Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
P.P 63-74

Vol. 11/ No. 4/ Winter 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

Stochastic security-constrained unit commitment by modeling the worst-contingency in the presence of electric vehicles, flexible loads, and energy storage systems

Ali Gholami Trojani[1], Mahmoud Samiei Moghaddam[1,*], Javad Mohamadi Baigi[1]
1- Department of Electrical Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran
*(Corresponding author) samiei352@yahoo.com

Abstract:
This paper presents a new formulation and algorithm for the problem of unit commitment with security constraints, which can obtain the worst case of transmission network line outage and solve the problem under such conditions. Optimal charging and discharging of electric vehicles, optimal charging and discharging of energy storage systems, and flexible loads along with renewable energy resources are considered in the problem of unit commitment. Uncertainty of energy resources is modeled as a scenario-based method. In this paper, a multi-objective function that includes reduction of operating cost, no-load and unit start-up/shutdown, load shedding costs, load shifting, unit pollution, optimal charging and discharging of storages, and the power cut of renewable energy resources is considered. The proposed formulation is a mixed integer linear programming (MILP) model whose absolute optimal solution is guaranteed by powerful Gurobi solvers. To validate the proposed formulation, several study cases and test 6- and 24-bus networks are analyzed. The simulation results show that the proposed algorithm is effective in identifying the worst possible line exit of the transmission network so that the objective function of the problem increases by about 8% after the worst-case line exit from the network.

Keywords:
Unit commitment, Stochastic security-constrained, optimization, renewable resources, mixed integer linear programming.

Submit date: 2022/08/09
Accepted date: 2023/02/27

Corresponding author Name: Mahmoud Samiei Moghaddam
Corresponding author address: Damghan Branch, Islamic Azad University

Iranian Electric Industry Journal
Quality & Productivity
ص.ص ۷۴-۶۳

Vol. 11 / No. 4/ Winter 2023
ISSN 2322-2344
EISSN 2717-1639

در مدار قرارگرفتن واحدها با قید امنیت تصادفی با مدل‌سازی بدترین پیشامد احتمالی در حضور خودروهای برقی، بارهای انعطاف‌پذیر و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی

نوع مطالعه: پژوهشی

علی غلامی تروجنی [۱]، دانشجو دکتری، محمود سمیعی مقدم[۱*]، استادیار، جواد محمدی بایگی[۱]، استادیار

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

چکیده: در این مقاله یک فرمولاسیون و الگوریتم جدید برای مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیتی، ارائه شده است، که قادر است بدترین پیشامد خروج خطوط شبکه انتقال را بدست آورده و مسئله را تحت چنین شرایطی حل نماید. شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی، شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌ها ذخیره‌سازی انرژی و بارهای انعطاف‌پذیر به همراه منابع انرژی تجدیدپذیر در مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها در نظر گرفته شده است. عدم قطعیت منابع انرژی پراکنده به صورت روش مبتنی بر سناریو مدل‌سازی شده است. در این مقاله یک تابع چند هدفه شامل، کاهش هزینه بهره‌برداری، بی‌باری و راه‌اندازی/خاموش‌سازی واحدها، هزینه‌های قطع بار، جابه‌جایی بار، آلایندگی واحدها، شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌سازها و قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است. فرمول‌بندی پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مرکب (MILP) می‌باشد، که جواب بهینه مطلق آن توسط حل‌کننده‌های قدرتمند Gurobi تضمین شده است. به منظور صحت‌سنجی فرمولاسیون پیشنهادی چندین مورد مطالعاتی و شبکه آزمایشی ۶ و ۲۴ شین برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی بدترین احتمال خروج خط شبکه انتقال کارآمد می‌باشد به طوری که تابع هدف مسئله پس از خروج بدترین حالت خط از شبکه در حدود ۸ درصد افزایش یافته است.

واژه های کلیدی: در مدار قرارگرفتن واحدها، سیستم‌های ذخیره انرژی، انرژی تجدیدپذیر، بارهای انعطاف‌پذیر، قیود امنیتی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۴۰۱/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر محمود سمیعی مقدم

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشکده مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

۱- مقدمه

مسئله مشارکت واحدها یک کار بهینه سازی اساسی در مدیریت سیستم‌های قدرت برای تعیین مجموعه بهینه وضعیت روشن/خاموش واحدهای موجود است که هزینه کل بهره برداری را به حداقل می‌رساند و در عین حال محدودیت‌های خاصی را در یک افق کوتاه‌مدت برآورده می‌کند. در سال‌های اخیر نشان داده شده است که منابع انرژی تجدیدپذیر، برق ارزان و بدون کربن را فراهم می‌کنند، اما در سطوح مشارکت بالا، تنوع و عدم قطعیت پیش‌بینی آن ها چالش‌هایی را برای اپراتور های سیستم قدرت در مسئله مشارکت واحدها ایجاد می‌کند. رشد سریع تقاضای انرژی منجر به مصرف قابل توجه سوخت فسیلی و انتشار گازهای گلخانه ای شده است بنابراین، بررسی گزینه‌های پایدار برای بهره‌برداری از شبکه برق و سیستم های حمل و نقل ضروری می‌باشد. یکی از گزینه‌ها استفاده از وسایل نقلیه برقی متصل به شبکه به عنوان واحدهای ذخیره انرژی سیار با برنامه-ریزی هوشمندانه شارژ و دشارژ آن‌ها در یک محیط شبکه هوشمند است. منابع ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ یک راه‌کار اساسی در افزایش انعطاف پذیری شبکه در حضور منابع انرژی تجدید پذیر و خودروهای برقی متصل به شبکه می‌باشد. از دیگر مسائلی که می‌توانند در شرایط بحرانی و خروج خط و یا واحدها به انعطاف پذیری شبکه کمک کند مسئله مدیریت پاسخ تقاضا می‌باشد، که با جابه جایی بار سبب شده تا شبکه از بحران خارج شود. با توجه به آنچه که بیان شد، ارائه یک مدل ریاضی برای مدل‌سازی مشارکت واحدها با قیود امنیتی و مدل‌سازی عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر به همراه مدل سازی خودروهای برقی و سیستم‌های ذخیره انرژی از چالش‌های اصلی بهره-برداران شبکه می‌باشد، که بتواند منجر به رسیدن به جواب‌های بهینه مطلق گردد.

