

Operating some Multi-microgrids with different Energy Carriers considering Uncertainty

Vahid Amir¹, Mahdi Azimian², Shapour Haddadipour³

¹ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kashan Branch, Kashan, Iran

² PhD Candidate, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kashan Branch, Kashan, Iran

³ PhD Candidate, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kashan Branch, Kashan, Iran

Abstract:

The future power system, with the unprecedented penetration of renewable energy resources, will be faced with many uncertainties which may lead to problems in grid operation. Consequently, the uncertainty assessment of system performance is essential. Hence, the conventional power flow methods, given the constraints of the electricity and gas networks, may not be suitable for distribution networks such as the multi-carrier microgrids. This paper presents an effective method for optimizing the simultaneous utilization of different energy infrastructures in an environment with different uncertainties considering the constraints of the network. The aim is to study the effect of uncertainties on the optimal operation management of an interconnected microgrids. The fluctuation behavior of loads, renewable resources, and electricity price has been investigated in the proposed model based on probabilistic power flow technique. The results of the system are extracted as random variables, which are depicted in probabilistic and cumulative distribution forms. In this study, the multi-carrier microgrids not only exchange energy with the main grid, but also, energy interchange among the microgrids is possible. Simulations are presented, applying the procedure to an illustrative system of three interconnected MCMGs, and the results justify the effectiveness of the proposed technique.

Keywords: Probabilistic Optimal Power Flow; Wind Turbine Generator; Solar Cell Generator; Uncertainty Modelling.

بهره‌برداری چند ریزشبکه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

وحید امیر^۱، مهدی عظیمیان^۲، شاپور حدادی‌پور^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان - کاشان - ایران

v.amir@iaukashan.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان - کاشان -

ایران

mahdi.azimian1991@gmail.com

shapour.Haddadipour@gmail.com

چکیده: شبکه برق آینده، با نفوذ بی‌سابقه منابع انرژی تجدیدپذیر، با عدم قطعیت‌های شدیدی روبه‌رو خواهد شد که ممکن است مشکلاتی را در بهره‌برداری از شبکه سبب شوند. ارزیابی عدم قطعیت عملکرد سیستم در این شبکه امری ضروری است؛ بنابراین، روش‌های بهره‌برداری سنتی با در نظر گرفتن قیود شبکه برق و گاز، ممکن است برای شبکه توزیع مانند ریزشبکه‌های چندحامل مناسب نباشند. این مقاله روش مؤثری برای بهینه‌سازی بهره‌برداری هم‌زمان زیرساخت‌های انرژی مختلف در یک محیط با عدم قطعیت‌های گوناگون را با در نظر گرفتن قیود شبکه ارائه کرده است. هدف این مقاله، مطالعه اثرات عدم قطعیت بر مدیریت بهینه این شبکه از ریزشبکه‌های چندحامل است. رفتار ناپایدار بارها، منابع تجدیدپذیر و قیمت برق در مدل پیش رو، براساس روش پخش بار احتمالاتی هم‌زمان چندحامل بررسی شده است. نتایج سیستم به صورت متغیرهای تصادفی استخراج شده‌اند؛ این متغیرها به شکل تابع توزیع تجمعی و احتمالی نمایش داده شده‌اند. در این مقاله، ریزشبکه‌های چندحامل، با شبکه بالادست مبادله می‌کنند و همچنین، مبادله انرژی بین ریزشبکه‌ها میسر است. شبیه‌سازی روی یک شبکه متشکل از سه ریزشبکه چندحاملی متصل به هم اعمال شده و نتایج، اثرگذاری روش پیشنهادی را تأیید کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: پخش بار احتمالاتی، تولید توربین بادی، تولید سلول خورشیدی، مدل‌سازی عدم قطعیت

۱- مقدمه

پخش بار در زیرساخت‌های حامل‌های مختلف معمولاً به صورت مستقل انجام می‌گیرد؛ بنابراین، یکپارچگی زیرساخت‌های حامل‌های مختلف مانند حامل برق و گاز طبیعی به دلیل تولیدات پراکنده و مولدهای مصرف‌کننده گاز، به ویژه تولیدات هم‌زمان دو و سه حامل که شبکه برق، گاز و حرارت را شامل می‌شود، به جای مطالعه یک حامل به تنهایی، اهمیت یافته است. این مسئله با مفهوم ریزشبکه به سادگی حل شده که به صورت گروهی از بارهای متصل به هم و منابع انرژی پراکنده است [۱]. ریزشبکه‌ها به طور ذاتی عدم قطعیت دارند؛ به دلیل اینکه وجود تولیدات پراکنده، بارها و رفتار بازار برق درون این شبکه‌ها پیش‌بینی ناپذیر

ارزیابی پخش بار زیرساخت‌های حامل‌های مختلف، ابزار تحلیلی قدرتمند برای بهره‌برداری و برنامه‌ریزی است. این ابزار تحلیل، یک حالت ماندگار از سیستم را برای مجموعه‌ای از تولیدات، بارها و شرایط شبکه مهیا می‌کند.

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

نام نویسنده مسئول: وحید امیر

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کاشان - بلوار قطب راوندی - دانشگاه آزاد واحد کاشان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

بهره‌برداری چند ریزشبهه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

بارگذاری خطوط، تحلیل انتقال، برنامه‌ریزی خطوط فشار متوسط و قوی و مدل‌سازی اتصالات نواحی خطوط به صورت گسترده استفاده می‌شود [۷]. در [۸]، یک پخش بار سه فاز احتمالاتی در شبکه توزیع شعاعی با در نظر گرفتن تنظیم ولتاژ به منظور آدرس‌دهی تولیدات پراکنده فتولتائیک مطالعه شده است.

عدم قطعیت در مطالعات سیستم‌های مهندسی به صورت احتمالاتی و با رویکرد امکان مطالعه می‌شود [۹]. روش‌های احتمالاتی زمانی اجراشدنی هستند که اطلاعات تاریخی از متغیر سیستم یا تابع توزیع احتمالشان در دسترس باشد؛ در غیر این صورت، روش‌های با رویکرد امکان استفاده می‌شوند. یک ابزار ترکیبی احتمالاتی و با رویکرد امکان برای ارزیابی عدم قطعیت در پخش بار، هر دو نوع متغیرهای احتمالاتی و با رویکرد امکان را به صورت هم‌زمان بررسی کرده است [۹]. روش پیشنهادی براساس تئوری ثبات و ترویج اتصال عدم قطعیت‌های احتمالاتی و با رویکرد امکان پیشنهاد شده است. وقتی بعضی متغیرهای عدم قطعیت سیستم، احتمالی و بعضی با رویکرد امکان باشند، روش احتمالی و روش با رویکرد امکان قابل پیاده‌سازی نیستند؛ بنابراین، روش حل ترکیبی نیاز است؛ در این مورد یک روش جدید انتقال فازی و تابع شبکه عصبی روی شبکه پایه شعاعی برای پخش بار احتمالاتی و با رویکرد امکان در ریزشبهه‌ها مطالعه شده که شامل بارهای با عدم قطعیت، منابع تجدیدپذیر و ماشین‌های متصل به شبکه است [۱۰]. یکی از مشخصه‌های متمایز روش پیشنهادی معادلات پخش بار، مستقل‌بودن مجموعه مشتقات جزئی محاسبات معادلات پخش بار در ماتریس جاکوبین معکوس است.

روش‌های احتمالاتی به سه دسته شبیه‌سازی، تقریبی و تحلیلی دسته‌بندی شده‌اند. روش‌های شبیه‌سازی شامل شبیه‌سازی مونت کارلو، نمونه‌برداری هاپرکیوب لاتین و الگوریتم رقابتی امپریالیست، روش‌های تقریبی شامل روش تخمین یک و دو نقطه و روش تحلیلی شامل روش رفت برگشت، کامیولنت، گوسین و تئوری گرم‌چارلیبر و ... هستند. شبیه‌سازی مونت کارلو، روش احتمالاتی براساس

است. در چنین شرایطی، محاسبات پخش بار قطعی ممکن است مؤثر و مناسب نباشد؛ بنابراین، در نظر گرفتن عدم قطعیت در محاسبات پخش بار یک مسئله مهم است.

مطالعه جامع از مقالات اخیر در زمینه بهینه‌سازی احتمالی برای مسائل پخش بار بهینه ارائه شده است که یک پیش از رفتار سیستم‌های تولید آینده را با وجود عدم قطعیت بالای تولید این سیستم‌ها به خواننده می‌دهد [۲]. همچنین، مشکلات روش‌های قطعی تأکید شده است؛ درحالی‌که مزایای روش‌های احتمالی برای مواجهه با عدم قطعیت‌های ناشی از تولیدات پراکنده، قیمت برق، پیش‌بینی بار، خاموشی تجهیزات و شرایط آب‌وهوایی تشریح شده‌اند. در [۳]، روش بهینه‌سازی برای انتخاب بهینه ظرفیت تجهیزات یک ریزشبهه چندحاملی جزیره‌ای با مالکان متعدد معرفی شده است. ایده اصلی این مقاله، معرفی سیستم چندعاملی تعاملی برای بهینه‌سازی انتخاب سائز تجهیزات است که مبادله اطلاعات بین واحدهای مختلف نظیر تولید، بارها، ایستگاه شارژ، واحد کنترل و طراحی را فعال می‌کند. در مقاله [۴]، اثر وابستگی بین شبکه برق و گاز برای تأمین تقاضای برق و حرارت، با در نظر گرفتن عدم قطعیت و برنامه پاسخگویی بار در یک ریزشبهه بررسی شده است. همچنین، امنیت قیود شبکه و تراکم خطوط برای بهره‌برداری این ریزشبهه بررسی شده است. مدل‌سازی یک ریزشبهه چندحاملی متصل به شبکه، شامل تولیدات تجدیدپذیر، مولد تولید هم‌زمان، مبدل‌ها و واحدهای ذخیره‌ساز، به منظور بهره‌برداری روز پیش رو و بازار زمان واقعی در یک مدل تصادفی صورت گرفته است [۵].

