



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 2, 2024
pp. 51-68
Research Paper

The effect of energy storage systems in transmission and distribution networks on the flexibility of power systems

Meysam Khani¹, Mahmoud Samiei Moghaddam², Tohid Nouri³, Reza Ebrahimi⁴

¹ Department of Electrical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran

² Assistant Professor, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

³ Department of Electrical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran

⁴ Department of Electrical Engineering, Gorgan Branch, Islamic Azad University, Gorgan, Iran

Abstract:

Energy storage systems have an important effect on increasing the flexibility of power grids and are necessary to achieve the goals of smart grids. So far, many researches have been conducted in the field of optimal utilization of batteries, but most of them have studied the effects of batteries only on the side of the transmission or distribution network. In the present study, the effect of the installation and optimal operation of energy storage systems on both sides of the transmission and distribution network has been investigated. This paper presents a bi-level optimization model for integrated energy management in transmission and distribution smart grids along with demand management issues. Considering that both proposed models are mixed integer linear programming models, it is difficult to solve them by direct methods. Therefore, a method based on the change of variables and KKT equations is presented to solve these problems, and globally optimal solutions to these problems are guaranteed. Several integrated systems that include transmission and distribution networks are considered to evaluate the proposed model and method, and the results show that the proposed model is efficient and shows the positive effect of modeling energy storage systems on both sides of the network.

Keywords: Distribution network, transmission network, optimization, renewable resources, energy storage system, demand side management.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2023.135384.1597>

تأثیر سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های انتقال و توزیع بر انعطاف‌پذیری

سیستم‌های قدرت

میثم خانی^۱، محمود سمیعی مقدم^{۲*}، توحید نوری^۳، رضا ابراهیمی^۴

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

khani58@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

samiei352@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

thdnouri@gmail.com

۴- دانشکده مهندسی برق، واحد گرگان، دانشگاه آزاد اسلامی، گرگان، ایران

ebrahimi_reza_b@yahoo.com

چکیده: سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، تأثیر مهمی در افزایش انعطاف‌پذیری شبکه‌های قدرت دارند و برای دستیابی به اهداف شبکه‌های هوشمند ضروری‌اند. تا کنون، بسیاری از تحقیقات در زمینه بهره‌برداری بهینه از باتری‌ها انجام شده است؛ اما بیشتر آنها تأثیرات باتری‌ها را تنها در سمت شبکه انتقال یا توزیع مطالعه کرده‌اند. در مطالعه حاضر، تأثیر نصب و بهره‌برداری بهینه سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در هر دو سمت شبکه انتقال و توزیع بررسی شده است. این مقاله یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای مدیریت یکپارچه انرژی در شبکه‌های هوشمند انتقال و توزیع همراه با مسائل مدیریت تقاضا ارائه می‌دهد. با توجه به اینکه هر دو مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب‌اند، حل آنها با روش‌های مستقیم دشوار است؛ بنابراین، روشی بر مبنای تغییر متغیرها و معادلات KKT برای حل این مسائل ارائه می‌شود و جواب‌های بهینه سراسری این مسائل تضمین می‌شوند. تعدادی سیستم یکپارچه شامل شبکه‌های انتقال و توزیع برای ارزیابی مدل و روش پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند مدل پیشنهادی کارآمدی دارد و تأثیر مثبت مدل‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در هر دو سمت شبکه را نمایان می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: شبکه توزیع، شبکه انتقال، بهینه‌سازی، منابع تجدیدپذیر، سیستم ذخیره انرژی، مدیریت سمت تقاضا.

۱- مقدمه

(TSO) و اپراتور سیستم توزیع (DSO) پیروی می‌کنند. همان‌طور که چارچوب‌های TSO و DSO ظهور می‌کنند، الگوریتم‌ها باید برای مقابله با مشکلات بهره‌برداری هماهنگ ارائه شوند. نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر و دستگاه‌های هوشمند وابسته به شبکه هوشمند، عصر جدیدی از تحقیقات را در هماهنگی سیستم‌های انتقال و توزیع گشوده است.

در سیستم‌های قدرت امروزی، کشورهای مختلف از چندین چارچوب مفهومی برای اپراتور سیستم انتقال

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۹

نام نویسنده مسئول: محمود سمیعی مقدم

نشانی نویسنده مسئول: ایران، دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی دامغان، دانشکده برق

۱-۱- مروری بر پیشینه تحقیق

در مرجع [۱] رویکردی هماهنگ مبتنی بر روابط عدد صحیح خطی و معادلات پخش بار بهینه در سیستم‌های یکپارچه انتقال و شبکه گاز به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم پیشنهاد شده است. در [۲] رویکردی براساس برنامه‌ریزی محدود به شانس و روش متناوب ضریب‌ها را برای کاهش هزینه‌های سیستم‌های یکپارچه انتقال و توزیع برق جفت شده ارائه شده است. مرجع [۳] یک بهینه‌سازی مقاوم برای هماهنگی بهینه شبکه توزیع و انتقال با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد داده است. در [۴] یک رویکرد تکاملی دو سطحی غیر متمرکز برای حل و هماهنگی هم‌زمان سیستم‌های یکپارچه شبکه‌های انتقال و توزیع با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش تلفات سیستم پیشنهاد شده است. در [۵] تأثیر وجود تعداد بالای منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه توزیع و مشکلات پیش‌آمده برای شبکه انتقال را نشان داده است. همچنین، یک راه‌حل هماهنگ برای حل این مشکلات نیز ارائه شده است. در مطالعه [۶] یک رویکرد دو سطحی با هدف ارتقای انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع و نیز کاهش هزینه‌های بهره‌برداری در شبکه‌های انتقال ارائه شده است. در مرجع [۷] یک روش تکاملی جدید برای هماهنگی بین شبکه‌های توزیع و انتقال برای هماهنگی بلادرنگ بین منابع انرژی تجدیدپذیر و جلوگیری از قطع بار در سیستم تحت شرایط مختلف ارائه داده است. در [۸] نویسندگان روشی مبتنی بر تولید ستون و محدودیت را برای حل یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی شامل شبکه‌های توزیع و انتقال با هدف کاهش خرید انرژی پیشنهاد کرده‌اند. در [۹] یک روش بهینه‌سازی غیر متمرکز برای حل هم‌زمان سیستم‌های یکپارچه انرژی انتقال و توزیع به منظور بهبود پروفیل ولتاژ سیستم و کاهش تلفات توان با در نظر گرفتن نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است. در [۱۰] یک استراتژی اقتصادی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای بهره‌برداری بهینه باتری‌های مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است. در [۱۱] یک رویکرد دو سطحی مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب برای حل مسئله

هماهنگی بهینه سیستم یکپارچه شبکه توزیع و انتقال با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، تلفات و انرژی ارائه شده است. در [۱۲] نویسندگان یک رویکرد بهینه برای هماهنگی شبکه انتقال و توزیع با استفاده از یک الگوریتم تجزیه ناهمگن را با هدف بهبود یک تابع چندهدفه در حضور منابع تولید پراکنده ارائه کردند. در [۱۳] یک رویکرد بهینه‌سازی غیر متمرکز برای هماهنگی شبکه‌های انتقال و توزیع یکپارچه با هدف کاهش هزینه تولید در شبکه انتقال و کاهش تلفات در سیستم توزیع پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۴] یک چارچوب برنامه‌ریزی مخروطی درجه دوم مبتنی بر روش لاگرانژی شتاب غیر متمرکز برای توزیع بار چند دوره‌ای سیستم‌های انتقال و توزیع با هدف کاهش هزینه سیستم ارائه شده است. در [۱۵] یک رویکردی سه مرحله‌ای برای هماهنگی شبکه انتقال و توزیع با استفاده از یک الگوریتم تکاملی تودرتو تعمیم‌یافته پیشنهاد شده است. در مطالعه [۱۶] یک روش دو سطحی توزیع‌شده برای تنظیم ولتاژ در نقاط اتصال شبکه انتقال و توزیع در حضور سیستم‌های ذخیره انرژی پیشنهاد شده است. در [۱۷] یک روش جداشده غیر تکراری برای حل هماهنگ جریان بهینه توان مقاوم در شبکه‌های انتقال و توزیع با استفاده از برنامه درجه دوم و روش خطی‌سازی پیشنهاد شده است. در [۱۸] یک رویکردی مبتنی بر برنامه‌ریزی خط عدد صحیح برای بهره‌برداری هم‌زمان شبکه‌های توزیع فعال با سیستم‌های انتقال در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و باتری‌های مقیاس بزرگ پیشنهاد کرده است. در [۱۹] نویسندگان یک روش دو سطحی مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم برای بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع فعال یکپارچه با شبکه گرمایش منطقه‌ای هماهنگ با شبکه انتقال با هدف افزایش رفاه اجتماعی پیشنهاد کرده‌اند. در [۲۰] نویسندگان یک رویکرد دو مرحله‌ای برای بهینه‌سازی سیستم‌های یکپارچه شبکه‌های انتقال و توزیع نامتعادل سه فاز به منظور بهبود یک تابع چندهدفه پیشنهاد کردند. در [۲۱] نویسندگان یک رویکرد توزیع‌شده ناهم‌زمان سراسری برای هماهنگی سیستم‌های یکپارچه انتقال و توزیع با در نظر گرفتن خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و شاخص تلفات سیستم ارائه کردند.

فازی نیز به کار رفته است. نتایج نشان می‌دهند این الگوریتم عملکرد خوبی دارد و باعث بهبود تلفات توان، پایداری ولتاژ، قابلیت اطمینان و کاهش هزینه بهره برداری می‌شود. در [۲۹] روشی حفاظتی هوشمند برای شبکه‌های توزیع برق با منابع تجدیدپذیر و اندازه بزرگ که بدون نیاز به سیستم‌های مخابراتی پیچیده عمل می‌کند، معرفی شده است. این روش از پروتکل‌های مدرن ارتباطی برای ارتباط سریع استفاده می‌کند و یک الگوریتم مستقل از نفوذ دارد. این روش با شبیه‌سازی‌ها اثبات شده و برای بهبود حفاظت شبکه‌های توزیع برق با منابع تجدیدپذیر و اندازه بزرگ مناسب است. در [۳۰]، یک روش جدید بر پایه الگوریتم رقابت استعماری برای حل مسئله پخش بار اقتصادی تولید هم‌زمان برق و حرارت معرفی شده است. این مسئله بهینه‌سازی، با قیود مختلف و تلفات انرژی را در نظر می‌گیرد. روش پیشنهاد شده با تصحیح‌هایی در هر مرحله بهترین جواب‌ها را جستجو می‌کند و نتایج عددی نشان می‌دهند این روش بهتر از روش‌های قبلی در حل مسئله عمل می‌کند.