در (Zhou et.al., 2022) فرمول‌بندی مسئله مشارکت واحدها با محدودیت امنیتی با یک فرآیند راه حل تکراری بر اساس عوامل توزیع قطع خط اصلاح شده بر اساس پخش بار خطی پیشنهاد شده است. در (Yin et.al., 2022) یک رویکرد مشارکت واحدها خوشه‌ای محدود به شبکه با برنامه‌ریزی میان مدت تصادفی ریسک گریز برای سیستم حرارتی-هیدرو-بادی پیشنهادی شده است. نویسندگان در (Said et.al., 2022) یک الگوریتم فراابتکاری با نام بهینه ساز مبتنی بر گرادیان را برای حل مسئله مشارکت واحدها پیشنهاد کردند. در (Jiang et.al., 2022) یک راه حلی برای مسئله در مدار قرار گرفتن واحدها با محدودیت امنیتی برای مبدل منبع ولتاژ هیبریدی مبتنی بر چند ترمینال سیستم‌های قدرت با نفوذ بالا در تولید باد ارائه شده است. در (Gao et.al., 2022) یک روش شتاب الگوریتمی داخلی برای فرآیند شاخه و برش درمسئله مشارکت واحدها بر اساس حل‌کننده‌های برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط ارائه شده است، که می‌تواند تاثیری چند برابر بر روی مدت زمان حل مسئله داشته باشد. در (Chen et.al., 2022) یک چارچوب پیش‌بینی و بهینه‌سازی حلقه بسته برای بهبود اقتصادی مشارکت واحدها محدود به شبکه ارائه کرده است. در (Flores et.al., 2022) یک مدل مخروطی مرتبه دوم برای حل مسئله مشارکت واحدها با محدودیت شبکه در مقیاس بزرگ بر اساس روش تجزیه بندرز پیشنهاد شده است. نویسندگان در (Alcaraz et.al., 2022) یک فرمولاسیون برای مدل سازی مسئله مشارکت واحدها با محدودیت امنیتی پیشگیرانه با مدل سازی تلفات سیستم انتقال پیشنهاد کردند. در (Zhang et.al., 2022) یک چارچوب مبتنی بر داده های عمومی برای مشارکت واحدها با محدودیت تحت نفوذ بالای انرژی‌های تجدید پذیر توسط شبکه های عصبی عمیق برای پیش‌بینی پاسخ فرکانسی با استفاده از داده های واقعی ارائه شده است. در مرجع (Wu et.al., 2022) یک مدل در مدار قرار گرفتن واحد امنیتی مبتنی بر سناریو با سیستم ذخیره انرژی با فرمول‌بندی برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط برای کاهش هزینه‌های بهره برداری پیشنهاد شده است. در (Doubleday et.al., 2022) نویسندگان بررسی کرده‌اند که چگونه مسئله مشارکت واحدهای تصادفی با اهرم پیش‌بینی‌های احتمالی منابع خورشیدی با نفوذ بالا می‌توانند از سایر اقدامات انعطاف پذیری پشتیبانی کند، اقدامات انعطاف‌پذیری، تغییر زمان انرژی باتری و ارائه خدمات جانبی منابع خورشیدی در نظر گرفته شده است. در (Egbue et.al., 2022) یک مدل در مدار قرار گرفتن واحدها با یک سیستم وسیله نقلیه متصل به شبکه برق هوشمند با در نظر گرفتن سطوح نفوذ مختلف خودرو های برقی و اثرات اقتصادی و فنی و وسایل نقلیه برقی برای پشتیبانی از شبکه پیشنهاد شده است. در (Cheng et.al., 2022) یک استراتژی مدل‌سازی سلسله مراتبی بر اساس مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای حل مسئله زمان‌بندی بهینه کوتاه مدت واحدهای آبی با تقسیم بر دو زیر بخش، توزیع بار و مشارکت واحدها ارائه کرده است. در (Sun et.al., 2022) یک مکانیسمی برای بهینه سازی مشارکت واحدها بر اساس تولید سناریوی انرژی باد با هدف کاهش هزینه های بهره‌برداری پیشنهاد کرده است. در (Truong et.al., 2022) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط فازی با تمرکز بر عدم قطعیت قیمت برای مسئله مشارکت واحدهای ماهانه در یک شبکه برق واقعی پیشنهاد شده است. در (Mansourshoar et.al., 2022) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای برنامه پاسخ تقاضای مبتنی بر قیمت بر قابلیت اطمینان سیستم در مسئله مشارکت واحدها با محدودیت امنیتی همراه با مزارع بادی در حضور حوادث غیر مترقبه پیشنهاد شده است. در (Xu et.al., 2021) یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای مسئله مشارکت واحدها با نیروگاه های

بادی در مقیاس بزرگ با در نظر گرفتن مسئله پاسخ تقاضا با محدودیت‌های انعطاف‌پذیری مقیاس چند زمانه پیشنهاد شده است. در (Constante et.al., 2022) یک مدل مخروطی مرتبه دوم عدد صحیحی مختلط برای حل مسئله مشارکت واحدها با مدل سازی انواع مختلف نیروگاه‌ها پیشنهاد شده است. در (Zhang et.al., 2022) یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای مسئله مشارکت واحدها محدود با امنیت برای سیستم‌های قدرت به هم پیوسته چندناحیه‌ای پیشنهاد شده است. در (Liang et.al., 2022) یک مدل قوی برای حل مسئله مشارکت واحدها با سیستم ذخیره‌سازی انرژی یکپارچه، منابع انرژی تجدیدپذیر و دستگاه‌های FACTS به منظور حداکثر رساندن امنیت و به حداقل رساندن هزینه ها پیشنهاد نمودند. در مرجع (Alizadeh et.al., 2016) حل مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیتی با در نظر گرفتن نیروگاه‌های حرارتی و خورشیدی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات باینری پیشنهادی شده است. در (Simab et.al., 2021) نویسندگان مسئله مشارکت واحدها را با استفاده از مدیریت سمت تقاضا و سیستم‌های ذخیره انرژی پیشنهاد کردند. در مرجع (Hematiyan et.al., 2022) یک مدل بهینه سازی تصادفی برای بهبود وضعیت شبکه قدرت و هماهنگی بین واحدها با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره انرژی و مدیریت سمت تقاضا پیشنهاد شده است. در مرجع (Zanganeh et.al., 2023) نویسندگان یک مدل بهینه-سازی غیرخطی برای بهبود وضعیت سیستم توسط ادوات جبران ساز با استفاده از یک الگوریتم تکاملی پیشنهاد نمودند. در (Rostamiyan et.al., 2023) یک مدل مبتنی بر برنامه‌ریزی درجه دوم عدد صحیح مرکب برای بهینه سازی سیستم با در نظر گرفتن باتری، مترو و همچنین مدیریت سمت تقاضا پیشنهاد شده است.

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

مرجع	آلایندگی	باتری	بار انعطاف-پذیر	تصادفی	چند هدفه	انرژی تجدیدپذیر	قید امنیت	خودرو برقی	نوع مدل	حل‌کننده
مدل پیشنهادی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	Gurobi
Zhou et.al., 2022	-	-	-	-	-	-	✓	-	MILP	Gurobi
Yin et.al., 202	-	-	-	✓	-	✓	✓	-	MISOCP	CPLEX
Said et.al., 2022	-	-	-	-	-	-	-	-	MINLP	GBO
Jiang et.al., 2022	-	-	-	✓	-	✓	✓	-	MILP	CPLEX
Gao et.al., 2022	-	-	-	-	-	-	-	-	MILP	Gurobi
Chen et.al., 2022	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	MILP	CPLEX
Flores et.al., 2022	-	-	-	-	-	✓	✓	-	MIP	CPLEX
Alcaraz et.al., 2022	-	-	-	-	✓	-	✓	-	MILP	Xpress
Zhang et.al., 2022	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	MILP	Gurobi
Wu et.al., 2022	-	✓	-	✓	-	✓	✓	-	MILP	CPLEX
Doubleday et.al., 2022	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	MILP	Gurobi
Egbue et.al., 2022	-	-	-	-	-	-	-	✓	MILP	CPLEX
Cheng et.al., 2022	-	-	-	-	✓	✓	-	-	MILP	Gurobi
Sun et.al., 2022	-	-	-	✓	-	✓	-	-	MILP	Gurobi
Truong et.al., 2022	-	-	-	✓	-	-	-	-	MILP	CPLEX
Mansourshoar et.al., 2022	-	-	✓	✓	✓	✓	✓	-	MILP	DICOPT
Xu et.al., 2021	-	-	✓	-	-	✓	-	-	MILP	Gurobi
Constante et.al., 2022	-	-	-	-	-	✓	-	-	MISOCP	Gurobi
Zhang et.al., 2022	-	-	-	-	✓	-	✓	-	MILP	CPLEX
Liang et.al., 2022	-	✓	-	-	✓	✓	✓	-	MILP	CPLEX
Alizadeh et.al., 2016	-	-	-	-	✓	✓	✓	-	MINLP	PSO
Simab et.al., 2021	-	✓	✓	-	✓	-	-	-	MILP	Mosek

در جدول (۱) خلاصه‌ای از مدل و روش های پیشنهادی در مسئله مشارکت واحدها در مقالاتی که اخیرا چاپ شده است نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود طبق جدول (۱) مدل پیشنهادی این مقاله یک مدل کامل بهینه‌سازی نسبت به دیگر مقالات مشابه می‌باشد.

همانطور که از جدول (۱) مشاهده می‌گردد، تا کنون مطالعه‌ای که موارد ذکر شده در جدول (۱) را با هم در نظر گرفته باشد ارائه نشده است. لذا می‌توان گفت شکاف مطالعاتی در این زمینه عدم مدل سازی مسئله مشارکت واحدها با قیود امنیتی به صورت تصادفی همراه با منابع انرژی تجدید پذیر، بار های انعطاف پذیر، خودرو های برقی، سیستم‌های ذخیره انرژی به منظور بهبود یک تابع چند هدفه می‌باشد.

همچنین در این مطالعه یک الگوریتم کارآمد برای بدست آوردن بدترین احتمال خروج خطوط شبکه انتقال نیز ارائه شده است.

همانطور که در ادبیات اخیر بررسی شد، به طور خلاصه نوآوری ها و مشارکت اصلی این مقاله را می‌توان به شرح زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱. از لحاظ مدل‌سازی؛ ارائه یک فرمول‌بندی جدید مبتنی بر MILP برای مسئله در مدار قرارگرفتن واحدها با لحاظ کردن شارژ و دشارژ بهینه خودروهای برقی در مقیاس بزرگ به همراه شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی با در نظر گرفتن قید امنیت شبکه، برنامه مدیریت سمت تقاضا و منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور کاهش هزینه بهره‌برداری، بی‌باری و راه‌اندازی/خاموش‌سازی واحدها، هزینه‌های قطع بار، جابه‌جایی بار، آلایندگی واحدها، شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌سازها و قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر.