در [۶]، پخش بار متناوب، مطالعه و سپس با عملکرد پخش بار جریان مستقیم مقایسه شده است؛ اگرچه پخش بار جریان مستقیم به طور ذاتی تقریبی است و نتایج آن وابسته به سیستم و شرایط است [۷]. پخش بار جریان مستقیم، روش مناسبی برای آشکارسازی الگوی ازدیاد بار است که روی مدل سیستم متناوب افزوده می‌شود. مزیت اصلی پخش بار جریان مستقیم، عملکرد سریع آن است. مدل جریان مستقیم در نظارت‌کردن قطعی‌ها، جایگزینی

رسیدن به یک برنامه زمان‌بندی بهینه تولید انجام شده است. مدل‌سازی ساده پخش بار برق و گاز و فرمول‌های بنیادی در این مقاله به منظور حل مسئله پخش بار جریان مستقیم و پخش بار گاز انجام شده است. عدم قطعیت مرتبط با خطای پیش‌بینی مقدار بار الکتریکی و حرارتی، تولیدات تجدیدپذیر و قیمت برق به منظور مدیریت بهره‌برداری ریزشکه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، از یک مدل دومرحله‌ای برای حل مسئله تصادفی در نظر گرفته شده که سناریوهای مختلف با نرم‌افزار متلب (MATLAB) تولید شده است. سپس مسئله به‌عنوان مدل غیرخطی عدد صحیح آمیخته برای هر سناریو در بازه ۲۴ ساعت با نرم‌افزار گمز (GAMS) به صورت جداگانه حل شده است. اطلاعات ورودی مانند بار و قیمت انرژی در هر ریزشکه و تولید انرژی واحدهای تجدیدپذیر در فرم احتمالاتی توصیف شده‌اند و نتایج در فرم تابع توزیع احتمال یا تجمعی برای یک ساعت خاص نمایش داده شده‌اند. در ساختار پیشنهادی، تولیدات داخلی هر ریزشکه، انرژی مبادله‌شده بین ریزشکه‌ها و شبکه اصلی، براساس هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری تحلیل شده‌اند. امکان مبادله حرارت بین ریزشکه‌ها به منظور کاهش تلفات و هدررفت انرژی حرارتی در نظر گرفته شده است. به‌طور خلاصه، نوآوری اصلی مقاله به صورت زیر خلاصه شده است:

- پخش بار احتمالاتی چندین حامل در یک شبکه از ریزشکه‌های چندحامل به صورت هم‌زمان در نظر گرفته شده و ارزیابی اثر یک حامل انرژی روی بقیه حامل‌ها دیده شده است.
- اثر ظرفیت و تراکم خطوط برق و گاز، با وجود ذخیره‌سازها روی بهره‌برداری این چند ریزشکه با و بدون وجود منابع تجدیدپذیر ارزیابی شده است.

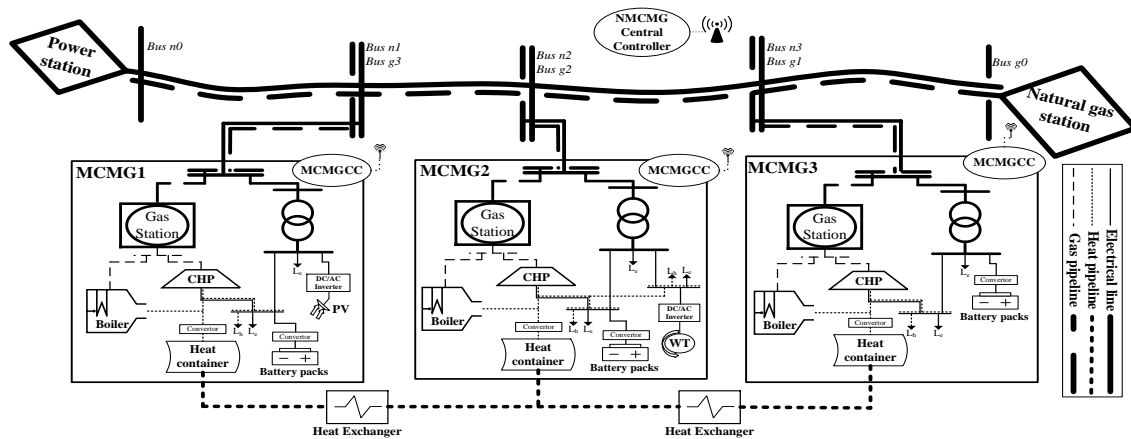
شبیه‌سازی است [۱۱] که اگرچه نتایج دقیق را مهیا می‌کند، محاسبات زیادی نیاز دارد. در [۱۲]، ترکیب شبیه‌سازی مونت کارلو و پخش بار، براساس بازار، به منظور افزایش رفاه اجتماعی در شرایط عدم قطعیت بار و منابع تجدیدپذیر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند توزیع تمام متغیرها و کمیت پخش بار از طریق محاسبات عددی ساده به صورت دقیق و مؤثر نشان داده شده‌اند. همچنین، روش پیشنهادی، نتایج مشابهی را نسبت به شبیه‌سازی مونت کارلو با محاسبات عددی کمتر به دست آورده است.

در [۱۳]، الگوریتم ازدحام ذرات برای حل مسئله تک‌هدفه برنامه‌ریزی توسعه خودروهای برقی در شبکه توزیع با هدف کاهش هزینه استفاده شده است. هدف مسئله تعیین بهینه و ظرفیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی و با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری و تلفات شبکه بوده است.

مهم‌ترین مزیت روش تحلیلی، نادیده گرفتن روش‌های با تعداد زیاد شبیه‌سازی است؛ درحالی‌که محاسبات ریاضی دقیق‌تری نیاز است. یک روش جدید به منظور پیاده‌سازی پخش بار ریزشکه جزیره‌ای با استفاده از روش بهبودیافته نیوتن رافسون پیشنهاد شده که روی هر سیستم قدرتی قابل استفاده است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزان و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت استفاده شود [۱۴]. در [۱۵]، روشی براساس کامیولنت، به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسئله پخش بار احتمالی پیشنهاد شده است.

با در نظر گرفتن مطالعات بالا، تاکنون توزیع چندین حامل انرژی در چندین ریزشکه چندحاملی، با وجود عدم قطعیت‌های متعدد و اثر ظرفیت و تراکم خطوط روی بهره‌برداری متمرکز این چند ریزشکه به صورت همکارانه و با در نظر گرفتن قیود امنیت انتقال و تراکم خطوط ارزیابی نشده است. در نتیجه، در این مقاله پخش بار احتمالی برق و گاز در یک شبکه‌ای از ریزشکه‌های چندحامل با هدف

بهره‌برداری چند ریزشبهه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت



شکل (۱): ساختار شبکه ریزشبهه‌های چندحامل

هیچ تلفات حرارتی مدل شده است. به صورت دقیق‌تر، شبکه حرارت محلی، یک باس در نظر گرفته شده است که امکان مبادله توان بین ریزشبهه‌ها را مهیا می‌کند. هر ریزشبهه به شبکه برق و گاز اصلی متصل شده است. یک کنترلر مرکزی در شبکه در نظر گرفته شده است که اطلاعات را از هر کنترلر محلی جمع‌آوری می‌کند. کنترلر مرکزی بهره‌برداری بهینه ریزشبهه‌ها را براساس تولیدات مقیاس کوچک، پیش‌بینی سرعت باد و تابش خورشید و بارها انجام می‌دهد و سپس سیگنال توزیع انرژی را به کنترلر محلی هر ریزشبهه ارسال می‌کند.

- زمان‌بندی انرژی متمرکز چندین ریزشبهه چندحامل با یک کنترلر مرکزی انجام شده است که سیگنال‌های مختلف را از کنترلرهای محلی دریافت می‌کند تا انرژی لازم را از تولید به مصرف‌کننده به صورت اقتصادی توزیع کند.
- یک روش دو مرحله‌ای برای حل مسئله با دو نرم‌افزار گمز و متلب استفاده شده است.
- شبکه پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در بار الکتریکی و حرارتی، قیمت بازار انرژی و تولیدات تجدیدپذیر مطالعه شده است.

۲- ساختار ریزشبهه‌های چندحاملی

یک ریزشبهه چندحاملی به صورت گروهی از بار و تولیدات پراکنده متصل به هم با محدوده زیرساخت انرژی توصیف می‌شود. این ریزشبهه چندحاملی، یک ناحیه مجزا نسبت به شبکه اصلی است که به صورت متصل به شبکه یا جزیره‌ای عمل می‌کند. در این مقاله، پخش بار احتمالی یک شبکه متمرکز از چندین ریزشبهه چندحاملی تحلیل شده و در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل، هر ریزشبهه شامل منابع انرژی مقیاس کوچک، بارهای گوناگون و ذخیره‌سازها است. واحدهای مقیاس کوچک شامل سیستم خورشیدی، توربین بادی، مولدهای تولید هم‌زمان، ترانسفورماتورها و گرماسازها است. در شبکه پیشنهادی، شبکه برق و گاز به صورت شعاعی مدل شده است؛ درحالی‌که شبکه حرارت به صورت حلقوی و بدون

۳- عدم قطعیت در مسئله پخش بار

صنعت برق به دلیل تغییرات قانون‌گذاری، تکنولوژی و بازار برق تجدید ساختار شده، درحال تنظیم آیین‌نامه‌های مبتنی بر خصوصی‌سازی است. از آنجایی که این آیین‌نامه‌ها بر تمام بخش‌های سیستم (تولید، انتقال و توزیع) تأثیر می‌گذارند، مطالعه پخش بار برای بهره‌برداری سیستم قدرت ضروری است. به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در سیستم‌های قدرت که خطاهایی را به حل مسئله اعمال می‌کنند، پخش بار قطعی مناسب نیست؛ بنابراین در این مقاله، پخش بار احتمالاتی و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های بار، قیمت برق و تولیدات خورشیدی و بادی مطالعه می‌شوند. عدم قطعیت‌ها به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر

$$RP^{wt}(v_t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_t \leq v_{ci} \\ & \text{or } v_t \geq v_{co} \\ P_r^{wt} \cdot \frac{v_t^2 - v_{ci}^2}{v_r^2 - v_{ci}^2} & v_{ci} \leq v_t \leq v_r \\ P_r^{wt} & v_r \leq v_t \leq v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

گرفته شده‌اند که روی متغیرهای خروجی مسئله تأثیرگذارند.

