

Bi-Level Optimization Model for Coordinated Management of Integrated Transmission and Distribution Systems

Roozbeh Tamizkar¹, Ph.D. Student, Mahmoud Samiei-Moghaddam², Assistant Professor, Azita Azarfar¹, Assistant Professor, Mohammad Hoseini-Abardeh¹, Associated Professor, Mojtaba Vahedi¹, Assistant Professor

¹Department of Electrical Engineering- Shahrood Branch, Islamic Azad University, Shahrood, Iran

²Department of Electrical Engineering- Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

tamizkar_IEEE@yahoo.com, samiei352@yahoo.com, azita.azarfar@gmail.com,
mohamad.hosseini@gmail.com, vahedi.mojtaba@gmail.com

Abstract

In this paper, a bi-level optimization model is proposed for the coordinated management of integrated transmission and distribution networks. The problem of the security-constrained unit commitment as an upper-level problem to reduce operating costs, startup/shutdown costs, and no-load along with load shedding as a mixed integer linear programming model and the problem of optimal operation in independent distribution networks by considering renewable and non-renewable resources along with charging stations for electric vehicles as a lower-level problem to reduce the costs of purchasing power from the upstream network and reduce the costs of power outages. The resources and charging power of electric vehicle charging stations are considered a linear model. To solve the bi-level problem, the proposed lower-level model is modeled as Karush-Kahn-Tucker optimality conditions. Several different networks have been considered for validating the model and the proposed method, and the results obtained from the simulation prove the efficiency of the model and the proposed method in considering the coordinated operation of intelligent transmission and distribution networks. To show the superiority of the proposed method over other algorithms for solving multilevel models, the proposed method has been compared with decomposition algorithms, and the results show the superiority of the proposed method in terms of execution time and faster convergence.

Keywords: distribution network, linear programming, optimization, renewable resources, transmission network

Received: 8 June 2022

Revised: 13 August 2022

Accepted: 12 September 2022

Corresponding Author: Dr. Mahmoud Samiei Moghadam

Citation: R. Tamizkar, M. Samiei-Moghaddam, A. Azarfar, M. Hoseini-Abardeh, M. Vahedi, "Bi-level optimization model for coordinated management of integrated transmission and distribution systems", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 59, pp. 1-20, September 2024 (in Persian).

مقاله پژوهشی

ارائه یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی برای مدیریت هماهنگ سیستم‌های انتقال و توزیع یکپارچه

روزبه تمیزکار^۱، دانشجو دکتری، محمود سمیعی مقدم^۲، استادیار، آزیتا آذرفر^۱، استادیار، محمد حسینی ابرده^۱،
استادیار، مجتبی واحدی^۱، استادیار

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

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

tamizkar_IEEE@yahoo.com, samiei352@yahoo.com, azita.azarfar@gmail.com,
mohamad.hosseini@gmail.com, vahedi.mojtaba@gmail.com

چکیده: در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی برای مدیریت هماهنگ شبکه‌های توزیع و انتقال یکپارچه پیشنهاد شده است. مسئله مشارکت واحدها با قید امنیت در شبکه انتقال به عنوان مسئله سطح بالایی با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، روشن/خاموش‌سازی و بی‌باری به همراه قطع بار به صورت یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب و مسئله بهره‌برداری بهینه در شبکه‌های توزیع مستقل با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر به همراه ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به عنوان مسئله پایینی با هدف کاهش هزینه‌های خرید توان از شبکه بالادست و کاهش هزینه‌های قطع توان منابع و توان شارژ ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به صورت یک مدل خطی در نظر گرفته شده است. برای حل مسئله دو سطحی پیشنهادی مدل سطح پایینی به صورت شرایط بهینگی کروش-کان-تاکر مدل‌سازی می‌شود. چندین شبکه مختلف برای صحت‌سنجی مدل و روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کارآمدی مدل و روش پیشنهادی را در نظر گرفتن بهره‌برداری هماهنگ شبکه‌های انتقال و توزیع هوشمند اثبات می‌کند. در پایان برای نشان دادن برتری روش پیشنهادی نسبت به دیگر الگوریتم‌های حل مدل‌های چندسطحی، روش پیشنهادی با الگوریتم‌های تجزیه مقایسه شده است که نتایج نشان از برتری روش پیشنهادی در مدت زمان اجرا و همگرایی سریع‌تر است.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی، شبکه انتقال، شبکه توزیع، منابع تجدیدپذیر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۳/۱۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۶/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمود سمیعی مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول: دامغان- بلوار چشمه علی- دانشگاه آزاد اسلامی واحد دامغان- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در سیستم‌های قدرت امروزی، کشورهای مختلف از چندین چارچوب مفهومی برای اپراتور سیستم انتقال^۱ و اپراتور سیستم توزیع^۲ پیروی می‌کنند. همان‌طور که چارچوب‌های اپراتور سیستم انتقال و اپراتور سیستم توزیع 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. مرجع [۱] مزایای دسترسی هماهنگ بهینه به منابع در داخل اپراتور سیستم انتقال و اپراتور سیستم توزیع را با استفاده از یک مدل دوسطح مقاوم^۳ مورد بحث قرار می‌دهد. در مرجع [۲] نشان داده شده است که نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های توزیع مشکلات قابل توجه را برای اپراتور سیستم انتقال ایجاد می‌کند که مدیریت بهینه آن‌ها از طریق روش مدیریت جداگانه فعلی دشوار است، لذا یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی مبتنی بر برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم^۴ برای رفع این مشکل ارائه شده است. مرجع [۳] با استفاده از یک مدل پخش بار بهینه جریان متناوب^۵ نشان داد که عدم هماهنگی بین شبکه انتقال و توزیع باعث شد تقریباً ۲/۷ میلیون مشترک در یک روز گرم بدون برق بمانند. این امر انگیزه‌ای برای تحقیق در مورد روش‌های هماهنگی جدید بین شبکه‌های توزیع و انتقال برای رسیدگی به مشکلات هماهنگی بالقوه تحت تأثیر منابع انرژی در مقیاس بزرگ را فراهم کرده است. در مرجع [۴] نویسندگان یک مدل مشارکت واحد سه مرحله‌ای را برای بهره‌برداری بازار هماهنگ انتقال و توزیع و تغییرات تقاضا با استفاده از یک الگوریتم تودرتو تعمیم یافته پیشنهاد کرده‌اند. در مرجع [۵] یک روش بهینه‌سازی غیرمتمرکز بر اساس یک چارچوب تصمیم‌گیری برای به‌دست آوردن استراتژی بازسازی هماهنگ بهینه سیستم انتقال و توزیع پیشنهاد شده است. از آنجا که سیستم مدیریت انرژی انتقال و توزیع مستقل فعلی با چالش‌های زیادی در ارتباط با ادغام ژنراتورهای توزیع شده^۶ در شبکه‌های آینده روبرو است، حل این چالش‌ها، مانند مشکل افزایش ولتاژ که منجر به قطع منابع تولید پراکنده می‌شود، از طریق مدیریت انرژی جداگانه فعلی دشوار خواهد بود، بنابراین در مرجع [۶] یک استراتژی هماهنگی شبکه انتقال-توزیع توسط یک الگوریتم تجزیه ناهمگن برای حل انتقال و توزیع به‌صورت توزیع شده مبتنی بر برنامه‌ریزی دوسطحی درجه دوم مختلط^۷ پیشنهاد شده است. در مرجع [۷] 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 مرجع [۸] یک روش تقریبی دو مرحله‌ای مبتنی بر روش هم ارزی شبکه دوجهته^۸ با در نظر گرفتن جفت شدن فزاینده بین شبکه‌های انتقال و توزیع نامتعادل سه فاز یکپارچه پیشنهاد شده است. مرجع [۹] یک چارچوب هماهنگ برای توزیع بار چند دوره‌ای سیستم‌های انتقال و توزیع برای به حداقل رساندن کل هزینه بهره‌برداری روزانه سیستم قدرت با استفاده از روش لاگرانژی شتاب غیرمتمرکز بر اساس یک مدل برنامه‌ریزی محدود به شانس^۹ پیشنهاد می‌کند. در مرجع [۱۰] یک روش تعمیم یافته تقسیم ارباب-برده مبتنی بر یک الگوریتم تجزیه ناهمگن برای مدیریت هماهنگ انرژی انتقال-توزیع برای بهبود ارزیابی پایداری ولتاژ ارائه شده است. در مرجع [۱۱] یک الگوریتم تجزیه ناهمگن کارآمد برای حل انتقال و توزیع هماهنگ پخش بار اقتصادی با در نظر گرفتن حساسیت قیمت حاشیه‌ای به تزریق بار برای افزایش همگرایی و اجتناب از واگرایی پیشنهاد شده است. مرجع [۱۲] یک مدل بهینه‌سازی دوسطحی را بر اساس مدل سطح بالا و پایین ارائه می‌کند تا واحدهای ذخیره‌سازی انرژی توزیع‌شده را به‌طور بهینه در مکان و اندازه توزیع کرده و اهداف بهره‌برداری در هماهنگی سیستم‌های توزیع و انتقال^{۱۰} را بهبود بخشد. مرجع [۱۳] یک برنامه‌ریزی ذخیره مقاوم توزیع شده را بر اساس روش جهت متناوب شبکه‌های توزیع فعال چند برابر کننده برای سیستم‌های انتقال و توزیع جفت شده پیشنهاد می‌کند. در مرجع [۱۴] یک راه حل هماهنگ مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی^{۱۱} و معادله‌های جریان خط در شبکه یکپارچه انتقال و توزیع با در نظر گرفتن منابع انرژی در شبکه‌های توزیع برای کاهش هزینه عملیاتی شبکه‌های برق پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۵] یک استراتژی محدب برخط^{۱۲} بر اساس مدل پخش بار نامتعادل سه فاز منابع انرژی توزیع شده برای بازیابی سیستم‌های انتقال و توزیع یکپارچه پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۶] برنامه‌ریزی هماهنگ سیستم‌های انتقال و توزیع یکپارچه با استفاده از رویکرد برنامه‌نویسی پویا پیوستگی لیپ‌شیتز برای به حداقل رساندن هزینه کل بهره‌برداری سیستم‌های انتقال و توزیع پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۷] یک روش مبادله یکبار داده جدید برای حل شبکه‌های انتقال و توزیع هماهنگ شده مدل پخش بار^{۱۳} جریان مستقیم مبتنی بر بهینه‌سازی غیرمتمرکز برای به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش تلفات شبکه پیشنهاد

