



دانشگاه صنعتی سهند

DOR:

20.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9

نشریه علمی غیرنظری در مهندسی برق

دوره ۹ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۱

صفحات ۴ الی ۲۶

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

بهبود ظرفیت میزبانی شبکه توزیع از منابع تولید پراکنده بادی با استفاده از بازآرایی و جبران‌سازی توان راکتیو

بابک دهقانفر^۱، محسن کیا^۲، لیلا ظفری^۳، حمیدرضا آراسته^۴ و فرخنده جباری^۵

^۱ کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، تهران، ایران

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند، تهران، ایران mkia@nri.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی سامانه‌های کنترل هوشمند، تهران، ایران lzafari@nri.ac.ir

^۴ استادیار، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، تهران، ایران harasteh@nri.ac.ir

^۵ استادیار، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، تهران، ایران fjabbari@nri.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی

شبکه توزیع،

ظرفیت میزبانی،

جبران‌سازی توان راکتیو،

منابع تولید پراکنده،

بازآرایی شبکه.

دنیای مدرن امروزی به منظور تامین تقاضای رو به رشد انرژی الکتریکی نیازمند کاربرد سیستم‌های قدرت دارای قابلیت اطمینان بالاست. به عنوان مثال، پیک مصرف برق در فصل تابستان کاربرد منابع انرژی تجدیدپذیر جهت تامین بار، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی جهت مدیریت سمت تولید، برنامه‌های پاسخگویی بار به منظور مدیریت سمت تقاضا و سایر راهکارهای مقابله با بحران انرژی را ضروری ساخته است. اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر فناوری‌های الکترونیک قدرت به شبکه سبب بروز مسائلی چون آلودگی کیفیت توان و خطای عملکرد دستگاه‌های حفاظتی می‌شود که باید در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم در نظر گرفته شود. با در نظر گرفتن چالش‌های یاد شده و نیاز به یک روش بهینه برای بهبود کارایی سیستم‌های توزیع، صنعت برق را به سوی استفاده از فناوری‌های جدید سوق داده است. منابع تولید پراکنده یکی از عناصر مهم و جدانشدنی سیستم‌های توزیع مدرن هستند که از این میان استفاده از منابع بادی و فتوولتائیک روز به روز با افزایش تقاضای انرژی الکتریکی در پی عواملی چون افزایش جمعیت، مصارف غیرمجاز نظیر دستگاه‌های غیرمجاز استخراج رمزارز، افزایش تاسیسات تهویه مطبوع برقی، گسترش می‌یابد. با این حال، محدودیت‌های موجود در مقدار نفوذ منابع تولید پراکنده یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در توسعه استفاده از این منابع است. به طور کلی، این مقاله به دنبال روشی جهت بهبود ظرفیت میزبانی شبکه توزیع از منابع تولید پراکنده با استفاده از بازآرایی و جبران‌سازی توان راکتیو است. به طور خلاصه، مدل‌سازی بازآرایی شبکه توزیع و منابع جبران‌ساز توان راکتیو، افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع و مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در مسئله اصلی‌ترین اهدافی است که در این مقاله انجام شده است. لازم به ذکر است، تابع هدف مسأله پیشنهادی افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی دریافتی از شبکه بالادست، انرژی منابع تولید پراکنده، تولید توان جبران‌سازی توان راکتیو و نیز هزینه قابلیت اطمینان شبکه توزیع است. علاوه بر این، قیود فنی شبکه نیز به عنوان محدودیت‌های موجود در نظر گرفته می‌شود. همچنین، به منظور دستیابی به نقطه بهینه مطلق با زمان اجرای بسیار پایین و درصد خطای بسیار پایین، مدل خطی آمیخته با عدد صحیح مسأله نیز توسعه داده می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان‌دهنده مزایای استفاده از روش پیشنهادی در افزایش ظرفیت میزبانی و در نتیجه توسعه استفاده از منابع تجدیدپذیر است.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.9, No.2

Autumn and Winter 2022

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Improvement of Wind Distribution Generation Hosting Capacity

by Reconfiguration and Reactive Power Compensation

Babak Dehghanfar¹, Mohsen Kia², Leila Zafari³, Hamidreza Arasteh⁴, Farkhondeh Jabbari⁵

¹ MSc, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Pardis Branch, Tehran, Iran

² **Corresponding Author**, Smart Control Systems Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. mkia@nri.ac.ir.

³ Smart Control Systems Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. lzafari@nri.ac.ir.

⁴ Power Systems Operation and Planning Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. harasteh@nri.ac.ir.

⁵ Power Systems Operation and Planning Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran. fjabbari@nri.ac.ir.

ABSTRACT

Keywords

distribution network,
distributed generation,
hosting capacity,
network reconfiguration,
reactive power compensation

In modern communities, design and development of high-reliable power systems has attracted more attention due to a significant increase in energy demands. Distributed Generation (DG) sources are key components of restructured distribution systems, among which renewable and clean energy sources such as solar photovoltaic panels and wind turbines have been attracted widely in reducing greenhouse pollutants. Meanwhile, peak electricity consumption in summer has made it necessary to integrate renewable-based power generation facilities, energy storage technologies, and demand response programs to procure a significant part of the increased demand in a clean and reliable manner. Connecting Renewable Energy Sources (RESs) based on power electronic technologies to power distribution grid causes some technical issues, such as power quality pollutions and protection failures, that should be involved in system planning and operation studies. However, the limited penetration level of distributed generations is an important challenge in the operation of future distribution networks. Hence, this paper aims to improve the hosting capacity of the distribution network from distributed generation sources using reactive power compensation and distribution system reconfiguration. In other words, reconfiguration of distribution systems and reactive power compensation could increase the hosting capacities of distribution systems. The objective function of the proposed problem is to increase the hosting capacity of the distribution network by minimizing the costs of energy received from the upstream network, the energy of distributed generation sources, the power generation of reactive power compensation sources, and the reliability cost of the distribution network taking into account the system technical constraints. Numerical results demonstrate the capability of the proposed approach to increase the hosting capacity of the distribution grids in the presence of RESs.

۱- مقدمه

توسعه پایدار بدون حفظ و نگهداری صحیح محیط‌زیست میسر نخواهد بود و به همین دلیل، بکارگیری فناوری‌های سبز یکی از الزامات آتی صنعت برق خواهد بود. آنچه بیش از پیش به نگرانی‌های بین‌المللی در زمینه انرژی دامن زده است، محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی است. طبق آمار سازمان اطلاعات انرژی آمریکا، میزان مصرف سوخت‌های فسیلی در سال ۲۰۲۲ در مقایسه با سال قبل ۱۵ درصد افزایش داشته است [۱]. رشد جمعیت، افزایش مراکز صنعتی و کارخانجات، گسترش تعداد خودروها، افزایش سوخت مصرفی نیروگاه‌ها به منظور تامین تقاضای برق افزایش یافته، نیاز بیشتر به مصرف فراورده‌های نفتی در فصل زمستان سبب افزایش مصرف سوخت و انتشار گازهای آلاینده گلخانه‌ای نظیر اکسیدهای کربن، نیتروژن و گوگرد شده است [۲]. میزان مصرف سوخت‌های فسیلی در ایران با افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر بادی، خورشیدی، آبی، زمین‌گرمایی و زیست توده به علت وجود منابع غنی در مناطق مختلف کشور افزایش یافته است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی که در سال ۲۰۲۱ منتشر شده است، در طی سی سال آینده، تقاضای جهانی انرژی با رشد پنجاه درصدی روبرو خواهد شد [۳]. بخش قابل توجهی از این انرژی در حوزه حمل و نقل مصرف شده و از طرف دیگر این حوزه یکی از مهم‌ترین منابع تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای است. از مهم‌ترین پیامدهای انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌توان به تغییر الگوهای آب و هوایی و بارندگی، پایین رفتن سطح آب دریاچه‌ها و رودخانه‌ها، و همچنین اثرات مخرب بر پوشش گیاهی، حیات وحش و سلامت انسان می‌توان اشاره نمود. لذا گسترش منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر مانند منابع بادی حتمی است. منابع تولید پراکنده سبب تغییر ساختار شبکه‌های توزیع از حالت پسیو به اکتیو شده و چنانچه برنامه‌ریزی‌ها به درستی صورت گیرد، مزایای فنی و اقتصادی فراوانی برای شبکه و مصرف‌کنندگان آن به همراه خواهند داشت. از طرفی دیگر سطح بالای نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر احتمال دارد که تأثیری منفی بر شبکه داشته باشد؛ مشکلات ناپایداری، تغییر پروفیل ولتاژ شبکه توزیع، افزایش ادوات الکترونیک قدرت که کیفیت توان شبکه را هدف قرار می‌دهد، بحث‌های مربوط به حفاظت شبکه با نفوذ بالای منابع تولید پراکنده (سطح اتصال کوتاه و در نتیجه تنظیمات سیستم حفاظتی در حضور منابع تولید پراکنده تغییر می‌کند) و موارد دیگر [۴]. شدت مسائل مطرح شده به ظرفیت و مکان نصب منابع تولید پراکنده، مشخصات بار و پیکربندی شبکه‌های توزیع بستگی دارد [۵، ۶]. به علت ماهیت نوسانی منابع انرژی تجدیدپذیر، تغییرات خروجی آنها تأثیر چشم‌گیری در بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع دارد. بنابراین برنامه‌ریزی صحیح، پیش‌بینی هوا، زمان‌بندی تولید منابع تولید پراکنده به منظور برآورد بار تقاضا شده ضروری است. خطاهای موجود در پیش‌بینی توان منابع انرژی تجدیدپذیر (به عنوان مثال، تابش خورشید یا سرعت باد) یا پیش‌بینی بار ممکن است موجب عدم قطعیت در بهره‌برداری زمان واقعی شبکه و کاهش قابلیت اطمینان در تحویل توان گردد. بنابراین پیش‌بینی هوا، بار، تولیدات منابع تجدیدپذیر و قیمت فروش برق به عنوان یک پیش‌نیاز برای بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع هوشمند مطرح می‌شود. توان تولیدی منابع انرژی تجدیدپذیر متصل به شبکه یا مستقل از آن به تغییرات شرایط آب و هوایی بستگی داشته و ماهیت تصادفی دارد که بهره‌برداری از این واحدها را به ازای تغییرات کوتاه‌مدت بار با مشکل مواجه می‌کند [۷]. ترکیب منابع انرژی تجدیدپذیر مقیاس بزرگ نیازمند یک شبکه قدرت منعطف برای مقابله با کمبود یا بیشبود انرژی در بازه‌های زمانی مختلف بوده و می‌توان از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای برقراری تعادل بین تولید و مصرف استفاده نمود که هزینه اضافی و تلفات تبدیل انرژی به شبکه تحمیل می‌کنند. همچنین، واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر سوخت‌های فسیلی نظیر دیزل ژنراتورها نیز گزینه مناسبی برای تأمین ذخیره چرخان مناسب و مقابله با عدم قطعیت تولیدات