۴- مدل سازی سیستم

۴-۱- مدل احتمالی بار و تولیدات تجدیدپذیر

توان تولیدی واحد فتوولتائیک نسبت به تابش خورشید متغیر است که به عامل‌های مختلفی نظیر شرایط محیطی، ساعتی از روز، ماه و فصل و جهت سلول‌های خورشیدی وابسته است. در این مقاله، تابش خورشید از طریق تابع توزیع بتا مدل‌سازی شده است [۱۷]. تابع توزیع بتا به صورت زیر فرموله شده است:

تابع توزیع نرمال، معروف‌ترین تابع توزیع بار است و به صورت گسترده استفاده می‌شود [۱۵]. بار الکتریکی و حرارتی با استفاده از تابع توزیع چگالی نرمال با میانگین برابر با بار اصلی برای هر ساعت و انحراف استاندارد برابر با ۰.۵ مقدار میانگین، مدل شده است.

$$f(R_t) = \frac{\Gamma(\varphi, \zeta)}{\Gamma(\varphi) \cdot \Gamma(\zeta)} \cdot R_t^{(\varphi-1)} \cdot (1-R_t)^\zeta \quad (5)$$

$$f(L_{t,i}) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(L_{t,i} - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (1)$$

توان تولیدی واحد فتوولتائیک به صورت یک تابع از تابش خورشید در هر ساعت، با استفاده از منحنی تولید تابش - توان، به صورت زیر فرموله می‌شود [۱۷]:

تحلیل‌های آماری در [۱۶] نشان می‌دهند تابع توزیع لگاریتمی نرمال، مناسب‌ترین تابع برای مدل‌سازی رفتار قیمت بازار برق است؛ بنابراین، تابع توزیع لگاریتمی نرمال با میانگین برابر با قیمت برق پایه شبکه برای هر ساعت و انحراف استاندارد برابر با ۰.۵ مقدار میانگین برای مدل‌سازی عدم قطعیت قیمت برق استفاده شده است.

$$RP^{pv}(R_t) = \begin{cases} P_r^{pv} \cdot \left(\frac{R_t^2}{R_{STAD} \cdot R_{ce}}\right) & 0 \leq R_t \leq R_{ce} \\ P_r^{pv} \cdot \left(\frac{R_t}{R_{STAD}}\right) & R_{ce} \leq R_t \leq R_{STAD} \\ P_r^{pv} & R_{STAD} \leq R_t \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{C_{t,e}}(C_{t,e}) = \frac{1}{C_{t,e} \sigma_c \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(C_{t,e}) - \mu_c)^2}{2\sigma_c^2}} \quad (2)$$

۴-۲- مدل سازی ذخیره‌ساز

مدل‌سازی ذخیره‌ساز به صورت زیر معادل‌سازی شده است:

همچنین، مقدار تولید انرژی واحدهای تجدیدپذیر به منبع اولیه آنها نظیر باد و خورشید وابسته است. سرعت باد به صورت لحظه‌ای در حال تغییر است که اهمیت مدل احتمالاتی را پررنگ می‌کند. معمولاً تابع توزیع ویبال برای مدل‌سازی سرعت باد استفاده می‌شود [۱۱]:

$$M_t(t, m) = S_t(t, m) \cdot \dot{E}_t(t, m) \quad (7)$$

$$f_v(v_t) = \begin{cases} \left(\frac{\beta}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{v_t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{v_t}{\alpha}\right)^\beta} & v_t \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$M_t(t, m) = \frac{1}{\eta s_t(t, m)} \cdot (E_t(t, m) - E_t(t-1, m) - E_{t,sub}) \quad (8)$$

$$\eta s_t(t, m) = I_t(t, m) \cdot \eta_t^{char}(m) + \frac{(1 - I_t(t, m))}{\eta_t^{dischar}(m)} \quad (9)$$

رابطه (۱۰)، ظرفیت ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد و رابطه (۱۱)، مقدار انرژی شارژ و دشارژ شده را محدود می‌کند. همچنین در رابطه (۱۲) فرض شده است مقدار انرژی موجود در ذخیره‌ساز در ساعت اول و آخر با هم برابرند.

$$E_t(t, m) \leq E_t(t, m) \leq \overline{E_t(t, m)} \quad (10)$$

$$|M_t(t, m, s)| \leq \overline{M_t(t, m, s)} \quad (11)$$

توان تولیدی توربین بادی در هر ساعت نیز با استفاده از منحنی تولید سرعت - توان به صورت زیر فرموله می‌شود [۱۱]:

بهره‌برداری چند ریزشبهه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

برابری و نابرابری رعایت شوند. مدل‌سازی ریاضی مسئله به صورت زیر انجام شده است.

۵-۱- تابع هدف

با توجه به توصیف مسئله، تابع هدف و قیود آن به منظور بهره‌برداری متمرکز شبکه پیشنهادی، برای ۲۴ ساعت و برای هر سناریو، به صورت زیر مدل‌سازی شده است. همچنین، مدل مسئله به صورت یک مدل عدد صحیح آمیخته غیرخطی است.

$$MIN : OF = \sum_s F_s \quad (19)$$

$$F_s = \sum_{t=1}^{24} \left[\begin{aligned} & \sum_{p \in \{e, g\}} P_{p, tot}(t, s) \cdot \pi_p(t, s) \\ & - T_{e, tot}(t, s) \cdot \psi_{e, tot}(t, s) \\ & + \sum_{m=1}^{n_m} C_{O \& M}(t, m, s) \end{aligned} \right] \quad (20)$$

که عبارت اول و دوم در رابطه (۲۰)، هزینه خرید و فروش انرژی توسط ریزشبهه‌ها است و عبارت سوم، هزینه نگهداری تجهیزات را نشان می‌دهد. در این مقاله، پخش بار احتمالاتی در سه شبکه متصل به هم برای ۲۴ ساعت اجرا شده است.

جزئیات تابع هدف به صورت زیر بیان شده‌اند.

$$P_{p, tot}(t, s) = \sum_{m=1}^{n_m} P_p(t, m, s) \quad p \in \{e, g\} \quad (21)$$

$$T_{l, tot}(t, s) = \sum_{m=1}^{n_m} T_l(t, m, s) \quad l \in \{e, h\} \quad (22)$$

$$C_{O \& M}(t, m, s) = P_{e, chp}(t, m, s) \cdot K_{O \& M}^{chp}(m) + P_{h, bo}(t, m, s) \cdot K_{O \& M}^{bo}(m) + P_{e, trans}(t, m, s) \cdot K_{O \& M}^{trans}(m) + \sum_{Ru} P_{e, Ru}(t, m, s) \cdot K_{O \& M}^{RP}(m) \quad (23)$$

$$P_{e, trans}(t, m, s) = P_e(t, m, s) \cdot \eta_e^{trans}(m) \quad (24)$$

$$P_{e, chp}(t, m, s) = P_g(t, m, s) \cdot \eta_l^{chp}(m) \cdot \nu_l^{chp}(t, m, s) \quad (25)$$

$$P_{h, bo}(t, m, s) = P_g(t, m, s) \cdot \eta_h^{bo}(m) \cdot \nu^{bo}(t, m, s) \quad (26)$$

$$P_{e, Ru}(t, m, s) = RP^{Ru}(t, m, s) \cdot \eta^{Ru}(m) \quad (27)$$

$$E_l(1, m) = E_l(24, m) \quad (12)$$

$$P_{bus-n}(t, s) - \sum_{bus-n \in N_n} P_{bus-m}(t, s) = 0 \quad (13)$$

$$P_{bus-m}(t, s) = \beta_{nm} \cdot (\delta_n(t, s) - \delta_m(t, s)) \quad (14)$$

۴-۳- معادلات پخش بار برق و گاز

معادلات پخش بار برق جریان مستقیم براساس بالانس توان باس و معادلات خطوط، طبق توضیحات ارائه شده در [۷]، در این بخش استفاده شده است. بالانس توان در هر باس برای هر ساعت، در رابطه (۱۳) و توان تزریقی بین خطوط در رابطه (۱۴) فرموله شده است.

