

考虑置信间隙决策理论的多能微网群协同共赢优化研究

高建伟^{1,2}, 王紫莹^{1,2}, 孟琪琛^{1,2}, 闫宇声^{1,2}

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206; 2. 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 为促进微网中新能源消纳与低碳经济运行, 构建了含共享储能电站的多能微网群模型。首先, 建立了含电、热、气的多能微网模型, 并由多个多能微网组成合作联盟共同建立共享储能。其次, 考虑风光出力的相关性和不确定性, 针对多能微网群构建多目标鲁棒优化调度模型, 采用 Copula-多场景置信间隙决策理论, 旨在实现总成本最小与碳排放量最少的双重目标。最后, 考虑联盟内成员的能源交互贡献、风险水平、碳减排贡献, 利用改进 Shapely 值法量化各联盟主体的贡献, 以公平分配合作剩余。算例结果表明, 所提模型相比独立配置储能, 总成本降低了 318.64%, 碳排放减少了 30.24%; 且实现各主体对联盟的综合贡献水平与合作剩余分配的精准匹配, 提升多能微网参与合作的积极性。

关键词: 共享储能; 多能微网群; Copula; 多场景置信间隙决策; 改进 Shapley 值

Collaborative Win-Win Optimization Study of Multi-Energy Microgrid Cluster Considering Confidence Gap Decision Theory

GAO Jianwei^{1,2}, WANG Ziyang^{1,2}, MENG Qichen^{1,2}, YAN Yusheng^{1,2}

(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of New Energy Electricity and Low-Carbon Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to promote new energy consumption and low-carbon economic operation in microgrids, a multi-energy microgrid cluster model with shared energy storage power stations is constructed. Firstly, a multi-energy microgrid model with electricity, heat and gas is established, and multiple microgrids form a cooperative alliance to jointly establish shared energy storage. Secondly, acknowledging the intricate correlation and inherent unpredictability of wind and solar energy outputs, a refined multi-objective robust optimization scheduling model for the multi-energy microgrid cluster is formulated. This approach integrates Copula-multi-scenario confidence gap decision theory to attain the dual objectives of cost minimization and carbon emission reduction. Finally, considering the energy interaction contribution, risk level, and carbon reduction contribution of the members in the alliance, the benefit of the improved Shapely value method is used to quantify the contribution of each alliance subject and equitably distribute the cooperation surplus. The example results show that the proposed model reduces the total cost by 18.64% and carbon emission by 30.24% compared with the independent allocation of energy storage, and it realizes the precise matching between the comprehensive contribution of each subject to the alliance and the distribution of the cooperation surplus, so as to enhance the enthusiasm of the multi-energy microgrids to participate in the cooperation.

Key words: shared energy storage; multi-energy microgrid cluster; Copula; multi-scenario confidence gap decision; improved Shapley value

0 引言

在“双碳”目标引领下,以风光为代表的分布式新能源迅速发展,当前电力系统改革正聚焦于构建一种以可再生能源为主导的新型电力架构^[1],促进高比例新能源并网消纳成为电力系统的一大挑战^[2-3]。多能微网(multi-energy microgrid, MEMG)可通过协调用户对不同类型的需求和实时价格有效促进新能源消纳^[4]。

针对微网的运行优化已开展了很多研究,文献[5]以微网运行成本与环境成本最小为目标构建冷热电气多能微网的优化调度模型。文献[6]构建了考虑热动态特性和碳交易机制的电-气-热多能微网模型,实现满足经济性和低碳性的最佳调度。然而,以上研究均局限于单一微网,未考虑微网间的能源交互。文献[7-9]均考虑了共享储能,其中文献[7]利用电热交互对共享储能和多综合能源系统进行优化调度,验证了共享储能在节约成本方面的有效性。文献[8]实现城市楼宇间分布式储能的容量共享,既提升了储能利用率,又降低了集群运行成本。文献[9]提出“集中共享、分散复用”的微电网群云储能系统,以经济性、低碳性和可靠性为目标进行优化配置。上述文献中的共享储能均为第三方建设运营,而对于多微网自建共享储能的机制尚缺乏深入研究。此外,由于风光出力具有高度不确定性,需要考虑其对系统优化调度的影响。

在应对不确定性问题时,常用方法主要有随机规划(stochastic optimization, SO)、鲁棒优化(robust optimization, RO)和信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGD T)等^[10]。文献[11]针对源荷不确定性建立了综合能源系统随机规划模型。文献[12]引入鲁棒系数描述电价和新能源出力的不确定性。文献[13]利用IGD T对风、光发电和用户负荷3个不确定变量进行描述,在最坏情况下建立了虚拟电厂近零碳调度优化模型。然而,上述方法均存在一定弊端:SO的结果过于主观或保守;RO难以保证鲁棒性;IGD T通常使用对称的均匀分布来描述随机性,导致对不确定性区间的描述过于粗糙^[10]。为此,文献[14]提出多场景置信间隙决策理论(multi-scenario confidence gap decision theory, MCGD T),采用概率置信区间描述不确定性,充分反映不确定变量的随机性与多态性,