۲. از لحاظ الگوریتم: ارائه یک الگوریتمی مبتنی بر ساخت لیست اولویت برای یافتن بدترین پیشامد احتمالی در مسئله مشارکت واحدها با قید امنیتی خروج خط.

در بخش بعدی مقاله مدل پیشنهادی ارائه و به طور کامل شرح داده خواهد شد. بخش سوم سیستم پیشنهادی معرفی و نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شود. بخش چهارم نیز نتیجه‌گیری مقاله ارائه و به منظور ادامه راه این مطالعه چندین پیشنهاد ارائه می‌شود.

۲- مدل‌سازی پیشنهادی

مسئله مشارکت واحدهای قید امنیت نیز در این بخش ارائه شده است. رابطه (۱) تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد. در رابطه (۱) چندین هدفه نیز فرموله شده است که شامل، کاهش هزینه‌های تولید، بی‌باری، راه‌اندازی، خاموش‌سازی، قطع بار، شارژ و دشارژ باتری، تغییر بار، آلایندگی و قطع توان منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد که به صورت تصادفی و مبتنی بر سناریو فرموله شده است.

$$\begin{aligned}\min \sum_{b=1}^{B}\sum_{t=1}^{T} & g_{b,t}c_b^{g} + s_{b,t}c_b^{nl} + u_{b,t}c_b^{su} + d_{b,t}c_b^{sd} \\ & + r_{b,t}c_b^{cr} \\ & + \left(pc_{b,t}^{ess} + pd_{b,t}^{ess}\right)c_b^{ess} \\ & + \left(d_{b,t}^{in} + d_{b,t}^{dsm}\right)c_b^{dsm} \\ & + g_{b,t}c_b^{emi} \\ & + \sum_{s=1}^{S}\pi_s \sum_{b=1}^{B}\sum_{t=1}^{T}\left(\left(g_{b,t,s}^{r} - g_{b,t}^{r}\right)c_b^{r}\right)\end{aligned} \tag{1}$$

در رابطه (۱) به ترتیب B، T، و S برابر مجموعه شین، زمان و سناریو می‌باشد، همچنین b، t، و s به ترتیب شاخص شین، زمان و سناریو می‌باشد. $g_{b,t}$ برابر توان واحدها در شین bام در زمان t و c_b^g برابر هزینه تولید واحد در شین bام می‌باشد. $s_{b,t}$ برابر وضعیت مشارکت واحدها در شین bام و در زمان t می‌باشد، همچنین هزینه بی‌باری هر واحد در شین bام با c_b^{nl} نشان داده شده است. وضعیت روشن و خاموش‌سازی واحدها در شین bام در زمان t به ترتیب با $u_{b,t}$ و $d_{b,t}$ نشان داده شده است، همچنین هزینه‌های مربوط به آن‌ها به ترتیب با c_b^{su} و c_b^{sd} نشان داده شده است. قطع بار در شین bام در زمان t با $r_{b,t}$ و همچنین هزینه مربوط به قطع بار با c_b^{cr} نشان داده شده است. به ترتیب $pc_{b,t}^{ess}$ و $pd_{b,t}^{ess}$ برابر توان شارژ و دشارژ باتری در شین bام در زمان t و هزینه مربوط به شارژ و دشارژ در شین bام برابر c_b^{ess} می‌باشد. بار بدون تغییر شبکه در شین bام در زمان t با $d_{b,t}^{in}$ و بار تغییر یافته پس از برنامه مدیریت سمت تقاضا با $d_{b,t}^{dsm}$ نشان داده شده است، همچنین هزینه مربوط به تغییر و یا قطع بار در شین bام در برنامه مدیریت سمت تقاضا با c_b^{dsm} نشان داده شده است. هزینه مربوط به آلایندگی واحدها در شین bام با c_b^{emi} نشان داده شده است. این هزینه ضریب جریمه مقدار دی اکسید کربن تولید شده به ازا هر تن بر مگاوات ساعت واحدها می‌باشد. π_s برابر با احتمال هر سناریو و $g_{b,t,s}^{r}$ برابر تولید واقعی منابع تجدید پذیر در شین bام در زمان t در سناریو s می‌باشد. همچنین $g_{b,t}^{r}$ برابر توان مورد استفاده از انرژی تجدیدپذیر در شین bام در زمان t می‌باشد و c_b^{r} هزینه قطع توان انرژی تجدیدپذیر در شین bام می‌باشد.

مسئله مشارکت واحدها با قید امنیت نیز با معادلات (۲) الی (۱۴) نشان داده شده است. معادله (۲) قید تعادل توان در هر شین شبکه را نشان می‌دهد. در این معادله $f_{ij,t}$ برابر شار توان از شین i به j و $f_{ji,t}$ برابر شار توان از شین j به i می‌باشد، $p_{b,t}^{ev}$ برابر توان تزریقی یا دریافتی خودروهای برقی در شین bام در زمان t می‌باشد. نامعادله (۳) محدودیت بهره‌برداری از واحدها را نشان می‌دهد، که به ترتیب g_b^{min} و g_b^{max} برابر حد پایین و بالای توان واحدها در شین bام. رابطه (۴) محدودیت شار توان در هر خط شبکه را نشان می‌دهد، که مجموعه خطوط شبکه با L و شاخص آن با l نشان داده شده است. در این رابطه x_l برابر وضعیت خطوط می‌باشد، که اگر برابر با ۱ باشد خط وصل و اگر برابر ۰ باشد خط قطع می‌باشد، همچنین f_l^{max} نشان دهنده حداکثر شار توان عبوری از خط lام می‌باشد. رابطه (۵) تعریف شار توان در هر خط می‌باشد، که B_l برابر سوسپتانس خط lام و $\theta_{i,t}$ برابر زاویه ولتاژ شین iام در زمان tام می‌باشد. محدودیت قطع بار در هر شین و در زمان t با (۶) نشان داده شده است. رابطه (۷) محدودیت زاویه ولتاژ هر شین در زمان t را نشان می‌دهد. در رابطه (۸) محدودیت زاویه ولتاژ شین مرجع نشان داده شده است. محدودیت بهره‌برداری از هر واحد تجدید پذیر در شین bام در زمان tام و در سناریو sام با (۹) نشان داده شده است. در (۱۰) رابطه بین متغیر های باینری در مسئله مشارکت واحدها می‌باشد. رابطه (۱۱) خروج خط را در شبکه نشان می‌دهد، که k برابر تعداد خطوط قطع شده از شبکه

می‌باشد. رابطه (۱۲) نشان‌دهنده محدودیت شیب توان رو به بالا و پایین واحدها و رابطه (۱۳) و (۱۴) به ترتیب نشان‌دهنده حداقل زمان روشن و خاموشی واحدها می‌باشد.

$$g_{b,t} + r_{b,t} + pd_{b,t}^{ess} + g_{b,t}^{r} + \sum_{ij\in B} f_{ij,t} - \sum_{ji\in B} f_{ji,t} + p_{b,t}^{ev} = pc_{b,t}^{ess} + d_{b,t}^{dsm} \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۲}$$

$$g_b^{min} s_{b,t} \le g_{b,t} \le g_b^{max} s_{b,t} \ \forall b \in B, t \in T, s_{b,t} \in \{0,1\} \tag{۳}$$

$$-f_l^{max} x_l \le f_{l,t} \le f_l^{max} x_l \ \forall l \in L, t \in T, x_l \in \{0,1\} \tag{۴}$$

$$f_{l,t} = x_l B_l(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \ \forall l \in L, t \in T, ij \in L \tag{۵}$$

$$0 \le r_{b,t} \le d_{b,t}^{dsm} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۶}$$

$$-\pi \le \theta_{b,t} \le \pi \ \forall b \in B, t \in T \tag{۷}$$

$$\theta_{b,t} = 0 \ \forall b = ref, t \in T \tag{۸}$$

$$0 \le g_{b,t}^{r} \le g_{b,t,s}^{r} \ \forall b \in B, t \in T, s \in S \tag{۹}$$

$$s_{b,t} - s_{b,t-1} = u_{b,t} - d_{b,t} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۱۰}$$

$$\sum_{l=1}^{L} x_l = L - k \tag{۱۱}$$

$$-r_b^{dw} \le g_{b,t+1} - g_{b,t} \le r_b^{up} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۱۲}$$

$$\sum_{k=t-UT_b+1}^{t} u_{b,k} \le s_{b,k} \ \forall b \in B, t \in \{UT_b, \dots, T\} \tag{۱۳}$$

$$\sum_{k=t-DT_b+1}^{t} d_{b,k} \le 1 - s_{b,k} \ \forall b \in B, t \in \{DT_b, \dots, T\} \tag{۱۴}$$

