

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240732

考虑风光不确定性的多数据中心微网与共享储能协同优化运行

张程^{1,2}, 江炜龙¹, 罗玉锦³, 兰嵩⁴

(1. 福建理工大学电子电气与物理学院, 福建 福州 350118; 2. 智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118; 3. 华能罗源发电有限责任公司, 福建 福州 350602; 4. 福建水利电力职业技术学院, 福建 三明 366000)

摘要: 共享储能是能源改革的关键技术, 多个园区数据中心微网与共享储能联盟可以实现各主体之间的能量互补和资源联动。为提高含共享储能联盟系统的经济效益, 提出了一种考虑风光不确定性的两阶段鲁棒多微网与共享储能合作博弈模型。首先, 各微网及共享储能之间联盟, 构建电能交易优化运行模型。然后, 将风光出力的不确定性信息以箱型不确定集的形式表示, 建立两阶段鲁棒模型。运用纳什理论构建多微网-共享储能多主体合作博弈模型, 并将模型等效转换为联盟合作成本最小化子问题和各主体交易谈判子问题, 通过交替方向乘子法对上述两个子问题进行分布式求解。最后, 仿真结果表明该方法能有效降低运行成本, 并通过分析计算出不同鲁棒参数下数据中心用户的最优补偿价格。

关键词: 共享储能; 微网; 数据中心; 两阶段鲁棒; 纳什谈判; 合作运行; 交替方向乘子法

Collaborative optimal operation of multiple data center microgrids and shared energy storage considering wind power and photovoltaic uncertainty

ZHANG Cheng^{1,2}, JIANG Weilong¹, LUO Yujin³, LAN Song⁴

(1. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. Engineering Research Center for Simulation Analysis and Integrated Control of Smart Grid in Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China; 3. Huaneng Luoyuan Power Generation Co., Ltd., Fuzhou 350602, China; 4. Fujian Polytechnic of Water Conservancy and Electric Power, Sanming 366000, China)

Abstract: Shared energy storage is a key technology for energy reform, and the alliance of multiple data center microgrids and shared energy storage can realize energy complementarity and resource linkage among different entities. To improve the economic benefits of systems with shared energy storage, a two-stage robust multiple data center microgrids and shared energy storage collaborative game model considering wind power and photovoltaic uncertainty is proposed. First, an alliance is formed between the microgrids and community-shared energy storage to construct an optimized operational model for electricity trading. Then, the uncertainty of wind power and photovoltaic output is represented in the form of a box-type uncertainty set to build a two-stage robust optimal dispatch model. Nash negotiation theory is used to construct a multi-microgrid and shared energy storage multi-entity cooperation game model. The model is equivalently transformed into the subproblems of alliance cooperation cost minimization and individual entity trading negotiation. These are analyzed in a distributed manner using the alternating direction multiplier method. Finally, simulation results show that this method can effectively reduce the operational cost and calculate the optimal compensation price for data center users with different robust parameters.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52377088).

Key words: shared energy storage; microgrids; data center; two-stage robustness; Nash negotiations; cooperative operation; alternating direction multiplier method

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52377088); 教育部产学研合作协同育人项目资助(220605211033030); 福建省财政厅专项资助(GY-Z220230); 福建省自然科学基金项目资助(2023J01951)

0 引言

随着云计算、5G、人工智能等新技术的发展,数据中心能耗体量激增,数据中心正逐步成为信息网络和各行各业的纽带。国家发改委在2020年提出加强新型基础设施建设,作为各类数据信息处理和服務的关键基础设施,数据中心正式被纳入国家“新基建”范畴^[1]。根据研究报告^[2]所述,2020年全国数据中心用电量占总用电量的2.7%;预计到2030年数据中心耗电量将达到全球耗电量的14%^[3]。数据中心用电带来高额电费支出,因此运营商尽可能地考虑利用可再生能源以降低开支^[4-5]。此外,近年来我国对微网大力扶持,鼓励以特许经营等方式进行微网建设,因此许多微网运营商选择以数据中心为主体建立数据中心微网^[6]。数据中心的负荷处理请求可分为需要立即处理的交互式负载和可延时处理的批处理负载^[7]。通过合理安排批处理负载请求,数据中心负载可以被看作需求响应负荷,促进可再生能源消纳^[8]。

随着共享经济兴起,共享储能的类型逐渐多样化。关于常规电池储能,文献^[9]针对不同用户的实际用能需求获取共享储能容量分配和运行策略,提高共享储能的使用率,提升经济效益;关于云储能,文献^[10]通过建设规模化储能,以储能资源共享的方式为所有用户提供服务,并进行集中管理控制,进一步提高储能资源利用率,降低储能使用成本;关于广义储能^[11],文献^[12-13]通过需求响应的方式将EV扩展为可被视为广义储能单元的大规模EV集群,达到电网侧削峰填谷、提升系统调度灵活度的作用。

不同主体在合作运行时利益关系错综复杂,造成协同运行效率较差的情况。为有效解决各用能主体的利益分配问题,可利用博弈理论建立多主体交易模型,而针对能源交易的博弈包括非合作博弈以及合作博弈^[14-15]。非合作博弈更加强调个体利益,缺乏系统性利益的考虑^[16]。而合作博弈可兼顾个体利益和整体利益的统一,能够得到稳定纳什均衡解,实现帕累托最优^[17-19]。但是以上研究中均忽略了可再生能源对系统合作运行时的影响,针对该问题,文献^[20]对于具有随机性的可再生能源出力采用拉丁超立方采样方法生成部分场景,接着利用场景削减得到需要的典型场景。文献^[21]考虑风光出力 and 负荷的不确定性因素,以多微网和配电网的净交互成本表征风险损失函数,构建基于条件风险价值的

多微网主体协同运行模型,可以较好地衡量多微网的经济性和风险性。

基于上述分析,本文考虑风光不确定性因素,针对多园区数据中心微网-社区共享储能合作优化运行模型展开研究,主要贡献如下所述。

1) 结合自身实际运行成本情况制定出合理的激励措施及补偿价格,既提高用户参与灵活性调节的积极性,增加批处理负载比例而降低总成本,又可以促进新能源的消纳率。

2) 考虑到风光出力的不确定性对数据中心微网的影响,构建园区数据中心微网两阶段鲁棒模型。由于其第二阶段中存在大量的二进制变量,无法直接使用对偶转换为单层问题,因此采用列和约束生成法(column and constraint generation, C&CG)嵌套重构和分解法(reformulation and decomposition algorithm, RD)在主问题和子问题中交替迭代求解。

3) 对多数据中心微网-共享储能多主体协同运行系统以合作博弈方法开展研究,运用纳什原理对原问题等效转换,得到合作成本最小化子问题和各主体交易谈判子问题。对两个子问题运用交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM)进行分布式求解,通过算例验证模型和方法的有效性,并通过分析得到不同鲁棒参数下数据中心用户的最优补偿价格。

1 多园区数据中心微网和共享储能电站系统协同优化运行架构

本文提出的多园区数据中心微网和共享储能电站协同优化运行系统如图1所示。各园区微网与配

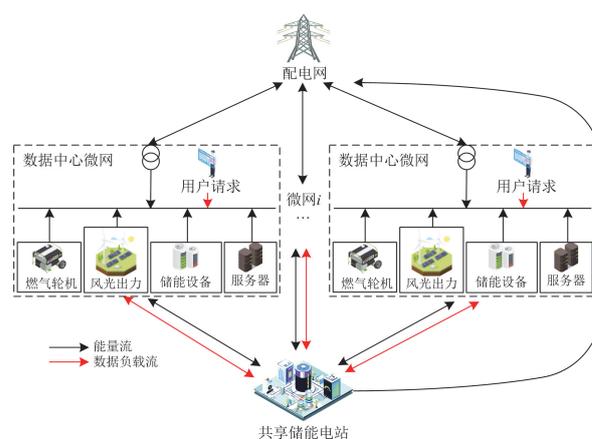


图1 多园区微网和共享储能协同系统

Fig. 1 Multi park microgrid and shared energy storage collaborative systems

电网、共享储能运营商之间均有电能交互，由于多个园区微网对可再生能源的产消能力不同，在不同时刻对外呈现出电量盈余或缺额的状态。通过该系统各微网倾向于在电量缺额时段向售电价格较低的共享储能电站购电，在电量盈余时段售电给共享储能运营商，帮助多园区微网平抑功率波动，有利于可再生能源的消纳。

2 共享储能运营商及数据中心微网建模

2.1 共享储能运营商模型

共享储能电站运营商为多个园区数据中心微网提供储能充放电服务，并且向微网收取储能电站服务费。共享储能电站主要从两方面获利：1) 共享储能电站为园区数据中心微网提供储能服务，通过微网与共享储能电站间的电能交互量收取服务费；2) 共享储能利用分时电价在电价谷时向园区微网购电，在电价峰时向数据中心微网和配电网放电赚取电能的结算价格差。本文的共享储能运营商模型如下所述。