پخش توان در خطوط توزیع گاز، همانند پخش بار گره‌ای و معادلات خطوط توصیف پذیر است [۱۸]. همانند رابطه (۱۲)، بالانس پخش بار احتمالاتی برای یک باس برای هر ساعت در رابطه زیر توصیف شده است:

$$Q_{\alpha, bus-g}(t, s) - \sum_{bus-n \in N_n} Q_{\alpha, bus-gg}(t, s) = 0 \quad (15)$$

نرخ حجم توان تزریقی در خطوط لوله برای هر ساعت، از رابطه (۱۶) به دست می‌آید. پخش توان احتمالاتی برای باس متصل به صورت تابعی از فشار بالادست و پایین دست فرموله شده است. رابطه پخش توان در لوله برای کلیه مایعات و گازها استفاده می‌شود.

$$Q_{bus-gg}(t, s) = Mk_{bus-gg} \cdot Sk_{bus-gg}(t, s) \cdot \sqrt{Sk_{bus-gg}(t, s) \cdot (Y_{bus-g}(t, s) - Y_{bus-g}(t, s))^2} \quad (16)$$

$$Sk_{bus-gg}(t, s) = \begin{cases} +1 & \text{if } Y_{bus-g}(t, s) \geq Y_{bus-g}(t, s) \\ -1 & \text{else.} \end{cases} \quad (17)$$

نرخ حجم توان به صورت زیر فرموله شده است:

$$Qu_{bus-gg}(t, s) = GHV \cdot Q_{bus-gg}(t, s) \quad (18)$$

۵- توصیف مسئله

پخش بار احتمالاتی در یک شبکه از ریزشبهه‌های چندحامل به عنوان یک مسئله بهره‌برداری برای تعیین میزان تولید بهینه واحدها تعیین شده است؛ در صورتی که قیود

$$P_{e,tot}(t,m,s) - P_e(t,m,s) + T_e(t,m,s) = \sum_{n'} \beta_{bus-nm} \cdot (\delta_{bus-n}(t,s) - \delta_{bus-n'}(t,s)) \quad (32)$$

if $m \rightarrow bus - n$

$$P_{g,tot}(t,m,s) - P_g(t,m,s) = \sum_{g'} Sk_{bus-gg} \cdot Mk_{bus-gg} \cdot \sqrt{Sk_{bus-gg} \cdot (\gamma_{bus-g}^2(t,s) - \gamma_{bus-g'}^2(t,s))} \quad (33)$$

if $m \rightarrow bus - g$

$$Sk_{bus-gg}(t,s) = \begin{cases} +1 & \text{if } \gamma_{bus-g}(t,s) - \gamma_{bus-g'}(t,s) \geq 0 \\ -1 & \text{else.} \end{cases} \quad (34)$$

رابطه (۳۲)، میزان انتقال انرژی را در هر خط، با توجه به روابط پخش بار مقید می‌کند و روابط (۳۳ و ۳۴)، میزان انتقال گاز را در هر لوله و میزان فشار گاز را در هر گره نشان می‌دهند.

برای تأمین امنیت سیستم، هیچ اضافه‌باری نباید از شاخه‌های انتقال بگذرد؛ برای مثال، توزیع توان باید به اندازه ظرفیت انتقال توان خطوط باشد. زاویه فاز و فشار بالادست و پایین‌دست خطوط الکتریکی و گاز نیز باید بین محدوده عملکردشان باشند. این معادلات به صورت زیر فرموله شده‌اند:

$$|\beta_{bus-nm} \cdot (\delta_{bus-n}(t,s) - \delta_{bus-n'}(t,s))| \leq \overline{P_{bus-nm}} \quad (35)$$

$$\left| \frac{S_{bus-gg}(t,s) \cdot Mk_{bus-gg}}{\sqrt{Sk_{bus-gg} \cdot (\gamma_{bus-g}^2(t,s) - \gamma_{bus-g'}^2(t,s))}} \right| \leq \overline{P_{bus-gg}} \quad (36)$$

$$|\delta_{bus-n}(t,s) - \delta_{bus-n'}(t,s)| \leq \overline{\Delta\delta} \quad (37)$$

$$\underline{\gamma_{bus-gg}} \leq \gamma_{bus-gg}(t,s) \leq \overline{\gamma_{bus-gg}} \quad (38)$$

روابط (۳۵ و ۳۶)، ظرفیت خط برق و گاز را برای انتقال توان نشان می‌دهند و روابط (۳۷ و ۳۸)، زاویه فاز هر باس و فشار بالادست و پایین‌دست هر گره را محدود می‌کنند.

معادله زیر بیان می‌کند تولید و فروش انرژی به صورت هم‌زمان برای هر سناریو امکان‌پذیر نیست؛ زیرا خرید و فروش هم‌زمان برق از شبکه بالادست منطقی نیست و توسط رابطه زیر از این رخداد جلوگیری می‌شود.

کل انرژی خریداری و فروخته شده در این شبکه از ریزشکه‌ها در معادلات (۲۱) و (۲۲) به ترتیب نوشته شده است. هزینه نگهداری تجهیزات، از ضرب میزان تولید انرژی هر واحد در ضریب هزینه نگهداری هر واحد در معادله (۲۳) نوشته شده است. میزان انرژی تبدیل‌شده با ترانسفورماتور، تولید مولد هم‌زمان، گرماساز و منابع تجدیدپذیر در معادلات (۲۴) تا (۲۷) نوشته شده است.

۵-۲- قیود مسئله

مقدار بار کل الکتریکی و حرارتی در معادله زیر فرموله شده که مجموع کل بارهای ریزشکه‌ها است.

$$L_{l,tot}(t,s) = \sum_{m=1}^{n_m} L_l(t,m,s) \quad l \in \{e,h\} \quad (28)$$

در این مقاله، مفهوم ریزشکه چندحاملی برای ایجاد بالانس بین تولید و مصرف حامل‌های مختلف انرژی استفاده شده است. بالانس انرژی الکتریکی و حرارتی برای هر ریزشکه در هر سناریو به ترتیب در زیر مدل شده‌اند:

$$L_e(t,m,s) + T_e(t,m,s) + M_e(t,m,s) = Po_e^{chp}(t,m,s) + Po_e^{Ru}(t,m,s) + Po_e^{trans}(t,m,s) \quad (29)$$

$$L_h(t,m,s) + T_h(t,m,s) + M_h(t,m,s) \leq Po_h^{chp}(t,m,s) + Po_h^{bo}(t,m,s) \quad (30)$$

میزان بار کل (بار پاسخگو و غیرپاسخگو)، برابر با میزان تولید واحدهای تولید پراکنده است. همچنین ذخیره‌ساز، نقش شارژ و دشارژ را در مدل، با توجه به شرایط بهره‌برداری دارد.

میزان تولید و مصرف انرژی حرارتی در هر شبکه از ریزشکه‌ها برای هر معادله باید به صورت زیر باشد تا بالانس انرژی حرارتی بین سه ریزشکه برقرار شود.

$$\sum_{m=1}^{n_m} P_h(t,m,s) = \sum_{m=1}^{n_m} T_h(t,m,s) \quad (31)$$

مدل‌سازی پخش بار برق و گاز در هر باس الکتریکی و حرارتی در معادلات (۳۲) تا (۳۴) به ترتیب زیر نوشته شده است.

بهره‌برداری چند ریزشبهه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

بارهای الکتریکی و حرارتی است. به‌منظور درک بهتر نقش ذخیره‌ساز برای ۲۴ ساعت بررسی شده است. ویژگی المان‌های ذخیره‌ساز در جدول (۱) نشان داده شده‌اند.

گام‌های حل مسئله پخش بار احتمالاتی در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. با توجه به فلوچارت، یک تابع چگالی توزیع برای مدل‌سازی بارهای الکتریکی و حرارتی، سرعت باد، تابش خورشید و قیمت بازار استفاده شده است که این ورودی‌های مسئله، متغیرهای احتمالاتی در این مدل تعریف شده‌اند. با توجه به ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی مسئله، متغیرهای خروجی شبکه، رفتار احتمالاتی نشان می‌دهند. با توجه به رفتار متناوب تولیدات تجدیدپذیر، قیمت بازار برق و نوسانات بار، مدل مطالعه‌شده براساس عدم قطعیت در اطلاعات ورودی بررسی شده است.

در این مقاله، تعداد سناریوهای باد، تابش و بارها برای هر ساعت ۵۰۰ در نظر گرفته شده است و نتایج به‌دست‌آمده برای زاویه فاز و بقیه پارامترهای شبکه در دو سناریو مقایسه شده‌اند. ظرفیت خطوط انتقال و ضریب مشخصه مایعات و لوله‌ها برای کیس اصلی و دو سناریوی مربوطه در جدول (۲) توصیف شده‌اند. تمامی اطلاعات ورودی مانند بار، سرعت باد و تابش به فرم تابع توزیع احتمال و تجمعی در نتایج احتمالی نمایش داده شده‌اند. بارهای الکتریکی و حرارتی هر ریزشبهه در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. گفتنی است قیمت خرید و فروش برق، در سه گام و با مقدار میانگین و انحراف معیار آن، یعنی به‌ترتیب ۰/۱۱۳ و ۰/۰۰۷ دلار بر کیلووات‌ساعت برابرند؛ درحالی‌که قیمت گاز خریداری‌شده برابر با ۰/۰۷ دلار بر کیلووات‌ساعت به‌طور ثابت در نظر گرفته شده است. به‌منظور افزایش تولیدات انرژی پاک، یک مزرعه بادی با ظرفیت یک مگاوات، در ریزشبهه دوم و همچنین، یک مزرعه خورشیدی با ظرفیت نصب‌شده ۲ مگاوات در ریزشبهه اول نصب شده است. پارامترهای توربین بادی و نیروگاه خورشیدی در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. تابع توزیع احتمال سرعت باد و تابش خورشید و مدل‌سازی احتمالی برای واحدهای فتوولتائیک و بادی در شکل (۴) نمایش داده شده‌اند.

$$\begin{cases} \text{if } P_e(t, m, s) - T_e(t, m, s) \geq 0 \\ \quad \Rightarrow P_e(t, m, s) \geq 0, T_e(t, m, s) = 0 \\ \text{else } P_e(t, m, s) - T_e(t, m, s) < 0 \\ \quad \Rightarrow P_e(t, m, s) = 0, T_e(t, m, s) \geq 0 \end{cases} \quad (39)$$