شده است. در مرجع [۱۸] یک روش جریان توان توزیع شده ناهمزمان سراسری برای تحلیل هماهنگ انتقال و توزیع با در نظر گرفتن شرایط ارتباطی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۹] یک مدل زمان‌بندی بهینه از سیستم یکپارچه برق-گاز انتقال-توزیع جفت شده بر اساس برنامه‌ریزی محدود شانس و روش متناوب ضریب‌ها برای به حداقل رساندن هزینه کل شبکه‌ها پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۰] یک بهینه‌سازی غیرمتمرکز را بر اساس روش جهت متناوب آرام ضرب کنند‌ها برای هماهنگی شبکه‌های انتقال و توزیع یکپارچه برای به حداقل رساندن هزینه تولید پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۱] یک مدل برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم اعداد صحیح مختلط دو سطحی برای عملیات بازار انرژی محلی شبکه توزیع فعال یکپارچه و شبکه گرمایش منطقه‌ای هماهنگ با سیستم انتقال برای به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۲] یک کنترل توزیع شده سیستم‌های ذخیره انرژی باتری در شبکه‌های توزیع برای تنظیم ولتاژ در نقاط اتصال شبکه انتقال-توزیع پیشنهاد شده است. در مرجع [۲۳] یک الگوریتم مبتنی بر روش تجزیه و بازفرمول‌نویسی برای حل مسئله بهینه‌سازی سیستم‌های یکپارچه انتقال و توزیع ارائه شده است. یک مدل دو سطحی به منظور حل مسئله همزمان شبکه توزیع و انتقال با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و پخش بار بهینه در مرجع [۲۴] ارائه شده است. در مرجع [۲۵] یک مدل دو سطحی برای افزایش انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع با هدف کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و افزایش تغییرات بار در یک برنامه مدیریت سمت تقاضا ارائه شده است. به منظور روشن شدن دقیق تفاوت‌های این مقاله با مطالعه‌های پیشین، یک جدول طبقه‌بندی شده برای مقایسه ارائه شده است. در مرجع [۲۶] یک روش تکاملی برای حل مسائل بهینه‌سازی دو سطحی که در هر دو سطح متغیرهای باینری و صحیح وجود داشته است، ارائه شده است. در مرجع [۲۷] یک مدل دو مرحله‌ای برای مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع ارائه شده که مرحله اول آن مربوط به مدیریت انرژی مشترکین و مرحله بعدی مدیریت پارکینگ شارژ خودروی برقی به منظور کاهش هزینه‌های شارژ و هم پارامترهای بهره‌برداری شبکه است. در مرجع [۲۸] یک مدل مدیریت انرژی برای بهره‌برداری از شبکه توزیع شعاعی با در نظر گرفتن خانه‌های هوشمند به منظور افزایش رفاه اجتماعی با برنامه پاسخ تقاضا ارائه شده است. در مرجع [۲۹] یک چارچوب غیرمتمرکز برای افزایش تاب‌آوری شبکه‌ها بر اساس سازماندهی تبادل‌های ربح‌بخش انرژی با در نظر گرفتن انگیزه‌های مالی مناسب جهت مشارکت شبکه‌های توزیع جزیره‌ای پیشنهاد شده است.

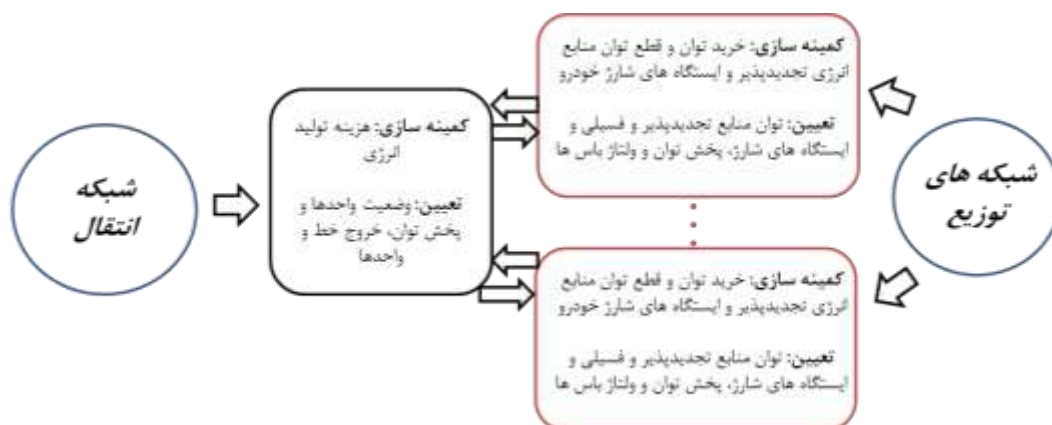
همان‌طور که در ادبیات اخیر بررسی شد، بحث هماهنگی بین شبکه‌های انتقال و توزیع برای اهداف مختلف با رویکردهای مختلف و با روش‌های متفاوت انجام شده که نشان دهنده اهمیت مسئله است، اما خلاهای مطالعاتی با توجه به جدول (۱) در این مورد وجود دارد که تاثیر احتمال خروج خطوط و قطع منابع نیروگاهی را در شبکه انتقال بر روی شبکه‌های توزیع در نظر نگرفته است. در این مقاله سعی شده که یک مدل کامل از مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیتی مدل‌سازی شود. همچنین در مقاله‌های اخیر نشان داده شده است که به علت افزایش روز افزون منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم توزیع در برخی مواقع که سیستم کم بار بوده، به دلیل رعایت تعادل بین بار و تولید اپراتورهای توزیع دستور قطع توان تجدیدپذیر را صادر کرده‌اند که این موضوع می‌تواند عدم بهره‌وری کامل از این منابع را نشان دهد. در این مقاله سعی شده که کاهش قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر نیز به عنوان یکی از اهداف اصلی شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شود. در این مقاله یک مدل خطی عدد صحیح مختلط دوسطحی برای هماهنگی بهره‌برداری شبکه انتقال با شبکه‌های توزیع به منظور کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. به طور خلاصه نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- ارائه یک مدل مشارکت واحدها با قیود امنیتی در حل مسئله همزمان شبکه توزیع و انتقال؛
 - مدل‌سازی تصادفی شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر، منابع تولید پراکنده و ایستگاه‌های شارژ وسایل نقلیه الکتریکی به عنوان یک مدل بهینه‌سازی خطی؛
 - استفاده از مدل خطی شرایط بهینه کروش-کان-تاکر برای حل مسئله دو سطحی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب^{۱۴}؛
 - مدل‌سازی چندین سیستم مختلف استاندارد^{۱۵} به منظور تجزیه و تحلیل دقیق نتایج.
- در ادامه مدل بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه شده و سپس روش حل مسئله تشریح می‌شود، سپس در بخش بعدی شبکه‌های آزمایشی معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی با روش‌های دیگر مقایسه می‌شود. در بخش پایانی، نتیجه‌گیری کلی ارائه شده است.

Table (1): Comparison between the proposed model and similar papers

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

مرجع	فیود امنیتی	مشارکت واحدها	مدل تصادفی	تابع چند هدفه	منابع تجدیدپذیر	منابع تولید پراکنده	خودرو برقی	نوع مدل
مدل پیشنهادی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Bi-MILP
[۱]	-	✓	-	✓	✓	✓	-	Bi-RO
[۲]	-	-	-	-	-	✓	-	Bi-SOCP
[۳]	-	-	-	✓	✓	✓	-	ACOPF
[۴]	-	✓	-	✓	✓	✓	-	MILP
[۵]	-	✓	✓	-	✓	✓	-	Bi-SOCP
[۶]	✓	-	-	✓	✓	✓	-	Bi-MIQP
[۷]	-	-	-	-	-	✓	-	Bi-SOCP
[۸]	-	-	-	✓	-	✓	-	Bi-DNE
[۹]	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	Bi-CCP
[۱۰]	-	-	✓	✓	✓	✓	-	Bi-MIQP
[۱۱]	-	-	-	✓	✓	✓	-	Bi-MISOCP
[۱۲]	-	-	-	-	-	✓	-	TDOPF
[۱۳]	-	-	-	✓	✓	✓	-	Bi-MILP
[۱۴]	-	-	-	✓	✓	✓	-	NLP
[۱۵]	-	-	-	✓	-	✓	✓	OCO
[۱۶]	✓	✓	✓	-	✓	✓	-	Bi-MIQP
[۱۷]	-	✓	-	-	✓	✓	✓	Bi-NLP
[۱۸]	-	-	-	✓	✓	✓	✓	Bi-MILP
[۱۹]	✓	-	-	✓	✓	✓	-	Bi-LP
[۲۰]	-	-	-	✓	-	✓	-	LP
[۲۱]	✓	-	-	✓	✓	✓	✓	Bi-MISOCP
[۲۲]	-	-	-	✓	✓	✓	-	Bi-MIQP
[۲۳]	-	✓	-	-	✓	✓	-	Bi-MILP
[۲۴]	-	-	-	✓	✓	✓	-	Bi-MILP
[۲۵]	-	-	✓	✓	✓	✓	-	Bi-MILP



شکل (۱): طرح هماهنگ شبکه انتقال و توزیع

Figure (1): Coordinated plan of transmission and distribution network

۲- مدل‌سازی

در این بخش مدل بهینه‌سازی دوسطحی پیشنهاد شده برای حل مسئله بهره‌برداری هماهنگ شبکه انتقال و شبکه توزیع ارائه شده است. به‌منظور حل مسئله دوسطحی چالش برانگیز پیشنهادی، مدل شبکه انتقال به‌صورت یک مسئله سطح بالایی و مدل شبکه‌های توزیع به‌صورت سطح پایینی در نظر گرفته می‌شود. متغیر لینک بین این دو شبکه در مدل دو سطحی پیشنهادی، توان حقیقی است که باید از پست توزیع توسط شبکه انتقال تامین شود. برای معرفی مدل دو سطحی پیشنهادی ابتدا مدل شبکه انتقال و سپس مدل شبکه توزیع و در نهایت راه‌حل برای حل مسئله پیشنهادی ارائه خواهد شد. در شکل (۱) طرح پیشنهادی برای هماهنگی شبکه‌های انتقال و توزیع یکپارچه نشان داده شده است. در پیوست پارامترها، متغیرها و مجموعه‌های مدل‌سازی پیشنهادی آمده است.

۲-۱- مدل سطح بالایی

مدل مسئله سطح بالایی در نظر گرفته شده در این مقاله، مدل‌سازی مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیت در شبکه انتقال است، که تابع هدف و قیود مرتبط با آن نیز به‌صورت معادله‌های (۱) الی (۱۲) مدل‌سازی شده است. رابطه (۱) نشان‌دهنده تابع هدف مسئله سطح بالایی است.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N G_{n,t} + c_n^u u_{n,t} + c_n^s s_{n,t} + c_n^d v_{n,t} + c_n^r r_{n,t} \quad (1)$$

معادله‌های (۲) الی (۱۲) نیز نشان‌دهنده قیود مربوط به مسئله بالایی است. معادله برابری (۲) نشان‌دهنده قید تعادل توان در شبکه انتقال است.

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

در رابطه (۲) توان پست شبکه توزیع به‌صورت متغیر مشترک بین دو سطح بالایی و پایینی است. رابطه (۳) نشان‌دهنده محدودیت توان واحدها است. نامعادله (۴) محدودیت قطع بار را نشان می‌دهد. رابطه (۵) نشان‌دهنده شار توان در خط است. معادله (۶) نشان‌دهنده رابطه منطقی بین متغیرهای باینری در مسئله مشارکت واحدها است. رابطه (۷) نشان‌دهنده محدودیت نرخ افزایش و کاهش توان واحدها است. رابطه‌های (۸) و (۹) به‌ترتیب نشان‌دهنده حداقل مدت زمان روشن و خاموش بودن واحدها است. رابطه (۱۰) محدودیت زاویه ولتاژ باس و رابطه (۱۱) زاویه ولتاژ باس مرجع را نشان می‌دهد. رابطه (۱۲) مربوط به قطعی واحدهای تولید و خطوط انتقال است.

$$z_{n,t} G_n u_{n,t} \leq G_{n,t} \leq u_{n,t} \overline{G_n} z_{n,t} \quad z_{n,t}, u_{n,t} \in \{0,1\}, \forall n \in N, t \in T \quad (3)$$

$$0 \leq r_{n,t} \leq D_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (4)$$

$$|f_{nm,t} - z_{nm,t} x_{nm} (\theta_{n,t} - \theta_{m,t})| \leq \overline{f_{nm}} \quad \forall nm \in L, n \in N, t \in T \quad (5)$$

$$u_{n,t+1} - u_{n,t} = s_{n,t+1} - v_{n,t+1} \quad u_{n,t}, s_{n,t}, v_{n,t} \in \{0,1\}, \forall n \in N, t \in T \quad (6)$$

$$G_{n,t+1} - G_{n,t} \leq \overline{R_n}, G_{n,t} - G_{n,t+1} \leq \underline{R_n}, \forall n \in N, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k=t-UT_n+1}^t s_{n,k} \leq u_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in \{UT_n, \dots, T\} \quad (8)$$

$$\sum_{k=t-DT_n+1}^t v_{n,k} \leq 1 - u_{n,t} \quad \forall n \in N, t \in \{DT_n, \dots, T\} \quad (9)$$

$$-\pi \leq \theta_{n,t} \leq \pi \quad \forall n \in N, t \in T \quad (10)$$

$$\theta_{n,t} = 0 \quad n = ref, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{n \in N} (1 - z_{n,t}) + \sum_{n,m \in L} (1 - z_{nm,t}) = k \quad \forall t \in T \quad (12)$$

همان‌طور که مشاهده شد مسئله سطح بالایی رابطه‌های (۱) الی (۱۲) یک مسئله برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب است، که می‌توان آن را به‌وسیله حل‌کننده‌های تجاری قدرتمند حل نمود. در بخش بعدی مسئله سطح پایینی که مربوط به شبکه توزیع است ارائه می‌شود.