تجدیدپذیر می‌باشد [۶ و ۸]. در این راستا افزایش ظرفیت شبکه جهت پذیرش این منابع یکی از چالش‌های مطرح است. شایان ذکر است استفاده از این منابع به دلیل وجود عدم قطعیت‌هایی در تولید، چالش استفاده از آن‌ها را وسیع‌تر می‌نماید. بازآرایی و استفاده از منابع جبران‌ساز توان راکتیو راهکاری است که جهت استفاده گسترده از منابع بادی پیشنهاد می‌گردد، اما وجود قیود مختلف در شبکه مانند محدودیت‌های ولتاژ و جریان و همچنین قیود منابع تولید پراکنده در کنار عدم قطعیت‌های تولید بادی و میزان بار الکتریکی مسئله را بسیار پیچیده می‌کند. بنابراین توجه به روش حل مسئله نیز ضروری است. در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده مسائلی چون محدودیت توان تولیدی، محدودیت‌های فیزیکی بهره‌برداری از مولدهای تولید پراکنده (اتصال موازی به شبکه یا تغذیه بار محلی به صورت مستقل از شبکه)، مدت زمان موردنیاز برای راه‌اندازی واحد و سنکرون کردن آن با شبکه، تاثیر فناوری‌های الکترونیک قدرت بر کیفیت توان شبکه، نحوه هماهنگی و تعامل بین بهره‌بردار سیستم و بهره‌بردار مولدهای تولید پراکنده، تاثیر منابع تولید پراکنده بر سیستم حفاظتی، اتوماسیون و مانیتورینگ و چگونگی ارتباط با مرکز کنترل دیسپاچینگ در نظر گرفته می‌شود.

به علت وجود نگرانی‌های ناشی از مصرف کنترل نشده سوخت فسیلی، دولت‌ها و سازمان‌ها به سمت وسوی استفاده از فناوری‌های جدید با قابلیت آلودگی محیط زیست پایین به عنوان منابع تولید پراکنده مانند منابع بادی هستند. از این رو پیش‌بینی می‌شود که ظرفیت منابع یاد شده در شبکه توزیع در چند سال آینده بسیار افزایش یابد. لذا برای جلوگیری از حوادث قابل انتظار از عدم مدیریت این عناصر در شبکه توزیع، نیاز به مدیریت انرژی عناصر یاد شده و همچنین ایجاد تغییر وضعیت ساختار شبکه تحت عنوان بازآرایی جهت افزایش ظرفیت شبکه جهت استفاده از این منابع است. به منظور استفاده حداکثری از این منابع باید ظرفیت شبکه توزیع افزایش یابد که نیازمند ارائه راهکارهای گوناگونی است.

علاوه بر این موضوع، افزایش تعداد عناصر یاد شده در شبکه توزیع موجب افزایش پارامترهای عدم قطعیت شبکه توزیع خواهد شد. از مهمترین منابع عدم قطعیت شبکه توزیع هوشمند می‌توان به تولیدات منابع انرژی تجدیدپذیر (تابش خورشید، سرعت باد)، پیش‌بینی بار، و تغییرات قیمت برق اشاره نمود. منظور از عدم قطعیت به این شرح است که یک و یا چند پارامتر از عناصر موجود در شبکه توزیع مانند بار مصرفی، سرعت وزش باد و شدت تابش خورشید همواره دارای وضعیت مشخصی نیستند و در ساعات مختلف روز و روزهای مختلف (به عنوان مثال تقاضای برق در روزهای کاری و تعطیلات) و فصول مختلف (پیک مصرف در تابستان) مقادیر متفاوتی دارند که به طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست. لذا تولیدات منابع انرژی تجدیدپذیر به روش‌های پیش‌بینی تخمین زده شده و یا بر مبنای روش‌های مدل‌سازی عدم قطعیت سناریوهای مختلفی برای تولیدات آنها اجاد شده و رفتار شبکه تحت سناریوهای مختلف ارزیابی می‌شود. لذا اپراتور شبکه توزیع بایستی بتواند به ازای تمامی سناریوهای حاصل از پارامترهای مختلف عدم قطعیت شرایط مدیریتی خاصی را انجام دهد تا در این صورت شبکه توزیع با عملکرد مناسبی قادر به فعالیت باشد. از این رو در این مقاله مسأله بهبود ظرفیت میزبانی شبکه توزیع از منابع تولید پراکنده با استفاده از بازآرایی و جبران‌سازی توان راکتیو بیان می‌گردد. در سال‌های اخیر روش‌های هوش مصنوعی و الگوریتم‌های ابتکاری برای بازآرایی شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع تولید پراکنده به کار رفته است. روش‌های هوش مصنوعی به دو دسته تکنیک‌های فازی و الگوریتم‌های آتش‌بازی^۱ طبقه‌بندی می‌شوند.

^۱ Firework algorithms

الگوریتم‌های ابتکاری شامل روش‌های مبتنی بر جمعیت (ژنتیک، کلونی مورچگان، ازدحام ذرات، جستجوی هارمونی، کلونی زنبور عسل)، شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم جستجوی ممنوعه هستند [۹].

تاکنون مطالعات ارزشمندی در زمینه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های توزیع در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و تولیدات تجدیدپذیر صورت گرفته است. در [۱۰] از روش کلاسیک ریاضی برای حل مسئله استفاده شده است. در این مقاله افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده بادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت سرعت باد و میزان بار الکتریکی مدل‌سازی گردیده است. شایان ذکر است که مدل مسئله پیشنهادی به صورت مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن برابر با کمینه‌سازی شبکه توزیع است. علاوه بر این، قیود مسئله شامل معادلات پخش توان، معادلات حاکم بر تولیدات پراکنده و محدودیت‌های فنی شبکه توزیع هوشمند است. در [۱۱] بررسی عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک^۱ در شبکه توزیع بیان شده است. براساس آن سیستم‌های فتوولتائیک در ساعات حوالی ظهر به علت چگالی بالای تابش خورشید، توان بالایی را به شبکه تزریق می‌کنند که در صورت کم‌باری شبکه می‌تواند سبب افزایش ولتاژ گردد. همچنین در [۱۲] عملکرد واحدهای بادی بررسی شده است که براساس آن، توان خروجی واحدهای بادی وابسته به سرعت باد است. از آنجا که سرعت باد دارای وضعیت مشخصی نیست، لذا توان خروجی واحدهای بادی نیز دارای عدم قطعیت است. در [۱۳]، توان تولیدی توربین بادی که در آن میزان سرعت باد با استفاده از تابع چگالی احتمال ویبال^۲ مدل شده است. همچنین در [۱۴]، مدیریت انرژی تولیدات پراکنده در کنار ذخیره‌سازهای انرژی^۳ به منظور افزایش انعطاف‌پذیری شبکه توزیع^۴ هوشمند ارائه شده است. در [۱۵-۱۸]، مسائل مختلفی از بازآرایی شبکه توزیع^۵ در حضور خودروهای الکتریکی، منابع تولید پراکنده^۶ و ذخیره‌سازهای انرژی بیان شده است. حضور خودروهای برقی و هیبرید به عنوان بار در شبکه توزیع هوشمند می‌تواند سبب افزایش عدم قطعیت بار در الگوهای رانندگی غیرقابل پیش‌بینی دقیق شود. همچنین به علت ماهیت غیرقطعی الگوهای رانندگی و مصرف برق (شارژ باتری) آنها، میزان دشارژ و ساعاتی که پک باتری این خودروها قابلیت تزریق توان به شبکه را دارد، نیز دارای عدم قطعیت خواهد بود. در [۱۵ و ۱۶] بازآرایی شبکه توزیع در حضور خودروهای الکتریکی انجام شده و در [۱۷ و ۱۸] بازآرایی شبکه توزیع در حضور تولیدات پراکنده مانند سیستم‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی^۷ بدون در نظر گرفتن همبستگی آنها بیان شده است. در این مراجع عنوان شده است که مدل مسئله به صورت برنامه‌نویسی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح^۸ است که عموماً برای حل آن از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم آموزش و یادگیری، ازدحام ذرات، ژنتیک و میگوها استفاده شده است. در [۱۹ و ۲۰] مدل مسئله بازآرایی ریزشبکه در حضور خودروهای الکتریکی و تولیدات پراکنده ارائه شده است. مسئله مذکور به صورت مسئله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن برابر با کمینه‌سازی هزینه‌های تامین انرژی است. همچنین قیود مسئله شامل

^۱ Photovoltaic (PV)

^۲ Weibull

^۳ Energy storage

^۴ Distribution network resilience

^۵ Distribution network reconfiguration

^۶ Distributed Generation (DG)

^۷ Wind turbines

^۸ Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)

معادلات شبکه، خودروه‌های الکتریکی (وضعیت شارژ^۱، محدودیت حداکثر توان شارژ و دشارژ باتری خودروها، قید بالانس توان در هر ساعت بر مبنای شارژ اولیه، توان جذب شده توسط باتری از شبکه یا توان تزریق شده توسط باتری به شبکه، راندمان شارژ و دشارژ باتری)، تولیدات پراکنده و قابلیت اطمینان (خسارت خاموشی بار با در نظر گرفتن نرخ خرابی تجهیزات) است. این مسأله به صورت برنامه‌نویسی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح است که مرجع مذکور برای حل آن از الگوریتم خودتطبیقی انتخاب تکثیری بهبودیافته^۲ استفاده شده است. براساس نتایج این مرجع، ارائه مسأله مذکور در شبکه توزیع موجب بهبود عملکرد خودروه‌های الکتریکی و تولیدات پراکنده در ریز شبکه (شارژ و دشارژ زمان‌بندی شده باتری خودروها در شرایط بیشبود و کسری تولید مولدهای پراکنده) شده است. همچنین تلفات و هزینه انرژی نیز متناسباً نسبت به عدم استفاده از مسأله مذکور کاهش می‌یابند. مرجع [۲۱] افزایش ظرفیت میزبانی با استفاده از جبران‌ساز SVC صورت پذیرفته است. ظرفیت بهینه منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولیدات پراکنده و بار به دست آمده است. همه تغییرات ممکن بار و تولیدات پراکنده به صورت مقادیر تصادفی در بازه‌هایی معلوم در نظر گرفته شده است. همچنین از ترانسفورماتورهای تپ‌چنجدار و جبران‌ساز SVC برای کنترل ولتاژ شبکه و برآورده شدن قید حداقل و حداکثر ولتاژ مجاز شینه‌ها، استفاده شده است. در مراجع [۲۲-۲۵] افزایش ظرفیت شبکه توزیع برای استفاده از سلول‌های خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. مرجع [۲۵] عدم قطعیت استفاده از این منابع را نیز مدل نموده است.