2.1.1 约束条件

$$\begin{cases} 0.1E_{ces,t}^{\max} \leq E_{ces,t} \leq 0.9E_{ces,t}^{\max} \\ 0 \leq P_{ces,t}^{ch} \leq U_{ces,t} P_{ces,t}^{ch,max} \\ 0 \leq P_{ces,t}^{dis} \leq (1 - U_{ces,t}) P_{ces,t}^{dis,max} \\ E_{ces,t} = E_{ces,t-1} + P_{ces,t}^{ch} \eta_{ces}^{ch} - P_{ces,t}^{dis} / \eta_{ces}^{dis} \\ E_{ces,1} = 0.2E_{ces,t}^{\max} + P_{ces,1}^{ch} \eta_{ces}^{ch} - P_{ces,1}^{dis} / \eta_{ces}^{dis} \\ E_{ces,24} = 0.2E_{ces,t}^{\max} \\ P_{ces,t}^{ch} + P_{ces,t}^{grid} - P_{ces,t}^{dis} + \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{ces,mg} = 0 \\ U_{ces,t} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $E_{ces,t}$ 、 $E_{ces,t}^{\max}$ 分别表示 t 时刻共享储能电站存储的能量及其理论上限； $P_{ces,t}^{ch}$ 、 $P_{ces,t}^{dis}$ 分别表示 t 时刻储能电站的充、放电功率； $P_{ces,t}^{ch,max}$ 、 $P_{ces,t}^{dis,max}$ 分别表示储能电站的充、放电功率的上限； $U_{ces,t}$ 表示社区共享储能电站的充、放电状态变量； η_{ces}^{ch} 、 η_{ces}^{dis} 分别表示共享储能的充、放电效率； $P_{ces,t}^{grid}$ 表示储能电站与配电网的电交互功率； $P_{i,t}^{ces,mg}$ 表示储能电站与各园区微网的电交互功率。

2.1.2 目标函数

$$\begin{cases} \min C_{ces} = C_{ces}^{loss} + C_{ces}^{grid} + C_{ces}^{net} + C_{ces}^{mg} \\ C_{ces}^{loss} = \lambda_{ces}^{loss} \sum_{t=1}^T (P_{ces,t}^{ch} + P_{ces,t}^{dis}) \\ C_{ces}^{grid} = \sum_{t=1}^T (p_t^{grid} P_{ces,t}^{grid}) \\ C_{ces}^{net} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{net} P_{i,t}^{ces,mg}) \\ C_{ces}^{mg} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (p_{i,t}^{ces,mg} P_{i,t}^{ces,mg}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： C_{ces} 表示共享储能运营商的总成本； C_{ces}^{loss} 、 C_{ces}^{grid} 、 C_{ces}^{net} 和 C_{ces}^{mg} 分别表示共享储能充放电的损耗成本、共享储能与配电网的电能交互成本、各微网向共享储能电能交易的过网费用、园区微网与共享储能的交互成本； λ_{ces}^{loss} 表示储能充放电时的损耗系数； T 取 24 h； p_t^{grid} 表示购售电价格； $p_{i,t}^{net}$ 表示过网费单价； $p_{i,t}^{ces,mg}$ 、 $P_{i,t}^{ces,mg}$ 分别表示共享储能电站向微网传输功率的交互电价和交互电量。

2.2 数据中心微网建模

本文的数据中心微网结构如图 2 所示，包括以风力机(wind turbine, WT)和光伏(photo voltaic, PV)为主的可再生能源发电机组、燃气轮机(gas turbine, GT)、储能设备以及数据中心服务器。负载主要有数据中心负荷和常规负荷，其中数据中心负载根据是否允许延迟处理可分为可延迟处理的批处理工作负载和需要即时处理的交互性工作负载。数据中心微网系统中的冷功率主要来自两方面，一方面是电制冷装置为数据中心服务器提供低温水(chilled water,

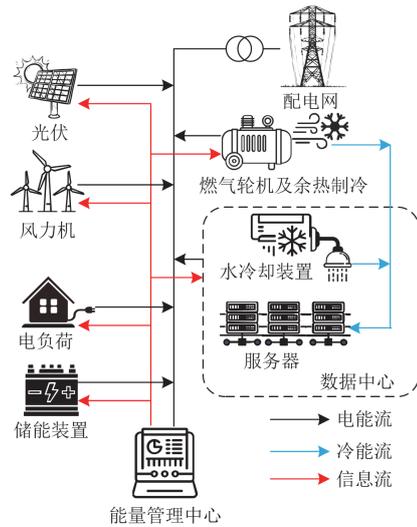


图 2 园区数据中心微网结构

Fig. 2 Data center microgrid structure diagram of the park

CW)制冷;另一方面是吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、燃气轮机在发电时产生的高温尾气被溴化锂机组吸收后转化为制冷功率。

2.2.1 数据中心运行模型

数据中心服务器运行过程中接收到的负载包括批处理工作负载和交互性负载。其中不可调节的交互性负载需要立即处理,假定交互性负载可以在1h内处理完成;而批处理工作负载可以延迟一定时间后再进行处理。

$$\begin{cases} P_{DC,i,t}^{\text{del, re}} = \mu \sum_{n=1}^{N_{DC}} \sum_{m=0}^{T_n} P_{DC,i,n,t+m}^{\text{del}} \\ P_{DC,i,t} = (1-\mu)P_{DC,i,t}^{\text{pro}} + \mu \sum_{m=0}^{t-1} P_{DC,i,t-m}^{\text{del}} \\ 0 \leq P_{DC,i,t}^{\text{del, re}} \leq P_{DC,i}^{\text{del, max}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{DC,i,t}^{\text{del, re}}$ 表示到达数据中心微网*i*中的批处理负载(未优化); μ 表示接受补偿价格后意愿转换为批处理负载占该时刻总负载比例; N_{DC} 表示*t*时刻批处理工作负载量; T_n 表示数据中心中上报的第*n*个批处理负载的可延迟时间上限;批处理负载到达数据中心后,根据最大可延迟时间分别进行处理,例如最大可延迟时间13h的批处理负载,则包括当前时刻在内总共14h的工作负载分量,即 $P_{DC,i,n,t+m}^{\text{del}}$ 表示微网*i*在*t*时刻到达的第*n*个批处理负载延迟到*t+m*时刻的工作负载; $P_{DC,i,t}$ 表示微网*i*分配到*t*时刻的数据中心服务器工作负载总量; $P_{DC,i,t}^{\text{pro}}$ 表示数据中心微网*i*中需要即时处理的交互性负载; $P_{DC,i,t-m}^{\text{del}}$ 表示经过数据中心微网*i*优化后的批处理负载; $P_{DC,i}^{\text{del, max}}$ 表示可延迟的批处理负载的最大可容纳量。

2.2.2 燃气轮机与溴冷机

本文中燃气轮机通过消耗天然气产生电能,同时将产生的高温余热尾气通过溴化锂机组转化为制冷功率,有效提高能源利用效率,且燃气轮机的输出功率可以调整,响应速度快。燃气轮机与溴化锂机组满足式(4)。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{GT}} = \eta_{\text{gas}}^{\text{GT}} Q_{\text{gas}} P_{i,t}^{\text{GT, gas}} \\ P_{i,t}^{\text{eCL}} = \eta_{\text{wh}}^{\text{eCL}} P_{i,t}^{\text{GT}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{GT}} \leq P_{\text{max}}^{\text{GT}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{eCL}} \leq P_{\text{max}}^{\text{eCL}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{GT}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{GT}}$ 分别表示*t*时刻数据中心微网*i*的燃气轮机产生的电功率和其功率上限; $P_{i,t}^{\text{eCL}}$ 、 $P_{\text{max}}^{\text{eCL}}$ 分别表示*t*时刻数据中心微网*i*的燃气轮机产生的冷功率和其功率上限; $\eta_{\text{gas}}^{\text{GT}}$ 、 $\eta_{\text{wh}}^{\text{eCL}}$ 分别表示燃气轮

机产生电能的转化效率、溴化锂制冷机的余热回收效率; Q_{gas} 表示天然气热值; $P_{i,t}^{\text{GT, gas}}$ 表示燃气轮机消耗的天然气。

2.2.3 数据中心水冷却装置

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{CL}} = N^{\text{CL}} P_{DC,i,t} \\ P_{i,t}^{\text{iCL}} = \eta^{\text{iCL}} L_{i,t}^{\text{fl}} \\ 0 \leq L_{i,t}^{\text{fl}} \leq L_{\text{max}}^{\text{fl}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{CL}}$ 表示微网*i*在*t*时刻数据中心冷功率总需求; N^{CL} 表示冷功率需求常数,数据中心的供冷一部分来自外部的溴化机余热制冷,另一部分利用电制冷装置为数据中心提供低温水制冷; $P_{i,t}^{\text{iCL}}$ 表示水冷却装置的制冷功率; η^{iCL} 表示水冷却装置的能效比; $L_{i,t}^{\text{fl}}$ 、 $L_{\text{max}}^{\text{fl}}$ 分别表示装置制冷耗电量和其上限。