جدول (۱) خلاصه‌ای بین مدل و روش پیشنهادی این مقاله با سایر مراجع مرتبط است.

در [۲۲] یک رویکرد تصادفی چندهدفه برای مدیریت هماهنگ شبکه‌های انتقال و توزیع برای بهبود پایداری ولتاژ سیستم با استفاده از روش مبتنی بر تجزیه پیشنهاد شده است. در [۲۳] نویسندگان یک رویکردی تصادفی مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا پیوستگی لپ‌شیتز با هدف کاهش هزینه کل بهره‌برداری سیستم‌های انتقال و توزیع با مدل‌سازی قیود امنیتی شبکه پیشنهاد کردند. در [۲۴] یک الگوریتم تجزیه ناهمگن برای هماهنگی بهینه شبکه انتقال و توزیع با در نظر گرفتن حساسیت قیمت حاشیه‌ای پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۵] یک مدل خطی شده برای پخش بار بهینه متناوب برای هماهنگی بین شبکه انتقال و توزیع با هدف کاهش هزینه نیروگاه‌ها ارائه شده است. در [۲۶] نویسندگان الگوریتمی برای جابه‌جایی بهینه ژنراتورهای سیار در شبکه‌های توزیع به منظور بهبود تاب‌آوری سیستم ارائه کردند. در [۲۷] مسئله برنامه‌ریزی احتمالی سیستم قدرت در حضور خودروهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر با استفاده از یک مدل خطی ترکیبی عدد صحیح پیشنهاد شده است. در [۲۸] روی بهبود شبکه‌های توزیع برق و افزایش کیفیت توان آنها با استفاده از بازآرایی و افزودن منابع تولید پراکنده و واحدهای DSTATCOM کار شده است. از یک الگوریتم ترکیبی جدید برای حل مسئله استفاده شده و منطق

جدول (۱): مقایسه بین مدل پیشنهادی با مقالات مشابه

مرجع	قیود امنیتی	مشارکت واحدها	مدل تصادفی	تابع چند هدفه	منابع تجدیدپذیر	منابع تولید پراکنده	خودرو برقی	DB	TB	نوع مدل
[۱]	x	x	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	Bi-MILP
[۲]	✓	x	x	✓	✓	✓	x	x	x	Bi-LP
[۳]	x	✓	x	✓	✓	✓	x	x	✓	Bi-RO
[۴]	x	✓	x	x	✓	✓	✓	x	x	Bi-NLP
[۵]	x	x	x	x	x	✓	x	x	x	Bi-SOCP
[۶]	x	x	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	Bi-MILP
[۷]	x	x	x	✓	✓	✓	x	x	x	ACOPF
[۸]	x	✓	x	x	✓	✓	x	✓	x	Bi-MISOCP
[۹]	x	✓	✓	x	✓	✓	x	x	x	Bi-SOCP
[۱۰]	x	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	MILP
[۱۱]	x	x	x	✓	✓	✓	x	x	x	Bi-MILP

[۱۲]	✓	×	×	✓	✓	✓	×	×	×	Bi-MIQP
[۱۳]	×	×	×	✓	×	✓	×	×	✓	LP
[۱۴]	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	Bi-CCP
[۱۵]	×	✓	×	✓	✓	✓	×	×	×	MILP
[۱۶]	×	×	×	✓	✓	✓	×	✓	×	Bi-MIQP
[۱۷]	×	×	×	×	×	✓	×	×	×	Bi-SOCP
[۱۸]	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	✓	Bi-MILP
[۱۹]	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	×	×	Bi-MISOCP
[۲۰]	×	×	×	✓	×	✓	×	×	✓	Bi-DNE
[۲۱]	×	×	×	✓	✓	✓	✓	×	×	Bi-MILP
[۲۲]	×	×	✓	✓	✓	✓	×	×	×	Bi-MIQP
[۲۳]	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	×	×	Bi-MIQP
[۲۴]	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	×	Bi-MISOCP
این مطالعه	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Bi-MILP

۱-۲- شکاف مطالعاتی

همان‌طور که از جدول (۱) و مرور ادبیات نشان داده شد، خلأ مطالعاتی در مدل‌سازی هم‌زمان سیستم‌های ذخیره انرژی در شبکه انتقال و توزیع وجود دارد. علاوه بر این، ارائه یک روش دقیق برای حل مدل دو سطحی که در هر دو سطح متغیر باینری وجود داشته باشد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رویکرد پیشنهادی در این مقاله علاوه بر قابلیت حل مدل دو سطحی پیشنهادی می‌تواند جواب‌های بهینه سراسری را تضمین کند. از دیگر ویژگی‌های مدل پیشنهادی، سرعت بالای حل نسبت به دیگر روش‌ها است. همچنین، مدل و رویکرد پیشنهادی به راحتی می‌تواند هر تعداد شبکه توزیع را در شبکه انتقال ادغام کند.

۱-۳- نوآوری تحقیق

نوآوری‌های این مقاله با توجه به برتری آن نسبت به پیشینه پژوهش به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱. مدل‌سازی جامع: مقاله مدل‌سازی جامعی از شبکه‌های قدرت ارائه می‌دهد که شامل ادغام شبکه‌های توزیع و انتقال، سیستم‌های ذخیره انرژی در هر دو سطح

شبکه، مدیریت سمت تقاضا، خودرهای برقی و منابع انرژی تجدیدپذیر و فسیلی است. این مدل‌سازی جدید توانمندی بهتری برای تحلیل و بهینه‌سازی توزیع انرژی با توجه به عوامل گوناگون موجود در شبکه‌ها ارائه می‌دهد.

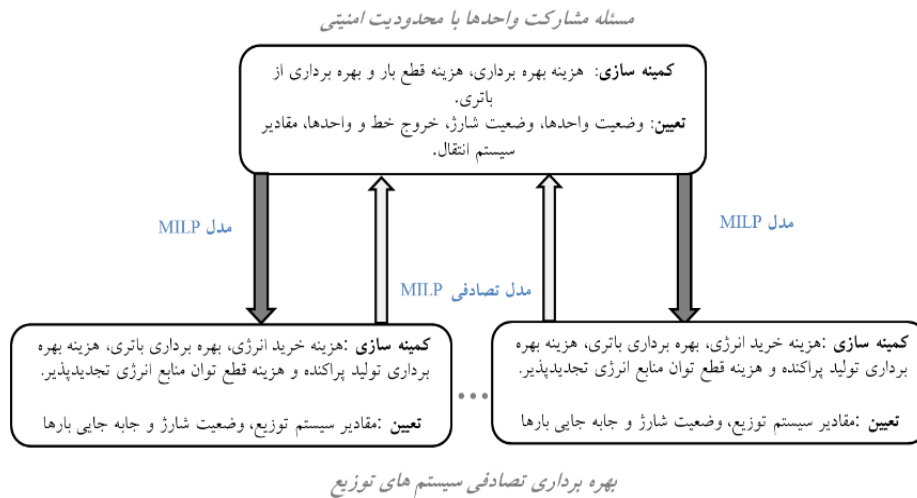
۲. الگوریتم بهینه‌سازی جدید: مقاله یک الگوریتم بهینه‌سازی جدید معرفی می‌کند که بر مبنای تغییر متغیر و معادلات KKT استوار است. این الگوریتم به عنوان روشی مؤثر برای حل مسائل بهینه‌سازی با مدل‌های خطی عدد صحیح مرکب به کار گرفته می‌شود و امکان جستجوی سریع‌تری را در مقایسه با روش‌های قبلی فراهم می‌کند. این الگوریتم تضمین می‌کند جواب بهینه سراسری به دست آید. در کل، در این مقاله، دو نوآوری به عنوان عناصر کلیدی معرفی می‌شود و بر اهمیت آنها برای بهبود شبکه‌های قدرت و مدیریت بهینه منابع انرژی تأکید می‌کند.

در ادامه، مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، ارائه و سپس روش حل مسئله تشریح می‌شود. در بخش بعدی شبکه‌های آزمایشی، معرفی و نتایج شبیه‌سازی با روش‌های دیگر مقایسه می‌شوند. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری کلی از مقاله ارائه شده است.

۲- مدل سازی

در مدل دو سطحی پیشنهادی، توان حقیقی است که باید از پست توزیع توسط شبکه انتقال تأمین شود. برای معرفی مدل دو سطحی پیشنهادی، ابتدا مدل شبکه انتقال و سپس مدل شبکه توزیع و در نهایت، راه حل برای حل مسئله پیشنهادی ارائه خواهد شد. در شکل (۱) طرح پیشنهادی برای هماهنگی شبکه‌های انتقال و توزیع یکپارچه نشان داده شده است.

در این بخش مدل بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهاد شده برای حل مسئله بهره‌برداری هماهنگ شبکه انتقال و شبکه توزیع ارائه شده است. به منظور حل مسئله دو سطحی چالش برانگیز پیشنهادی، مدل شبکه انتقال به صورت یک مسئله سطح بالایی و مدل شبکه‌های توزیع به صورت سطح پایینی در نظر گرفته می‌شود. متغیر لینک بین این دو شبکه



شکل (۱): طرح هماهنگ شبکه انتقال و توزیع.