همانطور که اشاره شد گسترش منابع تولید پراکنده حتمی است. لذا افزایش ظرفیت شبکه جهت پذیرش این منابع یکی از چالش‌های موجود در این زمینه است. شایان ذکر است استفاده از منابع تجدیدپذیر به دلیل وجود عدم قطعیت‌هایی در تولید و هزینه نسبتاً بالای آنها چالش استفاده از آن‌ها را وسیع‌تر می‌نماید. بازآرایی و استفاده از منابع جبران‌ساز توان راکتیو راهکاری است که جهت استفاده گسترده از این منابع پیشنهاد می‌گردد؛ اما وجود قیود مختلف در شبکه مانند محدودیت‌های ولتاژ و جریان و همچنین قیود منابع تولید پراکنده در کنار عدم قطعیت‌های تولید بادی و میزان بار الکتریکی مسئله را بسیار پیچیده می‌کند. بنابراین، توجه به روش حل مسئله نیز ضروری است. به طور خلاصه، نوآوری‌های مقاله عبارت هستند از:

- افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با استفاده و مدیریت بهینه منابع تولید پراکنده، جبران‌ساز توان راکتیو و بازآرایی
- مدل‌سازی بازآرایی شبکه توزیع در حضور جبران‌ساز توان راکتیو
- افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده
- مدل‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در مسئله افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع
- ارائه یک مدل کامل جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در مسئله افزایش ظرفیت استفاده از منابع تولید پراکنده با استفاده از بازآرایی شبکه توزیع و جبران‌سازی توان راکتیو

در جدول ۱، خلاصه مراجع مرتبط با موضوع پژوهش ارائه شده است تا میزان نوآوری ملموس‌تر باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند منابع بادی به صورت همزمان با استفاده از بازآرایی و جبران‌سازی توان راکتیو مورد توجه قرار نگرفته است. لذا در این مقاله مسأله بهبود ظرفیت میزبانی شبکه توزیع از منابع تولید پراکنده با استفاده از بازآرایی و جبران‌سازی توان راکتیو بیان می‌گردد.

^۱ State of Charge

^۲ Self-Adaptive Modified Clonal Selection Algorithm (SAMCSA)

جدول ۱. خلاصه مقالات مرتبط با موضوع پژوهش

مرجع	انرژی تجدید پذیر	جبران‌سازی توان راکتیو	بازآرایی	عدم قطعیت	تابع هدف
۳	*	-	*	*	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
۱۱	*	-	-	*	کاهش هزینه شبکه
۱۴	-	-	*	*	کاهش هزینه شبکه
۱۶	*	-	-	*	کاهش هزینه شبکه
۱۸	*	-	*	-	کاهش هزینه تامین انرژی
۲۰	*	-	-	-	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
۲۲	*	-	-	*	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه
این مقاله	*	*	*	*	افزایش ظرفیت میزبانی شبکه

در ادامه، ابتدا در بخش (۲) مدل پیشنهادی مقاله ارائه می‌شود. در بخش (۳) مدل‌سازی عدم قطعیت بیان شده است. در بخش (۴)، با استفاده از شبکه توزیع ۳۳ شینه استاندارد IEEE مطالعات عددی مورد نیاز انجام و تحلیل‌های لازم انجام شده است. در پایان، در بخش (۵)، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بیان شده است.

۲- مدل پیشنهادی

در این بخش مدل ریاضی مسأله «افزایش ظرفیت شبکه توزیع» بیان می‌شود. شایان ذکر است که مدل مسأله پیشنهادی به صورت مسأله بهینه‌سازی است که تابع هدف آن برابر با افزایش ظرفیت نصب منابع تولید پراکنده در شبکه است. همانطور که در فصل قبل اشاره گردید، یکی از راهکارهای افزایش ظرفیت میزبانی شبکه، استفاده بهینه از تجهیزات (منابع تزریق توان راکتیو مانند خازن‌ها) و ویژگی‌های موجود در شبکه (مانند بازآرایی) است. بدین منظور باید مجموع هزینه تامین توان (انرژی) در شبکه حداقل گردد. لذا تابع هدف به صورت کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی دریافتی از شبکه بالادست، هزینه انرژی تولیدات پراکنده (در شبکه‌های توزیع هوشمند فقط می‌توان بادی و خورشیدی استفاده کرد)، هزینه تولید انرژی منابع توان راکتیو و هزینه قابلیت اطمینان شبکه توزیع است. علاوه بر این، قیود مسأله شامل معادلات پخش توان، معادلات حاکم بر تولیدات پراکنده و منابع توان راکتیو (خازن)، محدودیت‌های فنی شبکه و محدودیت‌های قابلیت اطمینان در شبکه توزیع است. قابل توجه است که مسأله مذکور به صورت مسأله برنامه‌نویسی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح است که این مدل مسأله عموماً دارای زمان اجرای بالا است و همچنین آن دارای پاسخ بهینه محلی است. لذا در ادامه به منظور دستیابی به نقطه بهینه سراسری با زمان اجرای بسیار پایین و درصد خطای بسیار پایین، مدل مسأله خطی

آمیخته با اعداد صحیح^۱ معادل با مسأله اصلی بیان می‌گردد. شایان ذکر است که در مسأله مذکور پارامترهای عدم قطعیت مختلفی از قبیل بار مصرفی، سطح تابش خورشید، سرعت باد، قیمت انرژی وجود دارد که سناریوهای متناظر با آنها براساس تابع‌های چگالی احتمال مربوطه ایجاد شده و سپس با استفاده از روش کاهش سناریو برگشتی، سناریوهای با احتمال رخداد بالا استخراج می‌شوند.

مسأله پیشنهادی به صورت یک مسأله بهینه‌سازی است که دارای تابع هدف و قیود است. جزئیات تابع هدف به شرح زیر است:

- کمینه‌سازی هزینه انرژی دریافتی از شبکه بالادست [۲۷]
- کمینه‌سازی هزینه انرژی دریافتی از تولیدات پراکنده
- کمینه‌سازی هزینه انرژی منابع جبران‌ساز راکتیو (در این تحقیق از خازن متغیر برای جبران‌سازی توان راکتیو استفاده شده است)

- کمینه‌سازی هزینه قابلیت اطمینان [۲۸]

علاوه بر این قیود مسأله به شرح زیر است:

- معادلات پخش توان
- معادلات حاکم بر تولیدات پراکنده
- معادلات حاکم بر بازآرایی شبکه
- معادلات قابلیت اطمینان
- محدودیت‌های فنی شبکه از قبیل حدود مجاز ولتاژ باس‌ها و توان عبوری خطوط

بنابراین، تابع هدف مسأله مذکور به صورت زیر است.

$$\min \text{Cost} = \sum_{t \in \varphi_t} \rho_t \{P_t^{\text{Sub}} + \gamma \cdot \text{EENS}_t\} + \sum_{i \in \varphi_{dg}} (\lambda_i P_{i,t}^{\text{DG}} + SU_i v_{i,t} + SD_i w_{i,t}) \quad (1)$$

که آن برابر کمینه‌سازی هزینه‌های مختلف موجود در شبکه توزیع مانند هزینه انرژی دریافتی از شبکه بالادست (بخش اول)، هزینه قابلیت اطمینان (بخش دوم) و هزینه انرژی تولیدات پراکنده (بخش سوم) است. در این رابطه، شاخص مورد استفاده برای قابلیت اطمینان، هزینه خاموشی است که آن برابر حاصلضرب قیمت جریمه خاموشی و انرژی مورد انتظار تغذیه نشده^۲ است. علاوه بر این، هزینه انرژی یا بهره‌برداری تولیدات پراکنده برابر هزینه انرژی، خاموشی و راه‌اندازی تولیدات پراکنده است.

قیود مسأله نیز برابر با معادلات پخش توان (اکتیو و راکتیو)، تولیدات پراکنده، بازآرایی شبکه، قابلیت اطمینان و محدودیت‌های فنی شبکه است. این قیود در ادامه بیان شده است.

$$La_{n,t} + A_n^{\text{Sub}} P_t^{\text{Sub}} + \sum_{i \in \varphi_{dg}} A_{i,n}^{\text{DG}} P_{i,t}^{\text{DG}} - \sum_{h \in \varphi_n} A_{n,h}^L P_{n,h,t}^L = P_{n,t}^D \quad \forall n,t \quad (2)$$

$$A_n^{\text{Sub}} Q_t^{\text{Sub}} + A_n^r Q_t^r - \sum_{h \in \varphi_n} A_{n,h}^L Q_{n,h,t}^L = Q_{n,t}^D \quad \forall n,t \quad (3)$$

^۱ Mixed Integer Linear Programming (MILP)