۲-۲- مدل سطح پایینی

در این بخش مسئله بهینه‌سازی شبکه توزیع که به‌صورت یک مدل خطی است به‌صورت رابطه‌های (۱۳) الی (۲۵) در نظر گرفته شده است. تابع هدف مسئله پایینی در رابطه (۱۳) نشان داده شده است.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{n=\text{ref}}^N c_t^s (P_{n,t}^s + Q_{n,t}^s) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{DG}} (P_{n,t}^{\text{DG}}) + \sum_{s=1}^S \sigma_s \left(\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{RN}} (\bar{P}_{n,t,s}^{\text{RN}} - P_{n,t}^{\text{RN}}) + c_n^{\text{PEV}} (\bar{P}_{n,t,s}^{\text{PEV}} - P_{n,t}^{\text{PEV}}) \right) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) به‌ترتیب هدف اول کاهش هزینه توان اکتیو و راکتیو خریداری شده در پست توزیع از شبکه انتقال است. هدف بعدی کاهش هزینه عدم مشارکت منابع تجدیدپذیر و یا ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی است. این بخش از تابع هدف تضمین می‌دهد که 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 تامین گردد. رابطه‌های (۱۴) و (۱۵) قید تعادل توان اکتیو و راکتیو را در شبکه توزیع نشان می‌دهد.

$$P_{n=\text{ref},t}^s + \sum_{n,m \in N} f_{nm,t}^p - \sum_{m,n \in N} f_{mn,t}^p + P_{n,t}^{\text{RN}} - P_{n,t}^{\text{PEV}} + P_{n,t}^{\text{DG}} - d_{n,t}^p = 0 \quad \forall n \in N, t \in T \quad (14)$$

$$Q_{n=\text{ref},t}^s + \sum_{n,m \in N} f_{nm,t}^q - \sum_{m,n \in N} f_{mn,t}^q + \rho_n P_{n,t}^{\text{DG}} - d_{n,t}^q = 0 \quad \forall n \in N, t \in T \quad (15)$$

رابطه‌های (۱۶) الی (۱۸) به‌ترتیب نشان دهنده محدود بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر، منابع تولید پراکنده و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی است.

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{PV}} \leq \bar{P}_{n,t}^{\text{PV}} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (16)$$

$$(17) 0 \leq P_{n,t}^{\text{DG}} \leq \bar{P}_{n,t}^{\text{DG}} \quad \forall n \in N, t \in T$$

$$(18) 0 \leq P_{n,t}^{\text{PEV}} \leq \bar{P}_{n,t}^{\text{PEV}} \quad \forall n \in N, t \in T$$

رابطه‌های (۱۹) و (۲۰) به‌ترتیب نشان دهنده حد مجاز شار توان‌های اکتیو و راکتیو بین خطوط است.

$$\underline{f}_{nm}^p \leq f_{nm,t}^p \leq \bar{f}_{nm}^p \quad \forall nm \in L, t \in T \quad (19)$$

$$\underline{f}_{nm}^q \leq f_{nm,t}^q \leq \bar{f}_{nm}^q \quad \forall nm \in L, t \in T \quad (20)$$

در رابطه‌های (۲۱) و (۲۲) حداکثر توان اکتیو و راکتیو بهره‌برداری از پست توزیع نشان داده شده است.

$$P_{n,t}^s \leq \bar{P}_n^s \quad n=\text{ref}, t \in T \quad (21)$$

$$Q_{n,t}^s \leq \bar{Q}_n^s \quad n=\text{ref}, t \in T \quad (22)$$

رابطه (۲۳) ولتاژ مربعی باس شبکه توزیع را نشان می‌دهد. رابطه (۲۴) نیز نشان دهنده محدودیت بهره‌برداری ولتاژ باس است.

$$V_{n,t}^{\text{sqe}} = V_{n,t}^{\text{sqe}} - 2(r_{nm} f_{nm,t}^p - x_{nm} f_{nm,t}^q) \quad \forall n \in N, nm \in L, t \in T \quad (23)$$

$$V_n^{\text{min}2} \leq V_{n,t}^{\text{sqe}} \leq V_n^{\text{max}2} \quad n \in N, t \in T \quad (24)$$

با معرفی مدل سطح پایینی، هر دو مدل سطح بالا و پایین مسئله بهینه‌سازی دوسطحی پیشنهادی ارائه شده است. در بخش بعدی طریقه حل مدل پیشنهادی ارائه می‌شود.

۳- روش حل مسئله

همان‌طور که در بخش قبل ارائه شد، مدل سطح بالا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و مدل سطح پایین یک مدل خطی است. به‌طور کلی مسئله دوسطحی پیشنهادی به‌صورت معادله‌های (۲۵) الی (۲۸) است.

$$\text{Upper Level} = \min \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N c_n^g G_{n,t} + c_n^c u_{n,t} + c_n^s s_{n,t} + c_n^d v_{n,t} + c_n^r r_{n,t} \quad (25)$$

$$(26) \text{ s.t } (2) - (12)$$

$$(27) \text{ Lower Level} = \min \sum_{t=1, n=\text{ref}}^T c_t^s (P_{n,t}^s + Q_{n,t}^s) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{RN}} (\bar{P}_{n,t}^{\text{RN}} - P_{n,t}^{\text{RN}}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{PEV}} (\bar{P}_{n,t}^{\text{PEV}} - P_{n,t}^{\text{PEV}}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{DG}} (P_{n,t}^{\text{DG}})$$

$$\text{ s.t } (14) - (24) \quad (28)$$

برای حل مدل دوسطحی پیشنهادی ابتدا مدل سطح پایینی رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) را به صورت شرایط بهینگی کروش-کان-تاکر تبدیل و سپس آن را به قید مسئله سطح بالایی یعنی رابطه (۲۶) اضافه می‌کنیم تا مسئله از دوسطحی به تک‌سطحی تبدیل شود. برای بازنویسی مسئله سطح پایینی رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) به معادله‌های کروش-کان-تاکر به روش m-بزرگ [۲۳] از رابطه‌های (۲۹) الی (۳۵) پیروی می‌کنیم.

$$L(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{j=1}^k \lambda_j (h_j(x)) + \sum_{i=1}^m \mu_i (g_i(x)) \quad (29)$$

$$\nabla f(x) + \sum_{j=1}^k \lambda_j \nabla h_j(x) + \sum_{i=1}^m \mu_i \nabla g_i(x) = 0 \quad (30)$$

$$h_i(x) = 0 \quad (31)$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad (32)$$

$$\mu_i(x) \geq 0 \quad (33)$$

$$\mu_i \leq m(1 - \alpha_i) \quad \forall \alpha_i \in \{0, 1\}, m = \text{big number} \quad (34)$$

$$g_i \leq m(\alpha_i) \quad \forall \alpha_i \in \{0, 1\}, m = \text{big number} \quad (35)$$

رابطه‌های (۲۹) الی (۳۵) فرم خطی معادله‌های کروش-کان-تاکر برای بازنویسی مسئله سطح پایینی است. با پیروی از این رابطه‌های، بازنویسی مسئله پایینی رابطه‌های (۲۷) و (۲۸) به فرم بهینگی کروش-کان-تاکر به صورت معادله‌های (۳۶) الی (۴۲) خواهد شد:

$$\begin{aligned} L(x, \lambda, \mu) = & \sum_{t=1, n=\text{ref}}^T c_t^s (P_{n,t}^s + Q_{n,t}^s) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{RN}} (\bar{P}_{n,t}^{\text{RN}} - P_{n,t}^{\text{RN}}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{PEV}} (\bar{P}_{n,t}^{\text{PEV}} - P_{n,t}^{\text{PEV}}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T c_n^{\text{DG}} (P_{n,t}^{\text{DG}}) \\ & + \lambda_1 \left(P_{n=\text{ref},t}^s + \sum_{n,m \in N} f_{nm,t}^p - \sum_{m,n \in N} f_{mn,t}^p + P_{n,t}^{\text{RN}} + P_{n,t}^{\text{DG}} - P_{n,t}^{\text{PEV}} - d_{n,t}^p \right) + \lambda_2 \left(Q_{n=\text{ref},t}^s + \sum_{n,m \in N} f_{nm,t}^q - \sum_{m,n \in N} f_{mn,t}^q + \rho_n P_{n,t}^{\text{DG}} - d_{n,t}^q \right) \\ & + \lambda_3 (V_{n,t}^{\text{sqe}} - V_{n,t}^{\text{sqe}} + 2(r_{nm} f_{nm,t}^p - x_{nm} f_{nm,t}^q)) + \mu_1 (-P_{n,t}^{\text{RN}}) + \mu_2 (P_{n,t}^{\text{RN}} - \bar{P}_{n,t}^{\text{RN}}) + \mu_3 (P_{n,t}^{\text{DG}}) + \mu_4 + \mu_5 (-P_{n,t}^{\text{DG}}) + \mu_6 (P_{n,t}^{\text{DG}} - \bar{P}_{n,t}^{\text{DG}}) \\ & + \mu_7 (-P_{n,t}^{\text{PEV}}) + \mu_8 (P_{n,t}^{\text{PEV}} - \bar{P}_{n,t}^{\text{PEV}}) + \mu_9 (f_{nm,t}^p - f_{nm,t}^p) + \mu_{10} (f_{nm,t}^p - \bar{f}_{nm,t}^p) + \mu_{11} (f_{nm,t}^q - f_{nm,t}^q) + \mu_{12} (f_{nm,t}^q - \bar{f}_{nm,t}^q) + \mu_{13} (-P_{n,t}^s + \bar{P}_{n,t}^s) \\ & + \mu_{14} (-Q_{n,t}^s + \bar{Q}_{n,t}^s) + \mu_{15} (-V_{n,t}^{\text{min}2} + V_{n,t}^{\text{sqe}}) + \mu_{16} (-V_{n,t}^{\text{sqe}} + V_{n,t}^{\text{max}2}) \end{aligned} \quad (36)$$

$$c_t^s + \lambda_1 - \mu_{13} = 0, c_t^s + \lambda_2 - \mu_{14} = 0, \sum_{n=1}^N -c_n^{\text{RN}} + \lambda_1 - \mu_1 + \mu_2 = 0, \sum_{n=1}^N -c_n^{\text{PEV}} - \lambda_1 - \mu_7 + \mu_8 = 0, \sum_{n=1}^N c_n^{\text{DG}} + \lambda_1 - \mu_3 + \mu_4 = 0 \quad (37)$$