实现置信鲁棒度与系统综合目标的协同优化,更加准确合理地衡量非线性鲁棒度。上述文献为本文可再生新能源不确定性研究奠定了基础,然而这些研究未能充分探讨同一区域内的风光出力的相关性。

此外,合作建立共享储能的各多能微网隶属于不同利益主体,所以不仅涉及联盟整体满意度最高问题,还涉及合作剩余分配问题,以同时满足整体与个体利益的最大化。文献[15]对含电转气的综合能源联盟内的每个主体进行了公平合理的利润分配。文献[16]按各微电网的边际贡献对涌现收益进行再分配,解决系统优化与个体利益的冲突。文献[15-16]均采用Shapley值法分配合作收益,但该方法认为每种联盟组合发生的概率相同,未考虑其他因素对利益分配的影响。

综上,本文考虑区域内相邻的多能微网合作共建共享储能,以合作联盟为研究对象建立经济-环境的优化调度模型。首先,考虑风光出力的相关性和不确定性,基于Copula-MCGD T方法为联盟构建鲁棒优化模型。其次,提出考虑能源交互贡献度、碳减排贡献度及风险水平的多因素改进Shapley值法,对合作剩余进行分配。最后,通过算例部分验证本文所提模型的有效性。

1 考虑共享储能的多能微网群优化调度模型

具有多种发电和负荷形式的微电网通常被称为多能微网^[17]。本文中多能微网内含电、热、气多种能源,耦合燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉和电转气多种能源转换设备,通过与上级电网和天然气网交互充分满足系统内部负荷需求。多个多能微网组成合作联盟形成多能微网群,并自行建立共享储能(shared energy storage, SES),其框架结构如图1所示。在联盟中,微网间可通过SES电能共享解决电能不足或过剩问题。

1.1 目标函数

1.1.1 总成本

$$\min C_{\text{total}} = C^{\text{MEM}} + C^{\text{SES}} \quad (1)$$

式中: C^{MEM} 、 C^{SES} 分别为多能微网群成本和共享储能成本; C_{total} 为总成本。

1.1.1.1 多能微网群成本

$$C^{\text{MEM}} = \sum_{i=1}^n (C_{\text{om}}^i + C_{\text{utility}}^i + C_{\text{CO}_2}^i) \quad (2)$$

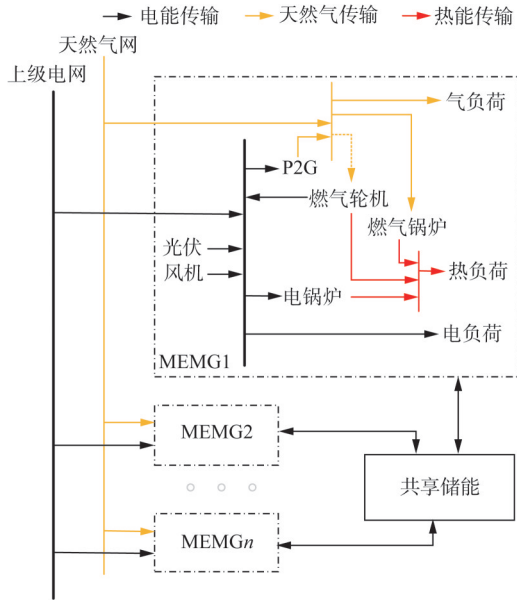


图1 含共享储能的多能微网群模型

Fig. 1 Multi-energy microgrid cluster model with shared energy storage

式中: C_{om}^i 、 $C_{utility}^i$ 、 $C_{CO_2}^i$ 分别为微网 i 的设备运维成本、能源购买成本和碳交易成本; n 为多能微网数量。

1) 设备运维成本

$$C_{om}^i = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T c_{om}^j P_{j,t}^i \quad (3)$$

式中: $P_{j,t}^i$ 为 t 时刻微网 i 中设备 j 的输出功率; c_{om}^j 为设备 j 的单位运维成本; J 为设备数量; T 为调度周期。

2) 能源购买成本

$$C_{utility}^i = \sum_{t=1}^T (c_{e,t} P_{i-grid,t}^{buy} + c_{g,t} Q_{i-grid,t}^{buy}) \quad (4)$$

式中: $P_{i-grid,t}^{buy}$ 、 $Q_{i-grid,t}^{buy}$ 分别为 t 时刻微网 i 的购电量和购气量; $c_{e,t}$ 、 $c_{g,t}$ 分别为 t 时刻购电、购气价格。