^۲ Expected energy not supplied (EENS)

$$P_{n,h,t}^L = \left\{ g_{n,h} (V_{n,t})^2 - V_{n,t} V_{h,t} \left\{ g_{n,h} \cos(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) + b_{n,h} \sin(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) \right\} \right\} sw_{n,h,t} \quad \forall n, h, t \quad (4)$$

$$Q_{n,h,t}^L = \left\{ -b_{n,h} (V_{n,t})^2 + V_{n,t} V_{h,t} \left\{ b_{n,h} \cos(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) - g_{n,h} \sin(\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) \right\} \right\} sw_{n,h,t} \quad \forall n, h, t \quad (5)$$

$$A_n^{Sub} \theta_{n,t} = 0 \quad \forall n, t \quad (6)$$

$$N_{n,h}^{RCS} = \sum_{t \in \phi_i} |sw_{n,h,t} - sw_{n,h,t-1}| \quad \forall n, h \quad (7)$$

$$N_{n,h}^{RCS} \leq N_{n,h}^{RCS, \max} \quad \forall n, h \quad (8)$$

$$N_{L,t} = N_{Br} - N_B + 1 \quad \forall t \quad (9)$$

$$(P_{n,h,t}^L)^2 + (Q_{n,h,t}^L)^2 \leq (S_{n,h}^{L, \max})^2 \quad \forall n, h, t \quad (10)$$

$$(P_t^{Sub})^2 + (Q_t^{Sub})^2 \leq (S^{Sub, \max})^2 \quad \forall t \quad (11)$$

$$V_n^{\min} \leq V_{n,t} \leq V_n^{\max} \quad \forall n, t \quad (12)$$

$$S_i^{DG, \min} u_{i,t} \leq P_{i,t}^{DG} = or \leq S_i^{DG, \max} u_{i,t} \quad \forall i, t \quad (13)$$

$$u_{i,t} - u_{i,t-1} \leq v_{i,t} \quad \forall i, t \quad (14)$$

$$u_{i,t-1} - u_{i,t} \leq w_{i,t} \quad \forall i, t \quad (15)$$

$$Q_r^{r, \min} \leq Q_{r,t}^r \leq Q_r^{r, \max} \quad \forall r, t \quad (16)$$

$$EENS_t = \sum_{n \in \phi_n} La_{n,t} \quad \forall t \quad (17)$$

قیود (۲) الی (۶) مرتبط با معادلات پخش توان هستند که به ترتیب نمایان‌گر، تعادل توان اکتیو در هر باس و هر لحظه، تعادل توان راکتیو در هر باس و هر لحظه، توان اکتیو عبوری از خط مابین باس n و h ، توان راکتیو عبوری از خط مابین باس n و h ، میزان زاویه باس شبکه توزیع بالادست هستند. توجه شود که کلیدها بر روی خط سوار هستند. بنابراین اگر کلیدی وصل باشد (یعنی یک)، پس خط در شبکه موجود است و روابط (۴) و (۵) در مسأله ظاهر خواهند شد. ولی اگر کلیدی قطع باشد (یعنی صفر)، پس خط در شبکه موجود نیست و رابطه (۴) و (۵) در مسأله ظاهر نخواهند شد. قیود (۷) الی (۹) بیانگر قیود بازآرایی شبکه است که به ترتیب برابر با محاسبه تعداد کلیدزنی هر کلید در طول شبانه‌روز، محدودیت تعداد کلیدزنی و تعداد حلقه موجود در شبکه هستند. متناسب با قید (۹)، ساختار این شبکه توزیع، همواره بصورت شعاعی باقی خواهد ماند. قیود فنی ریزشکه یعنی محدودیت توان عبوری خطوط، توان شبکه بالادست و ولتاژ باس‌ها در قیود (۱۰) الی (۱۲) بیان شده است [۲۵-۲۶].

شایان ذکر است که قید تولیدات پراکنده در روابط (۱۳) الی (۱۵) ذکر شده است که مربوط به محدودیت ظرفیت آنها، لحظه راه‌اندازی و لحظه خاموشی هستند. توجه شود که در رابطه (۱۳)، عبارت مساوی برای واحدهای باد و سیستم‌های فتوولتائیک است و عبارت نامساوی برای انواع دیگر تولیدات پراکنده است. قید (۱۶) مربوط به محدودیت تولید توان راکتیو برای منابع جبران‌ساز است که برای هر کدام باید لحاظ گردد. در نهایت انرژی مورد انتظار تغذیه نشده در رابطه (۱۷) محاسبه شده است که آن برابر با مجموع بارهای تغذیه نشده در شبکه توزیع است.

همانطور که مشاهده شد، مسأله پیشنهادی دارای روابطی غیرخطی و غیرمحدب و متغیرهای باینری است. این امر موجب می‌شود که مسأله مذکور به صورت غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح باشد. در این مقاله، مدل برنامه‌نویسی خطی آمیخته با اعداد صحیح مسأله پیشنهادی توسعه داده شده است که در ادامه بیان می‌شود.

در معادلات پخش توان، روابط (۴) و (۵) به صورت غیرخطی هستند. برای خطی‌سازی آن فرض می‌شود که دامنه ولتاژ نزدیک به یک پریونیت است و اختلاف زاویه ولتاژ دو سر خط کم است [۲۲ و ۲۴]. شایان ذکر است که این فرضیات در شبکه توزیع صادق است. بنابراین با توجه به فرضیات، دامنه ولتاژ به صورت $1 + \Delta V$ بیان می‌شود که ΔV برابر انحراف ولتاژ است. همچنین عبارت‌های کوسینوس و سینوس به ترتیب برابر یک و $(\theta_{n,t} - \theta_{h,t})$ است. در نهایت معادلات خطی دو معادله مذکور به صورت زیر بیان می‌شوند [۲۵-۲۶]:

$$P_{n,h,t}^L = \{g_{n,h} (\Delta V_{n,t} - \Delta V_{h,t}) - b_{n,h} (\theta_{n,t} - \theta_{h,t})\} sw_{n,h,t} \quad \forall n, h, t \quad (18)$$

$$Q_{n,h,t}^L = \{-g_{n,h} (\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) - b_{n,h} (\Delta V_{n,t} - \Delta V_{h,t})\} sw_{n,h,t} \quad \forall n, h, t \quad (19)$$

همچنین:

$$V_{n,t} = 1 + \Delta V_{n,t} \quad \forall n, t \quad (20)$$

در نهایت معادلات داخل کרוشه در طرف راست معادلات (۴) و (۵) به صورت روابط (۱۸) و (۱۹) خطی‌سازی می‌شوند. ولی توجه شود که عبارت داخل کרוشه در متغیر باینری (sw) ضرب شده است. براساس روابط (۱۸) و (۱۹) داریم، $P = 0$ و $Q = 0$ اگر $sw = 0$ ، در غیر این صورت آن‌ها برابر عبارت‌های داخل کרוشه خواهند بود. به عبارتی دیگر، اگر کلید قطع باشد ($sw = 0$)، بنابراین خطی که کلید مذکور بر روی آن سوار بوده، از شبکه خارج می‌شود. از این رو توان اکتیو و راکتیو عبوری آن برابر صفر است. حال اگر کلید وصل باشد ($sw = 1$)، بنابراین خطی که کلید مذکور بر روی آن سوار بوده، در شبکه باقی می‌ماند. در این صورت توان اکتیو و راکتیو عبوری آن غیر صفر است. بنابراین موضوع فوق و یا روابط (۱۸) و (۱۹) را می‌توان به صورت زیر به روابطی خطی تبدیل کرد [۲۵-۲۶].

$$-M \times (1 - sw_{n,h,t}) \leq P_{n,h,t}^L - \begin{cases} g_{n,h} (\Delta V_{n,t} - \Delta V_{h,t}) \\ -b_{n,h} (\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) \end{cases} \leq M \times (1 - sw_{n,h,t}) \quad \forall n, h, t \quad (21)$$

$$-M \times (1 - sw_{n,h,t}) \leq Q_{n,h,t}^L - \left\{ \begin{array}{l} -g_{n,h} (\theta_{n,t} - \theta_{h,t}) \\ -b_{n,h} (\Delta V_{n,t} - \Delta V_{h,t}) \end{array} \right\} \leq M \times (1 - sw_{n,h,t}) \quad \forall n, h, t \quad (22)$$

$$(P_{n,h,t}^L)^2 + (Q_{n,h,t}^L)^2 \leq sw_{n,h,t} (S_{n,h}^{L,max})^2 \quad \forall n, h, t \quad (23)$$

که در روابط بالا، M معرف یک عدد بزرگ مثلاً 10^6 است. همچنین توجه شود که معادله مدنظر هم اکنون غیرخطی است که از تکنیک خطی‌سازی محدوده دایره‌ای برای خطی‌سازی آن استفاده می‌شود. حال اگر کلید وصل باشد ($sw = 1$)، متناسب با روابط (۲۱) و (۲۲)، توان اکتیو و راکتیو عبوری خطوط غیر صفر بود و برابر عبارات‌های داخل کروشه روابط (۱۸) و (۱۹) به ترتیب هستند. اما اگر کلید قطع باشد ($sw = 0$)، بنابراین براساس رابطه (۲۵)، توان اکتیو و راکتیو عبوری خطوط برابر صفر است [۲۵-۲۶].

شایان ذکر است که معادلات (۱۱) و (۲۳) به صورت صفحه دایره‌ای هستند. که برای خطی‌سازی آن براساس شکل ۱ رفتار می‌شود. براساس این شکل می‌توان گفت که یک صفحه دایره‌ای می‌توان محدوده داخلی یک n ضلعی منتظم باشد [۲۶]. لذا براساس [۱۸] معادلات مذکور به صورت زیر خطی‌سازی می‌شوند.

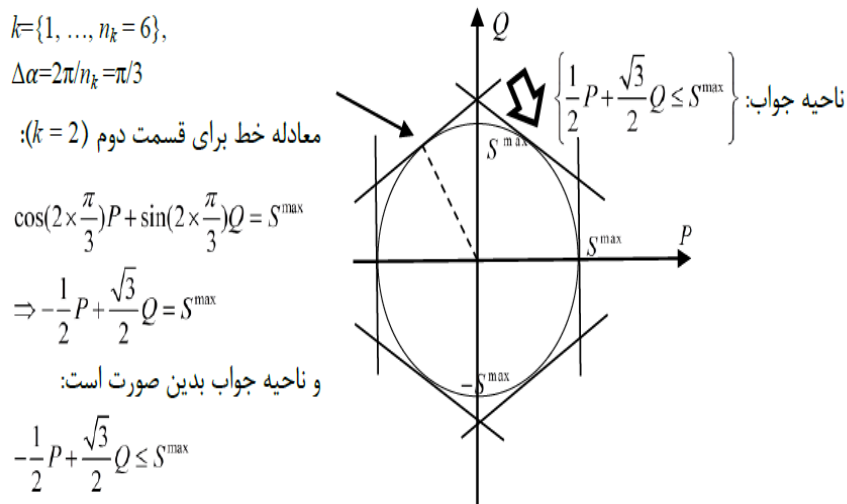
$$P_t^{Sub} \cos(k.\Delta\alpha) + Q_t^{Sub} \sin(k.\Delta\alpha) \leq S^{Sub,max} \quad \forall k, t \quad (24)$$

$$P_{n,h,t}^L \cos(k.\Delta\alpha) + Q_{n,h,t}^L \sin(k.\Delta\alpha) \leq sw_{n,h,t} S_{n,h}^{L,max} \quad \forall k, n, h, t \quad (25)$$

در خطی‌سازی قدر مطلق، ابتدا متغیر به دو مؤلفه مثبت و منفی تقسیم می‌شود، سپس معادله قدر مطلق براساس این مؤلفه‌ها تنظیم می‌شود. یعنی داریم:

$$a = |b| \quad \forall b_{min} \leq b \leq b_{max} \\ \Leftrightarrow \begin{cases} b = b^+ + b^- \\ a = b^+ - b^- \end{cases} \quad \forall 0 \leq b^+ \leq b_{max}, b_{min}(1-x) \leq b^- \leq 0 \quad (26)$$

در رابطه بالا، x یک متغیر باینری است.