2.2.4 储能设备

$$\begin{cases} E_{i, \text{ess}}^{\text{min}} \leq E_{i,t}^{\text{ess}} \leq E_{i, \text{ess}}^{\text{max}} \\ 0 \leq P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} \leq \lambda_{\text{ess},i,t} P_{\text{ess}}^{\text{ch, max}} \\ 0 \leq P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}} \leq (1-\lambda_{\text{ess},i,t}) P_{\text{ess}}^{\text{dis, max}} \\ E_{i,t}^{\text{ess}} = E_{i,t-1}^{\text{ess}} + P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} \eta_{\text{ess}}^{\text{ch}} - P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}} / \eta_{\text{ess}}^{\text{dis}} \\ E_{i,1}^{\text{ess}} = 0.2 E_{i, \text{ess}}^{\text{max}} + P_{\text{ess},i,1}^{\text{ch}} \eta_{\text{ess}}^{\text{ch}} - P_{\text{ess},i,1}^{\text{dis}} / \eta_{\text{ess}}^{\text{dis}} \\ E_{i,T}^{\text{ess}} = 0.2 E_{i, \text{ess}}^{\text{max}} \\ \lambda_{\text{ess},i,t} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $E_{i,t}^{\text{ess}}$ 表示微网*i*在*t*时刻储能设备中的储存电量; $E_{i, \text{ess}}^{\text{max}}$ 、 $E_{i, \text{ess}}^{\text{min}}$ 分别表示其储存电量的上限和下限; $P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}}$ 分别表示微网*i*在*t*时刻储能装置的充、放电功率; $P_{\text{ess}}^{\text{ch, max}}$ 、 $P_{\text{ess}}^{\text{dis, max}}$ 分别表示微网*i*在*t*时刻储能装置充、放电的功率上限; $\lambda_{\text{ess},i,t}$ 表示充放电状态变量; $\eta_{\text{ess}}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{ess}}^{\text{dis}}$ 分别表示其充、放电效率。

2.2.5 微网与外界交互约束

各园区数据中心微网与社区共享储能合作运行,向电网购售电,以及向天然气网购气,应满足式(7)和式(8)约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t,e}^{\text{buy}} \leq P_{i,e,\text{max}}^{\text{buy}} \\ 0 \leq P_{i,t,e}^{\text{sell}} \leq P_{i,e,\text{max}}^{\text{sell}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{GT, gas}} \leq P_{i,\text{gas},\text{max}}^{\text{grid}} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{i,\text{min}}^{\text{mg, ces}} \leq P_{i,t}^{\text{mg, ces}} \leq P_{i,\text{max}}^{\text{mg, ces}} \quad (8)$$

式中: $P_{i,t,e}^{\text{buy}}$ 、 $P_{i,t,e}^{\text{sell}}$ 分别表示数据中心微网*i*在*t*时刻向电网的购电和售电功率; $P_{i,t}^{\text{GT, gas}}$ 表示数据中心微网*i*在*t*时刻向天然气网的购气量; $P_{i,e,\text{max}}^{\text{buy}}$ 、 $P_{i,e,\text{max}}^{\text{sell}}$ 、 $P_{i,\text{gas},\text{max}}^{\text{grid}}$ 分别表示购电、售电功率最大值及购气量的

最大值； $P_{i,t}^{\text{mg,ces}}$ 表示微网 i 在 t 时刻出售给共享储能电站的电功率； $P_{i,\text{max}}^{\text{mg,ces}}$ 、 $P_{i,\text{min}}^{\text{mg,ces}}$ 分别表示其电功率的最大值和最小值。

2.2.6 数据中心微网功率平衡约束

电功率平衡式

$$P_{\text{DC},i,t} + P_{i,t}^{\text{eCL}} + P_{i,t}^{\text{eload}} + P_{i,t}^{\text{mg,ces}} + P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t,e}^{\text{sell}} = P_{i,t}^{\text{GT}} + P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,t,e}^{\text{buy}} + P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}} \quad (9)$$

冷功率平衡式

$$P_{i,t}^{\text{CL}} = P_{i,t}^{\text{eCL}} + P_{i,t}^{\text{iCL}} \quad (10)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 分别表示园区数据中心微网 i 在 t 时刻的风力机和光伏实际出力； $P_{i,t}^{\text{eload}}$ 表示园区微网 i 在 t 时刻的电负载。

3 两阶段鲁棒园区数据中心微网调度模型及求解

3.1 可再生能源出力的不确定性模型

大规模可再生能源并网带来的源侧不确定性对多园区数据中心微网的运行造成的影响已不可忽视，为分析其影响，本文引入不确定量 \mathbf{u} ，构造箱式不确定集 U 来描述运行过程中风力机和光伏出力的不确定性，不确定性集合模型表示为

$$\begin{cases} \mathbf{u} = [u_{i,t}^{\text{PV}}, u_{i,t}^{\text{WT}}] \\ u_{i,t}^{\text{PV}} - \hat{u}_{i,t}^{\text{PV}} \in [-\beta_{i,t}^{\text{PV}-} \Delta u_{i,t}^{\text{PV,max}}, +\beta_{i,t}^{\text{PV}+} \Delta u_{i,t}^{\text{PV,max}}] \\ u_{i,t}^{\text{WT}} - \hat{u}_{i,t}^{\text{WT}} \in [-\beta_{i,t}^{\text{WT}-} \Delta u_{i,t}^{\text{WT,max}}, +\beta_{i,t}^{\text{WT}+} \Delta u_{i,t}^{\text{WT,max}}] \\ \Delta u_{i,t}^{\text{PV,max}} = \lambda_{i,t}^{\text{PV}} \hat{u}_{i,t}^{\text{PV}}, \Delta u_{i,t}^{\text{WT,max}} = \lambda_{i,t}^{\text{WT}} \hat{u}_{i,t}^{\text{WT}} \\ \beta_{i,t}^{\text{PV}+} + \beta_{i,t}^{\text{PV}-} \leq 1, \beta_{i,t}^{\text{WT}+} + \beta_{i,t}^{\text{WT}-} \leq 1 \\ \sum_{t \in T} (\beta_{i,t}^{\text{PV}+} + \beta_{i,t}^{\text{PV}-}) \leq \gamma_i^{\text{PV}}, \sum_{t \in T} (\beta_{i,t}^{\text{WT}+} + \beta_{i,t}^{\text{WT}-}) \leq \gamma_i^{\text{WT}} \\ \beta_{i,t}^{\text{PV}+}, \beta_{i,t}^{\text{PV}-}, \beta_{i,t}^{\text{WT}+}, \beta_{i,t}^{\text{WT}-} \in \{0,1\} \\ u_{i,t}^{\text{PV}} = P_{i,t}^{\text{PV}} + P_{i,t}^{\text{PV,cur}}, u_{i,t}^{\text{WT}} = P_{i,t}^{\text{WT}} + P_{i,t}^{\text{WT,cur}} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\hat{u}_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $\hat{u}_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别表示微网 i 在 t 时刻的光伏和风机的预测功率； $u_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $u_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别表示微网 i 在 t 时刻考虑不确定性波动后的光伏、风机出力的预测值； $\Delta u_{i,t}^{\text{PV,max}}$ 、 $\Delta u_{i,t}^{\text{WT,max}}$ 分别表示数据中心微网 i 的光伏出力和风机出力在 t 时刻允许的最大功率波动偏差值； $\lambda_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $\lambda_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别表示其对应的鲁棒波动偏差参数； $\beta_{i,t}^{\text{PV}+}$ 、 $\beta_{i,t}^{\text{PV}-}$ 、 $\beta_{i,t}^{\text{WT}+}$ 和 $\beta_{i,t}^{\text{WT}-}$ 均表示不确定性误差的上偏和下偏二进制变量； γ_i^{PV} 、 γ_i^{WT} 分别表示光伏和风力机出力的波动保守度参数； $P_{i,t}^{\text{WT,cur}}$ 和

$P_{i,t}^{\text{PV,cur}}$ 分别表示光伏和风机的弃风、弃光功率。

3.2 两阶段鲁棒调度模型

园区数据中心微网 i 与共享储能电站联盟的协同优化目标函数表示为

$$\begin{aligned} \min_x \{ & C_i^{\text{mg,ces}} + C_i^{\text{net}} + \\ & \max_{\mathbf{u} \in U} \min_{y,z} [C_i^{\text{DC}} + C_i^{\text{grid}} + C_i^{\text{cur}} + C_i^{\text{om}}] \} \end{aligned} \quad (12)$$

式中：第一阶段最外层 \min 的决策变量 x 是 $P_{i,t}^{\text{mg,ces}}$ ，表示在第一阶段首先得到决策方案中微网 i 与共享储能电站的交互电量；第二阶段最内层 \min 的决策变量是 y 和 z ， y 表示微网内各设备出力， z 表示园区微网内电储能设备充放电的二进制状态变量；第二阶段最外层 \max 的决策变量是系统运行最恶劣场景的不确定变量 \mathbf{u} 。