$$\begin{aligned} & + \lambda_1 + \lambda_2 (\rho_n) - \mu_5 + \mu_6 = 0, \lambda_1 + \lambda_3 (2r_{nm}) - \mu_9 + \mu_{10} = 0, \lambda_2 - \lambda_3 (2x_{nm}) - \mu_{11} + \mu_{12} = 0, \lambda_3 + \mu_{15} - \mu_{16} = 0 \\ & \left(P_{n=\text{ref},t}^s + \sum_{n,m \in N} f_{nm,t}^p - \sum_{m,n \in N} f_{mn,t}^p + P_{n,t}^{\text{RN}} + P_{n,t}^{\text{DG}} - P_{n,t}^{\text{PEV}} - d_{n,t}^p \right) = 0, \left(Q_{n=\text{ref},t}^s + \sum_{n,m \in N} f_{nm,t}^q - \sum_{m,n \in N} f_{mn,t}^q + \rho_n P_{n,t}^{\text{DG}} - d_{n,t}^q \right) = 0 \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} & (V_{n,t}^{\text{sqe}} - V_{n,t}^{\text{sqe}} + 2(r_{nm} f_{nm,t}^p - x_{nm} f_{nm,t}^q)) = 0 \\ & (-P_{n,t}^{\text{RN}}) \leq 0, (P_{n,t}^{\text{RN}} - \bar{P}_{n,t}^{\text{RN}}) \leq 0, (-P_{n,t}^{\text{DG}}) \leq 0, (P_{n,t}^{\text{DG}} - \bar{P}_{n,t}^{\text{DG}}) \leq 0, (-P_{n,t}^{\text{PEV}}) \leq 0, (P_{n,t}^{\text{PEV}} - \bar{P}_{n,t}^{\text{PEV}}) \leq 0, (f_{nm,t}^p - \bar{f}_{nm,t}^p) \leq 0, \\ & (f_{nm,t}^p - \bar{f}_{nm,t}^p) \leq 0, (f_{nm,t}^q - \bar{f}_{nm,t}^q) \leq 0, (f_{nm,t}^q - \bar{f}_{nm,t}^q) \leq 0, (-P_{n,t}^s + \bar{P}_{n,t}^s) \leq 0, (-Q_{n,t}^s + \bar{Q}_{n,t}^s) \leq 0, (-V_{n,t}^{\text{min}2} + V_{n,t}^{\text{sqe}}) \leq 0, \\ & (-V_{n,t}^{\text{sqe}} + V_{n,t}^{\text{max}2}) \leq 0 \end{aligned} \quad (39)$$

$$\mu_i(x) \geq 0 \forall i = \{1, \dots, 14\} \quad (40)$$

$$\mu_i \leq m(1-\alpha_i) \quad \forall i = \{1, \dots, 14\}, \alpha_i \in \{0, 1\}, m = \text{big number} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} -P_{n,t}^{RN} \leq m\alpha_1, P_{n,t}^{RN} - \bar{P}_{n,t}^{RN} \leq m\alpha_2, -P_{n,t}^{DG} \leq m\alpha_3, P_{n,t}^{DG} - \bar{P}_{n,t}^{DG} \leq m\alpha_4, -P_{n,t}^{PEV} \leq m\alpha_5, P_{n,t}^{PEV} - \bar{P}_{n,t}^{PEV} \leq m\alpha_6, \\ f_{nm}^p - f_{nm,t}^p \leq m\alpha_7, f_{nm,t}^p - \bar{f}_{nm}^p \leq m\alpha_8, f_{nm}^q - f_{nm,t}^q \leq m\alpha_9, f_{nm,t}^q - \bar{f}_{nm}^q \leq m\alpha_{10}, -P_{n,t}^s + \bar{P}_n^s \leq m\alpha_{11}, -Q_{n,t}^s + \bar{Q}_n^s \leq m\alpha_{12}, \\ -V_n^{\min 2} + V_{n,t}^{sqe} \leq m\alpha_{13}, -V_{n,t}^{sqe} + V_n^{\max 2} \leq m\alpha_{14} \end{aligned} \quad (42)$$

در نهایت با بازنویسی مسئله پایینی به صورت معادله‌های کرش-کان-تاکر، مدل تک سطح مسئله پیشنهادی به صورت رابطه‌های (۴۳) الی (۴۵) می‌شود.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N c_n^g G_{n,t} + c_n^u u_{n,t} + c_n^s s_{n,t} + c_n^d v_{n,t} + c_n^r r_{n,t} \quad (43)$$

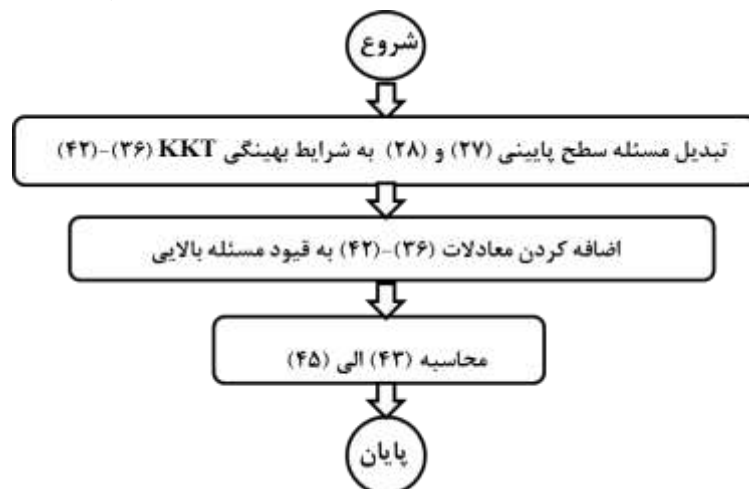
$$(36)-(42) \quad (44) \text{ s.t } (2)-(12) \quad (45)$$

در شکل (۲) به طور خلاصه فرایند حل مدل دوسطحی پیشنهادی نشان داده شده است. در بخش بعدی نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و صحت‌سنجی روش و مدل پیشنهادی نشان داده می‌شود. در این مقاله مقادیر غیرقطعی منابع تجدیدپذیر و همچنین ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به صورت رابطه‌های (۴۶) الی (۵۰) مدل‌سازی می‌شود. رابطه (۴۶) تابع توزیع نرمال منابع فتوولتائیک^{۱۶} است. رابطه (۴۷) توان واقعی فتوولتائیک را نشان می‌دهد. رابطه (۴۸) تابع توزیع نرمال برای ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد. همچنین رابطه (۴۹) مقدار واقعی توان شارژ ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد و در آخر رابطه (۵۰) تابع توزیع برای منابع بادی در شبکه است.

$$f_{pv,t} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(1-\mu_t^{pv})^2}{2\sigma^2}\right) \quad \forall t \in T \quad (46)$$

$$\bar{P}_{n,t}^{pv} = f_{pv,t} P_{pv,n} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (47)$$

$$f_{EV,t} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\frac{(x+24-\mu_t^{EV})^2}{2\sigma_t^2}\right), & 0 < x \leq \mu_t^{EV} - 12 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left(-\frac{(x-\mu_t^{EV})^2}{2\sigma_t^2}\right), & \mu_t^{EV} - 12 < x \leq 24 \end{cases} \quad (48)$$



شکل (۲): فرایند حل مسئله دو سطحی پیشنهادی
Figure (2): The proposed bi-level problem solving process

$$\bar{P}_{n,t}^{EV} = f_{EV,t} P_{EV,n} \quad \forall n \in N, t \in T \quad (49)$$

$$\bar{P}_{n,t}^{WD} = \begin{cases} 0, \tau < \tau_{ci} \\ \frac{P_{n,r} \tau^3}{\tau_r^3 - \tau_{ci}^3} - \frac{P_{n,r} \tau_{ci}^3}{\tau_r^3 - \tau_{ci}^3}, \tau_{ci} < \tau < \tau_r \\ P_{n,r}, \tau_r < \tau < \tau_{co} \\ 0, \tau > \tau_{co} \end{cases} \quad (50)$$

۴- شبیه‌سازی

در این بخش به‌منظور صحت‌سنجی مدل و روش پیشنهادی سه سیستم ترکیبی مختلف شامل سیستم انتقال ۶ باس، ۱۴ باس، ۳۰ باس و شبکه بزرگ ۱۱۸ باس به همراه چندین شبکه توزیع در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از لپ‌تاپ با پردازنده ۱/۸ گیگاهرتز با رم ۶ گیگابایت با استفاده از حل‌کننده گروبی نسخه ۹ با زبان جولیا پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، تفاوت‌های این مقاله با سایر مراجع در مدل‌سازی آورده شده است. برای مثال در مرجع [۲] بهینه‌سازی همزمان شبکه انتقال و توزیع ارائه شده است، اما مسئله قیود امنیتی، مسئله مشارکت واحدها، مدل تصادفی و منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است، شایان ذکر است که یک مدل پخش بار بهینه به‌جای مسئله مشارکت واحدها به عنوان مسئله شبکه انتقال در نظر گرفته شده است.

۴-۱- سیستم اول

همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، شبکه انتقال دارای ۶ باس و ۹ خط است، دارای ۴ واحد نیروگاهی است و در باس‌های ۲ و ۳ شبکه انتقال، دو شبکه توزیع مدل‌سازی شده است. شبکه توزیع پیشنهادی بر روی باس ۳ شبکه انتقال دارای ۱۴ باس و ۱۳ خط است. روی باس‌های ۵ و ۱۲ پارکینگ شارژ خودروهای برقی و روی باس‌های ۶ و ۱۴ تولیدپراکنده تجدیدپذیر است. در باس‌های ۱۰ و ۱۱ به‌ترتیب واحد فتوولتائیک و بادی وجود دارد. شبکه توزیع بعدی که روی باس ۲ شبکه انتقال قرار دارد، دارای ۸ باس و ۷ خط است، در باس ۳ تولیدپراکنده فسیلی، در باس ۴ ایستگاه شارژ خودروهای برقی و در باس‌های ۵ و ۷ به‌ترتیب واحد فتوولتائیک و بادی قرار دارد. برای تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی و تاثیر تغییرات هر دو شبکه انتقال و توزیع بر روی همدیگر چندین سناریو در نظر گرفته شده است که به شرح زیر است.

سناریو اول- بهره‌برداری بدون تغییرات در هر دو شبکه.

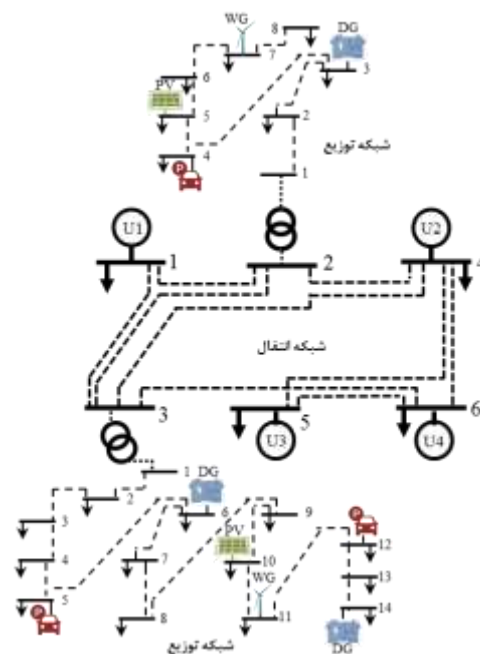
سناریو دوم- تغییرات در شبکه‌های توزیع، بدون در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر.