شکل ۱. تقریب خطی صفحه دایره‌ای [۲۶]

۲-۱- سیستم بادی

نیروی تولید شده توسط یک توربین بادی در درجه اول به سرعت باد برخوردی به توربین بستگی دارد. جریان باد همیشه با اجزای متلاطم همراه است که طبیعتی متغیر همراه با عدم قطعیت دارد. عدم قطعیت‌های باد معمولاً با استفاده از روش‌های آماری، مانند استفاده از پتانج چگالی احتمال ریلی^۱ (برگرفته از توزیع ویبال^۲) برای ثبت رفتار باد در یک مکان خاص، مدل‌سازی می‌شوند. توزیع ریلی (و ویبال) یک تقریب مناسب برای پروفیل‌های سرعت باد ارائه می‌دهد که با معادله (۲۷) نشان داده می‌شود. که در آن c شاخص مقیاس و k پارامتر شکل است [۲۹].

$$f_w(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \times \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \quad (27)$$

بر این اساس، خطی‌سازی تکه‌ای منحنی توان درجه سوم را می‌توان برای محاسبه توان خروجی توربین بادی به عنوان تابعی از سرعت باد تصادفی، همانطور که در معادله (۲۸) نشان داده شده، استفاده کرد.

$$P_{wt,s}^t = \begin{cases} P_{wt,r} & v_r < v_s^t \leq v_{cout} \\ P_{wt,r} \frac{v_s^t - v_{cin}}{v_r - v_{cin}} & v_{cin} < v_s^t \leq v_r \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

که در آن، P_{wt}^t بیانگر توان خروجی توربین بادی در زمان t ، بیانگر ظرفیت نامی توربین بادی، v_r ، v_{cin} ، v_{cout} به ترتیب سرعت باد شروع به کار و سرعت باد قطع توربین بر حسب متر بر ثانیه است.

۲-۲- سیستم خورشیدی

سیستم‌های فتوولتائیک نور خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، که در آن توان الکتریکی تولید شده تابعی از میزان تابش خورشیدی برخوردی بر روی پانل‌های فتوولتائیک است. تابش خورشیدی می‌تواند به طور قابل توجهی به دلیل تغییرات فصلی و هواشناسی متفاوت باشد، و بنابراین تولید توان سیستم‌های فتوولتائیک به طور طبیعی با عدم قطعیت همراه است. همانطور که در مورد تولید باد وجود داشت، اغلب یک رویکرد آماری برای ثبت رفتار تصادفی استفاده می‌شود که تابع چگالی احتمال بتا معمولاً به عنوان بهترین تابع برای مدل‌سازی توان خروجی سلول‌های فتوولتائیک در نظر گرفته می‌شود [۲۹]. این تابع در معادله (۲۹) نشان داده شده است.

$$f_b(r) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} r^{\alpha-1} (1-r)^{\beta-1} & 0 \leq r \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

که در آن پارامترهای α و β از رابطه (۳۰) بر حسب میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) تابش خورشیدی برای دوره مورد مطالعه بدست می‌آید. r بیانگر مقدار تابش خورشیدی بر حسب کیلووات بر متر مربع است.

^۱ Rayleigh

^۲ Weibull

$$\beta = (1-\mu) \times \left(\frac{\mu \times (1+\mu)}{\sigma^2} - 1 \right), \alpha = \frac{\mu \times \beta}{1-\mu} \quad (30)$$

مقدار توان خروجی سیستم فتوولتائیک را می‌توان با معادله (۳۱)، با استفاده از راندمان سلول‌های خورشیدی، میزان تابش خورشیدی، و سطح پنل‌ها محاسبه کرد.

$$P_{pv,s}^t = \eta_{PV} \cdot r_s^t \cdot S_{PV} \quad (31)$$

که در آن P_{pv}^t توان خروجی سیستم فتوولتائیک (به کیلووات) است. S_{PV} ، η_{PV} به ترتیب راندمان و مساحت پنل‌های فتوولتائیک هستند.

۳-۲- بارهای الکتریکی

برای بهره‌بردار شبکه مهم است که بتواند میزان بارهای الکتریکی را برای یک روز آینده (۲۴ ساعت) پیش‌بینی کند. رفتار مصرف‌کنندگان و در نتیجه تقاضای انرژی آنها در روزهای مختلف و حتی در ساعات مختلف روز متفاوت است. تقاضای مشتریان تحت تأثیر عوامل زیادی مانند شرایط آب و هوایی، رویدادهای اجتماعی، تعطیلات رسمی و غیره قرار دارد. بنابراین، تقاضای مصرف‌کننده نیز به‌عنوان متغیر تصادفی مدل‌سازی می‌شود و عدم قطعیت آن به عنوان یک تابع چگالی احتمال نرمال، همانطور که در معادله (۳۲) بیان شده، مدل‌سازی می‌شود.

$$f_d(l) = \left(\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \right) \times \exp \left(-\frac{(l-\mu)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (32)$$

که در آن μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف استاندارد داده‌های بارهای الکتریکی در گذشته هستند [۳۰].

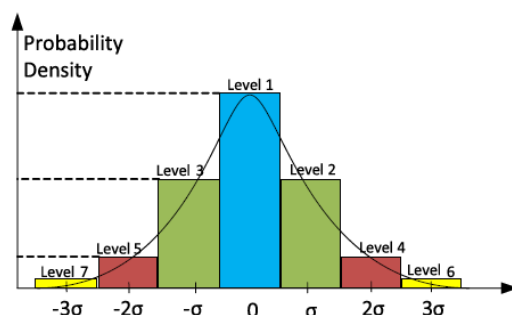
۳- مدل‌سازی عدم قطعیت

در علم ریاضیات، مبحث توزیع آمار و احتمال از اهمیت زیادی برخوردار است. در این بین، بخش توزیع احتمال و همچنین، توابع چگالی احتمال به دلیل سادگی روند کار و ایجاد یک وابستگی بین متغیرات موجود، بیشتر استفاده می‌شوند. در همین راستا، روند تولید سناریو و همچنین، اثر دادن احتمال آنها روی متغیرهای دارای عدم قطعیت به ترتیب به توزیع احتمالی و تابع چگالی احتمال نیازمند است [۲۹]. در این مقاله عدم قطعیت‌های بار اکتیو و راکتیو، قیمت انرژی، و توان اکتیو تولیدات پراکنده مدل‌سازی شده است. در مدل پیشنهادی، در ابتدا تولید سناریوهای زیادی صورت می‌گیرد و با روش‌های کاهش سناریو، تعداد سناریوها به حد مناسبی کاهش داده می‌شود. در نهایت مدل ارائه شده بایستی برای هر سناریو تکرار شود و مساله پیشنهادی به صورت مساله تصادفی^۱ حل خواهد شد.

^۱ Stochastic problem

(۱) **تولید سناریو:** در روش پیشنهادی، هر پارامتر عدم قطعیت برای اساس تابع چگالی احتمال^۱ تعیین خواهد شد. محدوده هر PDF به دو عبارت تکه‌های مجزا و یا سطوح احتمال تقسیم‌بندی می‌شود [۱۶]. هر سطح احتمال بیان‌گر یک خطای خاص پیش‌بینی مدل‌سازی در پارامتر عدم قطعیت متناظر است. به عنوان مثال، شکل ۲ یک PDF نرمال با هفت سطح احتمال را نمایش می‌دهد. فرآیند تولید سناریو در این بخش از الگوریتم چرخ رولت^۲ برای تولید سناریو بهره گرفته شده است. در هر سناریو و برای هر پارامتر عدم قطعیت، تعداد عبارت تصادفی در محدوده صفر الی یک تولید می‌شود. این تعداد عبارت‌های تصادفی در یک سطح احتمال متناظر که نمایان‌گر احتمال حضور برخی خطاها در متغیر عدم قطعیت است، فرو می‌روند [۲۲]. در نهایت این فرآیند برای همه متغیرهای عدم قطعیت تکرار می‌شوند تا اینکه همه سناریوهای ممکن ساخته شوند. تعداد بالای سناریوها تصمیم‌گیری را با مشکلات جدی مواجه می‌کند. یکی از مشکلات مهم، افزایش پیچیدگی مسئله به ازای افزایش تعداد سناریوها می‌باشد که به کمک روش‌های مختلفی می‌توان تعداد سناریوها را کاهش داد [۲۲].