各项成本的具体计算如式(13)所示。

$$\begin{cases} C_i^{\text{mg,ces}} = \sum_{t=1}^T (p_{i,t}^{\text{mg,ces}} P_{i,t}^{\text{mg,ces}}) \\ C_i^{\text{net}} = p_i^{\text{net}} \sum_{t=1}^T (P_{i,t}^{\text{mg,ces}}) \\ C_i^{\text{DC}} = p_i^{\text{com}} P_{\text{DC},i,t}^{\text{del,re}} \\ C_i^{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (p_{i,t,e}^{\text{buy}} P_{i,t,e}^{\text{buy}} + p_{i,t,e}^{\text{sell}} P_{i,t,e}^{\text{sell}} + p_{i,t}^{\text{gas}} P_{i,t}^{\text{GT,gas}}) \\ C_i^{\text{cur}} = \delta_i^{\text{cur}} \sum_{t=1}^T (P_{i,t}^{\text{PV,cur}} + P_{i,t}^{\text{WT,cur}}) \\ C_i^{\text{om}} = \delta_i^{\text{GT}} P_{i,t}^{\text{GT}} + \delta_i^{\text{fl}} L_{i,t}^{\text{fl}} + \lambda_i^{\text{loss}} \sum_{t=1}^T (P_{\text{ess},i,t}^{\text{ch}} + P_{\text{ess},i,t}^{\text{dis}}) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $C_i^{\text{mg,ces}}$ 、 C_i^{net} 、 C_i^{DC} 、 C_i^{grid} 、 C_i^{cur} 、 C_i^{om} 分别表示园区微网与共享储能电站的交互成本、过网费用、数据中心用户补偿费用、购能成本、弃风弃光惩罚成本和运维成本； $p_{i,t}^{\text{mg,ces}}$ 表示园区数据中心微网 i 在 t 时刻与社区共享储能电站的交互电价； p_i^{com} 表示微网 i 的数据中心对有意愿转化为批处理负载的用户补偿价格； $p_{i,t,e}^{\text{buy}}$ 、 $p_{i,t,e}^{\text{sell}}$ 分别表示园区数据中心微网 i 在 t 时刻的购电和售电价格； $p_{i,t}^{\text{gas}}$ 表示数据中心微网 i 的购买天然气价格； δ_i^{cur} 表示微网 i 的弃风弃光惩罚系数； δ_i^{GT} 、 δ_i^{fl} 分别表示燃气轮机和低温水冷却装置的运行损耗系数； λ_i^{loss} 表示电储能设备充放电时的损耗系数。

3.3 两阶段鲁棒调度模型求解算法

由于上述两阶段鲁棒调度问题中，第二阶段的约束式(6)存在二进制变量，使储能在相同时刻不能同时充放电，故不能直接进行对偶变换以及利用 KKT 条件将 \max - \min 双层问题转化为容易处理的

单层问题, 因此本文采用嵌套 C&CG 算法, 即将原问题分为主问题和子问题, 基于子问题中的储能充放电二进制变量再次运用 C&CG 算法拆分为子问题 1 和子问题 2, 并循环迭代找到最优解。为了便于说明模型求解的具体思路, 将式(12)一式(13)概括为矩阵形式, 如式(14)所示。

$$\begin{cases} \min_x \{D^T x + \max_{u \in U} \min_{y, z} E^T y\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} Fx \leq h \\ Gx + Hy + Kz \leq f(u) \\ z \in \{0, 1\} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

式中: D 表示式(13)中第 1—2 行相应的系数矩阵; E 表示式(13)中第 3—6 行相应的系数矩阵; h 、 G 、 H 、 K 均为常系数矩阵。首行约束表示第一阶段的约束, 具体是式(8); 第 2 行约束表示第二阶段的约束, 具体是式(3)一式(7)、式(9)和式(10); $f(u)$ 表示源侧不确定变量的相关函数。

主问题模型表示如式(15)所示。

$$\begin{cases} \min_{x, \theta, y^m, z^m} \{D^T x + \theta\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} Fx \leq h \\ Gx + Hy^m + Kz^m \leq f^{m^*}(u) \\ \theta \geq E^T y^m \\ z^m \in \{0, 1\}, \forall 1 \leq m \leq M \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

式中: m 表示外层 C&CG 算法(子问题 1)当前的迭代次数, 最大迭代次数为 M ; 引入 θ 作为辅助变量, 第三行约束表示 max-min 第二阶段的成本相比于前 m 次迭代得到的成本值都更高; $f^{m^*}(u)$ 表示历经 m 次迭代求得最恶劣场景的关于风光出力不确定性变量 u 的函数。

子问题模型表示如式(16)所示。

$$\begin{cases} \max_{u \in U} \min_{y, z} E^T y \\ \text{s.t.} \begin{cases} Fx^* \leq h \\ Gx^* + Hy + Kz \leq f(u) \\ z \in \{0, 1\} \end{cases} \end{cases} \quad (16)$$

x^* 表示主问题中求得的第一阶段变量。由于子问题内层 min 问题中包含储能设备充放电的二进制状态变量, 不能直接转换为容易处理的单层问题, 故再次运用 C&CG 算法原理将其拆分为子问题 1 及子问题 2 进行迭代求解。

1) 问题 1 需要决策出最恶劣场景的二进制状态变量, 其表达式为

$$\begin{cases} \min_{y, z} E^T y \\ \text{s.t.} \begin{cases} Gx^* + Hy + Kz \leq f(u^n) \\ z \in \{0, 1\}, \forall 1 \leq n \leq N \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

式中: n 表示内层 C&CG 算法(子问题 2)目前的迭代次数, 迭代次数的上限为 N ; u^n 表示经过 n 次迭代获得的最恶劣场景关于风光出力的不确定性变量。

2) 由子问题 1 中决策得到的二进制状态变量作为常量输入子问题 2 中进行求解, 利用强对偶转换和 KKT 条件将 max-min 模型转换为单层模型, 其模型表示为

$$\begin{cases} \max_{u \in U} \eta^T [Gx^* + Kz^{n+1} - f(u)] \\ \text{s.t.} \begin{cases} E^T + \eta^T H = 0 \\ z^{n+1} \in \{0, 1\}, \eta \in \{0, 1\} \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

由于 $\eta^T f(u)$ 表示二进制变量与连续变量的乘积, 故引入辅助变量运用 Big-M 法对其进行线性化, 即 η 为引入的对偶变量, 且 η 中变量取值为 0 或 1。嵌套 C&CG 算法分解鲁棒模型的求解过程如图 3 所示。

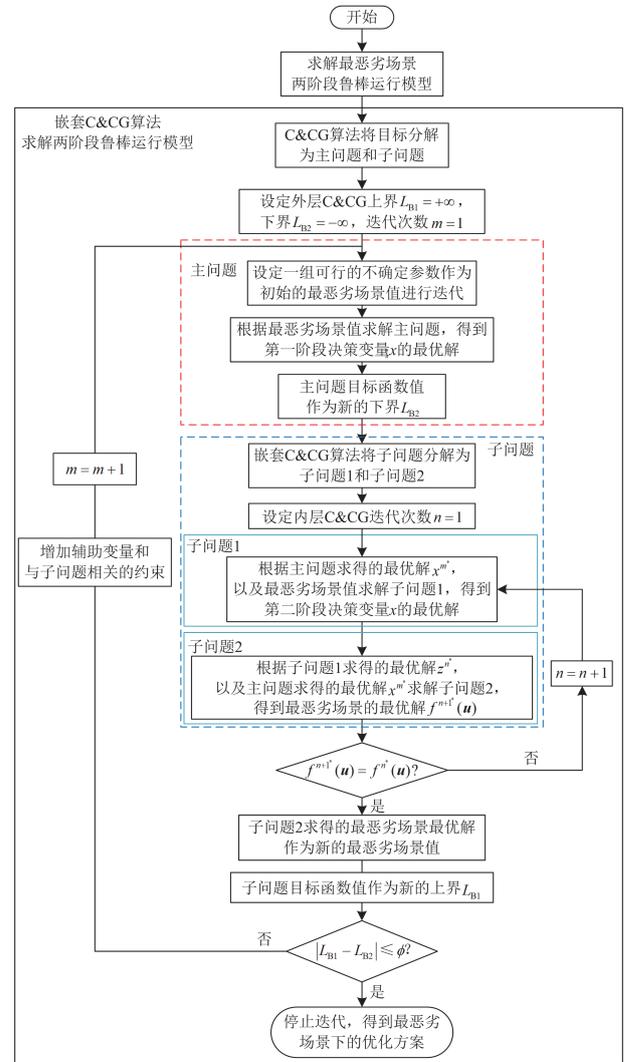


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

4 多园区数据中心微网与共享储能电站合作博弈模型及求解

4.1 基于纳什谈判的多园区数据中心微网与共享储能协同优化运行模型

在多园区数据中心微网-社区共享储能系统中,每个园区数据中心微网和社区共享储能运营商达成协议,通过合作的方式进行能量共济,使各主体最大程度地提高收益,并且公平合理地进行利益分配。根据纳什谈判标准模型的定义,本文的多微网和社区共享储能之间的合作博弈模型表达式如式(19)所示。

$$\begin{cases} \max(E_i^{\text{ces},0} - E_i^{\text{ces}}) \prod_{i=1}^I (E_i^{\text{mg},0} - E_i^{\text{mg}}) \\ \text{s.t.} \begin{cases} E_i^{\text{ces},0} - E_i^{\text{ces}} \geq 0 \\ E_i^{\text{mg},0} - E_i^{\text{mg}} \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $E_i^{\text{ces},0}$ 、 $E_i^{\text{mg},0}$ 分别表示共享储能运营商和园区数据中心微网运营商 i 的谈判破裂点,即社区共享储能独立运行成本; I 表示微网运营商的数目; E_i^{ces} 、 E_i^{mg} 分别表示共享储能和园区微网合作后的各主体成本。约束条件表示各主体在参与合作后运行成本下降,运行效益均能得到提升。式(19)是非凸非线性问题,不能直接采用求解器进行求解,所以通过一定的转化将其等效成求解联盟合作成本最小化问题和各主体交易谈判问题。