همان‌طور که از جدول (۲) مشاهده می‌شود نتایج مربوط به دو سناریو در نظر گرفته شده نشان داده شده است. در سناریو اول هیچگونه تغییراتی در دو شبکه در نظر گرفته شده اعمال نمی‌شود. روشن است که در این سناریو مقدار تابع هدف سطح بالایی برابر ۴۱۳۱۹ دلار و مقدار تابع هدف سطح پایینی برابر ۱۹۰۵ 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 مگاوات برای ۲۴ ساعت شده است. شایان ذکر است که در این سیستم دوره زمانی ۲۴ ساعته برای روزپیشرو برای تجزیه و تحلیل انتخاب شده است. مقدار توان اکتیو تولید شده توسط واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال برای ۲۴ ساعت برابر با ۱۸۲/۵ مگاوات شده است. با در نظر گرفتن k برابر یک برای قیود امنیتی، همان‌طور که مشاهده می‌شود، خط ۹ ساعات ۱ الی ۶ و ۲۰ الی ۲۴ قطع است، خط ۱ ساعات ۷ الی ۱۳ و در ساعت ۱۸ قطع است، خط ۲ ساعت ۱۵، خط ۴ ساعت ۱۶ و خط ۵ ساعت ۱۷ و ۱۹ قطع است. ژنراتور ۴ نیز در ساعت ۱۴ قطع است.

برای نشان دادن تاثیر مدل‌سازی شبکه‌های توزیع بر شبکه انتقال و صحت‌سنجی روش و مدل پیشنهادی نتایج سناریو دوم نیز ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۲) در سناریو دوم مشخص است، با حذف منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و منابع فسیلی از شبکه‌های توزیع تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر شبکه انتقال گذاشته است. مشاهده می‌شود که تابع هدف مسئله بالایی از ۴۱۳۱۹ به ۴۲۴۲۷ دلار افزایش پیدا کرده است. این در حالی است که تنها فقط دو پست توزیع در این سیستم مدل شده است،

بدیهی است با مدل‌سازی بیشتر پست‌های توزیع و اعمال تغییرات بر روی آن‌ها تاثیرات بیشتری بر روی شبکه انتقال مشاهده خواهد شد و مدل نیز دقیق‌تر می‌شود. اما باید این نکته را توجه نمود که با افزایش مدل‌سازی شبکه توزیع تعداد متغیرهای مسئله هم اضافه شده و باتوجه به آن حل مسئله هم طولانی‌تر خواهد و به سیستم‌های کامپیوتری قدرتمندی برای حل نیاز خواهد شد. مطابق جدول (۲) در سناریو دوم تابع هدف مسئله پایینی حدود ۲۰ درصد نسبت به سناریو اول افزایش پیدا کرد. در اینجا بخوبی تاثیر منابع تولید توان در شبکه توزیع مشاهده می‌شود. میزان توان خریداری شده در پست‌های توزیع برای ۲۴ ساعت در سناریو دوم برابر ۸/۷۶ و ۵۱/۴۷ مگاوات شده است. به همین ترتیب نیز مقدار توان تولید شده توسط واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال از ۱۸۲/۵ به ۱۸۹/۲۲ مگاوات افزایش پیدا کرد. با بررسی و مشاهده جدول (۲) بخوبی می‌توان تاثیر و عملکرد روش و مدل پیشنهاد شده را اثبات نمود.

شکل (۴) نشان‌دهنده ولتاژ شبکه‌های توزیع ۱۴ و ۸ باس را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۵) نشان‌دهنده توان خریداری شده در هر ساعت در هر یک از شبکه‌های توزیع را نشان می‌دهد. در شکل (۶) توان منابع تجدیدپذیر و همچنین توان ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی را در هر ساعت پس از شبیه‌سازی در شبکه‌های توزیع نشان می‌دهد.



شکل (۳): دیاگرام سیستم مشترک پیشنهادی

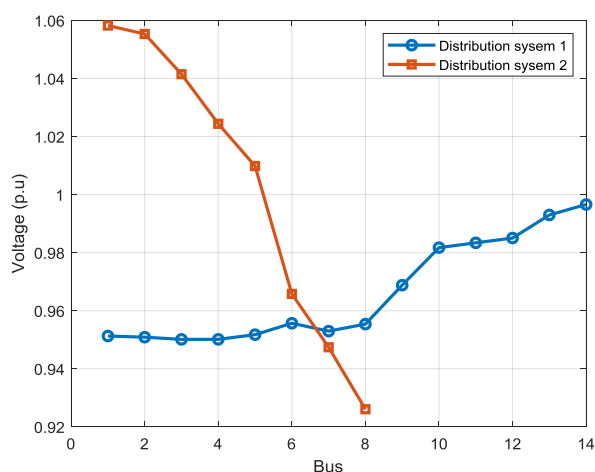
Figure (3): Diagram of the proposed joint system

Table (2): The results of the simulation of the first system in a 24-hour period
جدول (۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم اول در یک دوره ۲۴ ساعته

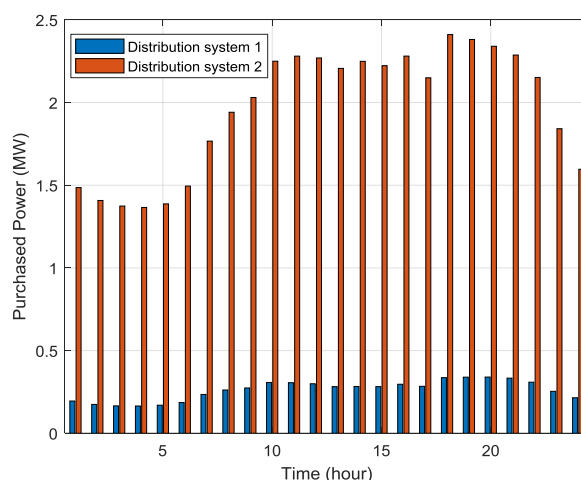
سناریو دوم	سناریو اول	
۴۲۴۲۷	۴۱۳۱۹	مقدار تابع هدف مسئله بالایی (دلار)
۲۱۷۹	۱۹۰۵	مقدار تابع هدف مسئله پایینی (دلار)
۸/۷۶	۶/۳	توان پست شبکه توزیع اول (مگاوات)
۵۱/۴۷	۴۷	توان پست شبکه توزیع دوم (مگاوات)
۱۸۹/۲۲	۱۸۲/۵	کل توان شبکه انتقال (مگاوات)
(۱-۲۴)۱	(۱۷، ۱۹)۵، (۱۶)۴، (۱۵)۳، (۱۸، ۷-۱۳)۱، (۲۰-۲۴، ۱-۶)۹	خروج خط (زمان)
-	(۱۴)۴	خروج واحد (زمان)

۴-۲- سیستم دوم

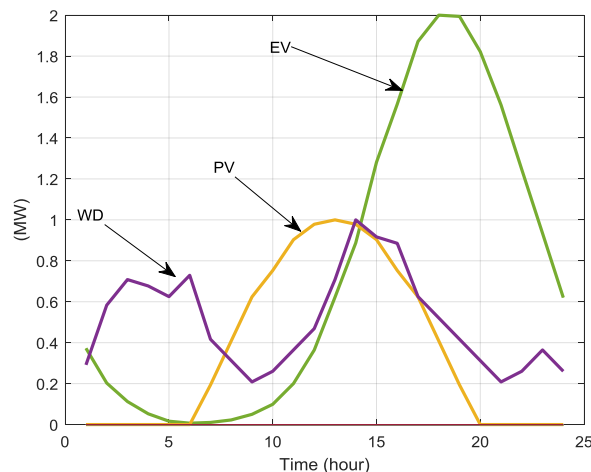
سیستم دوم شامل، شبکه انتقال ۱۴ باس است، که ۴ شبکه توزیع در آن مدل‌سازی شده است. شبکه توزیع اول الی چهارم به‌ترتیب روی باس‌های ۳، ۵، ۴ و ۹ شبکه انتقال قرار دارند. شبکه توزیع اول که روی باس ۳ شبکه انتقال قرار دارد دارای ۱۰ باس است، همچنین دارای ۳ تولید پراکنده در باس‌های ۲، ۶ و ۱۰ است. در این شبکه توزیع نیز منابع فتوولتائیک در باس‌های ۲، ۵ و ۱۰ قرار دارد. همچنین منابع بادی نیز در باس‌های ۳، ۶ و ۹ مدل‌سازی شده است. ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱ و ۵ قرار دارد. منبع بادی در باس ۳ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱ و ۵ است. شبکه توزیع سوم که روی باس ۴ شبکه انتقال قرار دارد، از ۱۵ باس و ۱۴ خط تشکیل شده است. سه واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۲، ۷ و ۱۰ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس ۱ و ۵، ۸، ۱۱ و ۱۴ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۳، ۸ و ۱۱ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ است. شبکه توزیع چهارم که روی باس ۹ شبکه انتقال قرار دارد، از ۳۳ باس و ۳۲ خط تشکیل شده است. سه واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۶، ۱۴ و ۳۲ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۸ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۱۱، ۱۹ و ۲۶ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۵، ۱۲، ۱۷، ۲۴ و ۳۳ است.



شکل (۴): ولتاژ باس‌های شبکه‌های توزیع در ۲۴ ساعت در نظر گرفته شده در سناریو اول
Figure (4): Bus voltage of distribution networks in 24 hours considered in the first scenario



شکل (۵): توان خریداری شده شبکه‌های توزیع در ۲۴ ساعت در سناریو اول
Figure (5): Purchased power of distribution networks in 24 hours in the first scenario



شکل (۶): توان خروجی منابع تجدیدپذیر و ایستگاه شارژ خودروهای برقی در ۲۴ ساعت در سناریو اول

Figure (6): The output power of renewable resources and electric vehicle charging stations in 24 hours in the first scenario

در جدول (۳) نتایج سیستم دوم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همانند سیستم اول با حذف منابع در شبکه‌های توزیع تابع هدف در دو مسئله بالایی و پایینی افزایش پیدا کرده است. در سناریو اول هیچگونه تغییری در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شده اعمال نمی‌شود. روشن است که در این سناریو مقدار تابع هدف سطح بالایی برابر ۱۲۱۱۳۰ دلار و مقدار تابع هدف سطح پایینی برابر ۷۲۳۵ 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 ۱۷، ۵/۶، ۲۳/۱ و ۱۰/۶ مگاوات است. مقدار توان اکتیو تولید شده توسط واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال ۱۴ باس برای ۲۴ ساعت برابر با ۱۴۱۳ مگاوات شده است. به دلیل افزایش مدل‌سازی شبکه‌های توزیع و همچنین شبکه انتقال بزرگتر مدت زمان حل برابر با ۱۵۱۲۱ ثانیه شده است. برای نشان دادن تاثیر مدل‌سازی شبکه‌های توزیع بر شبکه انتقال و صحت‌سنجی روش و مدل پیشنهادی نتایج سناریو دوم نیز ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۳) در سناریو دوم مشاهده می‌شود، با حذف منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و منابع فسیلی از شبکه‌های توزیع تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر شبکه انتقال گذاشته است. مشاهده می‌شود که تابع هدف مسئله بالایی از ۱۲۱۱۳۰ به ۱۲۱۵۷۰ دلار افزایش پیدا کرده است. مطابق جدول (۳) در سناریو دوم تابع هدف مسئله پایینی حدود ۵۵ درصد نسبت به سناریو اول افزایش پیدا کرد. در اینجا به خوبی تاثیر تغییرات در شبکه توزیع بر روی اهداف مسئله دوسطحی پیشنهادی مشاهده می‌شود.