حد تولید و میزان انتقال انرژی هر واحد، به ظرفیت آن واحد وابسته است که به‌صورت زیر فرموله شده‌اند:

$$Po_e^{chp}(t, m, s) \leq Po_e^{chp}(t, m, s) \leq \overline{Po_e^{chp}(t, m, s)} \quad (40)$$

$$Po_h^{bo}(t, m, s) \leq Po_h^{bo}(t, m, s) \leq \overline{Po_h^{bo}(t, m, s)} \quad (41)$$

$$P_{p,tot}(t, s) \leq P_{p,tot}(t, s) \leq \overline{P_{p,tot}(t, s)} \quad (42)$$

$$T_{e,tot}(t, s) \leq T_{e,tot}(t, s) \leq \overline{T_{e,tot}(t, s)} \quad (43)$$

$$P_p(t, m, s) \leq P_p(t, m, s) \leq \overline{P_p(t, m, s)} \quad (44)$$

$$T_l(t, m, s) \leq T_l(t, m, s) \leq \overline{T_l(t, m, s)} \quad (45)$$

$$0 \leq v^{chp}(t, m, s) \leq 1 \quad (46)$$

$$0 \leq v^{bo}(t, m, s) \leq 1 \quad (47)$$

$$v^{chp}(t, m, s) + v^{bo}(t, m, s) = 1 \quad (48)$$

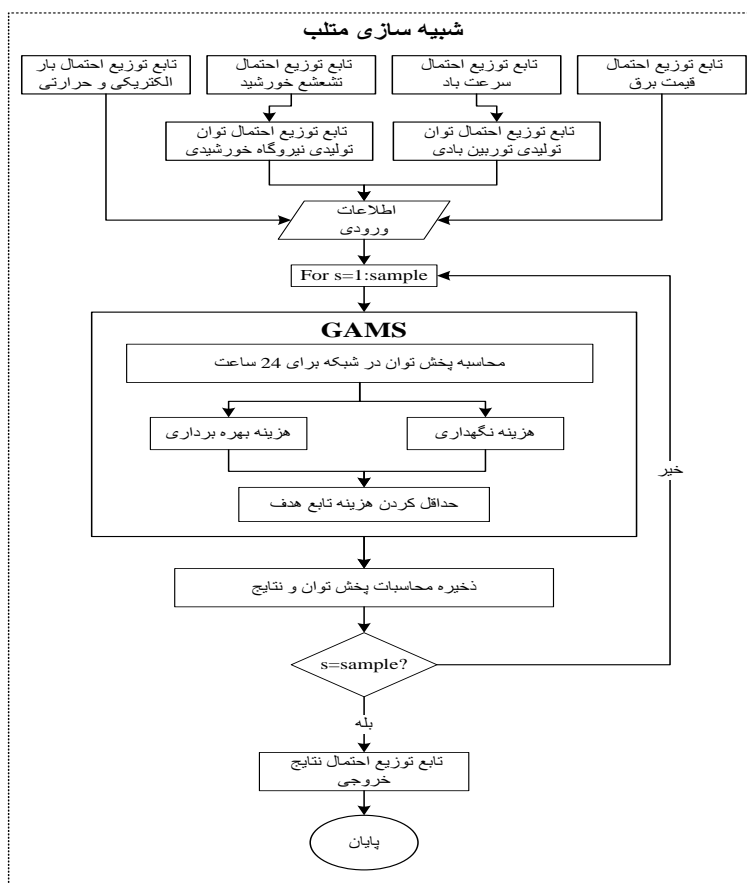
روابط (۴۰ و ۴۱)، ظرفیت مولد تولید هم‌زمان و گرماساز را محدود می‌کنند. روابط (۴۲ تا ۴۵)، میزان خرید و فروش انرژی را با توجه به ظرفیت خطوط شبکه بالادست و روابط (۴۶ تا ۴۸)، میزان گاز خریداری‌شده ورودی به مولد تولید هم‌زمان و گرماساز را نشان می‌دهند.

۵-۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

به‌منظور ارزیابی توانایی مدل پیشنهادی، یک ریزشبهه چندحاملی متصل به هم متمرکز، مطابق شکل (۱)، بررسی شده است. سیستم شامل سه ریزشبهه است که به شبکه برق و گاز اصلی از طریق خطوط انتقال متصل است. همچنین، شبکه داخلی انتقال حرارت بین ریزشبهه‌ها در نظر گرفته شده است تا در مواقعی که هریک از ریزشبهه‌ها امکان تأمین بار حرارتی را از منابع داخلی نداشته باشند بتوانند بار حرارتی را از ریزشبهه‌های مجاور تأمین کنند. همچنین، یک ریزشبهه چندحاملی قادر به فروش برق اضافی به شبکه اصلی است. هر ریزشبهه شامل منابع انرژی مقیاس کوچک، ذخیره‌ساز و

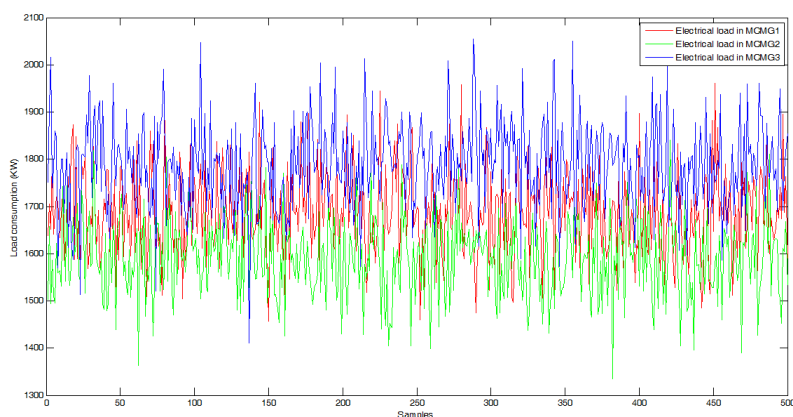
جدول (۱): مشخصات فنی المان‌های ریزشبکه

نوع واحد	شماره ریزشبکه	حداکثر ظرفیت	راندمان (%)		ضریب هزینه نگهداری
			الکتریکی	حرارتی	
ترانسفورماتور	۱		۹۲		
	۲	۵۰۰۰	۹۰		۰/۰۰۲
	۳		۹۰		
مولد تولید هم‌زمان	۱	۱۱۰۰	۴۰	۴۰	
	۲	۱۰۰۰	۴۰	۳۰	۰/۰۰۵۸۷
	۳	۹۰۰	۳۰	۳۰	
گرماساز	۱	۱۷۰۰		۸۵	
	۲	۱۵۰۰		۸۷	۰/۰۰۱
	۳	۱۹۰۰		۹۰	
نیروگاه خورشیدی	۱	۲۰۰۰			۰/۰۰۳
توربین بادی	۲	۱۰۰۰			۰/۱۳۶۹
ذخیره‌ساز الکتریکی	۱ تا ۳	۹۰	-	-	-
ذخیره‌ساز حرارتی	۱ تا ۳	۹۰	-	-	-
مبدل ذخیره‌ساز	۱ تا ۳	-۳۰/۳۰	۹۵/۹۰		-

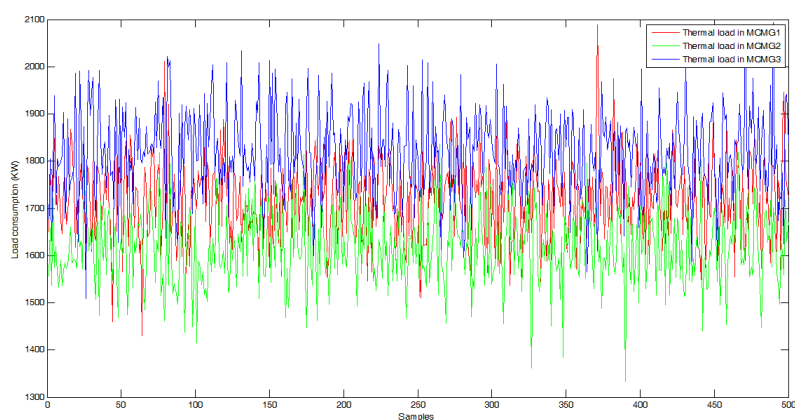


شکل (۲): الگوریتم حل مسئله

بهره‌برداری چند ریزشبهه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت

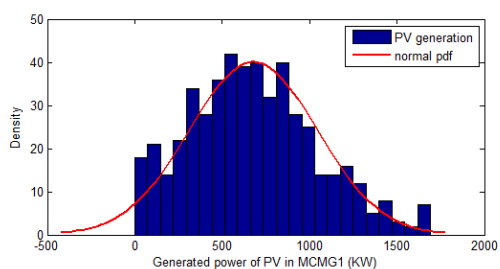


الف: الکتریکی

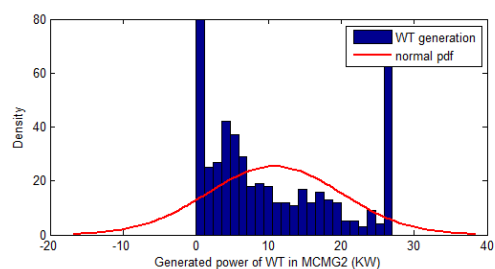


ب: حرارتی

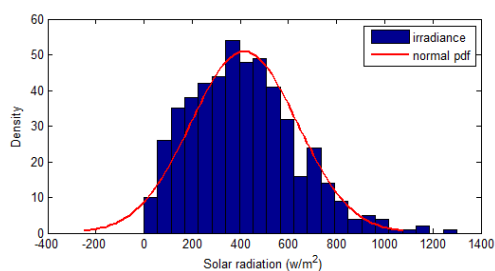
شکل (۳): منحنی احتمالاتی بار



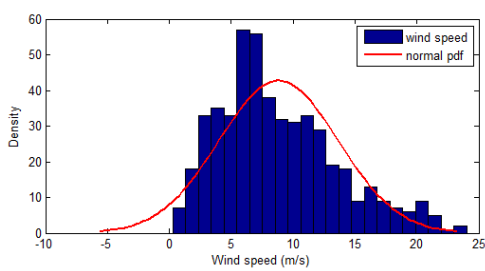
ب: نیروگاه بادی



الف: نیروگاه خورشیدی



د: سرعت باد



ج: تابش

شکل (۴): تابع توزیع فراوانی نیروگاه خورشیدی و بادی

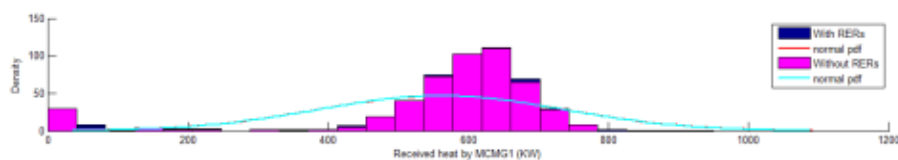
جدول (۳): مقادیر پارامترهای تولید فتوولتائیک و توربین بادی

توربین	$P_r^{wt} = 1000$	$V_{ci} = 2.5$	$V_r = 14$
بادی	$V_{co} = 25$	$\beta = 2$	$\alpha = 10$
فتوولتائیک	$P_r^{pv} = 2000$	$R_{ce} = 150$	$R_{STD} = 1000$

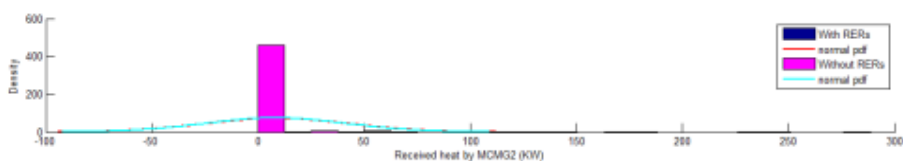
مقدار میانگین و انحراف معیار انرژی خریداری شده در این شبکه از ریزشبهکها در جدول (۴) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در جدول مشخص است، میزان برق خریداری شده از شبکه بالادست، با وجود منابع تجدیدپذیر، به مقدار چشمگیری کاهش داشته که در نتیجه، بهبود زاویه فاز و کاهش هزینه‌های شبکه را سبب شده است.