روابط (۱۵) الی (۲۶) مدل سازی خودروهای برقی را در مسئله مشارکت واحدها با قید امنیت نشان می‌دهد. انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری ($e_{b,t}^{net_ev}$) در خودروهای برقی در شین bام در زمان t با توجه به راندمان هر باتری در (۱۵) نشان داده شده است. در رابطه (۱۵) $p_{b,t}^{dis_ev}$ و $p_{b,t}^{ch_ev}$ به ترتیب برابر توان دشارژ و شارژ باتری خودروهای برقی در شین bام در زمان t می‌باشد، همچنین η_b^{ev} نشان‌دهنده راندمان شارژ باتری خوردوهای برقی می‌باشد. رابطه (۱۶) مقدار توان تزریقی و دریافتی از یا به شبکه توسط خودروهای برقی را در شین bام در زمان t نشان می‌دهد که توسط نرخ شارژ و دشارژ باتری محاسبه می‌شود. وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در (۱۷) نشان داده شده است، که به ترتیب $I_{b,t}^{dis_ev}$ و $I_{b,t}^{ch_ev}$ نشان‌دهنده وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی را در شین bام در زمان t نشان می‌دهد، همچنین $n_{b,t}^{ev}$ برابر وضعیت اتصال به شبکه خودروهای برقی می‌باشد، که اگر برابر ۱ باشد خودرو به شبکه متصل در غیر اینصورت قطع می‌باشد. رابطه (۱۸) و (۱۹) به ترتیب محدودیت توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی را نشان می‌دهد. به ترتیب $\underline{p}_b^{ch_ev}$ و $\overline{p}_b^{ch_ev}$ برابر حداقل و حداکثر توان شارژ خودروهای برقی و $\underline{p}_b^{dis_ev}$ و $\overline{p}_b^{dis_ev}$ به ترتیب برابر حداقل و حداکثر توان دشارژ خودروهای برقی می‌باشد. رابطه (۲۰) وضعیت انرژی در باتری خوردوهای برقی ($e_{b,t}^{ev}$) را نشان می‌دهد، که $dr_{b,t}^{ev}$ نشان‌دهنده انرژی تقاضا شده خودروهای برقی در شین bام در زمان t برای سواری می‌باشد. رابطه (۲۱) محدودیت ظرفیت انرژی باتری در خودروهای برقی را نشان می‌دهد، که می‌بایست بین حداقل ($\underline{e}_{b,t}^{ev}$) و حداکثر ($\overline{e}_{b,t}^{ev}$) باشد. رابطه (۲۲) و (۲۳) انرژی خالص شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی و انرژی در دسترس باتری خودروهای برقی را در ساعت اول و آخر برابر با هم در نظر می‌گیرد. معادلات (۲۴) الی (۲۶) نشان‌دهنده منحنی هزینه شارژ و دشارژ باتری خودروهای برقی می‌باشد. در اینجا $c_{b,t}^{ev}$ برابر هزینه بهره‌برداری خودروهای برقی، $\beta_{k,b}^{ev}$ برابر شیب تکه kام برای خط‌سازی منحنی هزینه و $p_{k,b,t}^{ev}$ برابر توان تکه kام خودروهای برقی می‌باشد. در نهایت $\overline{p}_{k,t}^{ev}$ برابر حداکثر توان در نظر گرفته شده برای تکه kام در خطی‌سازی می‌باشد، همچنین k شاخص مقدار تکه‌های منحنی و K مجموعه آن می‌باشد.

$$e_{b,t}^{net_ev} = p_{b,t}^{dis_ev} - \eta_b^{ev} p_{b,t}^{ch_ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۱۵}$$

$$p_{b,t}^{ev} = p_{b,t}^{dis_ev} - p_{b,t}^{ch_ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۱۶}$$

$$I_{b,t}^{dis_ev} + I_{b,t}^{ch_ev} = n_{b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۱۷}$$

$$I_{b,t}^{ch_ev} \underline{p}_b^{ch_ev} \le p_{b,t}^{ch_{ev}} \le I_{b,t}^{ch_{ev}} \overline{p}_b^{ch_ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۱۸}$$

$$I_{b,t}^{dis_ev} \underline{p}_b^{dis_ev} \le p_{b,t}^{dis_{ev}} \le I_{b,t}^{dis_{ev}} \overline{p}_b^{dis_ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۱۹}$$

$$e_{b,t}^{ev} = e_{b,t-1}^{ev} - e_{b,t}^{net_{ev}} - (1 - n_{b,t}^{ev}) dr_{b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۲۰}$$

$$\underline{e}_{b,t}^{ev} \le e_{b,t}^{ev} \le \overline{e}_{b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۲۱}$$

$$e_{b,t=1}^{ev} = e_{b,t=24}^{ev} \ \forall b \in B \tag{۲۲}$$

$$e_{b,t=1}^{net_ev} = e_{b,t=24}^{net_ev} \ \forall b \in B \tag{۲۳}$$

$$c_{b,t}^{ev} = n_{b,t}^{ev} \sum_{k=1}^{K} \beta_{k,b}^{ev} p_{k,b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۲۴}$$

$$n_{b,t}^{ev}(e_{b,t}^{ev} - e_{b,t-1}^{ev}) \ge -\sum_{k=1}^{K} p_{k,b,t}^{ev}, \ n_{b,t}^{ev}(e_{b,t}^{ev} - e_{b,t-1}^{ev}) \le \sum_{k=1}^{K} p_{k,b,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۲۵}$$

$$0 \le p_{k,b,t}^{ev} \le \overline{p}_{k,t}^{ev} \ \forall b \in B, t \in T \tag{۲۶}$$

معادلات (۲۷) الی (۳۲) نشان‌دهنده سیستم ذخیره انرژی (باتری) در مسئله مشارکت واحدها می‌باشد. رابطه (۲۷) و (۲۸) به ترتیب حداقل و حداکثر توان دشارژ و شارژ باتری را نشان می‌دهد، که $z_{b,t}^{ess}$ برابر وضعیت باتری و $\overline{e}_b^{ess}$ برابر حداکثر ظرفیت باتری در شین bام در زمان t می‌باشد. رابطه (۲۹) نشان‌دهنده انرژی موجود در باتری ($e_{b,t}^{ess}$) می‌باشد و رابطه (۳۰) محدودیت حداقلی و حداکثری انرژی در باتری را

نشان می‌دهد. رابطه (۳۱) ظرفیت اولیه باتری را در زمان t=1 نشان می‌دهد، که α_b برابر مقدار انرژی اولیه موجود در باتری در شین bام، همچنین رابطه (۳۲) وضعیت انرژی در زمان t=1 را نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود معادلات (۲۴) و (۲۵) غیر خطی می‌باشد، که خطی‌سازی آن‌ها از طریق روش بزرگ M انجام شده است. بدین گونه که ضرب دو متغیر باینری و پیشته به صورت یک متغیر جدید تعریف شده است و چندین محدودیت مرتبط با آن تعریف می‌شود.

$$0 \le pd_{b,t}^{ess} \le \overline{e}_b^{\text{ess}} z_{b,t}^{ess} \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۲۷}$$

$$0 \le pc_{b,t}^{ess} \le \overline{e}_b^{\text{ess}} (1 - z_{b,t}^{ess}) \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۲۸}$$

$$e_{b,t}^{ess} = e_{b,t-1}^{ess} + pc_{b,t}^{ess}\eta_{ess} - pd_{b,t}^{ess}\, {}^{1}/_{\eta_{ess}} \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۲۹}$$

$$0 \le e_{b,t}^{ess} \le \overline{e}_b^{\text{ess}} \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۳۰}$$

$$e_{b,t=1}^{ess} = \alpha_b \quad \forall b \in B \tag{۳۱}$$

$$e_{b,t=1}^{ess} = pc_{b,t=1}^{ess}\eta_{ess} - pd_{b,t=1}^{ess}\, {}^{1}/_{\eta_{ess}} \quad \forall b \in B \tag{۳۲}$$

همانطور که مشاهده می‌شود تفاوت اصلی مدل‌سازی خودروهای برقی و سیستم‌های ذخیره انرژی در این است که سیستم‌های ذخیره انرژی دقیقا بر اساس قیمت انرژی و بهبود تابع هدف مسئله شارژ و دشارژ می‌شوند و انرژی درون آن می‌تواند کاملا تخلیه شود، اما خودروهای برقی علاوه بر شارژ و دشارژ بهینه تقاضای بار برای حرکت خوردوها نیز در آن تاثیر گذار است، همچنین انرژی موجود در آن‌ها به صورت کاملا نمیتواند تخلیه گردد.