۲-۱- مدل سطح بالایی

مدل مسئله سطح بالایی در نظر گرفته شده در این مقاله، مدل سازی مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیت در شبکه انتقال است که تابع هدف و قیود مرتبط با آن نیز به صورت معادلات (۱) الی (۱۷) مدل سازی شده‌اند. رابطه (۱) نشان‌دهنده تابع هدف مسئله سطح بالایی است.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N c_n^g G_{n,t} + c_n^c u_{n,t} + c_n^s s_{n,t} + c_n^d v_{n,t} + c_n^r r_{n,t} + c_n^{ess} (p_{n,t}^{ch} + p_{n,t}^{dis}) \quad (1)$$

معادلات (۲) الی (۱۷) نیز نشان‌دهنده قیود مربوط به مسئله بالایی است. معادله برابری (۲) نشان‌دهنده قید تعادل توان در شبکه انتقال است. در اینجا $N(n)$ مجموعه گره‌هایی است که مستقیماً به گره n متصل می‌شوند.

$$G_{n,t} + r_{n,t} + \sum_{m \in N(n)} f_{mn,t} - \sum_{m \in N(n)} f_{nm,t} - D_{n,t} - P_{n,t}^s + p_{n,t}^{dis} - p_{n,t}^{ch} = 0 \quad (2)$$

در رابطه (۲) $P_{n,t}^s$ برابر توان پست شبکه توزیع موجود در باس n ام شبکه انتقال در زمان t است. این توان نیز به صورت متغیر مشترک بین دو سطح بالایی و پایینی است. رابطه (۳) نشان‌دهنده محدودیت توان واحد در باس n ام در زمان t بین حداقل (G_n) و حداکثر توان (\bar{G}_n) قابل تولید است. همچنین، $(z_{n,t})$ برابر متغیر باینری در محدودیت قید امنیتی است که اگر واحد در گره n در بدترین حالت احتمالی در زمان t در دسترس نباشد، برابر با صفر است؛ در غیر این صورت، یک است.

$$\sum_{k=t-UT_n+1}^t s_{n,k} \leq u_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in \{UT_n, \dots, T\} \quad (۸)$$

$$\sum_{k=t-DT_n+1}^t v_{n,k} \leq 1 - u_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in \{DT_n, \dots, T\} \quad (۹)$$

رابطه (۱۰) محدودیت زاویه ولتاژ باس n در زمان t و

رابطه (۱۱) زاویه ولتاژ باس مرجع را نشان می‌دهد.

$$-\pi \leq \theta_{n,t} \leq \pi \quad \forall n \in N, t \in T \quad (۱۰)$$

$$\theta_{n,t} = 0 \quad n = ref, t \in T \quad (۱۱)$$

رابطه (۱۲) مربوط به قطعی واحدهای تولید و خطوط

انتقال است که (k) تعداد خروج خط و واحد در شبکه انتقال در زمان t است.

$$\sum_{n \in N} (1 - z_{n,t}) + \sum_{n,m \in L} (1 - z_{nm,t}) = k \quad \forall t \in T \quad (۱۲)$$

رابطه (۱۳) و (۱۴) به ترتیب محدودیت دشارژ و شارژ

باتری را نشان می‌دهد.

$$0 \leq p_{n,t}^{dis} \leq \zeta_{n,t}^{ess} X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (۱۳)$$

$$0 \leq p_{n,t}^{ch} \leq (1 - \zeta_{n,t}^{ess}) X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (۱۴)$$

رابطه (۱۵) معادله انرژی باتری و (۱۶) محدودیت آن

و قید مربوط به حداکثر دفعات دشارژ در (۱۷) نشان داده شده است.

$$e_{n,t}^{ess} = e_{n,t-1}^{ess} + \eta_n^{ess} p_{n,t}^{ch} - \frac{p_{n,t}^{dis}}{\eta_n^{ess}} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (۱۵)$$

$$0 \leq e_{n,t}^{ess} \leq X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (۱۶)$$

$$\sum_{t \in T} \zeta_{n,t}^{ess} = A \quad \forall n \in N \quad (۱۷)$$

همان‌طور که مشاهده شد مسئله سطح بالایی (۱) الی

(۱۷) یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب است

که می‌توان آن را به‌وسیله حل‌کننده‌های تجاری قدرتمند حل

کرد. در بخش بعدی، مسئله سطح پایینی مربوط به شبکه

توزیع ارائه می‌شود.

$$\begin{aligned} z_{n,t} G_n u_{n,t} &\leq G_{n,t} \\ &\leq u_{n,t} \overline{G_n} z_{n,t} \quad z_{n,t}, u_{n,t} \in \{0,1\}, \forall n \in N, t \in T \end{aligned} \quad (۳)$$

نامعادله (۴) محدودیت قطع بار در باس n در زمان t را نشان می‌دهد.

$$0 \leq r_{n,t} \leq D_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (۴)$$

رابطه (۵) نشان‌دهنده شار توان در خط nm است که

باید کوچک‌تر از مقدار حداکثر ($\overline{f_{nm}}$) در نظر گرفته شده

باشد که مجموعه خطوط شبکه انتقال با L نشان داده شده

است. x_{nm} برابر سوسپتانس بین خط nm است و $\theta_{n,t}$

برابر با زاویه ولتاژ در باس n ام در زمان t است و ($z_{nm,t}$)

برابر متغیر باینری در محدودیت قید امنیتی است که اگر

خط nm در بدترین حالت احتمالی در زمان t در دسترس

نباشد، برابر با صفر است؛ در غیر این صورت، یک است.

$$\begin{aligned} |f_{nm,t} = z_{nm,t} x_{nm} (\theta_{n,t} - \theta_{m,t})| \\ \leq \overline{f_{nm}} \quad \forall nm \in L, n \in N, t \in T \end{aligned} \quad (۵)$$

معادله (۶) نشان‌دهنده رابطه منطقی بین متغیرهای

باینری در مسئله مشارکت واحدها است که اگر واحدها

روشن باشند، متغیر باینری $u_{n,t}$ برابر با یک خواهد بود. به

همین ترتیب، اگر واحدها خاموش شوند، متغیر باینری $v_{n,t}$

برابر یک و هنگامی که دوباره روشن شوند، متغیر باینری

$s_{n,t}$ برابر یک می‌شود.

$$\begin{aligned} u_{n,t+1} - u_{n,t} \\ = s_{n,t+1} - v_{n,t+1} \quad u_{n,t}, s_{n,t}, v_{n,t} \in \{0,1\}, \forall n \in N, t \in T \end{aligned} \quad (۶)$$

رابطه (۷) نشان‌دهنده محدودیت نرخ افزایش ($\overline{R_n}$) و

کاهش توان ($\underline{R_n}$) واحدها در باس n ام در زمان t است.

$$\begin{aligned} G_{n,t+1} - G_{n,t} \leq \overline{R_n}, G_{n,t} - G_{n,t+1} \\ \leq \underline{R_n}, \forall n \in N, t \in T \end{aligned} \quad (۷)$$

رابطه (۸) و (۹) به ترتیب نشان‌دهنده حداقل مدت زمان

روشن و خاموش‌بودن واحدها در باس n ام در زمان t

است.

۲-۲- مدل سطح پایینی

در این بخش، مسئله بهینه‌سازی شبکه توزیع که یک مدل خطی است، به صورت روابط (۱۸) الی (۴۰) در نظر گرفته شده است. تابع هدف مسئله پایینی در (۱۸) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1, n=ref}^T c_t^s (P_{n,t}^s + Q_{n,t}^s) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{DG} (P_{n,t}^{DG}) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{ess} (p_{n,t}^{ch} + p_{n,t}^{dis}) \\ & + \sum_{n=1}^S \sum_{t=1}^T c_n^{DSM} (\bar{a}_{n,t}^p - d_{n,t}^p) \\ & + \sum_{s=1}^S \sigma_s \left(\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{RN} (\bar{P}_{n,t,s}^{RN} - P_{n,t}^{RN}) \right. \\ & \left. + c_n^{PEV} (\bar{P}_{n,t,s}^{PEV} - P_{n,t}^{PEV}) \right) \end{aligned} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸) به ترتیب هدف اول کاهش هزینه توان حقیقی $(P_{n,t}^s)$ و راکتیو $(Q_{n,t}^s)$ خریداری شده در پست توزیع در زمان t از شبکه انتقال است. هدف بعدی کاهش هزینه عدم مشارکت منابع تجدیدپذیر یا ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی است. این بخش از تابع هدف تضمین می‌دهد از حداکثر توان منابع تجدیدپذیر در هر ساعات در هر باس از شبکه توزیع بهره‌برداری شود و همچنین، توان شارژ خودروهای برقی در هر ساعات در هر باس تأمین شود. همچنین، هزینه اجرای برنامه مدیریت سمت تقاضا در تابع هدف مسئله سطح پایینی در نظر گرفته شده که در اینجا c_n^{DSM} برابر هزینه تغییرات بار در برنامه مدیریت سمت تقاضا است.

رابطه (۱۹) و (۲۰) قید تعادل توان اکتیو و راکتیو را در شبکه توزیع نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} P_{n=ref,t}^s + \sum_{m \in N(n)} f_{mn,t}^p \\ - \sum_{m \in N(n)} f_{nm,t}^p \\ + P_{n,t}^{RN} - P_{n,t}^{PEV} \\ + P_{n,t}^{DG} - \bar{a}_{n,t}^p \\ + p_{n,t}^{dis} - p_{n,t}^{ch} \\ = 0 \quad \forall n \in N, t \in T \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} Q_{n=ref,t}^s + \sum_{m \in N(n)} f_{mn,t}^q \\ - \sum_{m \in N(n)} f_{nm,t}^q \\ + \rho_n P_{n,t}^{DG} - \bar{a}_{n,t}^q \\ = 0 \quad \forall n \in N, t \in T \end{aligned} \quad (20)$$

در رابطه (۱۹) $P_{n=ref,t}^s$ برابر توان حقیقی پست توزیع در زمان t است. به همین ترتیب، در رابطه (۲۰) $Q_{n=ref,t}^s$ برابر توان راکتیو پست توزیع در زمان t است. رابطه (۲۱) الی (۲۳) به ترتیب نشان‌دهنده محدود بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر، منابع تولید پراکنده و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی است.

$$0 \leq P_{n,t}^{RN} \leq \bar{P}_{n,t,s}^{RN} \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \quad (21)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{DG} \leq \bar{P}_{n,t}^{DG} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (22)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{PEV} \leq \bar{P}_{n,t}^{PEV} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (23)$$

رابطه (۲۴) و (۲۵) به ترتیب نشان‌دهنده حد مجاز شارژ توان حقیقی و راکتیو بین خطوط nm در زمان t است.

$$\underline{f}_{nm}^p \leq f_{nm,t}^p \leq \bar{f}_{nm}^p \quad \forall nm \in L, t \in T \quad (24)$$

$$\underline{f}_{nm}^q \leq f_{nm,t}^q \leq \bar{f}_{nm}^q \quad \forall nm \in L, t \in T \quad (25)$$

در رابطه (۲۶) و (۲۷) حداکثر توان اکتیو (\bar{P}_n^s) و راکتیو (\bar{Q}_n^s) بهره‌برداری از پست توزیع در ساعت t نشان داده شده است.

$$P_{n,t}^s \leq \bar{P}_n^s \quad n = ref, t \in T \quad (26)$$

$$Q_{n,t}^s \leq \bar{Q}_n^s \quad n = ref, t \in T \quad (27)$$

رابطه (۲۸) ولتاژ مربعی باس n ام شبکه توزیع را در ساعات t ام نشان می‌دهد. رابطه (۲۹) نیز نشان‌دهنده محدودیت بهره‌برداری ولتاژ باس n ام در ساعت t است.