جدول (۲): اطلاعات شبکه برق و گاز

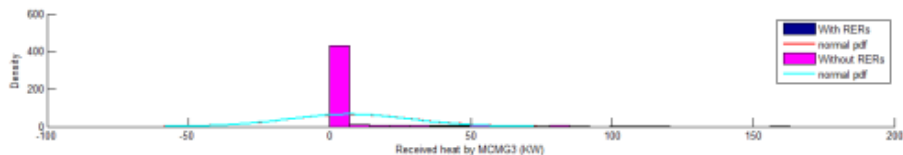
کسب اصلی	سناریوی ۱		سناریوی ۲	
	تا	از	ظرفیت خطوط (کیلووات)	حداقل فشار گاز (psia)
برق	۰	۱	۱۰۰۰۰	۲۵۰۰
	۰	۲	۱۰۰۰۰	۲۳۰۰
	۲	۳	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰
گاز	۰	۱	۱۴۰۰۰	۱۴۰۰۰
	۰	۲	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰
	۲	۳	۴۰۰۰	۸۰۰۰



الف: ریزشبهک اول

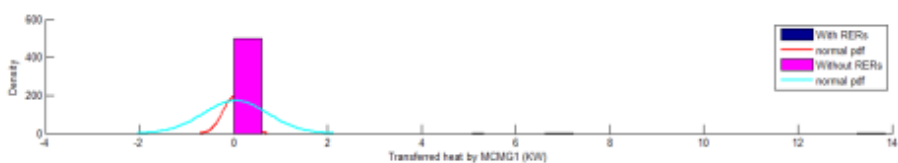


ب: ریزشبهک دوم



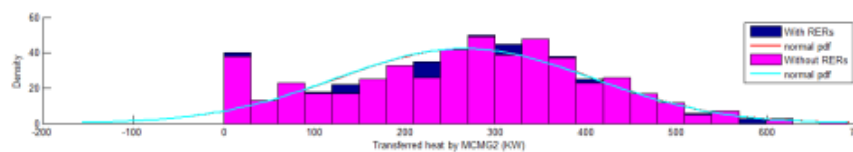
ج: ریزشبهک سوم

شکل (۵): تابع توزیع فراوانی حرارت دریافتی



الف: ریزشبهک اول

بهره‌برداری چند ریزشبهه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت



ب: ریزشبهه دوم



ج: ریزشبهه سوم

شکل (۶): تابع توزیع فراوانی حرارت انتقالی

جدول (۴): مقدار میانگین و انحراف معیار برق کل خریداری شده توسط ریزشبهه‌ها

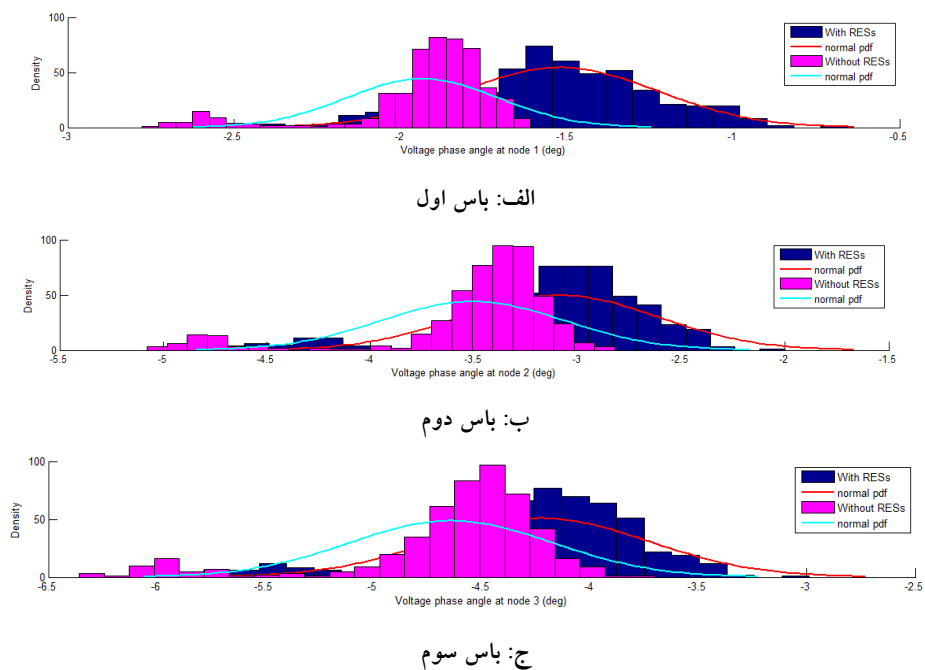
نوع حامل	کل انرژی خریداری شده توسط ریزشبهه‌ها					
	با تولیدات تجدیدپذیر (کیلووات)			بدون تولیدات تجدیدپذیر (کیلووات)		
	متوسط	انحراف معیار	تقارن	متوسط	انحراف معیار	تقارن
برق	۲۸۴۶	۴۰۲/۹	۱/۶۵	۳۳۷۴	۴۰۰/۸۰	۱/۹۰۰۳
گاز	۸۸۱۷۸	۵۳۶/۹۴	-۲/۴	۸۸۲۲/۲	۵۲۷/۴۴	-۲/۴۸

فراوانی پخش بار برق و گاز در خطوط برای فیدرهای توزیع با و بدون تولیدات تجدیدپذیر به ترتیب در شکل (۹) و (۱۰) نشان داده شده‌اند.

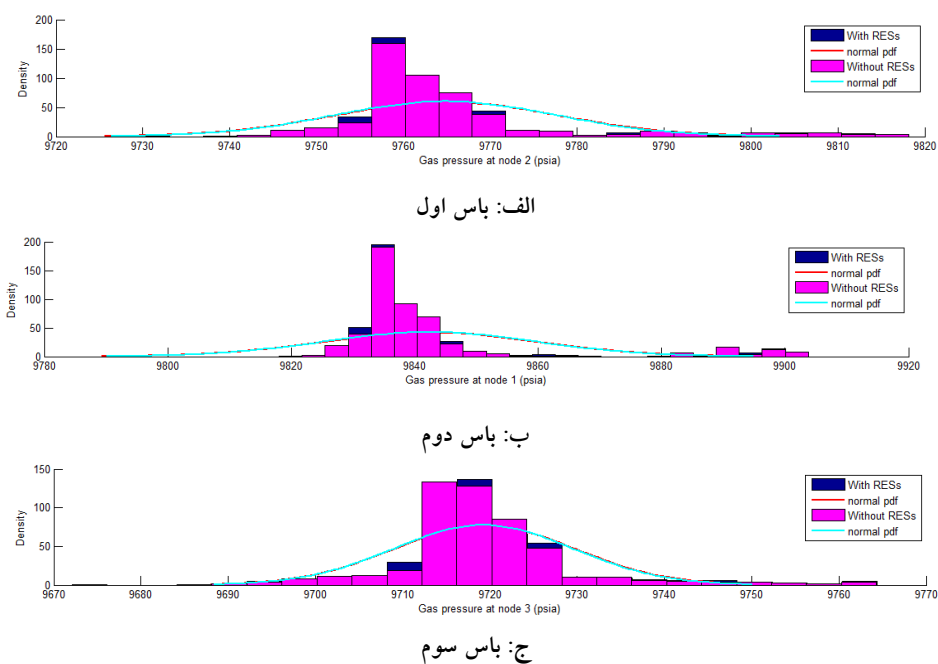
همچنین، مقدار میانگین و انحراف معیار پخش بار برق و گاز در خطوط برای هر فیدر توزیع با و بدون منابع تجدیدپذیر در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. براساس جدول، مقدار میانگین و انحراف معیار انرژی مصرفی در باس الکتریکی و گازی اول برای جبران انرژی مورد نیاز سیستم افزایش داشته است.

زاویه فاز و فشار گاز باس اسلک (باس الکتریکی و گازی صفر) به ترتیب برابر صفر (درجه) و ۱۰۰۰۰ (psia) در نظر گرفته شده‌اند. تابع توزیع فراوانی زاویه فاز باس الکتریکی در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند تولیدات تجدیدپذیر که نزدیک بارها قرار گرفته‌اند، بهبود زاویه فاز را سبب شده‌اند. همچنین، تابع توزیع فراوانی فشار گاز در باس‌های گازی در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. با توجه به شعاعی بودن خطوط الکتریکی و گازی، زاویه فاز و فشار گاز در باس‌های انتهایی کمتر شده‌اند.