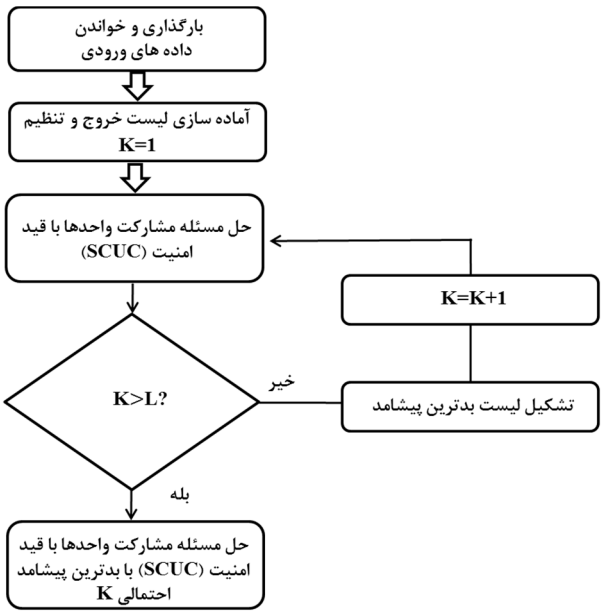
روابط (۳۳) الی (۳۵) نشان‌دهنده مسئله مدیریت سمت تقاضا در مسئله مشارکت واحدها می‌باشد. رابطه (۳۳) تضمین می‌دهد که بارهای تغییریافته پس از برنامه مدیریت سمت تقاضا کوچکتر یا مساوی بارهای اولیه شبکه در هر شین باشد. رابطه (۳۳) و (۳۴) تغییرات بار در شین bام در زمان t را در برنامه مدیریت سمت تقاضا نشان می‌دهد، که ω برابر درصد تغییرات بار می‌باشد.

$$\sum_{t\in T} d_{b,t}^{dsm} \le \sum_{t\in T} d_{b,t}^{in} \quad \forall b \in B \tag{۳۳}$$

$$d_{b,t}^{dsm} \ge d_{b,t}^{in} - d_{b,t}^{in}\omega \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۳۴}$$

$$d_{b,t}^{dsm} \le d_{b,t}^{in} + d_{b,t}^{in}\omega \quad \forall b \in B, t \in T \tag{۳۵}$$

در شکل (۱) فلوچارت الگوریتم پیشنهاد شده برای حل مسئله مشارکت واحدها با قید امنیت با در نظر گرفتن بدترین پیشامد احتمالی با استفاده از یک لیست اولویت نشان داده شده است.



شکل (۱): فلوچارت رویکرد پیشنهادی برای بدترین شرایط احتمالی در مسئله SCUC

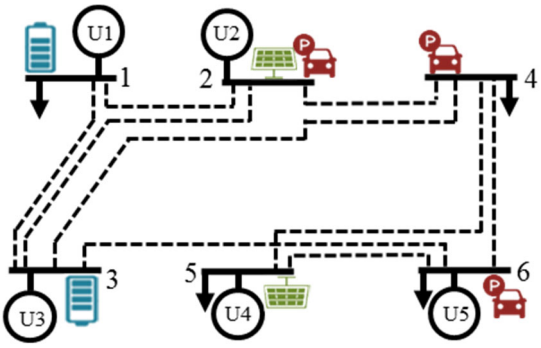
در بخش بعد شبکه آزمایشی پیشنهادی ارائه و نتایج شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل می‌شودهر مقاله باید شامل این بخشهای اصلی باشد: چکیده، کلمات کلیدی، مقدمه، مطالب اصلی، نتیجه، و مراجع. سایر بخشها مثل سپاسگزاری، ضمایم، و زیرنویس‌ها اختیاری است. این بخشها باید در آخر مقاله و قبل از مراجع قرار گیرند، بجز بخش زیرنویس ها که پس از مراجع آورده می‌شود.

۳- شبیه‌سازی

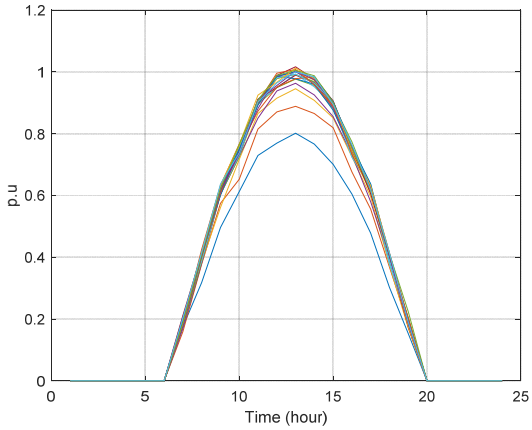
به منظور تجزیه و تحلیل مدل پیشنهادی دو شبکه تست ۶ و ۲۴ شین برای تجزیه و تحلیل انتخاب شده است. شبیه‌سازی با استفاده از Julia پیاده سازی و با حل‌کننده Gurobi حل شده است. از سیستم کامپیوتری با پردازنده مرکزی ۱.۸ گیگاهرتز و حافظه تصادفی ۶ گیگابایتی استفاده شده است.

۳-۱- شبکه ۶ شین

در این بخش نتایج مربوط به شبکه انتقال ۶ شین ارائه می‌شود. شکل (۲) شماتیک شبکه پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سیستم ذخیره انرژی (باتری) روی شین‌های ۱ و ۳ قرار دارد، منابع انرژی تجدید پذیر در شین های ۲ و ۵ نصب شده است و پارکینگ خودروهای برقی نیز در شین های ۲، ۴ و ۶ می‌باشد. بار شبکه در شین‌های ۱، ۴، ۵ و ۶ می‌باشد و ۵ واحد نیروگاهی نیز در شین‌های ۱، ۲، ۳، ۵ و ۶ می‌باشد. تعداد ۹ خط موجود شبکه با خط تیره نشان داده شده است. ۲۰ سناریو توسط تابع توزیع نرمال برای انرژی تجدیدپذیر تولید شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۲): شماتیک شبکه ۶ شین



شکل (۳): ۲۰ سناریو تولید شده توسط تابع توزیع نرمال برای منابع انرژی تجدیدپذیر

به منظور تجزیه و تحلیل بهتر فرمولاسیون پیشنهادی ۳ حالت مطالعاتی مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

حالت (۱): بدون خروج خط.

حالت (۲): خروج خط بدون الگوریتم پیشنهادی.

حالت (۳): خروج خط با الگوریتم پیشنهادی و بدترین پیشامد احتمالی.

همانطور که در جدول (۲) مشاهده می‌گردد، نتایج مربوط به حالت‌های مختلف در شبکه ۶ شین ارائه شده است. مشاهده می گردد که بدون خروج خط تابع هدف در کمینه‌ترین حالت ممکن قرار دارد، در این حالت مقدار تابع هدف برابر با ۵۲۹۵۳۷ دلار می‌باشد. در حالت ۲ که خروج خط داریم، خط شماره ۹ از شبکه قطع شده است، در این حالت از الگوریتم پیشنهادی برای یافتن بدترین پیشامد احتمالی استفاده نشده است. مشاهده می‌شود که در حالت دوم تابع هدف با خروج خط شماره ۹ کمی بیشتر از حالت اول شده است، در این حالت مقدار تابع هدف برابر با ۵۲۹۵۴۵ دلار شده است.

اما در حالت سوم برای یافتن بدترین پیشامد احتمالی و یا یافتن خطی که بیشترین آسیب را به شبکه می‌زند با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مسئله را حل نموده‌ایم. مشاهده می‌شود که در این حالت خط شماره ۷ از شبکه خارج شده است. در این وضعیت مشاهده می شود که بدترین خط برای خروج خط شماره ۷ می‌باشد که تابع هدف مسئله پس از خروج این خط برابر ۵۷۳۵۰۶ دلار شده است، که افزایش ۴۴ هزار دلاری تابع هدف را نشان می‌دهد.