(۲) **کاهش سناریو:** همانطور که اشاره شد در ابتدا بایستی سناریوهای تولید شوند که تعداد آنها بالا است و حجم محاسبات را افزایش خواهند داد. لذا بایستی تعداد سناریوها کاهش یابد. میزان محاسبات برای حل مدل‌های بهینه‌سازی بر پایه سناریو، به تعداد سناریوها بستگی دارد. به همین خاطر، ضروری است که مجموعه سناریوهای اصلی را به گونه‌ای کاهش دهیم که مشخصات مساله احتمالی تغییر فاحشی نکند. تعداد سناریوهای کاهش داده شده به نوع و طبیعت مساله بهینه‌سازی بستگی دارد، و باید کمتر از یک چهارم سناریوهای تولیدی باشد [۳۱]. ایده اولیه کاهش سناریو حذف سناریوهای با احتمال کم و سناریوهای نزدیک به هم می‌باشد. بنابراین، الگوریتم‌های کاهش سناریو، یک زیر مجموعه از سناریوها مشخص کرده و احتمالات برای سناریوی جدید را محاسبه می‌کند به نحوی که مقدار احتمال سناریوی کاهش داده شده به نزدیکترین سناریو از لحاظ فاصله احتمال اضافه شود [۳۲]. الگوریتم کاهش سناریو، سناریوهای دسته‌ای را با استفاده از محاسبه فاصله بین دو سناریو، کاهش می‌دهد. احتمال تمام سناریوهای حذف شده صفر در نظر گرفته می‌شود. احتمال جدید سناریوی حفظ شده برابر با جمع احتمالات پیشین و احتمال نزدیکترین سناریوهای حذف شده می‌باشد [۳۳]. در این مقاله از روش کاهش سناریو برگشتی همزمان، استفاده شده است [۲۲] در این روش فاصله بین سناریوها محاسبه شده و سپس امکان‌پذیرترین سناریو انتخاب می‌شود. مراحل این روش به شرح زیر است [۳۴]:



شکل ۲. تابع چگالی احتمال نرمال [۱۶]

^۱ Probability density function (PDF)

^۲ Roulette wheel mechanism (RWM)

✓ محاسبه فاصله بین دو سناریو: این روند براساس رابطه زیر انجام می‌شود:

$$DT_{ee'} = DT(R_e, R_{e'}) = \sqrt{\sum_{g=1}^w (r_{eg} - r_{e'g})^2} \quad \forall e, e' = 1, 2, \dots, N_w \quad (33)$$

در رابطه بالا، R_e برابر یک سناریو تولید شده است.

✓ کمترین فاصل با دیگر سناریوها برای هر سناریو R_e تعیین شود. یعنی داریم:

$$DT_{el} = \min DT_{ee'} \quad \forall e, e' = 1, 2, \dots, N_w; e' \neq e \quad (34)$$

که l تعداد سناریوهایی با کمترین فاصله از سناریو w را نگه‌داری می‌کند.

✓ ضرب احتمال هر سناریو pr_e با کمترین فاصله از دیگر سناریوها:

$$PD_{el} = pr_l \times DT_{el} \quad \forall e' = 1, 2, \dots, N_w \quad (35)$$

✓ سناریوی d را با کمترین مقدار برای معیار زیر از سناریوهای اولیه تعیین کنید.

$$PD_d = \min PD_e \quad \forall e = 1, 2, \dots, N_w \quad (36)$$

$$\xi = \xi - \{d\}, \quad DS = DS + \{d\}, \quad pr_l = pr + pr_d \quad (37)$$

که ξ معرف مجموعه سناریو است.

✓ تکرار گام‌های ۲ تا ۴ تا زمان رسیدن به تعداد سناریو مورد انتظار

در نهایت روش پیشنهاد شده، سناریوهایی با بالاترین احتمال را انتخاب می‌کند. در نهایت بایستی گفت که تابع هدف مسأله

پیشنهادی در مسأله تصادفی به صورت زیر بازنویسی خواهد شد:

$$\min \text{Cost} = \sum_{e=1}^{N_w} \frac{\prod_{g=1}^f pr_{eg}}{\sum_{e=1}^{N_e} \prod_{g=1}^f pr_{eg}} \times \left(\sum_{t \in \varphi_t} \rho_t \{P_t^{Sub} + \gamma \cdot EENS_t\} + \sum_{i \in \varphi_{dg}} (\lambda_i P_{i,t}^{DG} + SU_i v_{i,t} + SD_i w_{i,t}) \right) \quad (38)$$

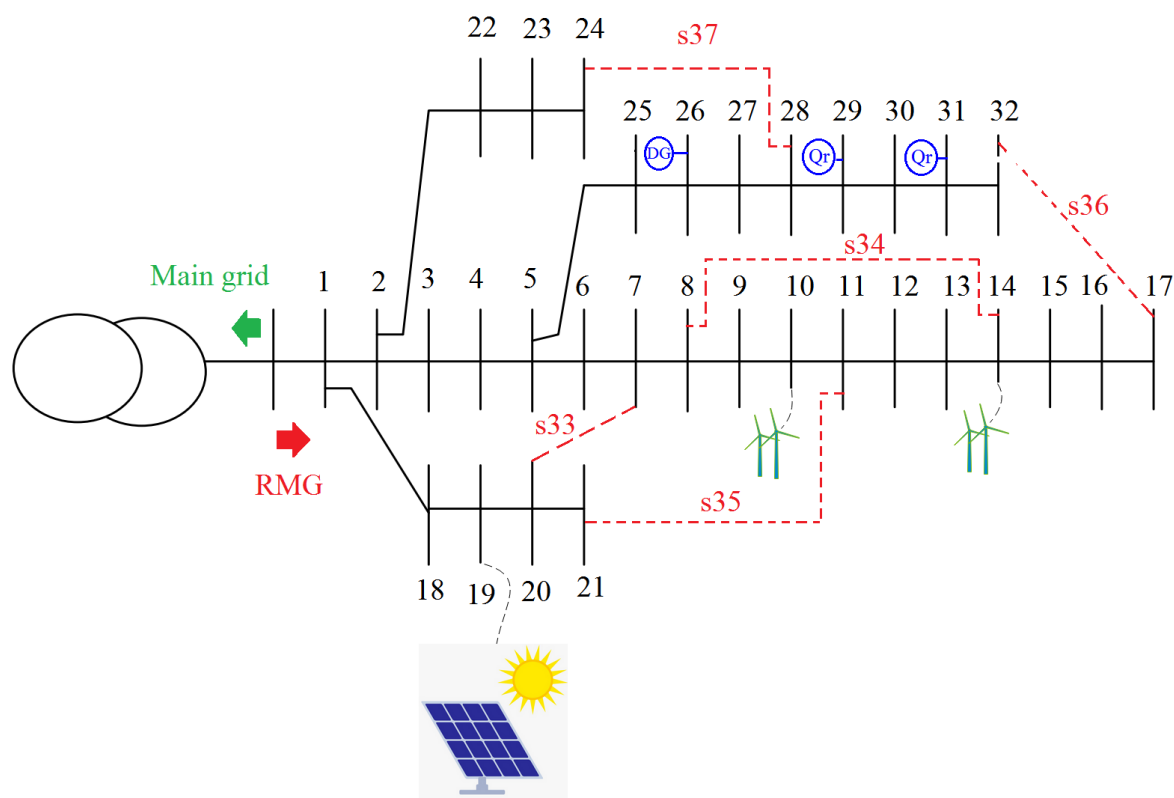
۴- نتایج عددی

• داده‌های مسأله

مدل مسأله پیشنهادی بر روی شبکه توزیع ۳۳ شینه استاندارد IEEE اعمال شده است که ساختار آن در شکل ۳ نمایش داده شده است [۲۳-۲۴]. منابع تولید استفاده شده از نوع بادی^۱، سیستم فتوولتائیک، منابع تولید پراکنده دیزلی^۲ و منابع جبران‌ساز توان راکتیو (QR) است که مکان هر کدام از آنها در شبکه توزیع نمونه، در شکل ۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مشخصات هر یک از تولیدات پراکنده و داده‌های شبکه در مرجع [۲۳] و همچنین داده‌های منحنی بار روزانه شبکه در مرجع [۲۴] آورده شده است.

^۱ Wind Turbine (WT)

^۲ Diesel Generator - در این مقاله به اختصار با D نشان داده شده است.



شکل ۳. ساختار شبکه توزیع مورد مطالعه [۲۲]

شبکه مذکور دارای ولتاژ ۱۲/۶۶ کیلوولت و بارهای اکتیو و راکتیو ۳۷۱۵ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار است. همچنین کمینه و بیشینه ولتاژ در هر باس به ترتیب برابر ۰/۹ و ۱/۰۵ پریونیت است. شایان ذکر است که شبکه مذکور دارای ۵ تای سوئیچ و ۳۲ کلید سکشنالیزینگ است که تای سوئیچ بر روی خطوط چین دار سوار هستند. همچنین کلیدهای سکشنالیزینگ بر روی خطوط پر سوار هستند. همچنین در نقطه PCC و یا MG یک مدار شکن وجود دارد. علاوه بر این در ابتدای هر فیدر یک سکشنالیزینگ وجود دارد. علاوه بر این حداکثر تعداد کلیدزنی هر سوئیچ برابر با ۱۶ فرض شده است [۲۳-۲۴].

در نهایت توجه شود که پارامترهای عدم قطعیت مسأله پیشنهادی برابر بار اکتیو و راکتیو، قیمت انرژی الکتریکی، خروجی واحد بادی و سیستم فتوولتائیک هستند که متناسب با تابع چگالی احتمال مربوطه رفتار می‌کنند. لذا در ابتدا ۱۰۰۰ سناریو برای آنها تولید می‌شود و سپس به ۲۰ سناریو کاهش داده می‌شود.

• موارد مطالعاتی

در ادامه روش پیشنهادی جهت برنامه‌ریزی منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع با استفاده از بازآرایی و جبران‌سازی توان راکتیو در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن ارائه می‌گردد. بهینه‌سازی‌های پیشنهادی با استفاده از نرم افزار تجاری بهینه‌سازی گمز ۱ پیاده سازی شده و از حل کننده سیپلکس ۲ که در مسائل خطی و همچنین مسائل مختلط با اعداد صحیح بسیار

^۱ GAMS

^۲ CPLEX

کارآمد بوده استفاده گردیده است. در این مقاله پنج مورد مطالعاتی برای ارزیابی قابلیت‌های طرح پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد که به شرح زیر است:

- **مورد مطالعاتی اول:** ارزیابی تابع هدف مسأله بدون در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده دیزلی و بازآرایی شبکه (آنالیز پخش بار شبکه)
- **مورد مطالعاتی دوم:** ارزیابی تابع هدف مسأله تنها با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده دیزلی با مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف
- **مورد مطالعاتی سوم:** ارزیابی تابع هدف مسأله با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده دیزلی و منابع بادی و خورشیدی با مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف
- **مورد مطالعاتی چهارم:** ارزیابی تابع هدف مسأله با در نظر گرفتن منابع تولید پراکنده دیزلی، منابع بادی و خورشیدی و منابع جبران‌ساز توان راکتیو با مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف
- **مورد مطالعاتی پنجم:** ارزیابی تابع هدف مسأله پیشنهادی شامل منابع تولید پراکنده دیزلی، منابع بادی و خورشیدی و منابع جبران‌ساز توان راکتیو و بازآرایی با مدل‌سازی پارامترهای عدم قطعیت مختلف