Table (3): Simulation results of the second system

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی سیستم دوم

سناریو اول	سناریو دوم	
۱۲۱۱۳۰	۱۲۱۵۷۰	مقدار تابع هدف مسئله بالایی (دلار)
۷۲۳۵	۱۱۳۶۸	مقدار تابع هدف مسئله پایینی (دلار)
۱۷	۲۵/۲	توان پست شبکه توزیع اول (مگاوات)
۵/۶	۱۲/۹	توان پست شبکه توزیع دوم (مگاوات)
۲۳/۱	۳۱	توان پست شبکه توزیع سوم (مگاوات)
۱۰/۶	۱۱/۸	توان پست شبکه توزیع چهارم (مگاوات)
۱۴۱۳	۱۴۳۷/۴	کل توان شبکه انتقال (مگاوات)
۶(۱-۶)، ۲۴(۹-)	۶(۱-۲)، ۲۴(۴-۶)، ۲۴(۹-)	خروج خط (زمان)
۱۴(۷-۸)	۱۴(۳)، ۱۴(۷-۸)	خروج واحد (زمان)
۱۵۱۲۱	۱۴۹۸۰	مدت زمان اجرا (ثانیه)

Table (4): Simulation results of the third system

جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی سیستم سوم

سناریو اول	سناریو دوم	
۲۶۳۳۲۶	۲۶۵۸۷۴	مقدار تابع هدف مسئله بالایی (دلار)
۱۹۸۸۱	۱۲۰۶۹	مقدار تابع هدف مسئله پایینی (دلار)
۲۱	۲۵	توان پست شبکه توزیع اول (مگاوات)
۲۶	۳۲	توان پست شبکه توزیع دوم (مگاوات)
۲۹/۱	۳۴/۷	توان پست شبکه توزیع سوم (مگاوات)
۱۶/۴	۱۹/۵	توان پست شبکه توزیع چهارم (مگاوات)
۱۲	۱۴/۵	توان پست شبکه توزیع پنجم (مگاوات)
۱۴/۵	۱۷/۹	توان پست شبکه توزیع ششم (مگاوات)
۲۴۹۸	۲۵۲۳	کل توان شبکه انتقال (مگاوات)
۴۱ (۱-۱۲)، ۴۱ (۱۵-۲۴)	۴۱ (۱-۳)، ۴۱ (۷-۱۳)، ۴۱ (۱۶-۲۳)	خروج خط (زمان)
۵ (۱۳-۱۴)	۵ (۴-۶)، ۵ (۱۴-۱۵)، ۵ (۲۴)	خروج واحد (زمان)
۲۶۵۴۸	۲۵۴۱۲	مدت زمان اجرا (ثانیه)

میزان توان خریداری شده در پست‌های توزیع برای ۲۴ ساعت در سناریو دوم به ترتیب برابر با ۲۵/۲، ۱۲/۹، ۳۱ و ۱۱/۸ مگاوات است. به همین ترتیب نیز مقدار توان تولید شده توسط واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال ۱۴ باس از ۱۴۱۳ به ۱۴۳۷/۴ مگاوات افزایش پیدا کرد. همان‌طور که از جدول‌های (۲) و (۳) مشاهده شد، مدل و روش پیشنهادی عملکردی مناسب برای سیستم‌های توزیع و انتقال متفاوت دارد.

۴-۳- سیستم سوم

سیستم سوم شامل، شبکه انتقال ۳۰ باس است، که ۶ شبکه توزیع در آن مدل‌سازی شده است. شبکه توزیع اول الی ششم به ترتیب روی باس‌های ۵، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۲۷ و ۳۰ شبکه انتقال قرار دارند. شبکه توزیع اول که روی باس ۵ شبکه انتقال قرار دارد، دارای ۱۳ باس است، همچنین دارای ۲ تولیدپراکنده در باس‌های ۷ و ۹ است. در این شبکه توزیع نیز منابع فتوولتائیک در باس‌های ۳، ۵ و ۸ قرار دارد. همچنین منابع بادی نیز در باس‌های ۲، ۳ و ۴ مدل‌سازی شده است. ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در نظر گرفته شده است. شبکه توزیع دوم که روی باس ۱۵ شبکه انتقال قرار دارد، از ۱۴ باس و ۱۳ خط تشکیل شده است. یک واحد تولیدپراکنده روی باس ۱۴ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰ و ۱۱ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس ۵ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۶ و ۹ است. شبکه توزیع سوم که روی باس ۲۰ شبکه انتقال قرار دارد، از ۲۲ باس و ۲۱ خط تشکیل شده است. ۳ واحد تولیدپراکنده روی باس‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۸ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰ و ۲۰ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۶، ۱۴ و ۲۲ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۹، ۱۳ و ۱۸ است. شبکه توزیع چهارم که روی باس ۲۵ شبکه انتقال قرار دارد، از ۲۵ باس و ۲۴ خط تشکیل شده است. ۲ واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۶ و ۱۴ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۱ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۱۱، ۱۹ و ۲۴ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۶ است. شبکه توزیع پنجم که روی باس ۲۷ شبکه انتقال قرار دارد، از ۳۳ باس و ۳۲ خط تشکیل شده است. ۳ واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۳۰، ۳۱ و ۳۲ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۱۴، ۲۰ و ۲۹ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۶، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ است. شبکه توزیع ششم که روی باس ۳۰ شبکه انتقال قرار دارد، از ۶۹ باس و ۶۸ خط تشکیل شده است. ۳ واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۴۰، ۵۰ و ۶۰ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس ۵۵، ۵۶ و ۵۹ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۳۴، ۴۴ و ۶۴ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز

روی باس‌های ۶، ۲۰، ۳۵ و ۴۹ است. در جدول (۴) نتایج سیستم سوم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود همانند سیستم اول و دوم با حذف منابع در شبکه‌های توزیع تابع هدف در دو مسئله بالایی و پایینی افزایش پیدا کرده است. در سناریو اول هیچگونه تغییراتی در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شده اعمال نمی‌شود. روشن است که در این سناریو مقدار تابع هدف سطح بالایی برابر ۲۶۳۳۲۶ دلار و مقدار تابع هدف سطح پایینی برابر ۱۹۸۸۱ دلار شده است. به همین ترتیب مقدار توان اکتیو خریداری شده توسط پست شبکه توزیع اول الی ششم از شبکه انتقال به ترتیب برابر با ۲۱، ۲۶، ۲۹، ۱۶/۴، ۱۲ و ۱۴/۵ مگاوات است. مقدار توان اکتیو تولید شده توسط واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال ۳۰ باس برای ۲۴ ساعت برابر با ۲۴۹۸ مگاوات شده است. به دلیل افزایش مدل‌سازی شبکه‌های توزیع و همچنین شبکه انتقال بزرگ‌تر مدت زمان حل برابر با ۲۶۵۴۸ ثانیه شده است. برای نشان دادن تاثیر مدل‌سازی شبکه‌های توزیع بر شبکه انتقال و صحت‌سنجی روش و مدل پیشنهادی نتایج سناریو دوم نیز ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۴) در سناریو دوم مشاهده می‌شود، با حذف منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و منابع فسیلی از شبکه‌های توزیع تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر شبکه انتقال گذاشته است. مشاهده می‌شود که تابع هدف مسئله بالایی از ۲۶۳۳۲۶ به ۲۶۵۸۷۴ دلار افزایش پیدا کرده است.

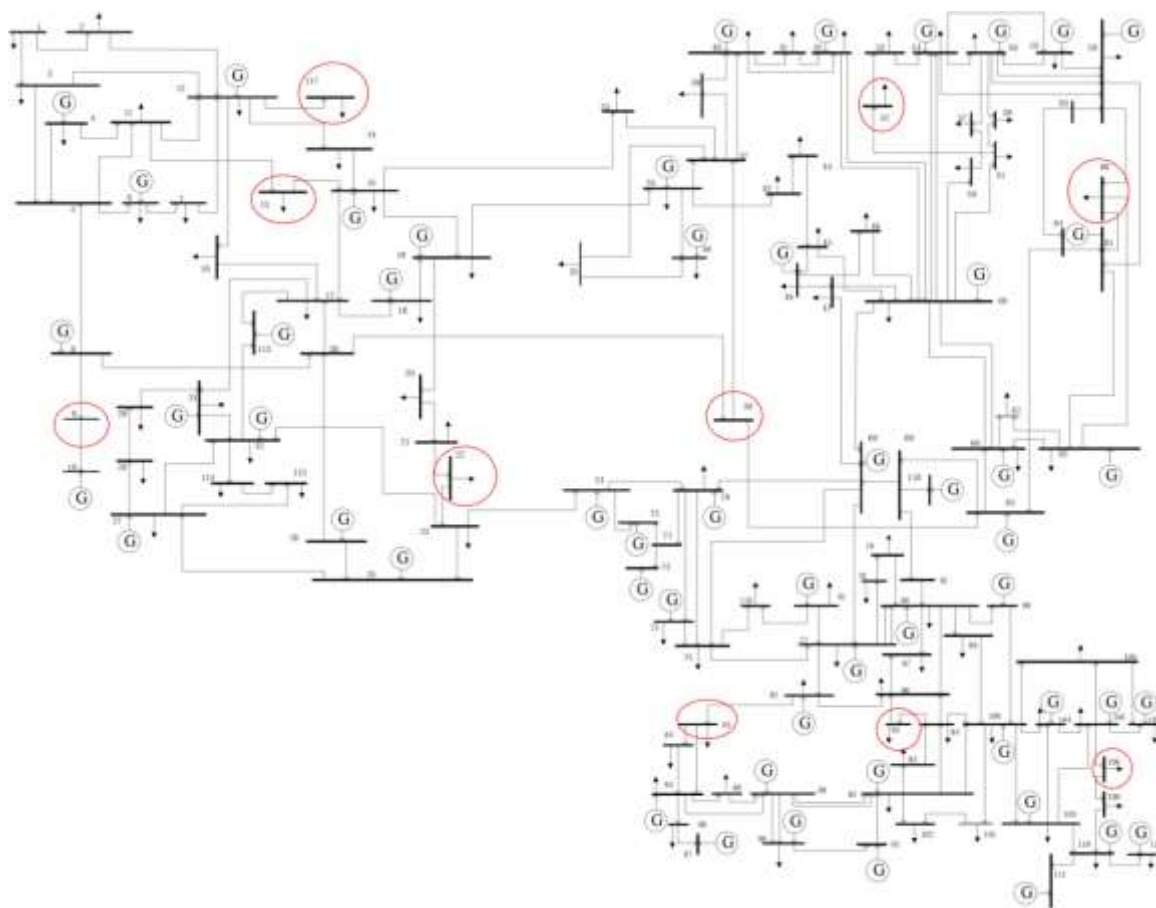
۴-۴- سیستم چهارم

سیستم چهارم شامل، شبکه بزرگ انتقال ۱۱۸ باس است، که ۱۰ شبکه توزیع در آن مدل‌سازی شده است. شکل (۷) دیاگرامی از شبکه بزرگ ۱۱۸ باس به همراه شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. دایره‌های قرمز رنگ مشخص شده در شکل (۷) مدل‌سازی شبکه‌های توزیع در آن باس شبکه انتقال را نشان می‌دهد. شبکه توزیع اول الی دهم به ترتیب روی باس‌های ۹، ۱۳، ۲۲، ۳۸، ۵۲، ۶۰، ۸۳، ۹۵، ۱۰۸ و ۱۱۷ شبکه انتقال قرار دارند. شبکه توزیع اول که روی باس ۹ شبکه انتقال قرار دارد دارای ۱۳ باس است، همچنین دارای ۲ تولیدپراکنده در باس‌های ۷ و ۹ است. در این شبکه توزیع نیز منابع فتوولتائیک در باس‌های ۳، ۵ و ۸ قرار دارد. همچنین منابع بادی نیز در باس‌های ۲، ۳ و ۴ مدل‌سازی شده است.

ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ در نظر گرفته شده است. شبکه توزیع دوم که روی باس ۱۳ شبکه انتقال قرار دارد، از ۱۴ باس و ۱۳ خط تشکیل شده است. یک واحد تولیدپراکنده روی باس ۱۴ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰ و ۱۱ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس ۵ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۶ و ۹ است. شبکه توزیع سوم که روی باس ۲۲ شبکه انتقال قرار دارد، از ۲۲ باس و ۲۱ خط تشکیل شده است. ۳ واحد تولیدپراکنده روی باس‌های ۱۴، ۱۶ و ۱۸ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰ و ۲۰ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۶، ۱۴ و ۲۲ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۶، ۹، ۱۳ و ۱۸ است. شبکه توزیع چهارم که روی باس ۳۸ شبکه انتقال قرار دارد، از ۲۵ باس و ۲۴ خط تشکیل شده است. ۲ واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۶ و ۱۴ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۱ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۱۱، ۱۹ و ۲۴ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۸، ۹، ۱۰ و ۱۶ است. شبکه توزیع پنجم که روی باس ۵۲ شبکه انتقال قرار دارد، از ۳۳ باس و ۳۲ خط تشکیل شده است.

سه واحد تولیدپراکنده روی باس‌های ۳۰، ۳۱ و ۳۲ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۵، ۱۵ و ۲۵ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۱۴، ۲۰ و ۲۹ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۶، ۱۲، ۱۵ و ۱۸ است. شبکه توزیع ششم که روی باس ۶۰ شبکه انتقال قرار دارد، از ۶۹ باس و ۶۸ خط تشکیل شده است.

سه واحد تولید پراکنده روی باس‌های ۴۰، ۵۰ و ۶۰ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس ۵۵، ۵۶ و ۵۹ مدل‌سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۳۴، ۴۴ و ۶۴ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۶، ۲۰، ۳۵ و ۴۹ است. شبکه توزیع هفتم که روی باس ۸۳ شبکه انتقال قرار دارد دارای ۱۰ باس است، همچنین دارای ۳ تولید پراکنده در باس‌های ۲، ۶ و ۱۰ است. در این شبکه توزیع نیز منابع فتوولتائیک در باس‌های ۲، ۵ و ۱۰ قرار دارد. همچنین منابع بادی نیز در باس‌های ۳، ۶ و ۹ مدل‌سازی شده است.



شکل (۷): دیاگرام سیستم یکپارچه چهارم

Figure (7): Diagram of the fourth integrated system

Table (5): Simulation results of the fourth system

جدول (۵): نتایج شبیه‌سازی سیستم چهارم

سناریو اول	سناریو دوم	
۷۵۲۹۶۲	۷۷۸۲۰۱	مقدار تابع هدف مسئله بالایی (دلار)
۲۸۹۲۱	۳۱۲۶۲	مقدار تابع هدف مسئله پایینی (دلار)
۱۵	۲۰	توان پست شبکه توزیع اول (مگاوات)
۳۱	۳۶	توان پست شبکه توزیع دوم (مگاوات)
۱۶	۲۰	توان پست شبکه توزیع سوم (مگاوات)
۱۱	۱۷	توان پست شبکه توزیع چهارم (مگاوات)
۹	۱۳	توان پست شبکه توزیع پنجم (مگاوات)
۱۳	۱۶	توان پست شبکه توزیع ششم (مگاوات)
۱۲	۱۹	توان پست شبکه توزیع هفتم (مگاوات)
۴	۹	توان پست شبکه توزیع هشتم (مگاوات)
۲۸	۳۲	توان پست شبکه توزیع نهم (مگاوات)
۱۱	۱۲	توان پست شبکه توزیع دهم (مگاوات)
۴۳۲۰	۴۳۶۳	کل توان شبکه انتقال (مگاوات)
۱۵۲ (۱-۵)، ۱۶۰ (۶-۹)، ۱۶۰ (۱۴-۲۴)	۱۵۲ (۱۱-۲۰)، ۱۶۰ (۱-۱۰)	خروج خط (زمان)
۳۰ (۱۰-۱۳)	۳۰ (۲۱-۲۴)	خروج واحد (زمان)
۵۲۹۸۴	۵۰۸۹۸	مدت زمان اجرا (ثانیه)

Table (6): Comparison of the proposed method with other methods

جدول (۶): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر

روش پیشنهادی	روش تجزیه	روش تکاملی
زمان حل سیستم اول (ثانیه)	۱۲۶۴	۲۱۰۹
زمان حل سیستم دوم (ثانیه)	۱۵۱۲۱	۲۲۹۴۰
زمان حل سیستم سوم (ثانیه)	۲۶۵۴۸	۳۸۰۶۹
زمان حل سیستم چهارم (ثانیه)	۵۲۹۸۴	۷۴۱۹۰
تابع هزینه سیستم اول (دلار)	۴۱۳۱۹	۴۱۷۸۸
تابع هزینه سیستم دوم (دلار)	۱۲۱۱۳۰	۱۲۲۰۹۰
تابع هزینه سیستم سوم (دلار)	۲۶۳۳۲۶	۲۶۴۳۶۲
تابع هزینه سیستم چهارم (دلار)	۷۵۲۹۶۲	۷۵۴۸۹۷

ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱، ۵ و ۱۰ در نظر گرفته شده است. شبکه توزیع هشتم که روی باس ۹۵ شبکه انتقال قرار دارد، از ۵ باس و ۴ خط تشکیل شده است. یک واحد تولیدپراکنده روی باس ۲ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱ و ۵ مدل سازی شده است. منبع بادی در باس ۳ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱ و ۵ است. شبکه توزیع نهم که روی باس ۱۰۸ شبکه انتقال قرار دارد، از ۱۵ باس و ۱۴ خط تشکیل شده است. ۳ واحد تولیدپراکنده روی باس‌های ۲، ۷ و ۱۰ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱ و ۵، ۸، ۱۱ و ۱۴ مدل سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۳، ۸ و ۱۱ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۱، ۵، ۶، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ است. شبکه توزیع دهم که روی باس ۱۱۷ شبکه انتقال قرار دارد، از ۳۳ باس و ۳۲ خط تشکیل شده است. ۳ واحد تولیدپراکنده روی باس‌های ۶، ۱۴ و ۳۲ قرار دارد، همچنین منابع فتوولتائیک روی باس‌های ۱۰، ۲۰ و ۲۸ مدل سازی شده است. منبع بادی در باس‌های ۱۱، ۱۹ و ۲۶ قرار دارد و ایستگاه شارژ خودروهای برقی نیز روی باس‌های ۵، ۱۲، ۱۷، ۲۴ و ۳۳ است. در جدول (۵) نتایج سیستم یکپارچه چهارم ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود همانند سیستم اول و دوم و سوم در این سیستم بزرگ هم با حذف منابع در شبکه‌های تابع هدف در دو مسئله بالایی و پایینی افزایش پیدا کرده است. در سناریو اول هیچگونه تغییراتی در شبکه‌های توزیع در نظر گرفته شده اعمال نمی شود. روشن است که در این سناریو مقدار تابع هدف سطح بالایی برابر ۷۵۲۹۶۲ دلار و مقدار تابع هدف سطح پایینی برابر ۲۸۹۲۱ دلار شده است. به همین ترتیب مقدار توان اکتیو خریداری شده توسط پست شبکه توزیع اول الی دهم از شبکه انتقال به ترتیب برابر با ۱۵، ۳۱، ۱۶، ۱۱.۱، ۹، ۱۳، ۱۲، ۴، ۲۸ و ۱۱ مگاوات است. مقدار توان اکتیو تولید شده توسط واحدهای نیروگاهی شبکه انتقال ۱۱۸ باس برای ۲۴ ساعت برابر با ۴۳۲۰ مگاوات شده است. به دلیل افزایش مدل سازی شبکه‌های توزیع و همچنین شبکه انتقال بزرگ‌تر مدت زمان حل برابر با ۵۲۹۸۴ ثانیه شده است. برای نشان دادن تاثیر مدل سازی شبکه‌های توزیع بر شبکه انتقال و صحت سنجی روش و مدل پیشنهادی نتایج سناریو دوم نیز ارائه شده است. همان طور که در جدول (۵) در سناریو دوم مشاهده می شود، با حذف منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و منابع فسیلی از شبکه‌های توزیع تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر شبکه انتقال گذاشته است. مشاهده می شود که تابع هدف مسئله بالایی از ۷۵۲۹۶۲ به ۷۷۸۲۰۱ دلار افزایش پیدا کرده است.

۴-۵- مقایسه

در این بخش روش پیشنهادی با روش تجزیه مورد مقایسه قرار گرفته است. همان طور که در بخش سوم ارائه شد، روش پیشنهادی این مقاله برای حل مسئله دو سطحی، بازنویسی مسئله پایینی به صورت شرایط کروش-کان-تاکر است. همان طور که می دانیم روش‌های بسیاری برای حل مسائل دو سطحی وجود دارد، که یکی از این آن‌ها روش تجزیه [۲۳] و دیگری الگوریتم‌های تکاملی [۲۶] است. جدول (۶) مقایسه‌ای بین مدت زمان حل مسئله پیشنهادی و تابع هزینه در سیستم‌های مختلف اجرا شده با روش پیشنهادی، روش تجزیه و روش تکاملی را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود روش

پیشنهادی نزدیک به ۴۰ درصد سریع‌تر از روش تجزیه است، که این نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی است. همچنین جواب‌های تابع هزینه نزدیک به ۲/۵ درصد در روش پیشنهادی از روش تکاملی بهتر شده است. با تجزیه و تحلیل جدول (۶) مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی هم از نظر مدت زمان حل و هم جواب‌های به دست آمده برتری قابل توجهی نسبت به روش‌های مانند تجزیه و تکاملی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی برای بهره‌برداری هماهنگ بین شبکه‌های انتقال و توزیع یکپارچه ارائه شد. مدل پیشنهادی یک مدل بهینه‌سازی دو سطحی که به عنوان یک مسئله سطح بالایی و سطح پایینی فرموله شده است. مسئله مشارکت واحدها در شبکه انتقال به عنوان یک مسئله سطح بالایی برای کاهش هزینه‌های بهره‌برداری و کاهش بار به عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و مسئله بهره‌برداری بهینه در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن انرژی‌های تجدیدپذیر به همراه ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی و منابع فسیلی به عنوان یک مدل خطی برای کاهش هزینه خرید توان از شبکه انتقال و افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و توان شارژ ایستگاه‌های خودروهای برقی در نظر گرفته شد. مدل خطی تکنیک شرایط کروش-کوهن-تاکر برای تبدیل مسئله دو سطحی به یک مسئله تک سطحی پیشنهاد شد که می‌تواند زمان حل مسئله را به‌طور قابل توجه کاهش دهد. چندین شبکه و سناریو مختلف برای اعتبارسنجی مدل و روش پیشنهادی در نظر گرفته شد که نتایج شبیه‌سازی کارایی مدل و روش پیشنهادی را در در نظر گرفتن عملکرد هماهنگ شبکه‌های یکپارچه انتقال و توزیع ثابت کرد. در نهایت برای نشان دادن برتری روش پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌های حل مدل دو سطحی، روش پیشنهادی با الگوریتم‌های تجزیه مقایسه شد که نشان‌دهنده برتری روش پیشنهادی از نظر زمان اجرا و هم‌گرایی سریع‌تر بود.