3) 碳交易成本

$$C_{CO_2}^i = \lambda (E_r^i - E_q^i) \quad (5)$$

$$\begin{cases} E_r^i = E_{e,buy,r}^i + E_{GTGB,r}^i + E_{gload,r}^i \\ E_{e,buy,r}^i = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_{i-grid,t}^{buy} + c_1 P_{i-grid,t}^{buy,2}) \\ E_{GTGB,r}^i = \sum_{t=1}^T (a_2 + b_2 P_{GTGB,t}^i + c_2 P_{GTGB,t}^{i,2}) \\ P_{GTGB,t}^i = P_{GT,t}^i + H_{GT,t}^i + H_{GB,t}^i \\ E_{gload,r}^i = \sum_{t=1}^T \varepsilon Q_{load,t}^i \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} E_q^i = E_{e,buy}^i + E_{GT}^i + E_{GB}^i + E_{gload}^i \\ E_{e,buy}^i = \chi_e \sum_{t=1}^T P_{i-grid,t}^{buy} \\ E_{GT}^i = \chi_h \sum_{t=1}^T (\chi_{e,h} P_{GT,t}^i + H_{GT,t}^i) \\ E_{GB}^i = \chi_h \sum_{t=1}^T H_{GB,t}^i \\ E_{gload}^i = \chi_{gload} \sum_{t=1}^T Q_{load,t}^i \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ 为碳交易成本系数; E_r^i 、 E_q^i 分别为微网 i 的实际碳排放量和碳排放权配额; $E_{e,buy,r}^i$ 、 $E_{GTGB,r}^i$ 、 $E_{gload,r}^i$ 分别为微网 i 购电、GT和GB、气负荷的实际碳排放量; $E_{e,buy}^i$ 、 E_{GT}^i 、 E_{GB}^i 、 E_{gload}^i 分别为对应碳排放权配额; $P_{GTGB,t}^i$ 为 t 时刻GT和GB的总热电输出; $P_{GT,t}^i$ 、 $H_{GT,t}^i$ 分别为 t 时刻微网 i 燃气轮机的输出电功率和输出热功率; $H_{GB,t}^i$ 为 t 时刻微网 i 燃气锅炉的输出热功率; $Q_{load,t}^i$ 为 t 时刻微网 i 的气负荷; a_1 、 b_1 、 c_1 为火电机组的碳排放因子; a_2 、 b_2 、 c_2 为耗天然气型机组的碳排放因子; ε 为气负荷碳排放因子; χ_e 、 χ_h 、 χ_{gload} 分别为单位电、热功率产生及耗气的碳排放权配额; $\chi_{e,h}$ 为电、热功率转换系数。

1.1.1.2 共享储能成本

$$C^{SES} = \frac{c_p^{SES} P_{max}^{SES} + c_s^{SES} M^{SES}}{365 \cdot Y_{SES}} \quad (8)$$

式中: c_p^{SES} 、 c_s^{SES} 分别为功率成本系数和容量成本系数; P_{max}^{SES} 为额定充放电功率; M^{SES} 为配置容量; Y_{SES} 为年使用寿命。

1.1.2 碳排放量

$$\min E_{r,total} = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (9)$$

式中 $E_{r,total}$ 为多能微网群的实际碳排放总量。

1.2 约束条件

1.2.1 能量平衡约束

1.2.1.1 电功率平衡

$$\begin{aligned} P_{PV,t}^i + P_{WT,t}^i + P_{GT,t}^i + P_{i-grid,t}^{buy} + P_{SES \rightarrow i,t} \\ = P_{i \rightarrow SES,t} + P_{EB,t}^i + P_{P2G,t}^i + P_{load,t}^i \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $P_{PV,t}^i$ 、 $P_{WT,t}^i$ 、 $P_{GT,t}^i$ 分别为 t 时刻微网 i 中光伏、风电、燃气轮机的输出电功率; $P_{SES \rightarrow i,t}$ 为 t 时刻SES传输给微网 i 的电功率; $P_{i \rightarrow SES,t}$ 为 t 时刻微网 i 传输给SES的电功率; $P_{EB,t}^i$ 、 $P_{P2G,t}^i$ 分别为电锅炉、电转气装置的输入电功率; $P_{load,t}^i$ 为电负荷。

1.2.1.2 气功率平衡

$$Q_{i-grid,t}^{buy} + Q_{P2G,t}^i = Q_{GT,t}^i + Q_{GB,t}^i + Q_{load,t}^i \quad (11)$$

式中: $Q_{P2G,t}^i$ 为电转气装置产气量; $Q_{GT,t}^i$ 、 $Q_{GB,t}^i$ 分别为燃气轮机和燃气锅炉的耗气量; $Q_{load,t}^i$ 为气负荷。

1.2.1.3 热功率平衡

$$H_{GT,t}^i + H_{GB,t}^i + H_{EB,t}^i = H_{load,t}^i \quad (12)$$

式中: $H_{GT,t}^i$ 、 $H_{GB,t}^i$ 、 $H_{EB,t}^i$ 分别为 t 时刻微网 i 中燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉的输出热功率; $H_{load,t}^i$ 为热负荷。