• نتایج شبیه‌سازی

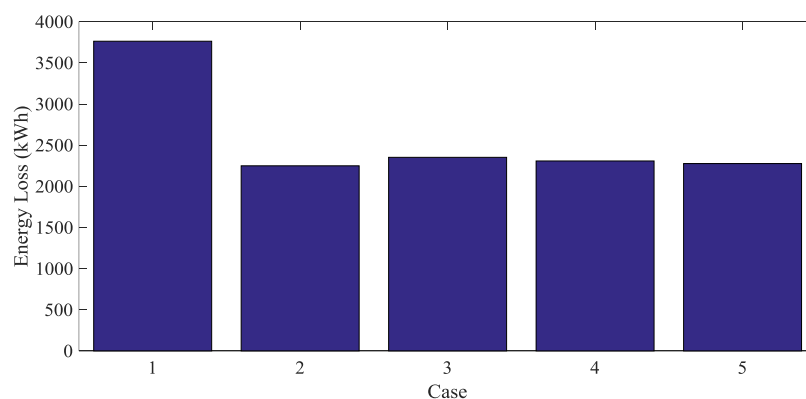
الف) ارزیابی هزینه انرژی و قابلیت اطمینان در موارد مطالعاتی مختلف: نتایج این بخش در جدول ۲ نشان داده شده است. براساس این جدول مشاهده می‌شود که بیشترین هزینه انرژی برای یک شبکه در مورد مطالعاتی اول رخ می‌دهد که هیچ منبع تولید پراکنده خورشیدی و بادی ندارد. به عبارتی، در این مورد مطالعاتی شبکه توزیع تنها توان از شبکه بالادست دریافت می‌کند و هیچ منبع تولید پراکنده با سوخت رایگان (بادی و خورشیدی) در آن استفاده نشده است. از این رو هزینه انرژی برای آن در این مورد مطالعاتی بالا خواهد بود. در مورد مطالعاتی دوم برای کاهش هزینه انرژی شبکه تنها استفاده از منابع تولید پراکنده دیزلی پیشنهاد شده است که با مقایسه هزینه انرژی در دو مورد مطالعاتی اول و دوم می‌توان گفت که حضور تولیدات پراکنده دیزلی در شبکه موجب کاهش ۵۷ درصدی هزینه انرژی نسبت به مورد مطالعاتی اول می‌شود. در مورد مطالعاتی سوم که از منابع خورشیدی و بادی با منبع سوخت رایگان نیز استفاده می‌شود، هزینه انرژی به ۲۷ هزار دلار تعدیل یافته و حدود ۴۰ درصد نسبت به مورد مطالعاتی دوم کاهش هزینه داشته است؛ البته هزینه قابلیت اطمینان به دلیل عدم قطعیت این منابع تجدیدپذیر، افزایش یافته است. همچنین استفاده از منابع جبران‌ساز توان راکتیو در مورد مطالعاتی چهارم موجب کاهش هزینه انرژی این مورد مطالعاتی می‌شود که براساس نتایج مورد مطالعاتی چهارم، هزینه انرژی با استفاده از جبران‌ساز در حدود ۲۲۸ دلار نسبت به مورد مطالعاتی سوم کاهش یافته است. در نهایت بازآرایی شبکه نیز به نوبه خود موجب کاهش ۲۶۸ دلاری هزینه انرژی، نسبت به مورد مطالعاتی چهارم شده است.

همچنین، در جدول ۲ میزان هزینه قابلیت اطمینان برای شبکه توزیع در موارد مطالعاتی مختلف نشان داده شده است که براساس آن می‌توان گفت، حضور منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در ریزشکبه موجب افزایش این هزینه شده، ولی ارائه طرح پیشنهادی توانسته است که این هزینه را به میزان بالایی کاهش دهد.

جدول ۲. هزینه انرژی و قابلیت اطمینان در موارد مطالعاتی مختلف

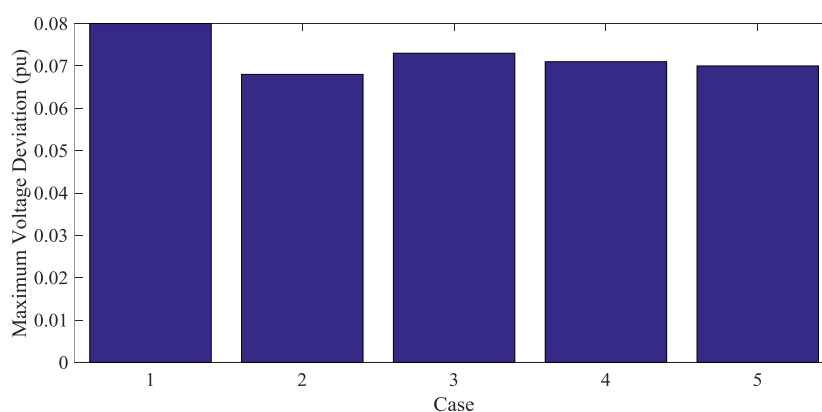
مورد مطالعاتی	هزینه انرژی (دلار)	هزینه قابلیت اطمینان (دلار)
اول	۱۱۳۳۸۱	۲۴۳
دوم	۴۶۵۳۳	۱۸۶
سوم	۲۷۴۴۹	۲۹۸
چهارم	۲۷۲۲۱	۲۱۶
پنجم	۲۶۹۵۳	۱۵۳

(ب) ارزیابی شاخص‌های فنی شبکه: در این بخش شاخص‌های فنی شبکه از قبیل ولتاژ و تلفات مورد بررسی قرار می‌گیرد. لذا شکل ۴ تلفات انرژی را برای موارد مطالعاتی مختلف بیان می‌کند. همانطور براساس این شکل مشاهده می‌شود، بیشترین تلفات انرژی برای یک شبکه در مورد مطالعاتی اول که یکسو تغذیه بوده است، رخ می‌دهد. به عبارتی، در این مورد مطالعاتی شبکه توزیع تنها توان از شبکه بالادست دریافت می‌کند و هیچ منبع تولید پراکنده‌ای در آن استفاده نشده است. از این‌رو تلفات انرژی برای آن در این مورد مطالعاتی بالا خواهد بود. در مورد مطالعاتی دوم برای کاهش تلفات انرژی شبکه تنها استفاده از تولیدات پراکنده پیشنهاد شده است که با مقایسه تلفات انرژی در دو مورد مطالعاتی اول و دوم می‌توان گفت که حضور تولیدات پراکنده در ریزشبکه موجب کاهش ۴۰ درصدی تلفات انرژی نسبت به مورد مطالعاتی اول می‌شود. کاهش تلفات به معنای افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع است. همچنین براساس نتایج مورد مطالعاتی چهارم، تلفات انرژی با استفاده از منابع جبران‌ساز توان راکتیو در حدود ۴۴ کیلووات ساعت (kWh) نسبت به مورد مطالعاتی سوم کاهش یافته است و منجر به افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع شده است. در نهایت بازآرایی شبکه نیز به نوبه خود موجب کاهش ۳۲ کیلووات ساعت تلفات انرژی نسبت به مورد مطالعاتی چهارم و افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع شده است.



شکل ۴. تلفات انرژی شبکه توزیع در موارد مطالعاتی مختلف

شکل ۵ نیز میزان حداکثر انحراف ولتاژ شبکه توزیع در موارد مطالعاتی مختلف را نشان می‌دهد. براساس این شکل، میزان حداکثر انحراف ولتاژ در مورد مطالعاتی اول برابر ۰/۰۸ پریونیت (p.u) است. در این مورد مطالعاتی شبکه تنها از طریق شبکه بالادست تغذیه می‌شود و تنها عنصر کنترل ولتاژ آن پست بالادست است. از این رو در این مورد مطالعاتی، افت ولتاژ نسبت به موارد مطالعاتی دیگر بالاتر است. در مورد مطالعاتی دوم، تولیدات پراکنده به صورت محلی کنترل ولتاژ را نیز انجام می‌دهند. لذا پیرو آن، حداکثر افت ولتاژ برابر ۰/۰۶۸ پریونیت است که نسبت به مورد مطالعاتی اول کاهش قابل توجهی داشته است. مورد مطالعاتی سوم موجب افزایش این افت ولتاژ به علت تغییرات غیرقابل پیش بینی منابع بادی و خورشیدی می‌شود، ولی در مورد مطالعاتی چهارم و پنجم با استفاده از منابع جبران‌ساز توان راکتیو و بازآرایی شبکه، حداکثر افت ولتاژ توانسته است که نسبت به مورد مطالعاتی سوم کاهش قابل توجهی داشته باشد.



شکل ۵. حداکثر انحراف ولتاژ در شبکه توزیع برای موارد مطالعاتی مختلف

ج) ارزیابی عملکرد عناصر شبکه توزیع در طرح پیشنهادی: همانطور که براساس نتایج بخش‌های قبل مشاهده شد، طرح پیشنهادی، یعنی بازآرایی شبکه توزیع به همراه استفاده از منابع جبران‌ساز توان راکتیو نسبت به موارد مطالعاتی دیگر یعنی موارد مطالعاتی اول تا چهارم، قابلیت‌های بهتری از نظر اقتصادی، فنی و قابلیت اطمینان شبکه دارای بودند. این امر منجر به افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع جهت استفاده از منابع تجدیدپذیر بادی جدید خواهد شد. در نهایت جدول ۳ کلیدهای باز در شبکه توزیع را به ازای هر ساعت بیان می‌کند. به عبارتی این جدول وضعیت عملکرد بهینه کلیدهای شبکه را جهت بهبود شاخص‌های شبکه، افزایش ظرفیت میزبانی و قابلیت اطمینان شبکه را نشان می‌دهد. در نهایت براساس این جدول مشاهده می‌شود که همواره ۵ کلید باز هستند که این امر به دلیل برقراری ساختار شعاعی شبکه توزیع است. زیرا که شبکه مذکور دارای ۳۳ شین، ۳۷ خط و ۳۲ نقطه بار است. لذا برای اینکه ساختار شعاعی برقرار باشد، بایستی تعداد خطوط و نقاط بار برابر باشند. از این رو، همواره پنج کلید باز خواهد بود.