References

مراجع

- [1] Z. Chen, Z. Li, C. Guo, J. Wang, Y. Ding, "Fully distributed robust reserve scheduling for coupled transmission and distribution systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 36, no. 1, pp. 169-182, Jan. 2021 (doi: 10.1109/TPWRS.2020.3006153).
- [2] C. Lin, W. Wu, M. Shahidehpour, "Decentralized ac optimal power flow for integrated transmission and distribution grids", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 11, no. 3, pp. 2531-2540, May. 2020 (doi: 10.1109/TSG.2019.2957142).
- [3] R. Roofegari nejad, W. Sun, A. Golshani, "Distributed restoration for integrated transmission and distribution systems with DERs", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 34, no. 6, pp. 4964-4973, Nov. 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.2019.2920123).
- [4] Z. Shen, M. Liu, L. Xu, W. Lu, "Coordinated scheduling of integrated transmission and distribution systems using an improved Lipschitz dynamic programming approach", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 140, Article Number: 108076, Sept. 2022 (doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108076).
- [5] S. Yin, J. Wang, H. Gangammanavar, "Stochastic market operation for coordinated transmission and distribution systems", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 12, no. 4, pp. 1996-2007, Oct. 2021 (doi: 10.1109/TSTE.2021.3076037).
- [6] J. Zhao, H. Wang, Y. Liu, Q. Wu, Z. Wang, Y. Liu, "Coordinated restoration of transmission and distribution system using decentralized scheme", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 34, no. 5, pp. 3428-3442, Sept. 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.2019.2908449).
- [7] D. Zhang, S. Miao, C. Li, Z. Zheng, W. Yang, J. Han, Y. Li, "A novel once-data-exchange method for solving transmission and distribution networks coordinated ACOPF model", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 123, Article Number: 106339, Dec. 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106339).
- [8] K. Tang, S. Dong, Y. Liu, L. Wang, Y. Song, "Asynchronous distributed global power flow method for transmission-distribution coordinated analysis considering communication conditions", Electric Power Systems Research, vol. 182, Article Number: 106256, May. 2020 (doi: 10.1016/j.epr.2020.106256).
- [9] P. Lan, G. Wu, X. Shen, L. Lv, J. Liu, H. Zhao, S. Jawad, J. Liu, "Distributed optimal scheduling for coupled transmission-distribution integrated electricity-gas system", Electric Power Systems Research, Volume 206, Article Number: 107759, May. 2022 (doi: 10.1016/j.epr.2021.107759).

- [10] W. Tang, W. Zhao, T. Qian, B. Zhao, Z. Lin, Y. Xin, "Learning-accelerated asynchronous decentralized optimization for integrated transmission and distribution systems over lossy networks", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Article Number: 100724, Sept. 2022 (doi: 10.1016/j.segan.2022.100724).
- [11] H. Chen, L. Fu, R. Zhang, C. Lin, T. Jiang, X. Li, G. Li, "Local energy market clearing of integrated ADN and district heating network coordinated with transmission system", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Volume 125, Article Number: 106522, Feb. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106522).
- [12] Z. Li, Q. Guo, H. Sun, J. Wang, "Coordinated transmission and distribution AC optimal power flow", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1228-1240, March. 2018 (doi: 10.1109/TSG.2016.2582221).
- [13] C. Lin, W. Wu, M. Shahidehpour, Y. Guo, B. Wang, "A non-iterative decoupled solution of the coordinated robust OPF in transmission and distribution networks with variable generating units", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 11, no. 3, pp. 1579-1588, July. 2020 (doi: 10.1109/TSTE.2019.2931908).
- [14] K. Tang, S. Dong, C. Zhu, Y. Song, "Affine arithmetic-based coordinated interval power flow of integrated transmission and distribution networks", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4116-4132, Sept. 2020 (doi: 10.1109/TSG.2020.2991210).
- [15] T. Zhao, A. Parisio, J. V. Milanović, "Distributed control of battery energy storage systems in distribution networks for voltage regulation at transmission-distribution network interconnection points", *Control Engineering Practice*, vol. 119, Article Number: 104988, Feb, 2022 (doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104988).
- [16] A. Nawaz, H. Wang, "Distributed stochastic security constrained unit commitment for coordinated operation of transmission and distribution system", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 708-718, July. 2021 (doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.02150).
- [17] A. Olson, A. Mahone, E. Hart, J. Hargreaves, R. Jones, N. Schlag, G. Kwok, N. Ryan, R. Orans, R. Frowd, "Halfway there: can california achieve a 50% renewable grid?", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 41-52, Aug. 2015 (doi: 10.1109/MPE.2015.2423211).
- [18] H. Jokar, B. Bahmani-Firouzi, M. Simab, "Bilevel model for security-constrained and reliability transmission and distribution substation energy management considering large-scale energy storage and demand side management", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2617-2629, Nov. 2022 (doi: 10.1016/j.egy.2022.01.137).
- [19] Z. Li, H. Sun, Q. Guo, J. Wang, G. Liu, "Generalized master-slave-splitting method and application to transmission-distribution coordinated energy management", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 6, pp. 5169-5183, Nov. 2019 (doi: 10.1109/TPWRS.2018.2890169).
- [20] Z. Li, Q. Guo, H. Sun, J. Wang, "A new LMP-sensitivity-based heterogeneous decomposition for transmission and distribution coordinated economic dispatch", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 931-941, March. 2018 (doi: 10.1109/TSG.2016.2571848).
- [21] M. K. Arpanahi, M. E. H. Golshan, P. Siano, "A comprehensive and efficient decentralized framework for coordinated multiperiod economic dispatch of transmission and distribution systems", *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 2583-2594, June. 2021 (doi: 10.1109/JSYST.2020.3009750).
- [22] A. Hassan, Y. Dvorkin, "Energy storage siting and sizing in coordinated distribution and transmission systems", *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1692-1701, Oct. 2018 (doi: 10.1109/TSTE.2018.2809580).
- [23] H. Haghighat, H. Karimianfard, B. Zeng, "Integrating energy management of autonomous smart grids in electricity market operation", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 11, no. 5, pp. 4044-4055, Sept. 2020 (doi: 10.1109/TSG.2020.2992570).
- [24] P. Sheikhhahmadi, S. Bahrara, A. Mazza, G. Chicco, J. P.S.Catalão, "Bi-level optimization model for the coordination between transmission and distribution systems interacting with local energy markets", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 124, Article Number: 106392, Jan. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106392).
- [25] M. R. RaeisiNiaa, S. Javadi, M. R. Jokar, S. A. Nejati, "Flexibility pricing in the active distribution network including renewable and flexibility sources as a bi-level optimization model", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, Article Number: 101947, Aug. 2022 (doi: 10.1016/j.seta.2021.101947).
- [26] A. Sinha, P. Malo, K. Deb, "Evolutionary algorithm for bilevel optimization using approximations of the lower level optimal solution mapping", *European Journal of Operational Research*, vol. 257, Issue 2, pp. 395-411, Aug. 2017 (doi: 10.1016/j.ejor.2016.08.027).
- [27] M. Saeedirad, E. Rokrok, M. Joorabian, "Technical and economic management of energy distribution to reduce charging costs and reduction", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 54, pp. 59-74, Sept. 2023 (in Persian). (dor 20.1001.1.23223871.1402.14.54.4.0).
- [28] S.A. Alavi-Matin, P. Radmehr, A. Ahmarinejad, S.A. Mansouri, "Distribution systems energy management in the presence of smart homes, renewable energy resources and demand response programs by considering uncertainties", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 79-98, June 2023 (in Persian) (dor: 20.1001.1.23223871.1402.14.53.5.9).

[29] M. Doostizadeh, H. Jalili, A. Babaei, "A decentralized framework to improve resilience in microgrids based on peer to peer transactions, considering independence and privacy", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 15, no. 57, pp. 31-50, Dec. 2024 (in Persian).

ضمیمه

پارامتر و متغیرهای مدل‌سازی

نماد	پارامتر	نماد	پارامتر
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
$G_{n,t}$	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
$P_{n,t}^s, Q_{n,t}^s$	توان اکتیو و راکتیو پست شبکه توزیع n در زمان t ام	$z_{n,t}$	متغیر باینری مربوط به قید امنیتی
$P_{n,t}^{DG}$	توان حقیقی تولید شده این واحدها در باس n ام شبکه توزیع	$f_{nm,t}^p, f_{nm,t}^q$	شار توان حقیقی و راکتیو خط nm شبکه توزیع
$V_{n,t}^{sqe}$	ولتاژ مربعی باس n ام شبکه توزیع در ساعت t	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
c_n^f	هزینه قطع بار در باس n ام	$D_{n,t}$	بار اکتیو در باس n در زمان t ام
$\underline{G}_n, \overline{G}_n$	حداقل و حداکثر توان واحدها	$\overline{f}_{nm}$	حداکثر شار توان از باس n به m
$\underline{R}_n, \overline{R}_n$	نرخ افزایش و کاهش توان واحدها	c_t^s	هزینه خرید انرژی از شبکه انتقال
C_n^{RN}, C_n^{PEV}	به ترتیب برابر هزینه عدم مشارکت منابع تجدیدپذیر و ایستگاه خودروهای برقی	$\overline{P}_{n,t}^{RN}, \overline{P}_{n,t}^{PEV}$	به ترتیب برابر مقدار واقعی توان اکتیو منابع تجدیدپذیر و توان واقعی شارژ مورد نیاز ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی
C_n^{DG}	هزینه سوخت واحدهای تولیدپراکنده فسیلی	$d_{n,t}^p, d_{n,t}^q$	توان حقیقی و راکتیو بار در باس n ام شبکه توزیع در زمان t
ρ_n	ضریب توان منبع تولید پراکنده غیرتجدیدپذیر	$\overline{f}_{nm}^p, f_{nm}^p$	حداکثر و حداقل شار توان اکتیو عبوری از خط nm شبکه توزیع
$\overline{f}_{nm}^q, f_{nm}^q$	حداکثر و حداقل شار توان راکتیو عبوری از خط nm شبکه توزیع	r_{nm}, x_{nm}	به ترتیب برابر مقاومت و راکتانس خط nm شبکه توزیع
k	تعداد خروج خط و واحد در شبکه انتقال	$V_n^{\min}, V_n^{\max}$	به ترتیب برابر حداقل و حداکثر ولتاژ باس n ام شبکه توزیع
$\overline{P}_n^s, \overline{Q}_n^s$	به ترتیب حداکثر توان اکتیو و راکتیو بهره‌برداری از پست توزیع در زمان t	μ_t^{pv}	مقدار متوسط
σ	انحراف استاندارد	l	میزان تابش
$P_{PV,n}$	ظرفیت فتوولتائیک در باس n ام	$P_{EV,n}$	مقدار واقعی توان شارژ ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی
$\tau_{ci}, \tau_f, \tau_{co}$	به ترتیب برابر حداکثر، مقدار و حداقل نرخ سرعت باد	$p_{n,t}$	نرخ توان خروجی منبع بادی در باس n ام

زیرنویس‌ها

1. Transmission system operator (TSO)
2. Distribution system operator (DSO)
3. Bi-level robust optimization (Bi-RO)
4. Bi-level second order cone programming (Bi-SOCP)
5. AC-optimal power flow (AC-OPF)
6. Distributed generators (DG)
7. Bi-level mixed integer quadratic programming (Bi-MIQP)
8. Bi-directional network equivalence (Bi-DNE)
9. Chance-constrained programming (CCP)
10. Transmission and distribution AC optimal power flow (TD-ACOPF)
11. Non-linear programming (NP)
12. Online convex optimization (OCO)

13. Alternating current (AC)
14. Bi-level mixed integer linear programming (Bi-MILP)
15. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
16. Photovoltaics (PV)