1.2.2 微网设备约束

1.2.2.1 运行约束

$$\begin{cases} P_{GT,t}^i = \eta_{GT}^e Q_{GT,t}^i H_g \\ H_{GT,t}^i = \eta_{GT}^h Q_{GT,t}^i H_g \end{cases} \quad (13)$$

$$H_{GB,t}^i = \eta_{GB} Q_{GB,t}^i H_g \quad (14)$$

$$H_{EB,t}^i = \eta_{EB} P_{EB,t}^i \quad (15)$$

$$Q_{P2G,t}^i = \eta_{P2G} P_{P2G,t}^i \quad (16)$$

式中: H_g 为天然气热值; η_{GT}^e 、 η_{GT}^h 分别为 GT 的气转电、气转热效率; η_{GB} 、 η_{EB} 分别为 GB、EB 的产热效率; η_{P2G} 为 P2G 的电转气效率; $Q_{GT,t}^i$ 、 $Q_{GB,t}^i$ 、 $Q_{P2G,t}^i$ 分别为 t 时刻微网 i 中 GT、GB 消耗天然气量和 P2G 生成天然气量。

1.2.2.2 出力及爬坡约束

$$P_{j,t,\min}^i \leq P_{j,t}^i \leq P_{j,t,\max}^i \quad (17)$$

$$-R_{j,\downarrow}^i \leq P_{j,t}^i - P_{j,t-1}^i \leq R_{j,\uparrow}^i \quad (18)$$

式中: $P_{j,t,\min}^i$ 、 $P_{j,t,\max}^i$ 分别为微网 i 中设备 j 的最小、最大输出功率; $R_{j,\downarrow}^i$ 、 $R_{j,\uparrow}^i$ 分别为微网 i 中设备 j 的最大向下、向上爬坡功率。

1.2.3 共享储能约束

$$\begin{cases} S_t^{\text{SES}} = (1 - \delta) S_{t-1}^{\text{SES}} + (P_{sto,t}^{\text{SES}} \eta_{sto}^{\text{SES}} - P_{rel,t}^{\text{SES}} / \eta_{rel}^{\text{SES}}) \Delta t \\ P_{sto,t}^{\text{SES}} = \mu_{i \rightarrow \text{SES},t}^i \sum_{i=1}^n P_{i \rightarrow \text{SES},t}^i \\ P_{rel,t}^{\text{SES}} = \mu_{\text{SES} \rightarrow i,t}^i \sum_{i=1}^n P_{\text{SES} \rightarrow i,t}^i \\ 0 \leq P_{sto,t}^{\text{SES}} \leq P_{\max}^{\text{SES}}, 0 \leq P_{rel,t}^{\text{SES}} \leq P_{\max}^{\text{SES}} \\ \mu_{i \rightarrow \text{SES},t}^i + \mu_{\text{SES} \rightarrow i,t}^i \leq 1 \\ S_1^{\text{SES}} = S_T^{\text{SES}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: S_t^{SES} 为 t 时刻 SES 的储能能量; S_1^{SES} 、 S_T^{SES} 分别为 SES 在调度周期开始时刻和结束时刻的储能能量; δ 、 η_{sto}^{SES} 、 η_{rel}^{SES} 分别为共享储能的自损率及储、放电效率; $P_{sto,t}^{\text{SES}}$ 、 $P_{rel,t}^{\text{SES}}$ 分别为 t 时刻 SES 储、放电功率; $\mu_{i \rightarrow \text{SES},t}^i$ 、 $\mu_{\text{SES} \rightarrow i,t}^i$ 分别为 t 时刻 SES 同微网 i 的购、售电状态变量, 为 0-1 变量; $P_{\max}^{\text{SES}}$ 为 SES 的最大充放电功率。

1.2.4 网络约束

$$P_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\min} \leq P_{i-\text{grid},t}^{\text{buy}} \leq P_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\max} \quad (20)$$

$$Q_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\min} \leq Q_{i-\text{grid},t}^{\text{buy}} \leq Q_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\max} \quad (21)$$

式中 $P_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\min}$ 、 $P_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\max}$ 、 $Q_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\min}$ 、 $Q_{i-\text{grid}}^{\text{buy},\max}$ 分别为微网 i 与外部电网、天然气网购功率的最小、最大限值。

2 基于 Copula-MCGDT 理论的多能微网群优化调度模型

2.1 基于 Copula 函数的风光联合出力描述

本文采用核密度估计法^[18]直接对风电、光伏功率的历史数据进行非参数估计。令随机变量 x 的概率密度函数为 $f(x)$, 其非参数核密度估计式如下。

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (22)$$

式中: n 为样本空间; h 为窗宽; $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为随机变量 x 的样本; $K(\cdot)$ 为核函数。

则 x 在 x_i 处的分布函数为 $F(x) = \int_{-\infty}^{x_i} f(x) dx$ 。

选取最优 Copula 函数, 根据各微网的风电、光伏边缘分布求得各微网每个时刻的风-光联合 Copula 函数, 并求逆得出对应风、光发电的功率值。

$$F(P_{PV}^i, P_{WT}^i) = C[F_{PV}^i(P_{PV}^i), F_{WT}^i(P_{WT}^i)] \quad (23)$$

$$\begin{aligned} (P_{PV,t}^i, P_{WT,t}^i) &= F^{-1}(P_{PV,t}^i, P_{WT,t}^i) \\ &= C^{-1}[F_{PV}^i(P_{PV,t}^i), F_{WT}^i(P_{WT,t}^i)] \end{aligned} \quad (24)$$

$$P_{C,t}^i = P_{PV,t}^i + P_{WT,t}^i \quad (25)$$

式中: $F(\cdot, \cdot)$ 为风光联合分布函数; $F_{WT}^i(\cdot)$ 、 $F_{PV}^i(\cdot)$ 分别为微网 i 的风电、光伏边缘分布函数; $C(\cdot, \cdot)$ 为考虑风光互补特性的 Copula 函数; $P_{C,t}^i$ 为 t 时刻微网 i 的风光联合出力值。