تابع توزیع فراوانی و تجمعی در هر فیدر توزیع با و بدون تولیدات تجدیدپذیر ارزیابی شده است. تابع توزیع

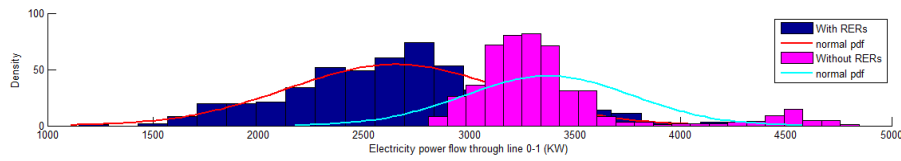


شکل (۷): تابع توزیع فراوانی زاویه فاز در باس‌های الکتریکی با و بدون منابع تجدیدپذیر

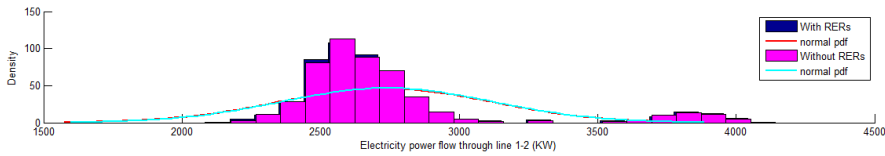


شکل (۸): تابع توزیع فراوانی فشار گاز در باس‌های گازی با و بدون منابع تجدیدپذیر

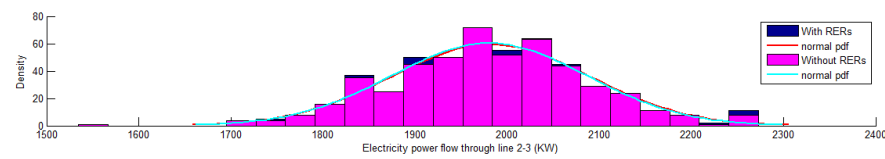
بهره‌برداری چند ریزشکبه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت



الف: خط اول

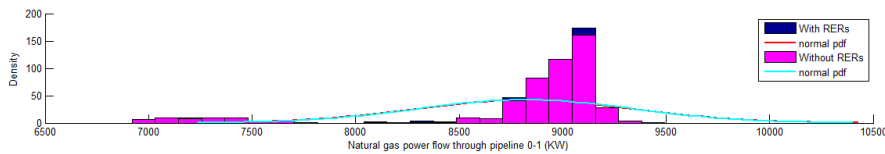


ب: خط دوم

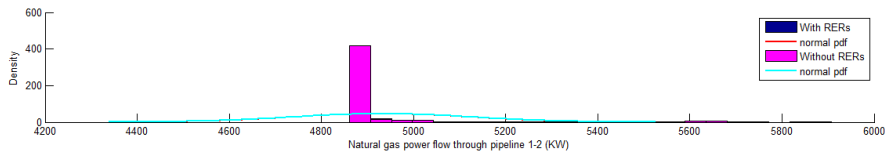


ج: خط سوم

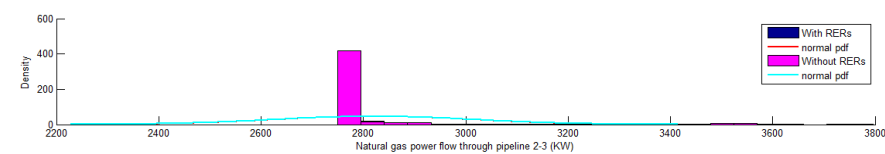
شکل (۹): تابع توزیع فراوانی توزیع توان الکتریکی در خطوط با و بدون منابع تجدیدپذیر



الف: لوله گاز اول



ب: لوله گاز اول



ج: لوله گاز سوم

شکل (۱۰): تابع توزیع فراوانی فشار گاز در لوله‌ها با و بدون منابع تجدیدپذیر برای سناریوی اول

را موجب شده‌اند؛ اما دید واقعی‌تری را نسبت به عملکرد شبکه به بهره‌بردار سیستم داده است. همچنین، با در نظر گرفتن پارامترهای شبکه، میزان خطا در هزینه‌ها نیز تا حدی افزایش داشته است. در سناریوی اول، توان تزریقی محدودشده در خطوط انتقال، افزایش تولید مولدهای مصرف‌کننده گازی، نظیر مولد تولید هم‌زمان برای تأمین بار

اثرات ظرفیت خطوط انتقال و افت فشار محدودشده باس‌ها نیز براساس جدول (۲) بررسی شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۶) نشان داده شده است، نتایج نشان می‌دهند این محدودیت‌ها بر بالانس انرژی تأثیر می‌گذارند و همچنین به‌طور چشمگیری هزینه‌های بهره‌برداری را افزایش می‌دهند. در هر صورت، این محدودیت‌ها، افزایش هزینه بهره‌برداری

فراوانی انرژی و توان ذخیره‌ساز الکتریکی و حرارتی ریزشبکه اول در یک ساعت خاص در شکل (۱۱) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، عملکرد ذخیره‌ساز بدون منابع تجدیدپذیر در یک شبکه محدودشده، بسیار تأثیرگذار بوده و در بسیاری از سناریوها در حال شارژ و دشارژ برای کاهش اثر عدم قطعیت در شبکه است.

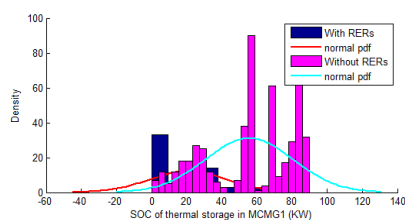
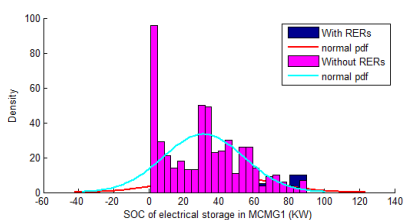
الکتریکی را سبب شده است. در سناریوی دوم، مصرف سوخت گاز کاهش یافته، اما تأمین بار الکتریکی شبکه بیشتر با خرید توان از شبکه بالادست انجام شده است. همچنین، بالانس حرارتی به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار گرفته و در نتیجه، عملکرد ذخیره‌ساز، به‌خصوص حرارتی، برای برطرف کردن نامتعادلی بار بهبود یافته است. تابع توزیع

جدول (۵): تحلیل آماری انتقال توان در خطوط برق و گاز

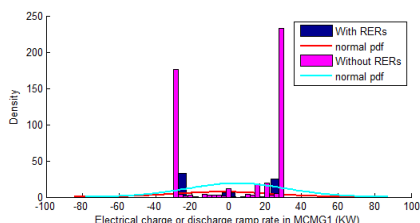
نوع حامل	شماره شاخه	از گره	تا	انتقال توان بین خطوط با حضور منابع تجدیدپذیر (کیلووات)		انتقال توان بین خطوط بدون حضور منابع تجدیدپذیر (کیلووات)	
				متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار
				برق	۱	۰	۱
	۲	۱	۲	۴۸/۲۷۳۴	۶۸۹/۳۸۶	۵۶/۲۷۴۱	۳۸۵/۳۸۱
	۳	۲	۳	۵۶/۱۹۸۰	۰۷۲/۱۰۶	۵۶/۱۹۸۰	۰۷۲/۱۰۶
گاز طبیعی	۱	۰	۱	۸۲/۸۸۱۷	۹۴۷/۵۳۶	۲۳/۸۸۲۲	۴۴۱/۵۲۷
	۲	۱	۲	۳۱/۴۹۳۲	۴۰۸/۱۹۶	۳۵/۴۹۳۲	۸۶۹/۱۹۷
	۳	۲	۳	۲۴/۲۸۲۱	۸۶۹/۱۹۷	۲۴/۲۸۲۱	۸۶۹/۱۹۷

جدول (۶): تحلیل اقتصادی مدل اصلی و سناریوها

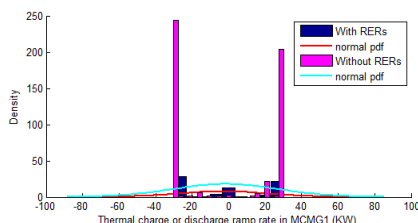
مدل اصلی	سناریوی ۱		سناریوی ۲			
	متوسط	انحراف معیار	متوسط	انحراف معیار		
هزینه (دلار)	۲۲۰۳۲	۵۸۲/۵	۲۲۹۲۸	۶۰۴/۷	۲۲۸۹۲	۶۰۱/۴



ب: انرژی الکتریکی



الف: انرژی حرارتی

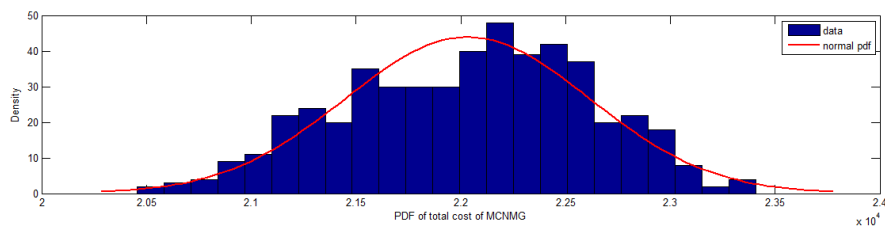


د: توان الکتریکی

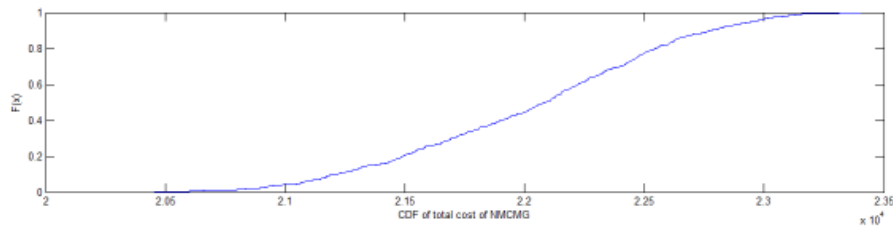
ج: توان حرارتی

شکل (۱۱): تابع توزیع فراوانی انرژی در ذخیره‌سازهای الکتریکی و حرارتی ریزشبکه اول در سناریوی دوم

بهره‌برداری چند ریزشبهه با حامل‌های مختلف انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت



الف: تابع توزیع فراوانی



ب: تابع توزیع تجمعی

شکل (۱۲): هزینه کل شبکه

شبکه مطالعه شده شامل چندین ریزشبهه متصل به هم است که شبکه الکتریکی و گازی به صورت شعاعی در آن مدل شده‌اند؛ درحالی که شبکه حرارتی به صورت حلقوی بدون هیچ تلفاتی مدل شده است. به صورت دقیق‌تر، شبکه حرارتی به صورت یک باس در شبکه در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، ریزشبهه‌ها قادر به مبادله توان حرارتی‌اند. نتایج نشان می‌دهند زاویه فاز باس‌هایی بهبود یافته است که نزدیک منابع تجدیدپذیر قرار گرفته‌اند و توانایی مبادله توان حرارتی بین ریزشبهه، کاهش هدررفت انرژی در شبکه را سبب شده است. همچنین، نشان داده شد حامل‌های گوناگون به عنوان منابع سوختی برخی از تولیدات پراکنده، به تأمین انرژی در شرایط تراکم خطوط یا ناتوانی‌های شبکه در انتقال توان کمک شایانی کرده‌اند. همچنین، توصیف پارامترهای شبکه به صورت تابع توزیع فراوانی و تجمعی برای بهره‌بردار و برنامه‌ریز سیستم توزیع بسیار مفیدند. به طور خلاصه، مدل پیشنهادی در این مقاله، افزایش هم‌افزایی منابع انرژی مختلف را سبب شده است؛ به طوری که بهره‌وری و در نتیجه هزینه‌های مجموعه ریزشبهه‌ها به صورت یکجا کاهش چشمگیری یافته است. درواقع، هماهنگی بین ریزشبهه‌های چندحاملی متمرکز متصل به هم در شبکه، شرایط بهره‌برداری را بهبود بخشیده است. همچنین، استفاده از روش احتمالاتی موجب شده

در نهایت، تابع توزیع فراوانی و تجمعی هزینه کل شبکه در شکل (۱۲) نشان داده شده است؛ در نتیجه، تحلیل احتمالاتی مسئله، پیچیدگی فرایند بهینه‌سازی مسئله را موجب شده است؛ اما دید واقعی‌تری را نسبت به بهره‌بردار سیستم قدرت، برای ارزیابی ریسک‌های تغییرات هزینه کل سیستم داده است؛ بنابراین، نتایج بسیار با ارزش‌تری را از دید مدیریت انرژی خواهیم داشت.

۶- نتیجه‌گیری

در یک محیط با منابع مختلف، تولیدات، تقاضا و الگوی بازار برق قطعی نیست و در چنین شرایطی، محاسبات قطعی پخش بار با در نظر گرفتن عدم قطعیت امکان‌پذیر نیست. در مقایسه با پخش بار جریان مستقیم، پخش بار احتمالاتی به بهره‌بردار سیستم قدرت کمک می‌کند تا رفتار سیستم را در محیطی بسیار واقعی‌تر ارزیابی کند. در این مقاله، بهینه‌سازی ترکیبی توزیع اقتصادی بار و روش پخش بار هم‌زمان حامل‌ها برای سیستم‌های الکتریکی و هیدرولیکی در یک محیط با عدم قطعیت، به منظور پوشش خطوط انتقال و تبدیل انرژی انجام شده است. این روش عدم قطعیت بار الکتریکی و حرارتی، تولیدات تجدیدپذیر نظیر نیروگاه فتوولتائیک و بادی و قیمت بازار برق را در نظر گرفته است.

سوسپتانس خطوط	β_{bus-nm}	است نتایج با در نظر گرفتن پارامترهای عدم قطعیت بسیار مطمئن تر باشند.
زاویه باس	δ_n	
گرمای خالص مایع	GHV	مطالعات بعدی در زمینه بررسی انواع برنامه‌های پاسخگویی بار، اثر هرکدام از برنامه‌ها بر کاهش تراکم خطوط و بررسی استراتژی خرید و فروش انرژی این چند ریزشکه در بازار روز قبل و پیش رو در محیط بازارهای انرژی مختلف می‌تواند بررسی شود.
نرخ پخش گاز در لوله	Q	
گاز تزریق شده در لوله	Qu	
ضریب مشخصه مایع و لوله	Mk_{bus-gg}	
فشار در باس	γ	

علائم یونانی

قیمت خرید انرژی	π
قیمت فروش انرژی	ψ
ضریب توزیع گاز	v

بالانویس

فتولتائیک	pv
توربین بادی	wi
واحدهای تجدیدپذیر	Ru
گرماساز	bo
مولد تولید هم‌زمان	chp
مبدل تبدیل توان ذخیره‌ساز در حال شارژ	$char$
مبدل تبدیل توان ذخیره‌ساز در حال دشارژ	$dischar$
ترانسفورماتور	$trans$

پایین نویس

برق	e
گاز طبیعی	g
حرارت	h
کل	tot
حامل ورودی	p
حامل خروجی	l
نوع حامل	ℓ
مقدار اولیه	0
تلفات انرژی ذخیره‌ساز	stb
بهره‌برداری و نگهداری	$O \& M$
باس الکتریکی	$bus - n$
باس گازی	$bus - g$

علائم

متغیر و پارامترها

C	قیمت
Po	تولید انرژی
P	انرژی دریافت شده
T	انرژی انتقال داده شده
E	انرژی ذخیره‌ساز
L	بار غیر پاسخگو
M	انرژی شارژ و دشارژ شده ذخیره‌ساز
t	ساعت
RP	تولیدات پراکنده
P_r	توان نامی
R	تابش خورشید
v	سرعت باد
α, β	پارامترهای انتخاب و بیاب
φ, ζ	پارامترهای انتخاب بتا
η	راندمان واحدها
EL	ماتریس کشش
ee	المان‌های کشش
K	ضریب هزینه نگهداری
S	ضریب کوپلاژ ذخیره‌ساز
σ	انحراف استاندارد
μ	مقدار میانگین
m	شماره ریزشکه
s	سناریو
I	متغیر باینری وضعیت ذخیره‌ساز
P_{bus-nm}	تزریق توان بین خطوط

24, no. 3, pp. 1290–1300, 2009.

[9] M. Gomez-Gonzalez and F. Ruiz-Rodriguez, "A binary SFLA for probabilistic three-phase load flow in unbalanced distribution systems with technical constraints," *Int. J.*, vol. 48, pp. 48–57, 2013.

[10] M. Aien, M., Rashidinejad, M., Fotuhi-Firuzabad, "On Possibilistic and Probabilistic Uncertainty Assessment of Power Flow Problem: A Review and a New Approach," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 883–895, 2014.

[11] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian, and H. A. Talebi, "Fuzzy unscented transform for uncertainty quantification of correlated wind/PV microgrids: possibilistic–probabilistic power flow based on RBFNNs," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 6, pp. 867–877, 2017.

[12] N. Nikmehr and S. N. Ravadanegh, "A study on optimal power sharing in interconnected microgrids under uncertainty," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 208–232, 2016.

[13] G. Mokryani and P. Siano, "Combined Monte Carlo simulation and OPF for wind turbines integration into distribution networks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 103, pp. 37–48, 2013.

[14] F. Mumtaz, M. H. Syed, M. Al Hosani, and H. H. Zeineldin, "A Novel Approach to Solve Power Flow for Islanded Microgrids Using Modified Newton Raphson with Droop Control of DG," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 493–503, 2016.

[15] M. Aien, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Rashidinejad, "Probabilistic optimal power flow in correlated hybrid wind-photovoltaic power systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 130–138, 2014.

[16] Sharma, K. Chand, R. Bhakar, and H. P. Tiwari, "Influence of price uncertainty modeling accuracy on bidding strategy of a multi-unit GenCo in electricity markets," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Electr. Eng.*, vol. 38, no. 2, pp. 191–203, 2014.

[17] N. Nikmehr and S. Najafi-Ravadanegh, "Optimal operation of distributed generations in micro-grids under uncertainties in load and renewable power generation using heuristic algorithm," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 9, no. 8, pp. 982–990, 2015.

[18] M. Geidl and G. G. Andersson, "Optimal power flow of multiple energy carriers," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 145–155, Feb. 2007.

توان نامی	r
سرعت حداقل	ci
سرعت حداکثر	co
نقطه تابش خاص	ce
شرایط استاندارد	STAD

اختصارات

ریزشبکه چندحاملی	MCMG
شبکه‌ای از ریزشبکه‌های چندحاملی	NMCMG
کنترلر مرکزی ریزشبکه چندحاملی	MCMGCC

مراجع

[1] Iman Goroohi Sardou. "Optimal Multi-objective Development Scheduling of Electric Vehicles in Distribution Network using Particle Swarm Optimization". *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, Vol.9, No.2, pp.55-64, 2018,. doi: 10.22108/isee.2018.106972.1068

[2] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the art in research on microgrids: A review," *IEEE Access*, Vol. 3, pp. 890–925, 2015.

[3] A. Alqurashi, A. H. Etemadi, and A. Khodaei, "Treatment of uncertainty for next generation power systems: State-of-the-art in stochastic optimization," *Electr. Power Syst. Res.*, Vol. 141, pp. 233–245, 2016.

[4] Mohseni, Soheil, and Seyed Masoud Moghaddas-Tafreshi. "A multi-agent system for optimal sizing of a cooperative self-sustainable multi-carrier microgrid." *Sustainable cities and society* 38 (2018): 452-465.

[5] Shams, Mohammad H., Majid Shahabi, and Mohammad E. Khodayar. "Stochastic day-ahead scheduling of multiple energy Carrier microgrids with demand response." *Energy* 155 (2018): 326-338.

[6] Li, Z. and Xu, Y., 2019. Temporally-coordinated optimal operation of a multi-energy microgrid under diverse uncertainties. *Applied Energy*, 240, pp.719-729.

[7] T. J. Overbye, Xu Cheng, and Yan Sun, "A comparison of the AC and DC power flow models for LMP calculations," in *37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2004. Proceedings of the, 2004*, p. 9 pp.

[8] B. Stott, J. Jardim, and O. Alsac, "DC power flow revisited," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.