4.2 基于 ADMM 的联盟合作成本最小化问题求解

根据均值不等式原理,非线性模型式(19)可转换为式(20)所示求解模型,详细转换方法参考文献[22]。

$$\begin{cases} \min \left\{ \sum_{i=1}^I C_i^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}) + C^{\text{ces}}(P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}) \right\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}} = P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} \\ \text{式(1)、式(2)、式(8)} \\ \text{式(12)、式(13)} \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $C^{\text{ces}}(P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}})$ 表示式(1)中不考虑 $C_{\text{ces}}^{\text{mg}}$ 的合作后共享储能运行成本; $C_i^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}})$ 表示式(13)第 1 行中不考虑 $C_i^{\text{mg},\text{ces}}$ 的合作后园区数据中心微网 i 运行成本。其中第一行约束表示在 t 时刻微网 i 向共享储能电站售电功率 $P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}$ 等于共享储能电站向微网 i 的购电功率 $P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}$ 。

运用 ADMM 算法对其进行分布式求解,得到优化后的合作成本,利用辅助变量 $P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}$ 解耦社区共享储能和各园区数据中心微网之间的电交互量。

$$P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}} = P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} = P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} \quad (21)$$

引入拉格朗日乘子 λ_i 和惩罚因子 ρ_i 构建多园区数据中心微网与共享储能电站的分布式优化模型。

园区数据中心微网分布式优化运行模型为

$$\begin{cases} \min [C_i^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \lambda_i (P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} - P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}) + \\ \sum_{t=1}^T \frac{\rho_i}{2} \|P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} - P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}\|_2^2] \\ \text{s.t. 式(13)} \end{cases} \quad (22)$$

共享储能电站分布式优化运行模型为

$$\begin{cases} \min [C^{\text{ces}}(P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \lambda_i (P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} - P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}) + \\ \sum_{t=1}^T \frac{\rho_i}{2} \|P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} - P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}\|_2^2] \\ \text{s.t. 式(1)、式(2)} \end{cases} \quad (23)$$

基于 3.3 节分析的嵌套 C&CG 算法求解联盟合作成本最小化问题,分布式优化运行模型根据式(24)迭代拉格朗日乘子,如果满足式(25)迭代终止,得到 t 时刻园区数据中心微网和共享储能电站的最小联盟合作成本 $C_{*i}^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}})$ 和 $C_*^{\text{ces}}(P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}})$,以及对应时刻的电交互量 $P_{i,t}^{\text{ces}-\text{mg}}$ 。

$$\lambda_{i,t+1} = \lambda_{i,t} + \rho_i (P_{i,t}^{\text{ces}-\text{mg}} - P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}) \quad (24)$$

$$\left\{ \max \left[\sum_{t=1}^T \|P_{i,t}^{\text{ces}-\text{mg}} - P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}\|_2 \right] \leq \zeta \right. \quad (25)$$

式中: $\lambda_{i,t+1}$ 、 $\lambda_{i,t}$ 分别表示 $t+1$ 时刻和 t 时刻对应的拉格朗日乘子; ζ 表示合作成本最小化问题的收敛阈值。

4.3 基于 ADMM 的联盟各主体交易谈判问题求解

通过求解联盟合作成本最小化问题得到园区微网与社区共享储能电站之间的最优电交互量 $P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}$; 共享储能电站单独运行时的成本可由求解器直接求解得到,表示为 C_0^{ces} ; 联盟合作前各园区数据中心微网两阶段鲁棒模型可由嵌套 C&CG 算法求解得到,表示为 $C_{i,0}^{\text{mg}}$ 。非线性模型式(19)转化为取对数形式表达式如式(26)所示,详细转换方法参考文献[22]。

$$\begin{cases} \min \left\{ -\left[\ln \sum_{i=1}^I (C_{i,0}^{\text{mg}} - C_{*i}^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}) - C_i^{\text{mg},\text{ces}}) + \right. \right. \\ \left. \ln(C_0^{\text{ces}} - C_*^{\text{ces}}(P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}) - C_i^{\text{ces},\text{mg}}) \right\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} C_{i,0}^{\text{mg}} - C_{*i}^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}}) - C_i^{\text{mg},\text{ces}} \geq 0 \\ C_0^{\text{ces}} - C_*^{\text{ces}}(P_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}}) - C_i^{\text{ces},\text{mg}} \geq 0 \\ \underline{p}_i^{\text{grid}} \leq p_{i,t}^{\text{mg},\text{ces}} / p_{i,t}^{\text{ces},\text{mg}} \leq \bar{p}_i^{\text{grid}} \\ \text{式(1)、式(2)、式(8)、式(13)} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

式中, \bar{p}_i^{grid} 和 p_i^{grid} 分别表示园区微网与配电网的交互电价上下界。

在模型式(26)中包含了各园区微网和共享储能电站之间电能交易价格的耦合变量, 且由式(2)和式(13)的第1行可知需要满足各园区微网与社区共享储能之间的购售能价格相等, 利用辅助变量 $p_{i,t}^{\text{ces-mg}}$ 解耦共享储能与各园区数据中心微网之间的电交易价格。

$$p_{i,t}^{\text{mg,ces}} = p_{i,t}^{\text{ces,mg}} = p_{i,t}^{\text{ces-mg}} \quad (27)$$

采用 ADMM 算法对其进行分布式求解, 引入拉格朗日乘子 $\sigma_{i,t}$ 和惩罚因子 γ_i 构建多园区数据中心微网与共享储能电站的分布式优化模型。

园区数据中心微网分布式优化运行模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \{ -[\ln(C_{i,0}^{\text{mg}} - C_{*i}^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg,ces}}) - p_{i,t}^{\text{mg,ces}} P_{*i,t}^{\text{ces-mg}}) + \\ \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sigma_i (p_{i,t}^{\text{ces-mg}} - p_{i,t}^{\text{mg,ces}}) + \\ \sum_{i=1}^I \frac{\gamma_i}{2} \|P_{i,t}^{\text{ces-mg}} - p_{i,t}^{\text{mg,ces}}\|_2^2] \} \\ \text{s.t. } C_{i,0}^{\text{mg}} - C_{*i}^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg,ces}}) - p_{i,t}^{\text{mg,ces}} P_{*i,t}^{\text{ces-mg}} \geq 0 \end{array} \right. \quad (28)$$

共享储能电站分布式优化运行模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \{ -[\ln(C_{i,0}^{\text{mg}} - C_{*i}^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg,ces}}) - p_{i,t}^{\text{ces,mg}} P_{*i,t}^{\text{ces-mg}}) + \\ \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \sigma_i (p_{i,t}^{\text{ces-mg}} - p_{i,t}^{\text{ces,mg}}) + \\ \sum_{i=1}^I \frac{\gamma_i}{2} \|P_{i,t}^{\text{ces-mg}} - p_{i,t}^{\text{ces,mg}}\|_2^2] \} \\ \text{s.t. } C_{i,0}^{\text{mg}} - C_{*i}^{\text{mg}}(P_{i,t}^{\text{mg,ces}}) - p_{i,t}^{\text{ces,mg}} P_{*i,t}^{\text{ces-mg}} \geq 0 \end{array} \right. \quad (29)$$

分布式优化运行模型根据式(30)迭代拉格朗日乘子, 如果满足式(31)迭代终止, 得到 t 时刻园区微网和共享储能电站的交易电价 $p_{i,t}^{\text{ces} \leftrightarrow \text{mg}}$ 。

$$\sigma_{i,t+1} = \sigma_{i,t} + \gamma_i (p_{i,t}^{\text{ces} \leftrightarrow \text{mg}} - p_{i,t}^{\text{mg,ces}}) \quad (30)$$

$$\max \left[\sum_{t=1}^T \|p_{i,t}^{\text{ces} \leftrightarrow \text{mg}} - p_{i,t}^{\text{mg,ces}}\|_2^2 \right] \leq \varpi \quad (31)$$