2.2 基于 Copula-MCGDT 的优化调度模型

多场景下模型优化目标如下。

$$\min_X C_{\text{total}} = \sum_{s=1}^S \omega_s C_{\text{total},s} = \sum_{s=1}^S \omega_s (C_s^{\text{MEM}} + C_s^{\text{SES}}) \quad (26)$$

$$\min_X E_{r,\text{total}} = \sum_{s=1}^S \omega_s E_{r,\text{total},s} = \sum_{s=1}^S \sum_{i=1}^n \omega_s E_{r,s}^i \quad (27)$$

$$\omega_s = N_s / N \quad (28)$$

式中: ω_s 为场景集 s 的权重系数; C_s^{MEM} 、 C_s^{SES} 分别为场景集 s 中各多能微网成本和共享储能成本; $E_{r,s}^i$ 为场景集 s 中微网 i 的碳排放量; $C_{\text{total},s}$ 、 $E_{r,\text{total},s}$ 分别为场景集 s 中多能微网群的总成本和碳排放量; N 为总场景数量; N_s 为场景集 s 包含的场景数量; S 为场景聚类

数量,即生成的典型场景集的数量; X 为决策变量。

$$\begin{aligned} \max_X \Gamma &= \sum_{s=1}^S \omega_s (1 - \alpha_s) = 1 - \alpha \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \Pr \{C_{\text{total},s}(X, P_{C,t}^{i,s}) \geq f_{s,1}\} \leq \beta_s \\ \Pr \{E_{r,\text{total},s}(X, P_{C,t}^{i,s}) \geq f_{s,2}\} \leq \beta_s \\ h(X, P_{C,t}^{i,s}) = 0, g(X, P_{C,t}^{i,s}) \geq 0 \\ P_{C,t}^{i,s} \in U_s(\hat{P}_{C,t}^{i,s}, \alpha_s) \\ = \{P_{C,t}^{i,s-}(\hat{P}_{C,t}^{i,s}, \alpha_s) \leq P_{C,t}^{i,s} \leq P_{C,t}^{i,s+}(\hat{P}_{C,t}^{i,s}, \alpha_s)\} \\ 0 \leq \alpha_s \leq 1, 0 \leq \beta_s \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (29)$$

式中: Γ 为置信鲁棒度; $1 - \alpha$ 为总的不确定变量置信水平; $1 - \alpha_s$ 为场景集 s 中的不确定变量置信水平,含下标 s 的变量均代表场景集 s 中的分量; α_s 为不确定变量的显著性水平; β_s 为目标显著性水平; $\Pr\{\cdot\}$ 为概率; $f_{s,1}$ 、 $f_{s,2}$ 分别为确定性模型下总成本和碳排放量的最优解; $U_s(\hat{P}_{C,t}^{i,s}, \alpha_s)$ 为风光联合出力的置信不确定区间; $\hat{P}_{C,t}^{i,s}$ 、 $P_{C,t}^{i,s}$ 分别为风光联合出力的预测值和实际值; $P_{C,t}^{i,s-}(\cdot, \cdot)$ 、 $P_{C,t}^{i,s+}(\cdot, \cdot)$ 为风光联合出力置信区间的下限和上限; $h(\cdot, \cdot)$ 为等式约束; $g(\cdot, \cdot)$ 为不等式约束。

本文采用文献[19]的不确定性理论将模型中的不确定性机会约束转化为等效确定性约束以简化求解过程。

$$\begin{cases} C_{\text{total},s}[X, F_{C,t}^{s-1}(\beta_s)] \leq f_{s,1} \\ E_{r,\text{total},s}[X, F_{C,t}^{s-1}(\beta_s)] \leq f_{s,2} \end{cases} \quad (30)$$

式中 $F_{C,t}^{s-1}(\beta_s)$ 为场景 s 下风光联合出力的逆累积分布函数。

3 基于改进 Shapley 值法的合作剩余分配

3.1 分配方法选择

合作博弈的利益分配方法主要包括 Nash 谈判

模型、核心法、最大最小值法、Shapley 值法,具体见表1^[20]。

综上,在解决合作博弈利益分配问题时,Shapley 值法因其建模简单、求解方便且能获得唯一解而具有较大优势。针对考虑因素单一的缺点,选择引入修正因子来更全面地评估参与者的贡献。