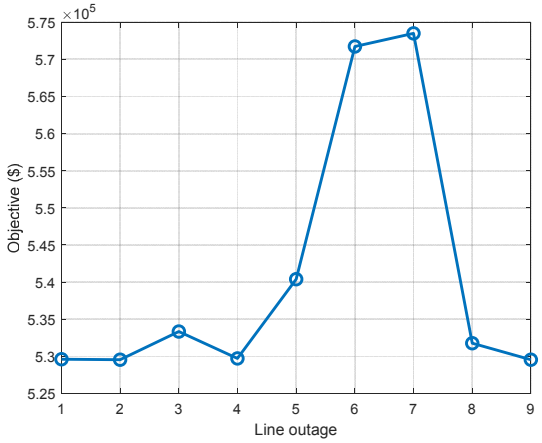
طبق جدول (۲) هزینه روشن و خاموش‌سازی واحدها در حالت اول و دوم برابر ۴۸۰۰ دلار می‌باشد، این در حالی است که در حالت سوم با خروج بدترین حالت خروج خط از شبکه انتقال هزینه روشن و خاموش‌سازی واحدها برابر با ۱۳۲۰۰ دلار شده است که رشدی معادل ۱۷۵ درصدی را نشان می‌دهد.

به همین ترتیب با توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه همچنین خودروهای برقی و سیستم‌های ذخیره انرژی هیچگونه حذف باری در شبکه در هر یک از سه حالت رخ نداده است.

جدول (۲): نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سیستم ۶ شین

	حالت (۱)	حالت (۲)	حالت (۳)
تابع هدف ($)	۵۲۹۵۳۷	۵۲۹۵۴۵	۵۷۳۵۰۶
هزینه روشن/خاموشی واحدها ($)	۴۸۰۰	۴۸۰۰	۱۳۲۰۰
هزینه قطع بار ($)	۰	۰	۰
شماره خط خارج شده	-	۹	۷

شکل (۴) لیست اولویت بدست آمده از خروج هر خط در این شبکه را نسبت به تابع هدف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با خروج خط ۷ از شبکه، بیشترین هزینه حاصل خواهد شد، این نشان می‌دهد که خط شماره بدترین پیشامد احتمالی نیز برای خروج خط می‌باشد.



شکل (۴): مقایسه تابع هدف با خروج هر خط شبکه

شکل‌های (۵) الی (۷) وضعیت هر واحد را در هر ساعت در هر کدام از حالت‌های در نظر گرفته شده در شبکه ۶ شین نشان می‌دهد. عدد ۱ نشان‌دهنده روشن بودن واحد و عدد صفر نشان‌دهنده خاموش بودن واحدها می‌باشد. مشاهده می‌شود که وضعیت روشن بودن واحدها در حالت اول و دوم همانند هم می‌باشد، اما در حالت سوم با خروج خط با بدترین پیشامد ممکن واحد نیروگاهی ۴ هم نیز به مدار تولید وارد شده است. مشاهده می‌شود که تاثیر بدترین پیشامد احتمالی علاوه بر تابع هدف بر وضعیت روشن و خاموش بودن واحدها هم نیز تاثیر می‌گذارد.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

شکل (۵): وضعیت مشارکت واحدها در شبکه ۶ شین در حالت اول

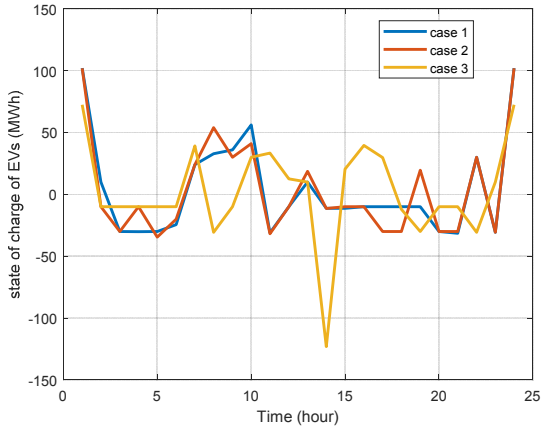
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

شکل (۶): وضعیت مشارکت واحدها در شبکه ۶ شین در حالت دوم

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
Unit 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

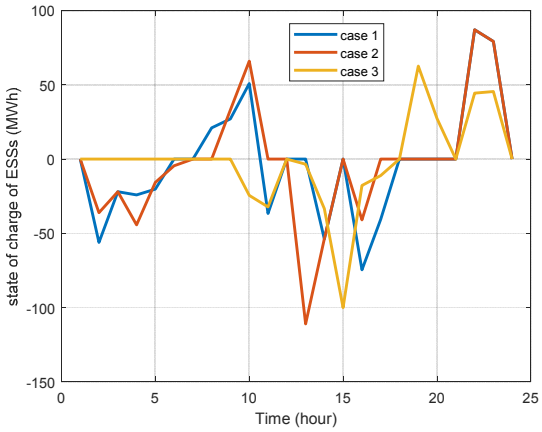
شکل (۷): وضعیت مشارکت واحدها در شبکه ۶ شین در حالت سوم

در شکل (۸) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه پارکینگ خودروهای برقی در سه حالت در نظر گرفته شده نشان داده شده است. محور عمودی منفی نشان از شارژ و محور مثبت نشان از دشارژ خودروهای برقی می‌باشد. مشاهده می شود که در هر حالت وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی باهم متفاوت می‌باشد.

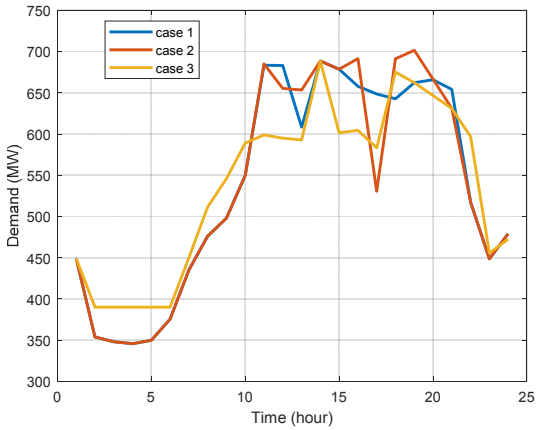


شکل (۸): مقایسه وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در شبکه ۶ شین

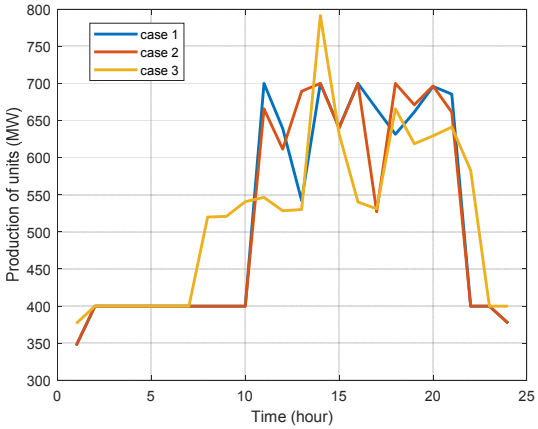
شکل (۹) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه سیستم ذخیره ساز انرژی را در هر ۴ حالت در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. شکل(۱۰) مقایسه‌ای از جابه جایی بارها در هر حالت را نشان می‌دهد. مشاهده می شود که جابه جایی بار در هر حالت باهم متفاوت می‌باشد. شکل (۱۱) تولید هر واحد را در روزپیشرو نشان می‌دهد.



شکل (۹): مقایسه وضعیت شارژ و دشارژ در باتری‌های شبکه ۶ شین



شکل (۱۰) مقایسه وضعیت جابه جایی بارها در شبکه ۶ شین



شکل (۱۱) مقایسه تولید واحدها در شبکه ۶ شین

به منظور بررسی تاثیر تغییر مکان واحدهای تجدید پذیر بر روی تابع هدف مسئله، فرض شده است که واحدهای تجدید پذیر در سیستم ۶ شین طبق شکل (۲) که در شین های ۲ و۵ قرار دارد به شین ۴ و۶ منتقل شود. با تغییر مکان واحدهای تجدید پذیر در حالت اول که تابع هدف برابر با ۵۲۹۵۳۷ دلار بود به ۵۲۹۵۴۳ دلار افزایش پیدا کرد. این

نشان‌دهنده افزایش ۶ دلاری هزینه است، به عبارت دیگر جابجایی واحدها نیز بر تابع هدف مسئله تاثیرگذار می‌باشد.