式中: $\sigma_{i,t+1}$ 、 $\sigma_{i,t}$ 分别表示 $t+1$ 时刻和 t 时刻对应的拉格朗日乘子; ϖ 表示联盟各主体交易谈判问题的收敛阈值。

5 算例分析

5.1 算例参数设置

本文选用多园区数据中心微网作为算例测试系统, 该系统考虑 1 个社区共享储能电站和 3 个园区数据中心微网间的电能共享, 社区共享储能为电储能。微网 1 配备风机和光伏, 微网 2 配备风机, 微网 3 配备光伏, 各微网的机组参数设置如表 1 所示, 可再生能源出力和各微网的负载如图 4 所示。共享

储能电站向电网售电价格与微网向电网售电价格均为 0.3 元/kWh。算例仿真在 Matlab R2021b 的编译环境下, 采用 Yalmip 工具箱构建模型, 基于求解器 Gurobi 求解联盟成本最小化问题, 基于求解器 Mosek 求解各主体交易谈判问题。

表 1 多微网与共享储能系统运行参数

Table 1 Operational parameters of multi-park microgrid with shared energy storage systems

参数	数值
燃气轮机额定功率	3500 kW
燃气轮机电转换效率	30%
天然气低热值	9.7 kWh/m ³
天然气单价	2.2元/m ³
蓄电池额定效率	95%
水冷却装置运行损耗系数	0.1 元/kWh
向配电网购电功率上限	5000/3000 kW
弃风弃光惩罚成本	0.5/0.5 元/kWh
共享储能容量上下限	9000/1000 kWh
过网费	0.01 元/kWh

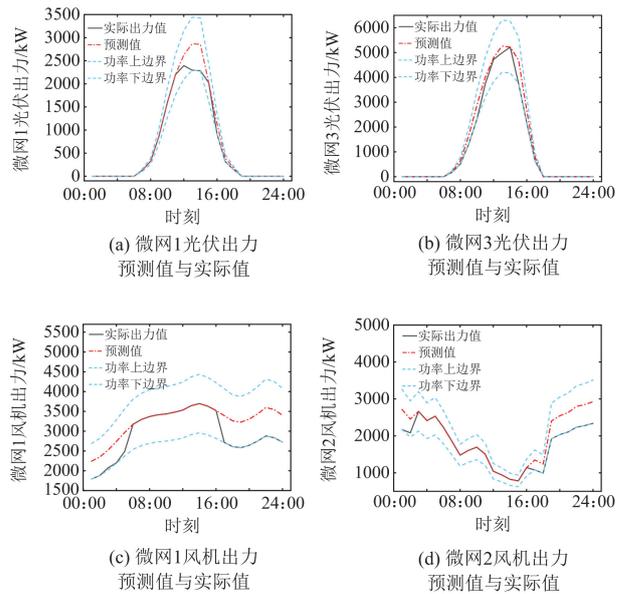


图 4 微网风光出力

Fig. 4 PV and WT output for microgrids

5.2 多园区微网协同运行优化结果分析

为了验证所提各园区数据中心微网与共享储能协同优化运行模型的有效性, 设置 6 种方案进行对比分析, 如表 2 所示, 获得的多种方案总运行成本如表 3 所示, 其中各方案可再生能源出力不确定性的最大偏差设置为 0.2 倍, 保守性参数为 12, 数据中心批处理负载占总负载比例为 22%, 补偿价格为 0.1 元。

表 2 不同运行方案对比

Table 2 Comparison of different operating schemes

运行方案	考虑风光出力的不确定性	各微网与共享储能合作	各微网建立数据中心
1	×	×	√
2	×	√	√
3	√	×	×
4	√	√	×
5	√	×	√
6	√	√	√

表 3 不同方案求解结果对比

Table 3 Comparison of solution results of different schemes
元

方案	成本				总成本
	微网 1	微网 2	微网 3	共享储能	
1	15 021.03	24 659.19	33 490.96	0	73 171.18
2	12 759.03	22 118.69	27 463.21	-3094.06	59 246.87
3	16 912.91	31 438.74	36 171.88	0	84 523.53
4	15 238.81	27 165.51	32 725.37	-2356.24	72 773.45
5	17 370.22	29 606.91	35 025.53	0	82 002.66
6	15 152.59	25 372.14	29 493.27	-3101.15	66 916.85

通过表 3 的数据结果可得以下结论。

1) 方案 6 相较于方案 5 总成本降低 15 085.81 元, 方案 4 相较于方案 3 总成本降低 11 750.08 元, 方案 2 相较于方案 1 总成本降低 13 924.31 元。这是因为社区共享储能与各园区微网进行电能共享后, 能减少燃气轮机出力, 优先消纳可再生能源, 并且减少向配电网的购电和购气, 实现联盟运行总成本的下降。

2) 方案 6 相较于方案 2 总成本从 59 246.87 元提高至 66 916.85 元, 方案 5 相较于方案 1 总成本从 73 171.18 元提高至 82 002.66 元。这是因为各园区微网考虑风光出力的不确定性, 而在考虑最恶劣场景时, 可再生能源出力相比预测出力有所降低, 这部分能源需要通过各微网增加燃气轮机机组出力来补充, 导致各园区微网的运行成本提升。

3) 方案 6 相较于方案 4 总成本从 72 773.45 元降低至 66 916.85 元, 方案 5 相较于方案 3 总成本从 84 523.53 元降低至 82 002.66 元。这是因为各园区微网建立数据中心后, 园区的部分电负荷作为数据中心的批处理负载允许在一定的时间范围内延迟处理, 在效益的驱动下, 批处理负载避开用电高峰期和分时电价较高的时段进行处理, 有利于平抑可再生能源, 实现联盟运行总成本的下降。

5.3 电能交互结果分析

基于方案 6 进行分析, 社区共享储能电站与微网之间的电能交互结果如图 5 所示。微网 1 建有风

机和光伏, 在 16:00—23:00 时段电负荷大, 相较于其他微网全天的电力都更多。微网 2 建有风机, 但是风机发电较为不足, 相较于微网 1 更为缺电。微网 3 有光伏发电, 在 10:00—16:00 时段光伏发电有富余, 表现为多电型微网, 在其余时段表现为缺电型微网。在 00:00—06:00 时段各个园区微网均售电给共享储能电站; 在 07:00—09:00 时段微网 2 和微网 3 风光出力在 1700 kW 以下, 而电负荷的功率在 3200 kW 以上, 所以这时段的风光出力不能完全满足, 需要向共享储能电站购电; 在 10:00—17:00 时段, 微网 3 的光伏出力激增, 通过向社区共享储能电站售电来消纳可再生能源; 在 18:00—22:00 时段, 微网 1 和微网 3 的光伏出力大幅减少, 供不应求, 向社区共享储能电站购电; 在 23:00—24:00 时段, 微网 2 的电负荷相较于其他时段降低, 风机出力增加, 供大于求, 通过向社区共享储能电站售电以消纳剩余可再生能源。综上, 3 个园区微网在各时段与共享储能电站均有电能交互, 说明共享储能电站与微网形成联盟可以促进各园区数据中心微网的供需均衡。

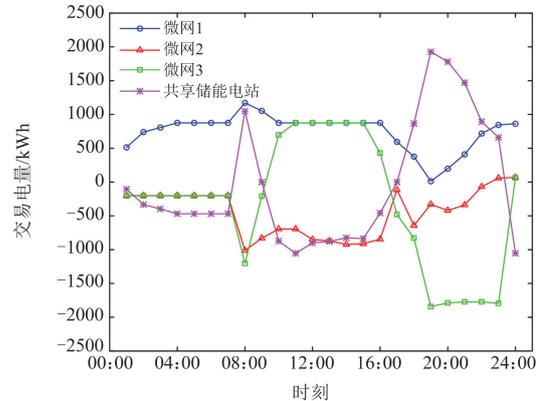


图 5 共享储能电站与微网的电能交互结果

Fig. 5 Shared energy storage and microgrid power interaction results

微网 3 的电能优化结果如图 6 所示, 微网 3 在 00:00—07:00 和 23:00—24:00 低电价时段增加向电网购电量, 减少燃气轮机发电量; 在光伏发电量不足的时段向储能电站购电, 降低运行成本。

本文采用 ADMM 算法分布式求解联盟合作成本最小化问题和各主体交易谈判问题, 共享储能电站与微网的电能交易价格如图 7 所示; 合作成本的迭代情况如图 8 所示, 迭代 8 次后成功收敛; 支付成本的迭代情况如图 9 所示, 迭代 7 次后成功收敛, 说明该方法具有良好的收敛性能。

5.4 成本与效益分析

基于方案6进行成本和效益分析, 获得结果如表4所示。接着求解各主体交易谈判问题进行联盟的收益再分配, 因为合作成本中不包括园区微网与共享储能电站间的电交易费用, 所以再分配前后的联盟成本不变。观察可发现, 最后联盟成本降低了