3.2 传统 Shapley 值法

Shapley 值法能反映合作联盟参与者对联盟的贡献程度并按边际贡献分配利益^[21]。

$$V_i = \sum_{y \subseteq Y, i \in y} \frac{(|y| - 1)!(n - |y|)!}{n!} [v(y) - v(y/i)] \quad (31)$$

式中: V_i 为主体 i 所分得的收益; Y 为多能微网群; n 为区域内邻近的多能微网总数量; $|y|$ 为参与合作的多能微网数量; V_i 为多能微网 i 分配得收益; $v(y)$ 为全部主体参与联盟时的收益; $v(y/i)$ 为联盟除去主体 i 时的收益。

3.3 改进 Shapley 值法

由于采用传统 Shapley 值法进行合作收益分配存在对称性^[22],因此本文提出一种考虑能源贡献度因子、环境因子和风险因子的改进 Shapley 值法分配合作收益。结合实际情况采用熵权法对权重进行赋值^[23]。

$$W_i = \gamma_1 W_{i,1} + \gamma_2 W_{i,2} + \gamma_3 W_{i,3} \quad (32)$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1 \quad (33)$$

$$\Delta W_i = W_i - \frac{1}{n} \quad (34)$$

$$V_i^* = V_i + \Delta W_i \cdot v(y) \quad (35)$$

式中: W_i 为联盟参与者 i 的收益分配系数; γ_1 、 γ_2 、 γ_3 为3个影响因子的对应权重; $W_{i,1}$ 、 $W_{i,2}$ 、 $W_{i,3}$ 分别为交互能源贡献度系数、风险系数和环保系数; ΔW_i 为新旧分配系数之差; V_i^* 为改进 Shapley 值法下多能微网 i 的联盟合作收益分

表1 合作博弈利益分配方法

Tab. 1 Methods for distributing the benefits of cooperative games

方法	基本原理	优点	缺点
Nash 谈判模型	最大化所有参与者收益的乘积,同时确保各参与者的收益都不低于谈判破裂时的收益。	考虑各方利益最大化,谈判结果具有稳定性。	求解方法繁琐,且存在出现多个最优解的可能。
核心法	找出所有满足集体和个人双重理性的合理分配方案,选择不被其他方案影响的方案作为核心解。	双重理性保障,保证联合体内成员无异议,公平性强。	核心解可能不存在或存在多个。
最大最小值法	确定最大值和最小值,求二者连线与理性分配解集合的交点。	直观,通过边界条件求解。	边界求解复杂。
Shapley 值法	遵守贡献和利益对等原则,按平均贡献评估利益分配。	原理简单,求解方便,能够求得唯一最优解。	边际贡献评估主观性强,考虑因素可能不全面。

配额。

3.3.1 交互能源贡献度因子

$$W_{i,1} = \frac{\sum_{t=1}^T (\frac{1}{2} P_{\text{SES} \rightarrow i,t} + \frac{1}{2} P_{i \rightarrow \text{SES},t})}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n (\frac{1}{2} P_{\text{SES} \rightarrow i,t} + \frac{1}{2} P_{i \rightarrow \text{SES},t})} \quad (36)$$

3.3.2 风险因子

$$W_{i,2} = v(f_i^1) / \sum_{i=1}^n v(f_i^1) \quad (37)$$

$$v(f_i^1) = \begin{cases} v_1(f_i^1 - b)^\alpha, & f_i^1 \geq b \\ -v_2(b - f_i^1)^\beta, & f_i^1 < b \end{cases} \quad (38)$$

式中： $v(f_i^1)$ 为价值函数 v_1 、 v_2 的损失厌恶系数； f_i^1 为风险函数； b 为参考点； α 、 β 为风险态度系数。

引入S型效用函数来描述各参与主体的风险水平，并据此得到风险因子系数。由于各微网的风、光出力存在不确定性，随着预测精度的提高，效用增长会相应减缓，根据效用理论将其划分为风险规避类型，选择 $v_2 = 2.25$ ， $b = 0$ ， $\alpha = \beta = 1.2^{[24]}$ 。

$$f_i^1 = 1 - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|\hat{P}_{i,c}^t - P_{i,c}^t|}{\hat{P}_{i,c}^t} \quad (39)$$

$$v(f_i^1) = \begin{cases} (f_i^1)^{1.2}, & f_i^1 \geq 0 \\ 2.25(f_i^1)^{1.2}, & f_i^1 < 0 \end{cases} \quad (40)$$

式中 $P_{i,c}^t$ 、 $\hat{P}_{i,c}^t$ 分别为风光出力的实际值和预测值。

3.3.3 环境因子

利用各多能微网通过参与合作实现的碳减排量来衡量其环境效益，据此得到环境因子系数。

$$W_{i,3} = \frac{E_{r,\text{before}}^i - E_{r,\text{after}}^i}{\sum_{i=1}^n (E_{r,\text{before}}^i - E_{r,\text{after}}^i)} \quad (41)$$