پایین مسئله بهینه‌سازی دو سطحی پیشنهادی ارائه شده‌اند. در بخش بعدی طریقه حل مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

۳- الگوریتم روش حل پیشنهادی

همان‌طور که در بخش قبل ارائه شد، مدل سطح بالا و پایین هر دو یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است. به‌طور کلی ساختار مسئله دو سطحی پیشنهادی به‌صورت معادلات (۴۱) الی (۴۴) است.

$$\text{Upper Level} = \min \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N c_n^g G_{n,t} + c_n^c u_{n,t} + c_n^s s_{n,t} + c_n^d v_{n,t} + c_n^r r_{n,t} + c_n^{ess} (p_{n,t}^{ch} + p_{n,t}^{dis}) \quad (41)$$

$$s. t \quad (2) - (17) \quad (42)$$

$$\text{Lower Level} = \min \sum_{t=1, n=ref}^T c_t^s (P_{n,t}^s + Q_{n,t}^s) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{DG} (P_{n,t}^{DG}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{ess} (p_{n,t}^{ch} + p_{n,t}^{dis}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{DSM} (\tilde{d}_{n,t}^p - d_{n,t}^p) + \sum_{s=1}^S \sigma_s \left(\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{RN} (\bar{P}_{n,t,s}^{RN} - P_{n,t}^{RN}) + c_n^{PEV} (\bar{P}_{n,t,s}^{PEV} - P_{n,t}^{PEV}) \right) \quad (43)$$

$$s. t \quad (19) - (40) \quad (44)$$

برای حل مدل دو سطحی پیشنهادی که در هر دو سطح عدد صحیح وجود دارد، نمی‌توان به روش مستقیم و با تبدیل سطح پایینی به معادلات KKT عمل کرد؛ زیرا مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب یا MILP برای آنها KKT وجود ندارد. برای حل این مدل، ابتدا مدل مسئله سطح پایینی با روش تغییر متغیر از MILP به یک مدل غیرمحدب درجه دوم تبدیل می‌شود. با این کار متغیرهای باینری در مدل تبدیل به متغیرهای پیوسته

$$V_{n,t}^{sqe} = V_{m,t}^{sqe} - 2(r_{nm} f_{nm,t}^p - x_{nm} f_{nm,t}^q) \quad \forall n \in N, nm \in L, t \in T \quad (28)$$

$$V_n^{min2} \leq V_{n,t}^{sqe} \leq V_n^{max2} \quad n \in N, t \in T \quad (29)$$

رابطه (۳۰) الی (۳۴) مدل‌سازی باتری را در شبکه توزیع نشان می‌دهد. همانند باتری در شبکه انتقال در اینجا هم رابطه (۳۰) و (۳۱) به ترتیب محدودیت دشارژ و شارژ باتری را نشان می‌دهد. رابطه (۳۲) نشان‌دهنده انرژی باتری و رابطه (۳۳) محدودیت انرژی باتری را نشان می‌دهد. درنهایت، رابطه (۳۴) محدودیت تعداد دفعات دشارژ باتری را نشان می‌دهد.

$$0 \leq p_{n,t}^{dis} \leq \zeta_{n,t}^{ess} X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (30)$$

$$0 \leq p_{n,t}^{ch} \leq (1 - \zeta_{n,t}^{ess}) X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (31)$$

$$e_{n,t}^{ess} = e_{n,t-1}^{ess} + \eta_n^{ess} p_{n,t}^{ch} - \frac{p_{n,t}^{dis}}{\eta_n^{ess}} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (32)$$

$$0 \leq e_{n,t}^{ess} \leq X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (33)$$

$$\sum_{t \in T} \zeta_{n,t}^{ess} = A \quad \forall n \in N \quad (34)$$

مدل مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده در این مقاله به‌صورت معادلات (۳۵) الی (۴۰) است. رابطه (۳۵) و (۳۸) به ترتیب تضمین می‌کند هیچ‌گونه حذف بار اکتیو و راکتیو در برنامه مدیریت سمت تقاضا رخ ندهد. رابطه (۳۶) و (۳۷) محدودیت تغییرات بار اکتیو و رابطه (۳۹) و (۴۰) محدودیت تغییرات بار راکتیو را در برنامه مدیریت سمت تقاضا نشان می‌دهد.

$$\sum_{t \in T} d_{n,t}^p = \sum_{t \in T} \tilde{d}_{n,t}^p \quad \forall n \in N \quad (35)$$

$$\tilde{d}_{n,t}^p \leq d_{n,t}^p + d_{n,t}^p \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (36)$$

$$\tilde{d}_{n,t}^p \geq d_{n,t}^p - d_{n,t}^p \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (37)$$

$$\sum_{t \in T} d_{n,t}^q = \sum_{t \in T} \tilde{d}_{n,t}^q \quad \forall n \in N \quad (38)$$

$$\tilde{d}_{n,t}^q \leq d_{n,t}^q + d_{n,t}^q \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (39)$$

$$\tilde{d}_{n,t}^q \geq d_{n,t}^q - d_{n,t}^q \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (40)$$

با معرفی مدل سطح پایینی، هر دو مدل سطح بالا و

$$Q_{n=ref,t}^s + \sum_{m \in N(n)} f_{mn,t}^q - \sum_{m \in N(n)} f_{nm,t}^q + \rho_n P_{n,t}^{DG} - \bar{d}_{n,t}^q = 0 \quad \forall n \in N, t \in T \quad (48)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{RN} \leq \bar{P}_{n,t,s}^{RN} \quad \forall n \in N, t \in T, s \in S \quad (49)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{DG} \leq \bar{P}_{n,t}^{DG} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (50)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{PEV} \leq \bar{P}_{n,t}^{PEV} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (51)$$

$$\underline{f}_{nm}^p \leq f_{nm,t}^p \leq \bar{f}_{nm}^p \quad \forall nm \in L, t \in T \quad (52)$$

$$\underline{f}_{nm}^q \leq f_{nm,t}^q \leq \bar{f}_{nm}^q \quad \forall nm \in L, t \in T \quad (53)$$

$$P_{n,t}^s \leq \bar{P}_n^s \quad n = ref, t \in T \quad (54)$$

$$Q_{n,t}^s \leq \bar{Q}_n^s \quad n = ref, t \in T \quad (55)$$

$$V_{n,t}^{sqe} = V_{m,t}^{sqe} - 2(r_{nm} f_{nm,t}^p - x_{nm} f_{nm,t}^q) \quad \forall n \in N, nm \in L, t \in T \quad (56)$$

$$V_n^{min2} \leq V_{n,t}^{sqe} \leq V_n^{max2} \quad n \in N, t \in T \quad (57)$$

$$0 \leq p_{n,t}^{dis} \leq \zeta_{n,t}^{ess} X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (58)$$

$$0 \leq p_{n,t}^{ch} \leq (1 - \zeta_{n,t}^{ess}) X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (59)$$

$$e_{n,t}^{ess} = e_{n,t-1}^{ess} + \eta_n^{ess} p_{n,t}^{ch} - \frac{p_{n,t}^{dis}}{\eta_n^{ess}} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (60)$$

$$0 \leq e_{n,t}^{ess} \leq X_n^{ess} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (61)$$

$$\sum_{t \in T} \zeta_{n,t}^{ess} = A \quad \forall n \in N \quad (62)$$

$$\sum_{t \in T} d_{n,t}^p = \sum_{t \in T} \bar{d}_{n,t}^p \quad \forall n \in N \quad (63)$$

$$\bar{d}_{n,t}^p \leq d_{n,t}^p + d_{n,t}^p \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (64)$$

$$\bar{d}_{n,t}^p \geq d_{n,t}^p - d_{n,t}^p \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (65)$$

$$\sum_{t \in T} d_{n,t}^q = \sum_{t \in T} \bar{d}_{n,t}^q \quad \forall n \in N \quad (66)$$

$$\bar{d}_{n,t}^q \leq d_{n,t}^q + d_{n,t}^q \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (67)$$

$$\bar{d}_{n,t}^q \geq d_{n,t}^q - d_{n,t}^q \varepsilon \quad \forall n \in N, t \in T \quad (68)$$

$$\zeta_{n,t}^{ess} - (\zeta_{n,t}^{ess})^2 = 0 \quad \forall n \in N, t \in T \quad (69)$$

مشاهده می شود به جای متغیر باینری $(\zeta_{n,t}^{ess})$ از متغیر پیوسته $(\zeta_{n,t}^{ess})$ استفاده شده و محدودیت (۶۹) برای حفظ ویژگی باینری بودن متغیر به مسئله اضافه شده است. حال می توان از طریق ساختار استاندارد زیر معادلات (۶۶) الی (۶۹) را به فرم معادلات KKT نوشت و به مسئله سطح بالایی اضافه کرد. در همین راستا با تبدیل مسئله (۶۶-۶۹) به فرم شرایط KKT و اضافه کردن آن به مسئله (۶۱-۶۲) مدل پیشنهادی به یک مدل تک سطحی تبدیل شده و

می شوند و سپس با تعریف محدودیت هایی می توان ویژگی باینری بودن متغیرهای تبدیل شده را حفظ کرد. از آنجایی که حل کننده قدرتمند Gurobi می تواند جواب های بهینه سراسری برای مدل های غیر محدب درجه دوم را به دست آورد؛ بنابراین، می توان بیان کرد جواب های بهینه سراسری تضمین شده است.