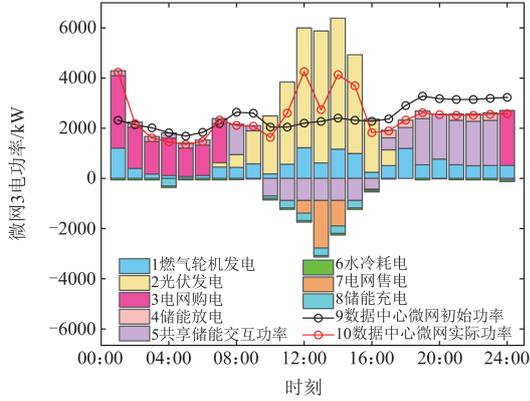


图6 微网3电能优化结果

Fig. 6 Electrical energy optimization results for microgrid 3

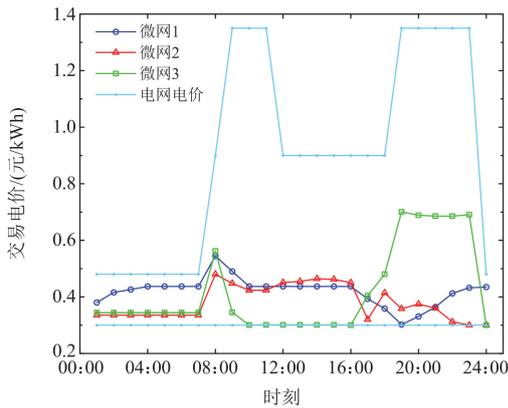


图7 共享储能电站与微网的电能交易价格

Fig. 7 Electricity trading prices for shared storage station and microgrids

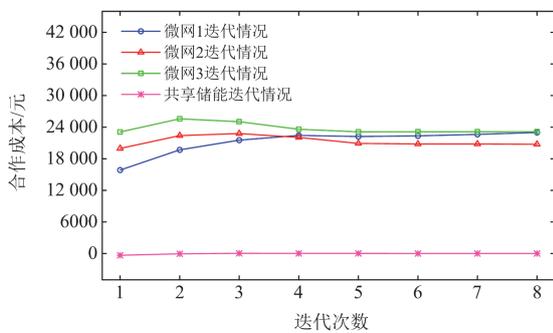


图8 ADMM 算法求解联盟合作成本最小化问题的迭代情况

Fig. 8 Iterative situation of ADMM algorithm for solving the problem of minimizing the cost of alliance cooperation

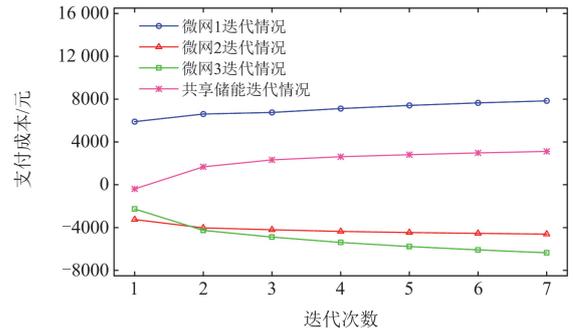


图9 ADMM 算法求解支付成本最小化问题的迭代情况

Fig. 9 Iterative situation of ADMM algorithm for solving the problem of minimizing the payment cost

15 085.81 元, 并且各主体的效益均获得一定程度的提升, 说明该模型能兼顾各方利益, 实现合作互惠。

表4 联盟的成本与效益分析

Table 4 Analysis of the costs and benefits of the alliance

	元				
	微网1	微网2	微网3	共享储能	联盟
破裂点成本	17 370.22	29 606.91	35 025.53	0	82 002.66
合作成本	22 994.1	20 763.14	23 145.54	14.07	66 916.85
支付成本	7841.51	-4609	-6347.73	3115.22	0
谈判结束成本	15 152.59	25 372.14	29 493.27	-3101.15	66 916.85
效益提升值	2217.63	4234.77	5532.26	3101.15	15 085.81

5.5 数据中心补偿价格与比例变量的影响

数据中心运行过程中, 数据中心运营商会根据需要的任务量进行评估, 为用户提供适当的激励及补偿费用, 使用户更愿意上报批处理工作负载, 批处理负载能延迟一段时间处理, 使部分负载转移至服务器通畅或低电价时段, 在数据负荷调度中有更好的灵活性。数据中心批处理负载比例与补偿价格的关系如图10所示, 详细推导过程参考文献[23]。

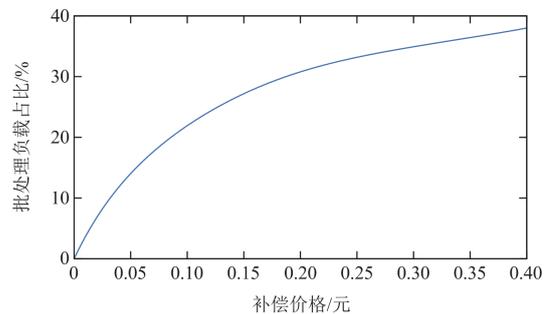


图10 数据中心批处理负载比例与补偿价格关系

Fig. 10 Relationship between batch load ratio and compensation price in data center

按照图10中数据中心批处理负载比例与补偿价格的关系进行设置, 补偿价格设置最大不超过0.3

元。对方案 5 中微网 3 进行分析，社区共享储能电站与各微网间无电能共享，可得到不同补偿价格对应微网运行成本的变化趋势如图 11 所示，可看出鲁棒参数固定而补偿价格不同时，微网运行成本存在极小值，在这个补偿价格下能获得最优运行成本。

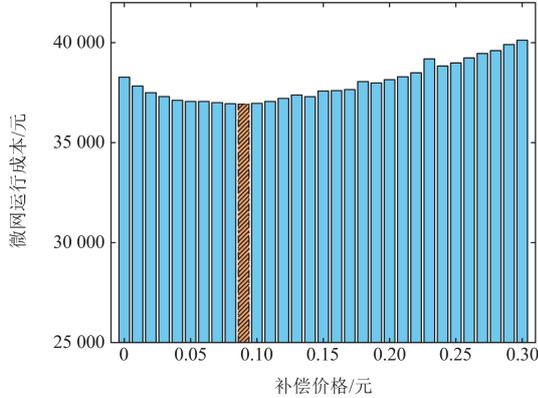


图 11 微网运行成本与补偿价格的关系

Fig. 11 Relationship between microgrid operating cost and compensation price

5.6 数据中心补偿价格与鲁棒参数对运行成本的影响

选取方案 5 中微网 3 进行分析，社区共享储能电站与各微网间无电能共享。鲁棒优化过程中，微网的运行成本很大程度上由风光出力的不确定程度和数据中心批处理负载在总负载中所占比例共同影响，风光出力的不确定程度一般由鲁棒波动偏差和波动保守度共同决定。

为了验证鲁棒波动偏差和补偿价格对微网运行成本的影响，设置波动保守性为定值 12，获得园区数据中心微网运行总成本随鲁棒波动偏差和补偿价格变化关系的三维图，如图 12 所示。观察可发现，鲁棒波动偏差与运行总成本呈现正相关，这是由于鲁棒波动偏差表示最恶劣值与预测值的偏差量，偏差量越高则运行总成本也越高。由于补偿价格对运行成本的影响关系中存在极值点，分析每一个鲁棒波动偏差参数中各个补偿价格得到的运行总成本，得到运行总成本最低时对应的补偿价格，记录以鲁棒波动偏差为横坐标、最优补偿价格为纵坐标的折线，如图 13(a)所示，该折线可以为运营商提供经验指标，即在波动保守度固定的情况下，根据鲁棒波动偏差在某一范围变化时，选取相应的用户补偿价格使得微网的运行总成本最小。

同理，可得到不同波动保守度情况对应的最优补偿价格的关系曲线，如图 13(b)所示。观察可以发现，鲁棒优化参数中鲁棒波动偏差和波动保守度对数据中心微网总运行成本的影响趋势相似，均需要

牺牲部分经济性来应对不确定性带来的风险。

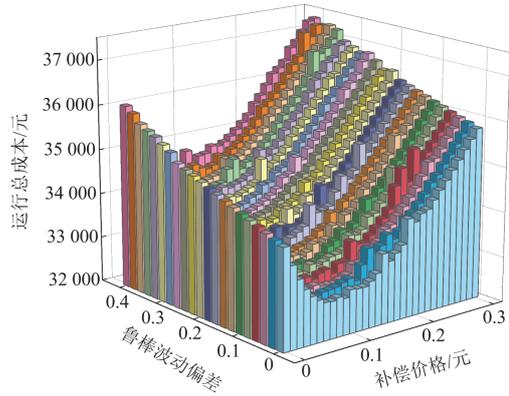
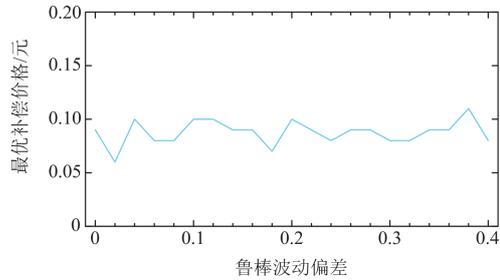
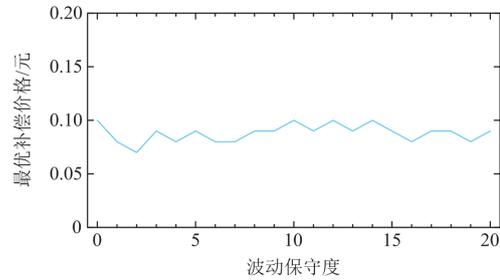