۲-۳- شبکه ۲۴ شین

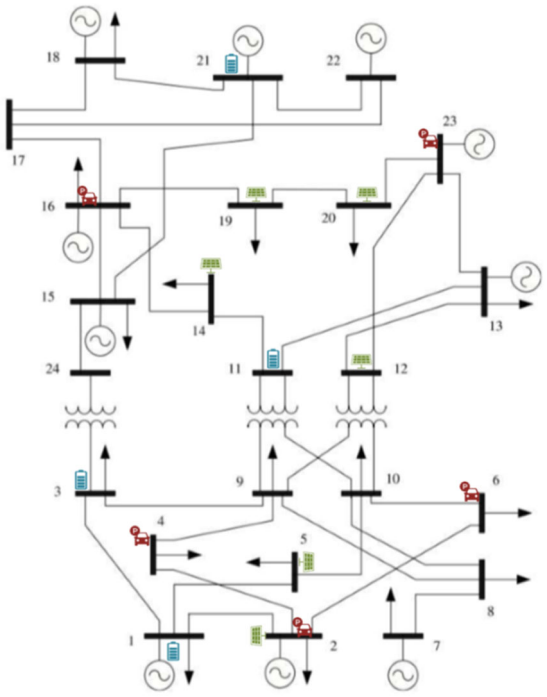
در این بخش نتایج مربوط به شبکه انتقال ۲۴ شین ارائه می‌شود. شکل (۱۲) شماتیک شبکه پیشنهادی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سیستم ذخیره انرژی منابع انرژی تجدید پذیر و پارکینگ خودروهای برقی روی شکل نشان داده شده است.

حالت‌های زیر برای تجزیه و تحلیل در این شبکه در نظر گرفته شده است:

حالت (۱): بدون خروج خط.

حالت (۲): خروج خط بدون الگوریتم پیشنهادی.

حالت (۳): خروج خط با الگوریتم پیشنهادی و بدترین پیشامد احتمالی.



شکل (۱۲): شماتیک شبکه ۲۴ شین

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد، نتایج مربوط به حالت‌های مختلف در شبکه ۲۴ شین ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که حالت اول کمترین تابع هدف را دارد، زیرا خروج خط در نظر گرفته شده است. به همین ترتیب در حالت ۱ الی ۳، تابع هدف برابر ۳۳۷۰۸۱۵، ۳۳۷۰۸۴۸ و ۳۴۷۶۸۹۴ دلار می‌باشد. مشاهده می‌شود که با بدترین پیشامد احتمالی خط ۱۱ از شبکه خارج می‌شود که همین امر نسبت به خروج خط شماره ۳ در حدود ۱۰۶ هزار دلار تابع هدف مسئله را افزایش می‌دهد.

طبق جدول (۳) هزینه روشن و خاموش‌سازی واحدها در حالت اول و دوم برابر ۱۰۳۰۵ دلار می‌باشد، این در حالی است که در حالت سوم با خروج بدترین حالت خروج خط از شبکه انتقال هزینه روشن و خاموش‌سازی واحدها برابر با ۱۱۰۵۵ دلار شده است که رشدی معادل ۸ درصدی را نشان می‌دهد.

به همین ترتیب با توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه همچنین خودروهای برقی و سیستم‌های ذخیره انرژی هیچگونه حذف باری در شبکه در هر یک از سه حالت رخ نداده است. این نشان‌دهنده تاثیر مدل پیشنهادی در مقابله با موارد آسیب‌پذیری به سیستم می‌باشد.

جدول (۳): نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سیستم ۲۴ شین

	حالت (۱)	حالت (۲)	حالت (۳)
تابع هدف ($)	۳۳۷۰۸۱۵	۳۳۷۰۸۴۸	۳۴۷۶۸۹۴
هزینه روشن/خاموش‌سازی واحدها ($)	۱۰۳۰۵	۱۰۳۰۵	۱۱۰۵۵
هزینه قطع بار ($)	۰	۰	۰
شماره خط خارج شده	-	۳	۱۱

شکل‌های (۱۳) الی (۱۵) وضعیت هر واحد را در هر ساعت در هر کدام از حالت‌های در نظر گرفته شده در شبکه ۲۴ شین برای روز پیشرو را نشان می‌دهد.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Unit 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

شکل (۱۳): وضعیت مشارکت واحدها در شبکه ۲۴ شین در حالت اول

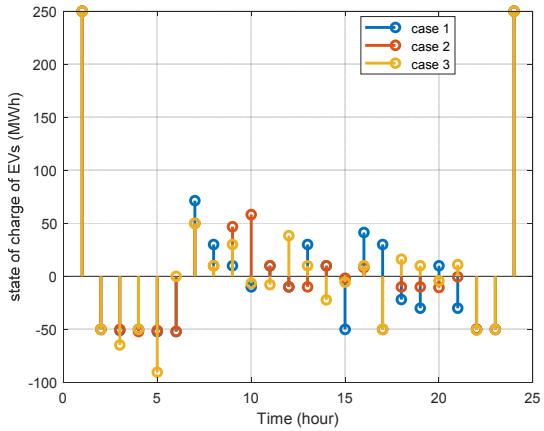
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Unit 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

شکل (۱۴): وضعیت مشارکت واحدها در شبکه ۲۴ شین در حالت دوم

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Unit 7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Unit 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

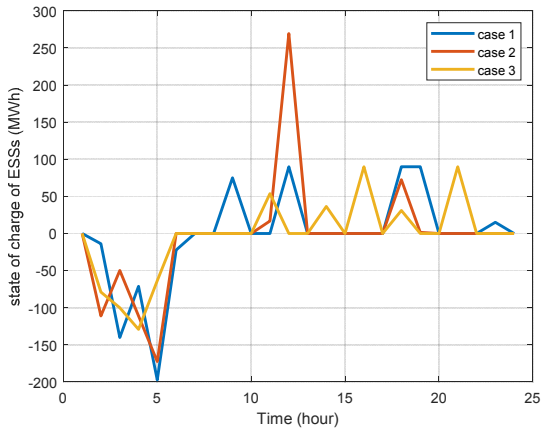
شکل (۱۵): وضعیت مشارکت واحدها در شبکه ۲۴ شین در حالت سوم

در شکل (۱۶) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه پارکینگ خودروهای بر قی در سه حالت در نظر گرفته شده نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در هر حالت وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی باهم متفاوت می‌باشد.

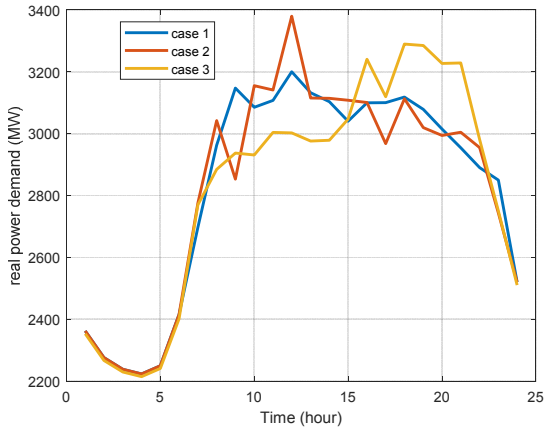


شکل (۱۶): مقایسه وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی در شبکه ۲۴ شین

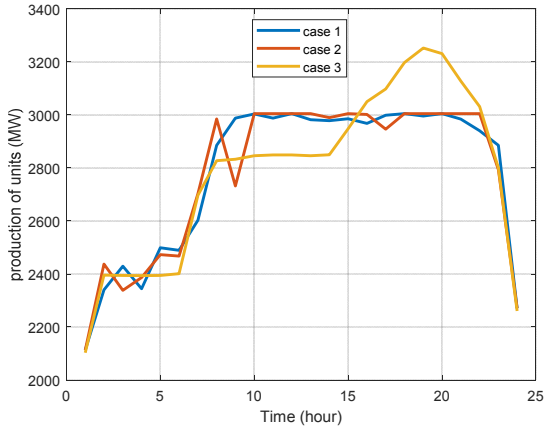
شکل (۱۷) وضعیت شارژ و دشارژ بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی را در هر سه حالت در نظر گرفته شده نشان می‌دهد. شکل(۱۸) مقایسه‌ای از جابه جایی بارها در هر حالت را نشان می‌دهد. مشاهده می شود که جابه جایی بار در هر حالت باهم متفاوت می‌باشد، در نهایت شکل (۱۹) تولید هر واحد در شبکه ۲۴ شین را در روزپیشرو نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): مقایسه وضعیت شارژ و دشارژ در باتری‌های شبکه ۲۴ شین



شکل (۱۸) مقایسه وضعیت جابه جایی بارها در شبکه ۲۴ شین



شکل (۱۹) مقایسه تولید واحدها در شبکه ۶ شین

با بررسی نتایج بدست آمده از شبکه ۶ و ۲۴ شین مشخص شد که مدل و روش پیشنهادی علاوه بر کارآمد بودن می‌تواند به راحتی برای هر سیستمی با هر ابعادی پیاده‌سازی و اجرا شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل تصادفی با محدودیت امنیت شبکه برای مسئله مشارکت واحدها در یک دوره ۲۴ ساعته ارائه شد. مدل پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح در نظر گرفته شده بود، که شامل مدل‌سازی تصادفی مشارکت واحدها با قید امنیت، مدل‌سازی شارژ و دشارژ خودروهای برقی در مقیاس بزرگ، شارژ و دشارژ بهینه سیستم‌های ذخیره انرژی و مدیریت سمت تقاضا به همراه منابع انرژی تجدیدپذیر بود. یک تابع چند هدفه به منظور کمینه‌سازی اهداف مختلف در نظر گرفته شد تا حداکثر کارایی از مدل پیشنهادی گرفته شود. یک الگوریتمی برای حل مسئله با بدترین پیشامد احتمالی

خروج خط در شبکه بر اساس یک لیست اولویت ارائه شد. دو سیستم ۶ و ۲۴ شین برای تجزیه و تحلیل با حالت‌های مختلف در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه های آزمایشی در نظر گرفته شده بخوبی عمل می‌کند و خطوط بدست آمده در بدترین پیشامد احتمالی می‌تواند تابع هزینه را در حدود ۸ در صد نسبت به حالت عادی شبکه افزایش دهد. به منظور ادامه راه این مقاله موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

۱) مدل‌سازی شبکه توزیع با در نظر گرفتن یک مدل دو سطحی و بررسی بدترین پیشامد خروج خطوط شبکه انتقال بر روی سیستم توزیع.