جدول ۳: کلیدهای باز در هر ساعت بعد از بازآرایی شبکه

کلیدها					ساعت	کلیدها					ساعت
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۳	۳۷	۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۱
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۴	۳۷	۳۶	۳۵	۳۴	۳۳	۲
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۵	۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۳
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۶	۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۴
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۷	۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۵
۲۴	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۸	۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۶
۲۹	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۹	۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۷
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۲۰	۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۸
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۲۱	۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۹
۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۲۲	۲۳	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۰
۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۲۴	۲۴	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۱
۳۷	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۲۴	۲۴	۳۶	۳۵	۱۳	۳۳	۱۲

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله مسأله «بهبود ظرفیت میزبانی شبکه توزیع از منابع تولید پراکنده بادی با استفاده از بازآرایی و جبران‌سازی توان راکتیو» بیان شد. شایان ذکر است که مدل مسأله پیشنهادی به صورت مسأله بهینه‌سازی بود که تابع هدف آن برابر با افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با کمینه‌سازی هزینه‌های انرژی دریافتی از شبکه بالادست، هزینه انرژی تولیدات پراکنده، بادی و خورشیدی، هزینه تولید توان منابع جبران‌سازی توان راکتیو و هزینه قابلیت اطمینان شبکه توزیع است. علاوه بر این، قیود مسأله شامل معادلات پخش توان، معادلات حاکم بر تولیدات پراکنده و منابع جبران‌ساز راکتیو، محدودیت‌های فنی شبکه و محدودیت‌های قابلیت اطمینان در شبکه توزیع است. قابل توجه است که مسأله مذکور به صورت برنامه‌نویسی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح بود که این مدل مسأله

عموماً دارای زمان اجرای بالا است و همچنین آن دارای پاسخ بهینه محلی است. لذا در ادامه به منظور دستیابی به نقطه بهینه مطلق با زمان اجرای بسیار پایین و درصد خطای بسیار پایین، مدل خطی آمیخته با عدد صحیح مسأله بیان گردید.

شایان ذکر است که در مسأله مذکور پارامترهای عدم قطعیت مختلفی از قبیل بار مصرفی، سطح تابش خورشید، سرعت باد، قیمت انرژی وجود داشت که سناریوهای متناظر با آنها براساس تابع‌های چگالی احتمال مربوطه ایجاد شد و سپس با استفاده از روش کاهش سناریو برگشتی، سناریوهای با احتمال رخداد بالا استخراج شدند. برای این بهینه‌سازی از برنامه گمز و روش سیپلکس که در حل مسائل مختلط با اعداد صحیح بسیار کارا می‌باشد، استفاده شده است. روش پیشنهادی در یک شبکه ۳۳ شین استاندارد IEEE اجرا شده و نتایج آن ارائه گردید. در نهایت با ارزیابی نتایج عددی حاصل موارد مطالعاتی مختلف، ملاحظه شد که استفاده و مدیریت بهینه منابع تولید پراکنده، جبران‌سازی توان راکتیو و بازآرایی می‌تواند موجب افزایش ظرفیت میزبانی شبکه توزیع گردد. همچنین، ملاحظه شد که با استفاده از بازآرایی، تولیدات پراکنده، منابع جبران‌سازی توان راکتیو و منابع بادی و خورشیدی می‌تواند هزینه انرژی، هزینه قابلیت اطمینان و مقدار تلفات انرژی را کاهش داد. در پایان، کاهش حداکثر میزان افت ولتاژ در صورت بازآرایی بهینه شبکه توزیع با در نظر گرفتن تولیدات پراکنده، خودروهای الکتریکی و ذخیره‌سازهای انرژی نسبت به عدم حضور این ادوات و بازآرایی در شبکه توزیع از دیگر نتایج حاصل از این مقاله بوده است. در ادامه این مقاله می‌توان به بررسی مسأله پیشنهادی با در نظر داشتن بازار انرژی در حضور منابع دیگری از قبیل پاسخگویی بار پرداخت.

مراجع

- [1] https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1107456/Energy_Trends_September_2022.pdf
- [2] <https://www.iea.org/news/world-energy-outlook-2022-shows-the-global-energy-crisis-can-be-a-historic-turning-point-towards-a-cleaner-and-more-secure-future>
- [3] Report, International Energy Outlook 2021 (IEO2021), Available: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>
- [4] S.-E. Razavi, E. Rahimi, M. S. Javadi, A. E. Nezhad, M. Lotfi, M. Shafie-khah, et al., "Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 105, pp. 157-167, 2019.
- [5] F. M. Nuroglu and A. B. Arsoy, "Voltage profile and short circuit analysis in distribution systems with DG," in 2008 IEEE Canada Electric Power Conference, 2008, pp. 1-5.
- [6] E. Coster, J. Myrzik, and W. Kling, "Effect of DG on distribution grid protection," *Distributed generation*, vol. 2, 2010.
- [7] S. Ullah, A. M. Haidar, P. Hoole, H. Zen, and T. Ahfock, "The current state of Distributed Renewable Generation, challenges of interconnection and opportunities for energy conversion based DC microgrids," *Journal of Cleaner Production*, p. 122777, 2020.
- [8] Othman, M. M., Hegazy, Y., Abdelaziz, A. Y., "A Review of virtual power plant definitions, components, framework and optimization," *International Electrical Engineering Journal*, vol. 6, pp. 2010-2024, 2015.

- [9] Badran O, Mekhilef S, Mokhlis H, Dahalan W (2017) Optimal reconfiguration of distribution system connected with distributed generations: A review of different methodologies *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73: 854-867
- [10] Solat, S., Aminifar, F., & Shayanfar, H. (2020). Distributed generation hosting capacity in electric distribution network in the presence of correlated uncertainties. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 15(5), 836-848.
- [11] Tonkoski, R., Turcotte, D., and El-Fouly, T. H. M., "Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 518-52, 2012.
- [12] Kavousi-Fard, A., Niknam, T., and Fotuhi-Firuzabad, M., "Stochastic reconfiguration and optimal coordination of V2G plug-in electric vehicles considering correlated wind power generation", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol.6, no.3, pp.822-830, 2015.
- [13] Jabari, F, Seyedi, H, Najafi Ravadanegh, S, Mohammadi-Ivatloo, B. "Multi-objective optimal preventive islanding based on stochastic backward elimination strategy considering uncertainties of loads and wind farms," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27:e2451, 2017, <https://doi.org/10.1002/etep.2451>.
- [14] Ghofrani, M., et al., "A Framework for Optimal Placement of Energy Storage Units Within a Power System With High Wind Penetration," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 434-442, 2013.
- [15] Guo, Z., Lei, S., Wang, Y., Zhou, Z., Zhou, Y., "Dynamic distribution network reconfiguration considering travel behaviors and battery degradation of electric vehicles," *IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL*, pp. 1-5, 2017.
- [16] J. Tabatabaei, M. S. Moghaddam and J. M. Baigi, "Rearrangement of Electrical Distribution Networks With Optimal Coordination of Grid-Connected Hybrid Electric Vehicles and Wind Power Generation Sources," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 219513-219524, 2020
- [17] Xing, H., Sun, X., "Distributed Generation Locating and Sizing in Active Distribution Network Considering Network Reconfiguration," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 14768-14774, 2017.
- [18] Koutsoukis, N.C., Siagkas, D.O., Georgilakis, P.S., Hatziargyriou, N.D., "Online Reconfiguration of Active Distribution Networks for Maximum Integration of Distributed Generation," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 437-448, April 2017.
- [19] Kavousi-Fard, A., Khodaei, A., "Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids," *Energy*, vol. 111, pp. 653-663, 2016.
- [20] Sedighzadeh M, Shaghghi-shahr G, Esmaili M, Aghamohammadi MR, "Optimal distribution feeder reconfiguration and generation scheduling for microgrid day-ahead operation in the presence of electric vehicles considering uncertainties", *Journal of Energy Storage*, vol. 21, pp. 58–71, 2019.
- [21] S. Wang, S. Chen, L. Ge and L. Wu, "Distributed Generation Hosting Capacity Evaluation for Distribution Systems Considering the Robust Optimal Operation of OLTC and SVC," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1111-1123, July 2016.
- [22] H. Wu, Y. Yuan, J. Zhu, K. Qian and Y. Xu, "Potential Assessment of Spatial Correlation to Improve Maximum Distributed PV Hosting Capacity of Distribution Networks," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 800-810, July 2021,

- [23] Vita, V. "Development of a Decision-Making Algorithm for the Optimum Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks", *Energies*, Vol. 10, No. 9, 1433, 2017. doi:10.3390/en10091433.
- [24] Čađenović, R., & Jakus, D., "Maximization of Distribution Network Hosting Capacity through Optimal Grid Reconfiguration and Distributed Generation Capacity Allocation/Control", *Energies*, Vol. 13, No. 20, 5315, 2020. DOI:10.3390/en13205315 .
- [25] S. Wang, Y. Dong, L. Wu and B. Yan, "Interval Overvoltage Risk Based PV Hosting Capacity Evaluation Considering PV and Load Uncertainties," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp. 2709-2721, May 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2960335.
- [26] Pirouzi, S., Latify, M. A., & Yousefi, G. R., "Conjugate active and reactive power management in a smart distribution network through electric vehicles: A mixed integer-linear programming model", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Vol. 22, 100344, 2020. doi:10.1016/j.segan.2020.100344.
- [27] M.E. Baran, F.F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989.
- [28] Alireza Heidari, Vassilios G Agelidis, Mohsen Kia, "Considerations of sectionalizing switches in distribution networks with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, No. 3, pp. 1401-1409, 2014.
- [29] Mohammad H Shams, Majid Shahabi, Mohsen Kia, Alireza Heidari, Mohamed Lotfi, Miadreza Shafie-Khah, João PS Catalão, "Optimal operation of electrical and thermal resources in microgrids with energy hubs considering uncertainties," *Energy*, Vol. 187, 2019.
- [30] Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P., "Economic-environmental energy and reserve scheduling of smart distribution systems: a multi objective mathematical programming approach," *Energy Convers Manag*, Vol. 78, pp. 151-164, 2014.
- [31] Heitsch, H., and Romisch, W., "Scenario reduction algorithms in stochastic programming," *Computational Optimization and Applications*, Vol. 24, pp. 187–206, 2003.
- [32] Heitsch, H., and Romisch, W., "Scenarios for Multistage Stochastic Programs," *Annals of Operations Research*, Vol. 100, pp. 25–53, 2000.
- [33] N. Grawe-Kuska, H. Heitsch, W. Romisch, "Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems," 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, Bologna, Italy, June 2003.
- [34] A. J. Conejo, M. Carriçon, and J. M. Morales, "Decision making under uncertainty in electricity markets," Vol. 153: Springer, 2010.