برای حل مدل دو سطح (۶۱) الی (۶۴) ابتدا مدل (۶۳) و (۶۴) که مدل سطح پایینی است، با تغییر متغیرهای باینری به پیوسته انجام می شود. داریم:

$$\zeta_{n,t}^{ess} - (\zeta_{n,t}^{ess})^2 = 0 \quad (45)$$

در محدودیت (۶۵) متغیر پیوسته $(\zeta_{n,t}^{ess})$ معادل متغیر باینری $(\zeta_{n,t}^{ess})$ است که در اینجا به صورت پیوسته تعریف شده است. لطفاً توجه شود دیگر متغیر باینری در مسئله سطح پایینی وجود نخواهد داشت و جایگزین آن متغیر پیوسته $(\zeta_{n,t}^{ess})$ است. حال با اضافه شدن قید (۶۵) به مدل سطح پایینی، مسئله به یک مدل غیر محدب درجه دوم تبدیل می شود که به راحتی می توان برای آن معادلات KKT را نوشت و پس از آن به مسئله سطح بالایی اضافه کرد. در نهایت، مدل سطح پایینی پس از تغییر متغیر به صورت معادلات (۶۶) الی (۶۹) تبدیل می شود:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{t=1, n=ref}^T c_t^s (P_{n,t}^s + Q_{n,t}^s) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{DG} (P_{n,t}^{DG}) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{ess} (p_{n,t}^{ch} + p_{n,t}^{dis}) \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{DSM} (\bar{d}_{n,t}^p - d_{n,t}^p) \\ & + \sum_{s=1}^S \sigma_s \left(\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{RN} (\bar{P}_{n,t,s}^{RN} - P_{n,t}^{RN}) \right) \\ & + c_n^{PEV} (\bar{P}_{n,t,s}^{PEV} - P_{n,t}^{PEV}) \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} P_{n=ref,t}^s + \sum_{m \in N(n)} f_{mn,t}^p - \sum_{m \in N(n)} f_{nm,t}^p + P_{n,t}^{RN} - P_{n,t}^{PEV} + P_{n,t}^{DG} - \bar{d}_{n,t}^p + p_{n,t}^{dis} - p_{n,t}^{ch} = 0 \quad \forall n \in N, t \in T \end{aligned} \quad (47)$$

در بخش بعدی برای صحت‌سنجی مدل و رویکرد پیشنهادی نتایج شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به منظور صحت‌سنجی مدل و روش پیشنهادی دو سیستم ترکیبی مختلف شامل سیستم انتقال ۶ باس و ۱۴ باس به همراه چندین شبکه توزیع در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از لپ‌تاپ با پردازنده ۲،۲ گیگاهرتز با رم ۱۶ گیگابایت با استفاده از حل‌کننده گروبی نسخه ۹ با زبان MATLAB پیاده‌سازی شده است.

۴-۱- سیستم اول

شکل (۳) نمایانگر شبکه انتقال انرژی است که در آن ۶ باس و ۹ خط ارتباطی وجود دارد. این شبکه شامل ۴ واحد نیروگاهی و ۲ واحد سیستم ذخیره‌سازی انرژی بزرگ در باس‌های ۲ و ۵ است. شبکه توزیع نیز در باس‌های ۲ و ۳ در نظر گرفته شده است. شبکه توزیع مرتبط با باس ۳ شبکه انتقال حاوی ۱۴ باس و ۱۳ خط ارتباطی است. باس‌های ۵ و ۱۲ به‌عنوان نقاط پارکینگ شارژ خودروهای برقی و باس‌های ۶ و ۱۴ برای تولید پراکنده غیرتجدیدپذیر در نظر گرفته شده‌اند.

در باس‌ها ۱۰ و ۱۱، به‌ترتیب، واحدهای PV و بادی واقع شده‌اند و باتری در باس‌های ۵ و ۱۳ نصب شده است. شبکه توزیع دیگری نیز روی باس ۲ شبکه انتقال واقع شده و شامل ۸ باس و ۷ خط ارتباطی است. در باس ۳ تولید پراکنده فسیلی، در باس ۴ ایستگاه شارژ خودروهای برقی و در باس‌ها ۵ و ۷ به‌ترتیب واحدهای PV و بادی وجود دارد. باتری‌ها نیز در باس‌های ۵ و ۷ نصب شده‌اند. در این مدل، حداکثر تغییرات بار نیز با نرخ ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است و باتری‌ها از نوع لیتیومی با راندمان ۹۰ درصد مدل‌سازی شده‌اند. به‌منظور تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی و تأثیر تغییرات هر دو شبکه انتقال و توزیع روی همدیگر چندین سناریو در نظر گرفته شده که به شرح زیر است.

سناریو اول: بهره‌برداری بدون قیود امنیتی.

جواب‌های بهینه مطلق آن با حل‌کننده Gurobi تضمین شده است. برای تبدیل مسئله (۶۶-۶۹) به شرایط KKT به صورت معادلات (۷۰) الی (۷۶) عمل می‌شود.

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) - \sum_{j=1}^k \lambda_j (0 - h_j(x)) - \sum_{i=1}^m \mu_i (0 - g_i(x)) \quad (70)$$

$$\nabla f(x) - \sum_{j=1}^k \lambda_j \nabla h_j(x) - \sum_{i=1}^m \mu_i \nabla g_i(x) = 0 \quad (71)$$

$$h_j(x) = 0 \quad (72)$$

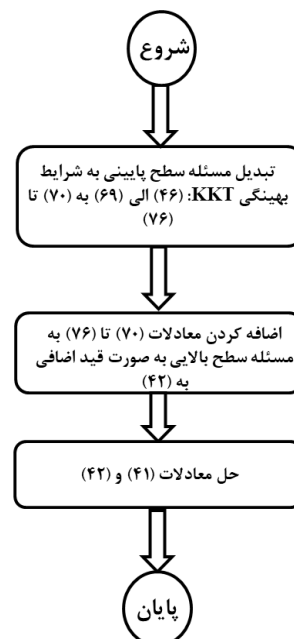
$$g_i(x) \geq 0 \quad (73)$$

$$\mu_i(x) \geq 0 \quad (74)$$

$$\mu_i \leq M(1 - \alpha_i) \quad \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{عدد بزرگ} \quad (75)$$

$$g_i \leq M(\alpha_i) \quad \forall \alpha_i \in \{0,1\}, M = \text{عدد بزرگ} \quad (76)$$

با تبدیل مسئله (۶۶-۶۹) به فرم (۷۰-۷۶) و اضافه‌کردن آن به مسئله (۴۱-۴۲) می‌توان به راحتی مدل تک سطحی جدید تولیدشده را با کمک Gurobi حل و جواب‌های بهینه سراسری را تضمین کرد. فلوچارت حل روش پیشنهادی نیز در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده است مراحل حل مسئله بهینه‌سازی دو سطحی با استفاده از شرایط بهینگی KKT در این شکل آمده است.

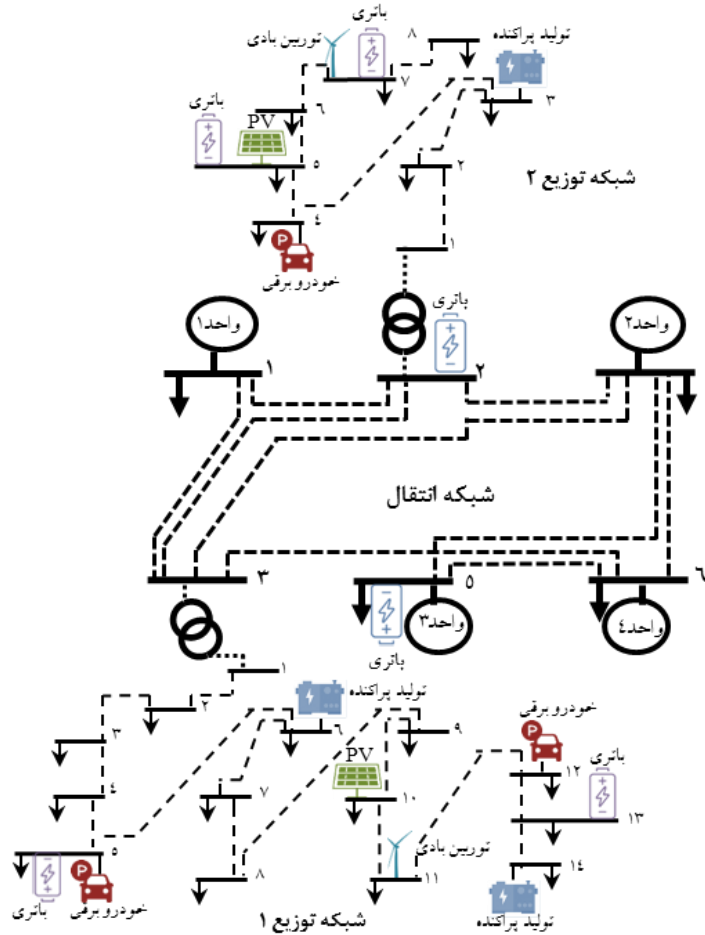


شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی حل مسئله دو سطحی

سناریو دوم: بهره‌برداری با قیود امنیتی.

سناریو سوم: بهره‌برداری بدون باتری در شبکه‌های

انتقال و توزیع.