۲) بررسی تاب‌آوری شبکه انتقال و شاخص های قابلیت اطمینان با بدترین خروج خطوط از شبکه.

مراجع

Zhou, H., K. Yuan and C. Lei, (2022) "Security Constrained Unit Commitment Based on Modified Line Outage Distribution Factors," IEEE Access, vol. 10, pp. 25258-25266, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3156081.

Yin, Y., C. He, T. Liu and L. Wu, (2022) "Risk-Averse Stochastic Midterm Scheduling of Thermal-Hydro-Wind System: A Network-Constrained Clustered Unit Commitment Approach," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 13, no. 3, pp. 1293-1304, doi: 10.1109/TSTE.2022.3150918.

Said, M., E. H. Houssein, S. Deb, A. A. Alhussan and R. M. Ghoniem, (2022)"A Novel Gradient Based Optimizer for Solving Unit Commitment Problem," IEEE Access, vol. 10, pp. 18081-18092, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3150857.

Jiang, Z., Y. Liu, Z. Kang, T. Han and J. Zhou, (2022) "Security-Constrained Unit Commitment for Hybrid VSC-MTDC/AC Power Systems With High Penetration of Wind Generation," IEEE Access, vol. 10, pp. 14029-14037, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3148316.

Gao, Q., Z. Yang, W. Yin, W. Li and J. Yu, (2022) "Internally Induced Branch-and-Cut Acceleration for Unit Commitment Based on Improvement of Upper Bound," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 3, pp. 2455-2458, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3146772.

Chen, X., Y. Yang, Y. Liu and L. Wu, (2022) "Feature-Driven Economic Improvement for Network-Constrained Unit Commitment: A Closed-Loop Predict-and-Optimize Framework," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 4, pp. 3104-3118, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3128485.

Constante-Flores, G. E., A. J. Conejo and F. Qiu, (2022) "AC Network-Constrained Unit Commitment via Relaxation and Decomposition," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 3, pp. 2187-2196, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3120180.

Gutiérrez-Alcaraz, G., B. Díaz-López, J. M. Arroyo and V. H. Hinojosa, (2022) "Large-Scale Preventive Security-Constrained Unit Commitment Considering N-k Line Outages and Transmission Losses," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 3, pp. 2032-2041, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3116462.

Zhang, Y., et al.,(2022) "Encoding Frequency Constraints in Preventive Unit Commitment Using Deep Learning With Region-of-Interest Active Sampling," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 37, no. 3, pp. 1942-1955, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3110881.

Wu, T., Y. -J. Angela Zhang and S. Wang, (2022) "Deep Learning to Optimize: Security-Constrained Unit Commitment With Uncertain Wind Power Generation and BESSs," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 13, no. 1, pp. 231-240, doi: 10.1109/TSTE.2021.3107848.

Doubleday, K., J. D. Lara, B. M. Hodge, (2022) "Investigation of stochastic unit commitment to enable advanced flexibility measures for high shares of solar PV", Applied Energy, Volume 321, 119337.

Egbue, O., C. Uko, A. Aldubaisi, E. Santi, (2022) "A unit commitment model for optimal vehicle-to-grid operation in a power system," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 141, 108094.

Cheng, X., S. Feng, H. Zheng, J. Wang, S. Liu, (2022) "A hierarchical model in short-term hydro scheduling with unit commitment and head-dependency," Energy, Volume 251, 123908.

Sun, Y., B. Wang, R. Yuan, J. Watada, (2022) "Rolling unit commitment based on dual-discriminator conditional generative adversarial networks," Electric Power Systems Research, Volume 205, 107770.

Truong, H. Q., C. Jeenanunta, (2022) "Fuzzy mixed integer linear programming model for national level monthly unit commitment under price-based uncertainty: A case study in Thailand," Electric Power Systems Research, Volume 209, 107963.

Mansourshoar, P., A. S. Yazdankhah, M. Vatanpour, B. Mohammadi-Ivatloo, (2022) "Impact of implementing a price-based demand response program on the system reliability in security-constrained unit commitment problem coupled with wind farms in the presence of contingencies," Energy, Volume 255, 124333.

Xu, J., Y. Ma, K. Li, Z. Li, (2021) "Unit commitment of power system with large-scale wind power considering multi time scale flexibility contribution of demand response," Energy Reports, Volume 7, Supplement 7, Pages 342-352.

Constante-Flores, E. G., A. J. Conejo, F. Qiu, (2022) "AC network-constrained unit commitment via conic relaxation and convex programming," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 134, 107364.

Zhang, C., L. Yang, (2022) "Distributed AC security-constrained unit commitment for multi-area interconnected power systems," Electric Power Systems Research, Volume 211, 108197.

Liang, P., N. Bohlooli, (2022) "Optimal unit commitment integrated energy storage system, renewable energy sources and FACTS devices with robust method," Electric Power Systems Research, Volume 209, 107961.

Alizadeh lashkani M, A. Baghramian, (2016) "Optimization of Security Constrained Unit Commitment Problem in Thermal Integrated Photovoltaic Units by BPSO Algorithm." ieijqp; 4 (2) :4-14
URL: http://ieijqp.ir/article-1-154-fa.html

Simab M., A. zandi, (2021) "Unit Commitment in Smart Grids Considering Emission and Energy Storage Systems." ieijqp; 10 (2) :96-105. URL: http://ieijqp.ir/article-1-760-fa.html.

Hematiyan M, M. Vahed, M. Samiei Moghaddam, N. Salehi, A. Azarfar, (2022) "Feasibility study of presenting a dynamic stochastic model based on mixed integer second-order conic programming to solve optimal distribution network reconfiguration in the presence of resources and demand-side management." IJE; 25 (3) :1-21.

Zanganeh, M., M. Samiei Moghaddam, A. Azarfar, M. Vahedi, N. Salehi, (2023) "Multi-area distribution grids optimization using D-FACTS devices by M-PSO algorithm," Energy Reports, Volume 9, Pages 133-147.

Rostamiyan, M. H., M. H. Abardeh, A. A. Azarfar, M. S. Moghaddam and N. Salehi, (2023) "A MIQP Approach Based on Demand Response in Distribution Networks to Improve the

Multi-Objective Function in the Presence of Renewable Energy Resources and Batteries to the Subway Systems," IEEE Access, vol. 11, pp. 17603-17612, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3243889.

لغت‌نامه

Security-constrained unit commitment	SCUC
Stochastic security-constrained unit commitment	SSCUC
Self-Adaptive Modified Crow Search Algorithm	SAMCSA
Mixed-integer second-order cone programming	MISOCP
Mixed Integer Nonlinear Programming	MINLP
Lévy flight and chaos disturbed beetle antennae search	LDBAS
Social beetle swarm optimization	SBSO
Heuristic algorithm	HA
Linear Programming	LP
Data-driven batch-constrained reinforcement learning	DBRL
Mixed-integer conic programming	MICP
Mixed-integer quadratic programming	MIQP
Mixed-integer linear programming	MILP
Standard Branch and Bound	SBB
Self-adaptive particle swarm optimization	SAPSO
Chance-constrained goal programming	CCGP
Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	NSGA-II
Evolutionary algorithm	EA
Spanning tree algorithm	STGA
Hybrid heuristic methods	HHA
Genetic algorithm-Particle swarm optimization	GA-PSO
Stochastic mixed-integer linear programming	SMILP
Discrete improved grey wolf optimization	DIGWO