جدول ۵. مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود در ادبیات در سناریو ۱

روش‌های حل	تلفات (کیلووات)	مینیمم ولتاژ (ولت)	زمان اجرا (ثانیه)
روش پیشنهادی	۲۷.۱	۰.۹۹۲	۰.۳۵
روش [۱]	۳۱	۰.۹۷۱	۱۱۸
روش [۲۳]	۳۶	۰.۹۶۵	۲۸

نتیجه‌گیری

در این مقاله، چارچوبی جامع برای عملکرد یک شبکه توزیع هوشمند در حضور هر دو نوع منابع پراکنده قابل توزیع و غیرقابل توزیع پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، شبکه توزیع به یک یا چند ریزشبکه تبدیل شده است. در حقیقت پس از وقوع خطای شدید در شبکه بالادست، ارتباط شبکه توزیع با شبکه بالادست قطع می‌شود. هدف این است که هر ریزشبکه بتواند بار خود را با کمترین حذف یا برداشت بار (یا حتی بدون حذف بار) تغذیه کند. منابع خورشیدی و بادی موجود در شبکه به‌صورت احتمالاتی مطالعه شده است که دقت مدل‌سازی را نسبت به حالت قطعی بالا می‌برد. برای شبیه‌سازی و عملیات بهینه‌سازی نیز از نرم‌افزار قدرتمند GAMS استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شبکه در حالت خودترمیم می‌تواند با تشکیل ریزشبکه‌های جزیره‌ای و خودکفا و تنظیم مجدد منابع پراکنده، حداکثر بار هریک از ریزشبکه‌ها را تغذیه کند. همچنین برای رسیدن به جواب بهینه یک مدل محدب ارائه شده است که توسط این مدل رسیدن به جواب بهینه سراسری تضمین می‌شود و زمان حل را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین اولویت‌بندی بار و در نظر گرفتن بارهای صنعتی نیز در این مقاله انجام شد و نتایج نشان‌دهنده عملکرد خوب روش پیشنهادی در حل مسئله هستند. در کارهای آینده می‌توان عدم قطعیت را با روش‌هایی همچون شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل‌سازی دقیق‌تر ارائه داد.

فهرست علائم و اختصارات

اندیس‌ها

i	شمارنده باس
t	شمارنده زمان

متغیرها

$\eta_{1,t}$	توان خریداری شده از شبکه بالادست.
$\mu_{1,t}$	توان فروخته شده به شبکه بالادست.
$CS_{i,t}$	متغیر باینری برای تعیین باسهایی که در باس i و در زمان t حذف شوند.
$P_{i,t}$	توان اکتیو خالص شارش یافته به شبکه از باس i در زمان t ام.
$Q_{i,t}$	توان راکتیو خالص شارش یافته به شبکه از باس i در زمان t ام.
$V_{i,t}$	دامنه ولتاژ باس i در زمان t ام.
$\delta_{i,j,t}$	اختلاف فاز بین ولتاژ باس‌های i ام و j ام در زمان t ام.
$p_{i,t}^G$	مقدار کل توان اکتیو تولیدی در باس i ام در زمان t ام.
$q_{i,t}^G$	مقدار کل توان راکتیو تولیدی در باس i ام در زمان t ام.
$q_{i,t}^D$	مقدار کل توان راکتیو بارها در باس i ام در زمان t ام.
$V_{i,t}$	ولتاژ باس i ام در زمان t ام.
$\Delta V_{i,t}$	میزان تغییرات ولتاژ در باس i .
$LC_{i,t}$	میزان قطع بار در باس i ام.
$L_{i,t}$	تعریف متغیر دوم برای برداشت بار به دلیل خطی‌سازی.

پارامترها

c^G	هزینه تولید.
c^{emi}	هزینه آلودگی.
c^D	سود ناشی از فروش برق.
c^B	هزینه برق خریداری شده از شبکه بالادست.
c^S	سود ناشی از فروش برق به شبکه بالادست.
ϵ	مقدار تغییرات مجاز ولتاژ در سیستم توزیع.
$B_{i,j}$	سوسپتانس خط بین باس i ام و j ام.
$G_{i,j}$	کندوکتانس خط بین باس i ام و j ام.
S_i^{max}	ظرفیت میکروتوربین‌ها در باس i ام.
$p_{i,t}^D$	مقدار کل توان اکتیو بارها در باس i ام در زمان t ام.
M_I	یک عدد بزرگ.