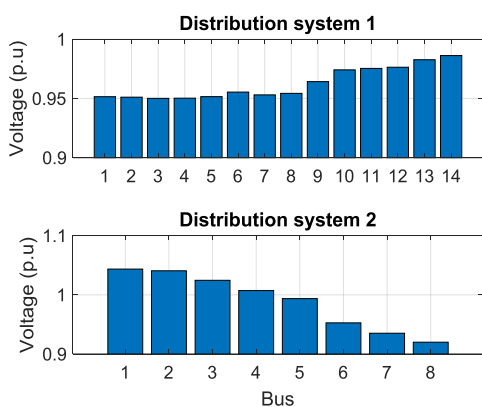
شکل (۳): دیاگرام سیستم مشترک پیشنهادی

جدول (۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم اول در یک دوره ۲۴ ساعته

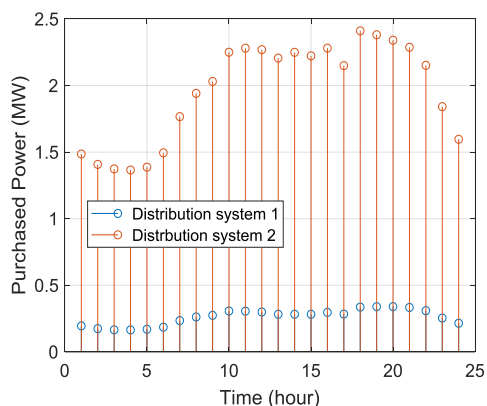
سناریو سوم	سناریو دوم	سناریو اول	
۷۴۱۳	۶۹۹۱	۶۷۸۳	مقدار تابع هدف مسئله بالایی (دلار)
۲۱۷۷	۱۹۲۵	۱۸۶۵	مقدار تابع هدف مسئله پایینی (دلار)
۶,۳	۶,۳	۶,۳	توان پست شبکه توزیع اول (مگاوات)
۴۷,۲	۴۷,۲	۴۷,۲	توان پست شبکه توزیع دوم (مگاوات)
۲۲۳	۲۲۳	۲۲۳	کل توان شبکه انتقال (مگاوات)
-	(۱.۳.۷.۱۰.۱۱.۱۳.۱۷.۱۸.۲۲.۲۳)۹ (۲.۲۴)۵ (۲۰)۶ (۴)۳ (۵.۸)۷ (۶.۹.۱۴.۱۵.۱۶)۸	-	خروج خط (زمان)
-	(۱۲.۱۹.۲۱)۲	-	خروج واحد (زمان)

بنابراین، می‌توان در ساعات بالابودن قیمت انرژی، توان را از باتری دشارژ کرد و در ساعات ارزان‌بودن قیمت انرژی، عملیات شارژ باتری را انجام داد.

شکل (۴) نشان‌دهنده ولتاژ شبکه‌های توزیع ۱۴ و ۸ باس است. همچنین، شکل (۵) نشان‌دهنده توان خریداری شده در هر ساعت در هر یک از شبکه‌های توزیع است. به ترتیب در شکل (۶) الی (۷) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه باتری‌ها در سیستم توزیع اول، دوم و شبکه انتقال نشان داده شده است. محور منفی γ نشان‌دهنده شارژ باتری است. شکل (۸) و (۹) به ترتیب مقایسه‌ای بین بار حقیقی اولیه شبکه و بار حقیقی تغییر یافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا در سیستم توزیع اول و دوم است.

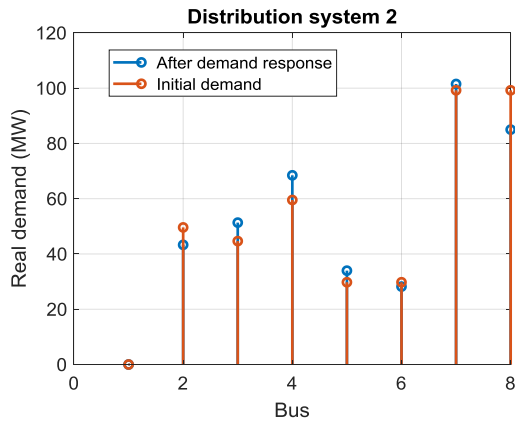


شکل (۴): ولتاژ باس‌های شبکه‌های توزیع در ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده در سناریو دوم

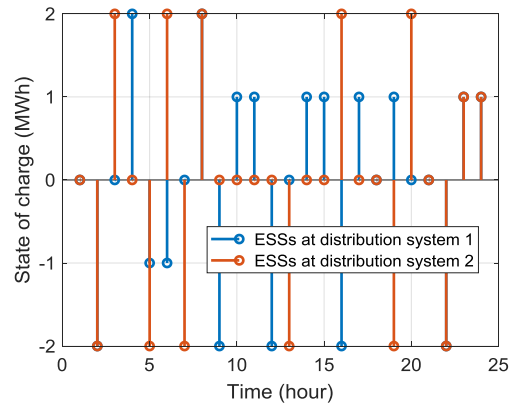


شکل (۵): توان خریداری شده شبکه‌های توزیع در ۲۴ ساعت در سناریو دوم

همان‌طور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود نتایج مربوط به سه سناریو نشان داده شده‌اند. در سناریو اول هیچ‌گونه خروج خط و واحد در شبکه انتقال در نظر گرفته نشده است یا به عبارتی، قیود امنیتی در این سناریو وجود ندارد. روشن است در این سناریو مقدار تابع هدف سطح بالایی برابر ۶۷۸۳ دلار و مقدار تابع هدف سطح پایینی برابر ۱۸۶۵ دلار شده است. به همین ترتیب، مقدار توان اکتیو خریداری شده توسط پست توزیع اول و دوم از شبکه انتقال برابر با ۶،۳ و ۴۷،۲ مگاوات برای ۲۴ ساعت شده است. شایان ذکر است در این سیستم دوره زمانی ۲۴ ساعته برای روزپیشرو برای تجزیه و تحلیل انتخاب شده است. مقدار توان اکتیو تولید شده با واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال برای ۲۴ ساعت برابر با ۲۲۳ مگاوات شده است. در سناریو دوم با در نظر گرفتن $k=1$ برای قیود امنیتی و به عبارتی، در نظر گرفتن محدودیت امنیتی تابع هدف در سطح شبکه انتقال و توزیع نیز افزایش پیدا کرده است. بدین ترتیب، تابع هدف مسئله سطح بالایی از ۶۷۸۳ به ۶۹۹۱ دلار در سناریو دوم افزایش پیدا کرده است. همچنین، تابع هدف شبکه‌های توزیع از ۱۸۶۵ به ۱۹۲۵ افزایش پیدا کرده است. این نشان می‌دهد خروج خط و واحد می‌تواند بر هر دو شبکه انتقال و توزیع اثرگذار باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سناریو دوم، خط ۹ در ساعات (۱،۳،۷،۱۰،۱۱،۱۳،۱۷،۱۸،۲۲،۲۳) در ساعات (۲،۲۴)، خط ۶ در ساعت (۲۰)، خط ۳ در ساعت (۴)، خط ۷ در ساعات (۵،۸) و خط ۸ در ساعات (۶،۹،۱۴،۱۵،۱۶) قطع است. همچنین، واحد ۲ در ساعات (۱۲،۱۹،۲۱) از مدار خارج است. در سناریو سوم تأثیر باتری در شبکه توزیع و انتقال نشان داده شده است. با توجه به اینکه در سناریو اول باتری در هر دو سطح شبکه وجود دارد، سناریو سوم به منظور بررسی تأثیر عدم باتری در شبکه‌ها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۲) تابع هدف مسئله سطح بالایی در سناریو سوم، زمانی که باتری در دو شبکه در نظر گرفته نشده است، در حدود ۱۰ درصد افزایش پیدا کرده است. همچنین، تابع هدف مسئله سطح پایینی نیز در حدود ۱۸ درصد افزایش داشته است. این نشان می‌دهد باتری تأثیر بسزایی در هر دو شبکه دارد؛



شکل (۹): مقایسه بار اکتیو شبکه توزیع دوم در حالت اولیه با حالت مدیریت پاسخ تقاضا در سناریو دوم



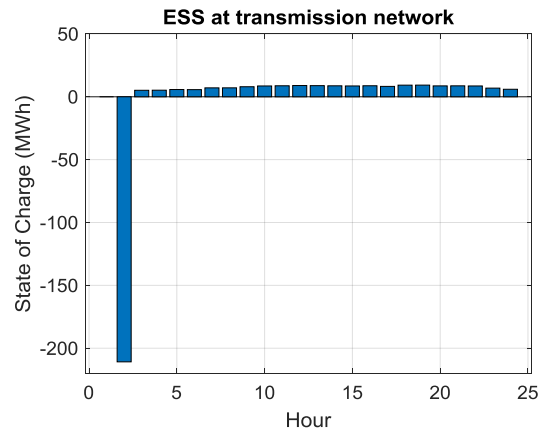
شکل (۶): توان بهینه شارژ و دشارژ باتری‌ها در سیستم توزیع اول و دوم در سناریو دوم

۴-۲- سیستم دوم

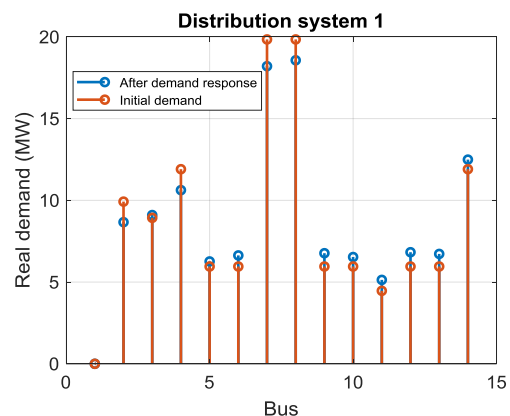
سیستم دوم شامل شبکه انتقال ۱۴ باس از استاندارد IEEE، ۴ شبکه توزیع را در بر می‌گیرد. در این سیستم، شبکه توزیع اول توسط باس‌های ۳، ۵، ۴ و ۹ در ارتباط با شبکه انتقال قرار دارد و باتری نیز در باس‌های ۲، ۱۱ و ۱۴ نصب شده است. این شبکه توزیع دارای ۱۰ باس است و شامل ۳ منبع تولید پراکنده در باس‌های ۲، ۶ و ۱۰ است. همچنین، منابع PV در باس‌های ۲، ۵ و ۱۰ مدل‌سازی شده‌اند. ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱، ۵ و ۱۰ در نظر گرفته شده و باتری در باس‌های ۲ و ۹ نصب شده است.