式中 $E_{r,\text{before}}^i$ 、 $E_{r,\text{after}}^i$ 分别为微网 i 在参与合作前后的实际碳排放值。

3.4 SES成本分摊

本文依据各微网对SES最大充放电功率的需求合理分摊其成本。

$$C_i^{\text{SES}} = \omega_i C^{\text{SES}} \quad (42)$$

$$\omega_i = \frac{\max \left\{ \max \left\{ P_{\text{SES} \rightarrow i,t} \right\}, \max \left\{ P_{i \rightarrow \text{SES},t} \right\} \right\}}{\sum_{i=1}^n \max \left\{ \max \left\{ P_{\text{SES} \rightarrow i,t} \right\}, \max \left\{ P_{i \rightarrow \text{SES},t} \right\} \right\}}, \quad (43)$$

$$t = 1, 2, \dots, 24$$

式中 C_i^{SES} 为微网 i 所承担的SES成本。

4 案例分析

4.1 基础数据

本文以3个相邻多能微网与一座8 MW/32 MWh共享储能电站作为研究对象，以24 h为调度周期，筛选风光联合出力典型场景并进行仿真计算。多能微网设备运行相关参数参考文献[25-26]，购电和购气价格参考文献[27]。

根据历史实测风光出力数据，采用非参数核密度估计拟合24 h内的风机、光伏出力概率密度函数。

运用Kendall秩相关系数、Spearman秩相关系数和平方欧氏距离作为指标值对各Copula函数比较验证，计算结果见表2。Frank Copula函数在Kendall秩相关系数和Spearman秩相关系数方面均表现出与经验函数的显著接近性，且其平方欧氏距离相较于其他4种copula函数更低。因此，本文选择Frank Copula作为最佳Copula函数，以确保数据的相关性和拟合度达到最佳状态。

表2 Copula函数拟合指标

Tab. 2 Copula function fitting indicators

函数类型	Kendall 秩相关系数	Spearman 秩相关系数	平方欧氏 距离
样本数据	0.040 8	0.061 5	0
正态 Copula	0.023 6	0.035 4	0.048 0
t-Copula	0.031 8	0.047 7	0.044 6
Frank Copula	0.042 0	0.063 0	0.040 1
Clayton Copula	0.016 7	0.025 1	0.052 9
Gumbel copula	0.034 9	0.052 4	0.043 9

4.2 方案对比分析

为验证本文所提模型的可行性，首先在不考虑风光出力不确定性置信区间的情况下，设置9种对比方案如表3所示，表中×和√分别表示不考虑的情况和考虑的情况。各方案运行结果如表4所示。

由运行结果可知，方案6中各微网考虑单独储

表3 对比方案

Tab. 3 Comparative schemes

方案	不合作无储能			单独储能			合作共建SES		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
经济性最优	√	×	√	√	×	√	√	×	√
碳排放量最低	×	√	√	×	√	√	×	√	√

表4 各方案运行结果

Tab. 4 Operation results of each plan

方案	总成本/元	二氧化碳排放量/kg
1	148 672.6	149 233.0
2	153 169.6	143 639.4
3	150 074.4	145 131.4
4	118 511.0	132 389.2
5	150 750.9	125 607.8
6	119 055.6	130 230.1
7	95 999.97	94 162.3
8	109 431.7	90 164.85
9	96 867.14	90 849.66

能,相较于方案3总成本降低20.67%,碳排放量降低了10.27%;方案9相较于方案6,总成本降低18.64%,碳排放量降低30.24%。这是因为储能的加入使得可再生能源利用率提高,实现了削峰填谷的效果,减少了能源购买量;而共享储能相较于单独储能能够更充分地调动各微网间能源,进一步发挥储能潜力,最大程度地促进分布式新能源就地消纳,进而降低多能微网群总成本和二氧化碳排放量。

方案9的总成本、碳排放量较方案7、8虽略有提高,但却能兼顾经济和环境两方面指标,相较于以经济性为单目标时的碳排放量、以碳排放量最低为单目标时的总成本分别降低3.51%和11.48%。

4.3 联盟合作结果运行分析

对方案9展开分析,场景1下MEMG1的电功率平衡情况如图2所示。在01:00—6:00和23:00—24:00两个低电价时段倾向于优先调度风电和外购电力,并存储剩余电能;在电价较高时段则通过整合可再生能源、SES、燃气轮机及外购电力共同满足负荷需求。在13:00—16:00时段风光出力较多,在满足自身负荷需求和尽可能为SES充电之后,为避免可再生能源的浪费,利用P2G将多余电能转化为天然气。场景1下MEMG1的气功率、热功率平衡情况分别见图3—4。燃气锅炉、燃气轮机耗气及园区气负荷主要依靠外购天然气,电锅炉优先供热,其次是燃气锅炉,不足部分由燃气轮机供应。

图5展示了场景1下SES的使用情况。SES主要依靠MEMG3存储电能,在13:00—16:00时段MEMG3的风光发电量远超该时段电力消耗,所以该时段储能较多;夜间时段的储能也较多,主要原