图 12 不同鲁棒波动偏差和补偿价格下的微网运行总成本

Fig. 12 Microgrid operating cost with different robust fluctuation deviation and compensation price



(a) 鲁棒波动偏差与补偿价格的关系



(b) 波动保守度与补偿价格的关系

图 13 鲁棒参数与补偿价格的关系

Fig. 13 Relationship between robust parameter and compensation price

6 结论

本文以多园区数据中心微网系统为研究对象，提出一种考虑可再生能源出力不确定性的多园区数据中心微网与社区共享储能协同运行模型。其中，数据中心微网模型为两阶段鲁棒模型，多主体协同运行模型基于纳什谈判理论转化为联盟成本最小化子问题和各主体交易谈判子问题，采用交替方向乘子法分布式求解。算例分析得出的结论如下所述。

1) 多园区数据中心微网与社区共享储能电站进行电能共享形成联盟,相较于各主体未合作的情况,可以有效降低各主体运行成本,且联盟效益有较大提升。并且采用交替方向乘子法对多园区数据中心微网与社区共享储能协同运行模型进行分布式求解,具有良好的收敛性能。

2) 提出的模型考虑到风机和光伏电站存在的不确定性,将园区数据中心微网以两阶段鲁棒模型形式表示,通过C&CG算法嵌套RD算法将其拆分为主问题和子问题进行迭代求解,在数据中心微网运营商能接受的鲁棒参数波动范围内,计算出最恶劣场景下的微网运行总成本,提高系统应对不确定性风险能力。

3) 在鲁棒波动偏差参数和波动保守度参数不同的情况下,分析出相应的用户最优补偿价格,满足数据中心微网运营商应对不确定性风险的需求,更好地权衡经济性与安全性。

参考文献

- [1] ZHU Y, LAN M. Digital economy and carbon rebound effect: evidence from Chinese cities[J]. *Energy Economics*, 2023, 126: 106957.
- [2] Natural Resources Defense Council (NRDC). Data center efficiency assessment[R]. NRDC, 2014.
- [3] 丁肇豪, 曹雨洁, 张素芳, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(一): 数据中心能耗模型[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3161-3176.
DING Zhaohao, CAO Yujie, ZHANG Sufang, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet (I): energy demand management model of data center[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9): 3161-3176.
- [4] URGAONKAR R, URGAONKAR B, NEELY M J, et al. Optimal power cost management using stored energy in data centers[C]// *Proceedings of the ACM SIGMETRICS Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*, 2011, San Jose: ACM: 221-232.
- [5] 李彬, 杜亚彬, 曹望璋, 等. 计及负载特性的数据中心微电网双层优化配置[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(2): 75-83.
LI Bin, DU Yabin, CAO Wangzhang, et al. Bi-level optimal configuration of microgrid in data center considering load characteristics[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(2): 75-83.
- [6] 解力也. 不确定环境下数据中心微网的资源优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
XIE Liye. Research on optimal resource scheduling of data center microgrid in uncertain environment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [7] 甘润东, 龙玉江, 汤杰, 等. 计及负荷时空转移需求响应的数据中心聚合商最优运行策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(3): 20-26.
GAN Rundong, LONG Yujiang, TANG Jie, et al. Optimal operation strategy of data center aggregators for demand response considering temporal and spatial load shift[J]. *Electric Power*, 2024, 57(3): 20-26.
- [8] 祁兵, 曹望璋, 李彬, 等. 计及负载特征及响应特性的多数据中心双层优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(21): 30-41.
QI Bing, CAO Wangzhang, LI Bin, et al. Bi-level optimization model of multiple data centers considering workload features and response characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(21): 30-41.
- [9] 王再闯, 陈来军, 李笑竹, 等. 基于合作博弈的产销者社区分布式光伏与共享储能容量优化[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(23): 5922-5932.
WANG Zaichuang, CHEN Laijun, LI Xiaozhu, et al. Capacity optimization of distributed PV and shared energy storage of prosumer community based on cooperative game[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(23): 5922-5932.
- [10] 谢涵铮, 刘友波, 马超, 等. 计及参与成本贡献的用户侧云储能服务及其纳什议价模型[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(2): 9-17.
XIE Hanzheng, LIU Youbo, MA Chao, et al. User-side cloud energy storage service considering participation cost contribution and its Nash bargaining model[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(2): 9-17.
- [11] 嵇文路, 廖英祺, 荆江平, 等. 考虑热惯性的广义储能共享交易机制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 178-186.
JI Wenlu, LIAO Yingqi, JING Jiangping, et al. A generalized energy storage sharing mechanism considering thermal inertia[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 178-186.
- [12] 朱旭, 孙元章, 杨博闻, 等. 考虑不确定性与非完全理性用能行为的电动汽车集群可调度潜力计算方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(10): 245-254.
ZHU Xu, SUN Yuanzhang, YANG Bowen, et al. Calculation method of EV cluster's schedulable potential capacity considering uncertainties and bounded rational energy consumption behaviors[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(10): 245-254.
- [13] 詹祥澎, 杨军, 韩思宁, 等. 考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J]. *电力系统自动化*,

- 2021, 45(10): 86-96.
ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining, et al. Two-stage market bidding strategy of charging station considering schedulable potential capacity of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 86-96.
- [14] JI Zhenya, LIU Xiaofeng, TANG Difei. Game-theoretic applications for decision-making behavior on the energy demand side: a systematic review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(2): 1-20.
- [15] 齐彩娟, 车彬, 杨燕, 等. 考虑新能源消纳与储能参与调频的共享储能主从博弈鲁棒定价方法[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 26-39.
QI Caijuan, CHE Bin, YANG Yan, et al. Master-slave game-based robust pricing method of shared energy storage considering renewable energy accommodation and energy storage participating in frequency modulation[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 26-39.
- [16] 梅生伟, 刘锋, 魏韡. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [17] 冯俊宗, 何光层, 代航, 等. “双碳”目标下基于合作博弈的“源-荷”低碳经济调度[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 120-127.
FENG Junzong, HE Guangceng, DAI Hang, et al. The “source-load” low-carbon economic dispatch based on cooperative game under the “double carbon” goal[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 120-127.
- [18] 王芸芸, 马志程, 周强, 等. 兼顾公平性的多能源合作博弈优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 482-492.
WANG Yunyun, MA Zhicheng, ZHOU Qiang, et al. Multi energy cooperative game optimal scheduling considering fairness[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(10): 482-492.
- [19] 李方姝, 余昆, 陈星莺, 等. 碳约束下基于双重博弈的电力零售商售电价格决策优化[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 126-136.
LI Fangshu, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Price decision optimization for electricity retailers based on dual game under carbon constraints[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 126-136.
- [20] 张程, 匡宇, 邹复民, 等. 考虑风光不确定性与电动汽车的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 236-244.
ZHANG Cheng, KUANG Yu, ZOU Fumin, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy system considering wind and solar uncertainty and electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 236-244.
- [21] 王开艳, 梁岩, 贾嵘, 等. 不确定环境下基于纳什谈判的含掺氢燃气综合能源多微网两阶段优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3141-3159.
WANG Kaiyan, LIANG Yan, JIA Rong, et al. Two-stage optimal scheduling of Nash negotiation-based integrated energy multi-microgrids with hydrogen-doped gas under uncertain environment[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3141-3159.
- [22] 张程, 罗玉锦, 陈昌亮. 考虑源荷不确定的多园区微网与共享储能电站协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 77-89.
ZHANG Cheng, LUO Yujin, CHEN Changliang. Collaborative optimization operation of multi park microgrids and shared energy storage power stations considering source load uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 77-89.
- [23] 马浩天, 胡俊杰, 童宇轩. 考虑灵活性的数据中心微网两阶段鲁棒规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19): 7396-7409.
MA Haotian, HU Junjie, TONG Yuxuan. A two-stage robust planning approach for data center microgrids considering flexibility[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19): 7396-7409.

收稿日期: 2024-06-13; 修回日期: 2024-10-11

作者简介:

张程(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统稳定性分析和广域监测等; E-mail: zhangcheng@fjut.edu.cn

江炜龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制; E-mail: 1979471863@qq.com

兰嵩(1981—), 男, 通信作者, 副教授, 研究方向为智能制造和新能源。E-mail: lansong@126.com

(编辑 张颖)