شبکه توزیع دوم که روی باس ۵ شبکه انتقال واقع شده، شامل ۵ باس و ۴ خط ارتباطی است. در این شبکه، یک واحد تولید پراکنده در باس ۲ وجود دارد. همچنین، منابع PV روی باس‌های ۱ و ۵ مدل‌سازی شده‌اند. منبع بادی در باس ۳ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱ و ۵ واقع شده است. باتری نیز در باس ۳ نصب شده است.

در شبکه توزیع سوم که روی باس ۴ شبکه انتقال قرار دارد، از ۱۵ باس و ۱۴ خط ارتباطی تشکیل شده است. در این شبکه، ۳ واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۲، ۷ و ۱۰ واقع شده‌اند. همچنین، منابع PV روی باس‌های ۱ و ۵ و همچنین، باس‌های ۸، ۱۱ و ۱۴ مدل‌سازی شده‌اند. منبع بادی در باس‌های ۳، ۸ و ۱۱ واقع شده و ایستگاه شارژ



شکل (۷): توان بهینه شارژ و دشارژ باتری‌ها در شبکه انتقال در سناریو دوم



شکل (۸): مقایسه بار اکتیو شبکه توزیع اول در حالت اولیه با حالت مدیریت پاسخ تقاضا در سناریو دوم

خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ در نظر گرفته شده است. باتری نیز در باس‌های ۶ و ۱۴ و همچنین، ۳۰ نصب شده است.

شبکه توزیع چهارم که روی باس ۹ شبکه انتقال قرار دارد، از ۳۳ باس و ۳۲ خط ارتباطی تشکیل شده است. در این شبکه، ۳ واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۶، ۱۴ و ۳۲ واقع شده‌اند. همچنین، منابع PV روی باس‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۸ مدل‌سازی شده‌اند. منبع بادی در باس‌های ۱۱، ۱۹ و ۲۶ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۵، ۱۲، ۱۷، ۲۴ و ۳۳ در نظر گرفته شده است. باتری نیز در باس‌های ۶ و ۱۴ و ۳۰ نصب شده است.

در جدول (۳) نتایج سیستم دوم ارائه شده‌اند. در سناریو اول، قیود امنیتی برای خط و واحدها در نظر گرفته نشده است. روشن است در این سناریو مقدار تابع هدف سطح بالایی برابر ۲۵۱۳۸ دلار و مقدار تابع هدف پایینی برابر ۱۰۳۴۵ دلار شده است. به همین ترتیب، مقدار توان اکتیو خریداری شده توسط پست شبکه توزیع اول الی چهارم از شبکه انتقال به ترتیب برابر با ۲۵،۲، ۱۲،۹، ۳۱ و ۱۱،۸ مگاوات است. مقدار توان اکتیو تولیدشده از واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال ۱۴ باس برای ۲۴ ساعت برابر با ۱۹۱۴ مگاوات شده است. همان‌طور که در جدول (۳) در سناریو دوم مشاهده می‌شود، با اعمال قیود امنیتی در شبکه انتقال تابع هدف مسئله نیز افزایش پیدا کرده است. مشاهده می‌شود تابع هدف مسئله بالایی از ۲۵۱۳۸ به ۲۶۴۶۸ دلار افزایش پیدا کرده است.

مطابق جدول (۳) در سناریو دوم تابع هدف مسئله پایینی حدود ۱۶۰۰ دلار نسبت به سناریو اول افزایش پیدا کرد. در اینجا به خوبی تأثیر قیود امنیتی بر تابع هدف شبکه توزیع و انتقال بر اهداف مسئله دو سطحی پیشنهادی مشاهده می‌شود.

در سناریو سوم با حذف باتری از شبکه‌های انتقال و توزیع توابع هدف مسئله سطح بالایی و پایینی به ترتیب ۹ و ۱۷ درصد افزایش داشته است که این تأثیر مطلوب باتری را در هر دو شبکه ثابت می‌کند.

۴-۳- مقایسه

در این بخش، روش پیشنهادی با روش تکاملی مقایسه شده است. روش پیشنهادی با الگوریتم تکاملی موجود در [۲۶] مقایسه شده است. جدول (۴) مقایسه‌ای بین مدت زمان حل مسئله پیشنهادی و تابع هزینه در سیستم‌های مختلف اجراشده با روش پیشنهادی و روش تکاملی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است به منظور مقایسه دقیق تمامی پارامترهای خطوط، بار و منابع و همچنین، باتری‌ها در مقایسه یکسان در نظر گرفته شده‌اند. تنها تفاوت روش حل مسئله است تا نشان داده شود روش پیشنهادی نتایجی دقیق‌تر را ارائه می‌کند.

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی سیستم دوم

سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	
۲۵۱۳۸	۲۶۴۶۸	۲۷۳۹۵	مقدار تابع هدف مسئله بالایی (دلار)
۱۰۳۴۵	۱۱۹۶۷	۱۲۲۸۹	مقدار تابع هدف مسئله پایینی (دلار)
۲۵،۲	۲۵،۲	۲۵،۲	توان پست شبکه توزیع اول (مگاوات)
۱۲،۹	۱۲،۹	۱۲،۹	توان پست شبکه توزیع دوم (مگاوات)
۳۱	۳۱	۳۱	توان پست شبکه توزیع سوم (مگاوات)
۱۱،۸	۱۱،۸	۱۱،۸	توان پست شبکه توزیع چهارم (مگاوات)
۱۹۱۴	۱۹۱۴	۱۹۱۴	کل توان شبکه انتقال (مگاوات)
-	(۲-۱)۴ (۶-۳)۶ (۱۶-۱۰) (۲۲،۲۳)۹ (۱۶-۱۳) (۲۱،۲۴)	-	خروج خط (زمان)
-	(۹)۴ (۸-۷)۵	-	خروج واحد (زمان)

شبکه و سناریو مختلف در نظر گرفته می‌شوند و نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند مدل و روش پیشنهادی با موفقیت عملکرد هماهنگی بین شبکه‌های انتقال و توزیع را بهبود می‌بخشد. در مقایسه با الگوریتم‌های تکاملی، روش پیشنهادی، عملکرد بهتری از نظر زمان اجرا و هم‌گرایی سریع‌تر دارد. به عبارت دیگر، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند روش پیشنهادی نزدیک به ۵,۵ درصد بهینه‌تر از روش تکاملی است و همچنین، در حدود ۱۲ درصد سریع‌تر عمل می‌کند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی سریع‌تر از روش تکاملی است که این نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی است. همچنین، جواب‌های تابع هزینه نزدیک به ۵,۵ درصد در روش پیشنهادی از روش تکاملی بهتر شده است و در حدود ۱۲ درصد سریع‌تر است. با تجزیه و تحلیل جدول (۴)، مشاهده می‌شود روش پیشنهادی هم از نظر مدت زمان حل و هم جواب‌های به‌دست‌آمده برتری درخور توجهی نسبت به روش‌های تکاملی دارد.

جدول (۴): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر با در

نظر گرفتن قید امنیت

روش تکاملی	روش پیشنهادی	
۳۳۴۰	۲۹۳۱	زمان حل سیستم اول (ثانیه)
۱۷۹۵۰	۱۹۶۲۴	زمان حل سیستم دوم (ثانیه)
۷۴۱۲	۶۹۹۱	تابع هزینه سیستم اول (دلار)
۲۸۶۲۹	۲۶۴۶۸	تابع هزینه سیستم دوم (دلار)

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی به‌عنوان یک مسئله سطح بالا و سطح پایینی ارائه شده است. در مسئله سطح بالا، مسائل مشارکت واحدها به‌منظور افزایش امنیت در شبکه انتقال به‌عنوان هدف، با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) مدل‌سازی شده‌اند. در مسئله سطح پایینی، مسائل بهره‌برداری بهینه در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر، ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی و منابع فسیلی و تجدیدپذیر به همراه باتری‌های کوچک، با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب دیگر مدل‌سازی شده است. در این راستا، یک رویکرد مبتنی بر روش مستقیم، ارائه و مسئله سطح پایینی از یک مدل خطی به یک مدل غیرمحدب درجه دوم تبدیل می‌شود تا به فرم استاندارد KKT برسد.

برای ارزیابی کارایی مدل و روش پیشنهادی، چندین

واژه نامه	
شاخص‌ها و مجموعه‌ها:	
n و N	مجموعه باس و شاخص باس شبکه انتقال
t و T	مجموعه دوره زمانی و شاخص زمان
s و S	مجموعه سناریوها و شاخص سناریو
l و L	مجموعه خطوط و شاخص خطوط شبکه انتقال
متغیرها:	
$G_{n,t}$	توان تولیدشده از واحد در باس n در زمان t ام
$u_{n,t}, s_{n,t}, v_{n,t}$	به ترتیب متغیر باینری مربوط به وضعیت واحدها، راه‌اندازی و خاموشی
$r_{n,t}$	توان قطع بار در باس n در زمان t ام
$f_{nm,t}$	شار توان حقیقی از باس n به m
$Q_{n,t}^s, P_{n,t}^s$	توان اکتیو و راکتیو پست شبکه توزیع n ام در زمان t ام
$z_{n,t}$	متغیر باینری مربوط به قید امنیتی
$P_{n,t}^{PDG}$	توان حقیقی تولیدشده این واحدها در باس n ام شبکه توزیع
$f_{nm,t}^q, f_{nm,t}^p$	شار توان حقیقی و راکتیو خط nm شبکه توزیع
$V_{n,t}^{sqe}$	ولتاژ مربعی باس n ام شبکه توزیع در ساعت t
$\bar{d}_{n,t}^q, \bar{d}_{n,t}^p$	توان حقیقی و راکتیو تغییر یافته در برنامه مدیریت سمت تقاضا در باس n ام در زمان t ام.
$p_{n,t}^{dis}, p_{n,t}^{ch}$	توان شارژ و دشارژ باتری در باس n ام در زمان t ام.
$e_{n,t}^{ess}$	انرژی باتری در باس n ام در زمان t ام.
$\zeta_{n,t}^{ess}$	وضعیت شارژ و دشارژ باتری در باس n ام در زمان t ام.
پارامترها:	
c_n^g	هزینه تولید واحد در باس n ام
c_n^c	هزینه بی‌باری واحد در باس n ام
c_n^d	هزینه خاموش‌سازی واحد در باس n ام