References

- [1] Zadsar, M., Haghifam, M. R., & Larimi, S. M. M. (2017). Approach for self-healing resilient operation of active distribution network with microgrid. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(18), 4633-4643 .
- [2] Cavalcante, P. L., López, J. C., Franco, J. F., Rider, M. J., Garcia, A. V., Malveira, M. R. R., Martins, L. L., & Direito, L. C. M. (2016). Centralized Self-Healing Scheme for Electrical Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 145-155. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2454436>
- [3] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A. I., & Fouly, T. H. M. E.-. (2013). Comprehensive Operational Planning Framework for Self-Healing Control Actions in Smart Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), 4192-4200. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2259852>
- [4] Wang, Z., & Wang, J. (2015). Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization Into Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(6), 3139-3149. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2389753>
- [5] Wang, Z., Chen, B., Wang, J., & Chen, C. (2016). Networked Microgrids for Self-Healing Power Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 310-319. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2427513>
- [6] Li, C., Liu, X., Zhang, W., Cao, Y., Dong, X., Wang, F & ,Li, L. (2016). Assessment Method and Indexes of Operating States Classification for Distribution System With Distributed Generations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(1), 481-490. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2402157>
- [7] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A. I., & El-Fouly, T. (2015). Optimized Multiple Microgrid-Based Clustering of Active Distribution Systems Considering Communication and Control Requirements. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(2), 711-723. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2352212>
- [8] Chen, B., Chen, C., Wang, J., & Butler-Purry, K. L. (2018). Sequential Service Restoration for Unbalanced Distribution Systems and Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), 1507-1520. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2720122>
- [9] Li, J., Ma, X., Liu, C., & Schneider, K. P. (2014). Distribution System Restoration With Microgrids Using Spanning Tree Search. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(6), 3021-3029. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2312424>
- [10] Karim, M. A., Currie, J., & Lie, T. T. (2018). Dynamic Event Detection Using a Distributed Feature Selection Based Machine Learning Approach in a Self-Healing Microgrid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(5), 4706-4718. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2812768>
- [11] Arefifar, S. A., Mohamed, Y. A. I., & El-Fouly, T. H. M. (2012). Supply-Adequacy-Based Optimal Construction of Microgrids in Smart Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3), 1491-1502. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2198246>
- [12] Hosseinneshad, V., Rafiee, M., Ahmadian, M., & Siano, P. (2018). A comprehensive framework for optimal day-ahead operational planning of self-healing smart distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 28-44. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.12.031>

- [13] Farzin, H., Fotuhi-Firuzabad, M., & Moeini-Aghtaie, M. (2016). Enhancing Power System Resilience Through Hierarchical Outage Management in Multi-Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2869-2879. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2558628>
- [14] Xu, Y., Liu, C. C., Schneider, K. P., Tuffner, F. K., & Ton, D. T. (2018). Microgrids for Service Restoration to Critical Load in a Resilient Distribution System. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 426-437. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2591531>
- [15] Shahnia, F., Chandrasena, R. P. S., Rajakaruna, S., & Ghosh, A. (2014). Primary control level of parallel distributed energy resources converters in system of multiple interconnected autonomous microgrids within self-healing networks. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 8(2), 203-222 .
- [16] Souza, F. A. d., Vila, C. U., Enembreck, F., & Carpes, L. M. (2017). A Multiagent Framework for Self-Healing Mechanisms Considering Priority-Based Load Shedding and Islanding with Distributed Generation in Smart Distribution Grids. *IEEE Latin America Transactions*, 15(4), 632-638. <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7896348>
- [17] Chen, C., Wang, J., Qiu, F., & Zhao, D. (2016). Resilient Distribution System by Microgrids Formation After Natural Disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 958-966. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2429653>
- [18] Pashajavid, E., Shahnia, F., & Ghosh, A. (2015). Development of a self-healing strategy to enhance the overloading resilience of islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(2), 868-880. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2477601>
- [19] Sun, W., Ma, S., Alvarez-Fernandez, I., & Golshani, A. (2018). Optimal self-healing strategy for microgrid islanding. *IET Smart Grid*, 1(4), 143-150 . <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2018.0057>
- [20] Anuranj, N. J., Mathew, R. K., Ashok, S., & Kumaravel, S. (2016, March 4-6). *Resiliency based power restoration in distribution systems using microgrids*. 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7584186>
- [21] Alipour, M. (2017). Optimal allocation of SVC and TCSC in power system by means of fuzzy estimator with the approach of increasing the static stability of the voltage. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 14(42), 95-121 .
- [22] Alinaghizadeh ardestani, m., & Vakili, A. (2020). Output feedback Controller design for HVAC system with delayed based Robust control approach. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 89-99. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112758>
- [23] Choopani, K., Hedayati, M., & Effatnejad, R. (2020). Self-healing optimization in active distribution network to improve reliability, and reduction losses, switching cost and load shedding. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(5), e12348. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12348>