- scheme. IEEE Transactions on Power Systems. 2019 Mar 31;34(5):3428-42. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2908449
- [4] Olson A, Mahone A, Hart E, Hargreaves J, Jones R, Schlag N, Kwok G, Ryan N, Orans R, Frowd R. Halfway there: Can california achieve a 50% renewable grid?. IEEE Power and Energy Magazine. 2015 Jun 23;13(4):41-52. DOI: 10.1109/MPE.2015.2423211
- [5] Zhao T, Parisio A, Milanović JV. Distributed control of battery energy storage systems in distribution networks for voltage regulation at transmission–distribution network interconnection points. Control Engineering Practice. 2022 Feb 1;119:104988. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104988>
- [6] Lin C, Wu W, Shahidehpour M. Decentralized AC optimal power flow for integrated transmission and distribution grids. IEEE Transactions on Smart Grid. 2019 Dec 3;11(3):2531-40. DOI: 10.1109/TSG.2019.2957142
- [7] RaeesiNia MR, Javadi S, Jokar MR, Nejadi SA. Flexibility pricing in the active distribution network including renewable and flexibility sources as a bi-level optimization model. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022 Aug 1;52:101947. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101947>
- [8] Arpanahi MK, Golshan MH, Siano P. A comprehensive and efficient decentralized framework for coordinated multiperiod economic dispatch of transmission and distribution systems. IEEE Systems Journal. 2020 Aug 3;15(2):2583-94. DOI: 10.1109/JSYST.2020.3009750
- [9] Haghghat H, Karimianfard H, Zeng B. Integrating energy management of autonomous smart grids in electricity market operation. IEEE Transactions on Smart Grid. 2020 May 7;11(5):4044-55. DOI: 10.1109/TSG.2020.2992570
- [10] Karimianfard H, Salehizadeh MR, Siano P. Economic profit enhancement of a demand response aggregator through investment of large-scale energy storage systems. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2022 May 6;8(5):1468-76. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.02650
- [11] Sheikahmadi P, Bahramara S, Mazza A, Chicco G, Catalão JP. Bi-level optimization model for the coordination between transmission and distribution systems interacting with local energy markets. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021 Jan 1;124:106392. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106392>

هزینه قطع بار در باس nام	c_n^r
بار اکتیو در باس nام در زمان tام	$D_{n,t}$
حداقل و حداکثر توان واحدها	$\overline{G}_n, \underline{G}_n$
حداکثر شار توان از باس n به m	\overline{f}_{nm}
نرخ افزایش و کاهش توان واحدها	$\underline{R}_n, \overline{R}_n$
هزینه خرید انرژی از شبکه انتقال	c_t^s
به ترتیب برابر هزینه عدم مشارکت منابع تجدیدپذیر و ایستگاه خودروهای برقی	c_n^{PEV}, c_n^{RN}
به ترتیب برابر مقدار واقعی توان اکتیو منابع تجدیدپذیر و توان واقعی شارژ مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی	$\overline{P}_{n,t}^{PEV}, \overline{P}_{n,t}^{RN}$
هزینه سوخت واحدهای تولید پراکنده فسیلی	c_n^{DG}
توان حقیقی و راکتیو بار در باس n ام شبکه توزیع در زمان t	$d_{n,t}^q, d_{n,t}^p$
ضریب توان منبع تولید پراکنده غیرتجدیدپذیر	ρ_n
حداکثر و حداقل شار توان اکتیو عبوری از خط nm شبکه توزیع	$\underline{f}_{nm}^p, \overline{f}_{nm}^p$
حداکثر و حداقل شار توان راکتیو عبوری از خط nm شبکه توزیع	$\underline{f}_{nm}^q, \overline{f}_{nm}^q$
به ترتیب برابر مقاومت و راکتانس خط nm شبکه توزیع	x_{nm}, r_{nm}
به ترتیب برابر حداقل و حداکثر ولتاژ باس n ام شبکه توزیع	V_n^{max}, V_n^{min}
ظرفیت باتری در باس nام در زمان tام.	X_n^{ess}
راندمان باتری در باس nام.	η_n^{ess}
حداکثر تعداد دفعات مجاز برای دشارژ باتری در یک روز.	A
درصد تغییرات بار در برنامه مدیریت سمت تقاضا	ε

مراجع

- [1] Karimianfard H, Haghghat H, Zeng B. Co-optimization of battery storage investment and grid expansion in integrated energy systems. IEEE Systems Journal. 2021 Dec 30;16(4):5928-38. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3130057
- [2] Li Z, Sun H, Guo Q, Wang J, Liu G. Generalized master–slave-splitting method and application to transmission–distribution coordinated energy management. IEEE Transactions on Power Systems. 2018 Dec 28;34(6):5169-83. DOI: 10.1109/TPWRS.2018.2890169
- [3] Zhao J, Wang H, Liu Y, Wu Q, Wang Z, Liu Y. Coordinated restoration of transmission and distribution system using decentralized

- Apr 27;12(4):1996-2007. DOI: 10.1109/TSTE.2021.3076037
- [21] Tang K, Dong S, Liu Y, Wang L, Song Y. Asynchronous distributed global power flow method for transmission–distribution coordinated analysis considering communication conditions. *Electric Power Systems Research*. 2020 May 1;182:106256. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106256>
- [22] Tang W, Zhao W, Qian T, Zhao B, Lin Z, Xin Y. Learning-accelerated asynchronous decentralized optimization for integrated transmission and distribution systems over lossy networks. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2022 Sep 1;31:100724. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100724>
- [23] Lin C, Wu W, Shahidehpour M, Guo Y, Wang B. A non-iterative decoupled solution of the coordinated robust OPF in transmission and distribution networks with variable generating units. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2019 Jul 30;11(3):1579-88. DOI: 10.1109/TSTE.2019.2931908
- [24] Chen H, Fu L, Zhang R, Lin C, Jiang T, Li X, Li G. Local energy market clearing of integrated ADN and district heating network coordinated with transmission system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021 Feb 1;125:106522. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106522>
- [25] Nikoobakht A, Mahboubi-Moghaddam E. A Robust Decentralized Linear AC Operation for Integrated Transmission and Distribution Networks. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*. 2022 Sep 23;13(3):101-16. DOI: 10.22108/ISEE.2021.128616.1471 [In Persian].
- [26] Ghasemi H, Mohammadi Chabanloo R. Planning of Mobile Generators to Improve Resiliency of Distribution Systems. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*. 2022 Jun 22;13(2):27-38. DOI: 10.22108/ISEE.2021.125931.1426 [In Persian].
- [27] Goroochi Sardou I, Shahriyari M. Power system probabilistic scheduling with electric vehicles considering renewable energy sources uncertainties. *Computational intelligence in electrical engineering*. 2020 Mar 20;11(1):111-30. DOI: 10.22108/ISEE.2019.118470.1264 [In Persian].
- [28] Bagheri Tolabi H, Lashkar Ara A. Simultaneous Reconfiguration, Optimal Allocation of D-STATCOM and Distributed Generation Units in Distribution Networks [12] Li Z, Guo Q, Sun H, Wang J. A new LMP-sensitivity-based heterogeneous decomposition for transmission and distribution coordinated economic dispatch. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016 May 25;9(2):931-41. DOI: 10.1109/TSG.2016.2571848
- [13] Khastieva D, Mohammadi S, Hesamzadeh MR, Bunn D. Optimal transmission investment with regulated incentives based upon forward considerations of firm and intermittent resources with batteries. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021 Mar 23;36(5):4420-34. DOI: 10.1109/TPWRS.2021.3068052
- [14] Chen Z, Li Z, Guo C, Wang J, Ding Y. Fully distributed robust reserve scheduling for coupled transmission and distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020 Jul 1;36(1):169-82. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3006153
- [15] Roofegari Nejad R, Sun W, Golshani A. Distributed restoration for integrated transmission and distribution systems with DERs. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019 May 31;34(6):4964-73. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2920123
- [16] Lan P, Wu G, Shen X, Lv L, Liu J, Zhao H, Jawad S, Liu J. Distributed optimal scheduling for coupled transmission-distribution integrated electricity-gas system. *Electric Power Systems Research*. 2022 May 1;206:107759. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107759>
- [17] Shen Z, Liu M, Xu L, Lu W. Coordinated scheduling of integrated transmission and distribution systems using an improved Lipschitz dynamic programming approach. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022 Sep 1;140:108076. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108076>
- [18] Hassan A, Dvorkin Y. Energy storage siting and sizing in coordinated distribution and transmission systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2018 Feb 26;9(4):1692-701. DOI: 10.1109/TSTE.2018.2809580
- [19] Zhang D, Miao S, Li C, Zheng Z, Yang W, Han J, Li Y. A novel once-data-exchange method for solving transmission and distribution networks coordinated ACOPF model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020 Dec 1;123:106339. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106339>
- [20] Yin S, Wang J, Gangammanavar H. Stochastic market operation for coordinated transmission and distribution systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2021

- Controller. Computational Intelligence in Electrical Engineering. 2023 Apr 26;14(2):79-94. DOI: 10.22108/ISEE.2022.135103.1582 [In Persian].
- [30] Davoodi E, Babaei E. A modified imperialist competitive algorithm for combined heat and power dispatch. Computational Intelligence in Electrical Engineering. 2019 May 22;10(1):1-8. DOI: 10.22108/ISEE.2018.90070.0 [In Persian].
- for Reducing Losses, Improving Reliability, Voltage Stability, and Operating Costs by Using a Combination of Horse Optimization and Genetic Algorithm. Computational Intelligence in Electrical Engineering. 2023 Jul 16. DOI: 10.22108/ISEE.2023.136749.1614 [In Persian].
- [29] Rostannia M, Fani B, Moazzami M, Rostannia MS. Intelligent Protection Scheme of Electrical Energy Distribution Systems in the presence of Distributed Generation Sources using Agent-Based Distributed