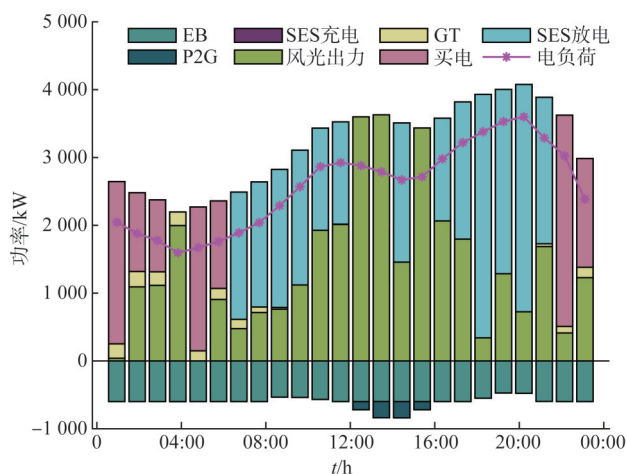


图2 场景1下MEMG1电功率平衡图

Fig. 2 MEMG1 electrical power balance diagram under scenario 1

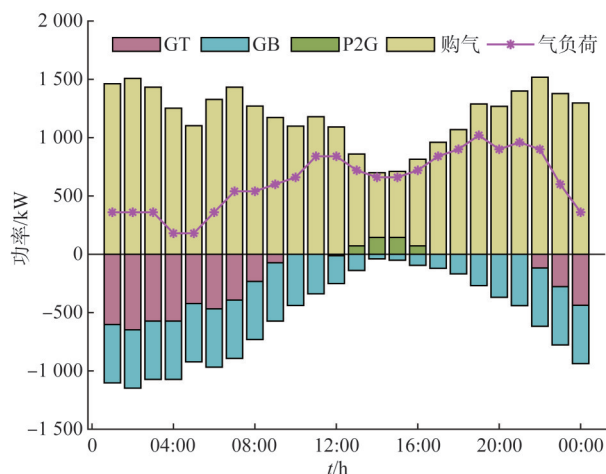


图3 场景1下MEMG1气功率平衡图

Fig. 3 MEMG1 gas power balance diagram under scenario 1

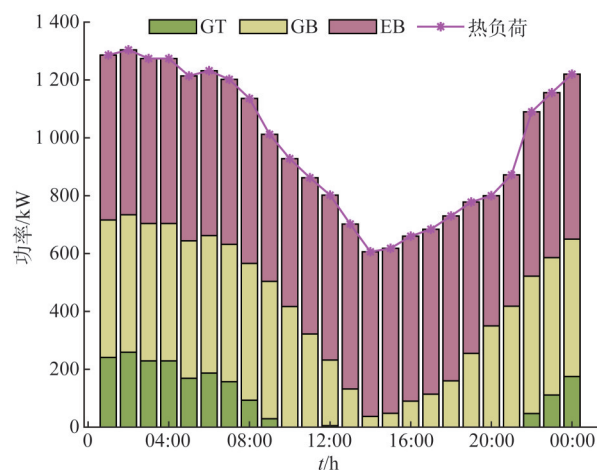


图4 场景1下MEMG1热功率平衡图

Fig. 4 MEMG1 heat power balance diagram under scenario 1

因是夜间电价低,例如在 04:00 和 24:00 时, MEMG3 将多余的风电和部分外购电力存储在 SES 中。此外,3 个微网对 SES 的电能消耗主要集中在 07:00—12:00 和 17:00—22:00。这是由于这些时段电价较高,且 SES 中电量充足,因此利用储电量来满足高负荷时段的用电需求以降低电网负荷峰值和平滑负荷曲线。

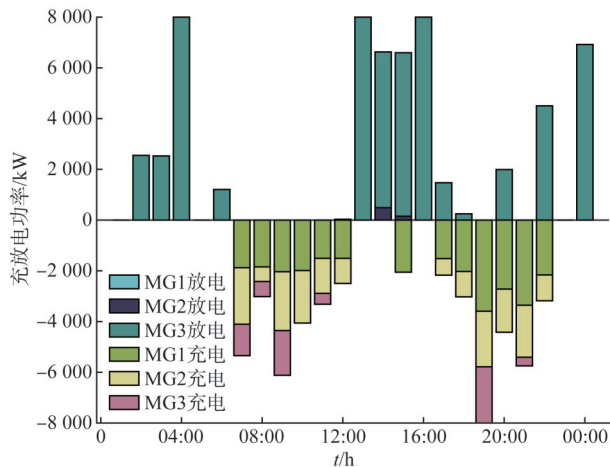


图 5 共享储能使用情况

Fig. 5 Usage of shared energy storage

4.4 利益分配与成本分摊分析

在考虑 SES 的情况下,3 个多能微网之间存在 7 种联盟形式,对应总成本如表 5 所示。

表 5 联盟组合成本

Tab. 5 Alliance portfolio costs

联盟组合	总成本 /元	联盟组合	总成本 /元
{MEMG1}	45 912.39	{MEMG1, MEMG2}	90 373.04
{MEMG2}	44 842.24	{MEMG1, MEMG3}	53 797.72
{MEMG3}	28 301.00	{MEMG2, MEMG3}	55 807.14
{MEMG1, MEMG2, MEMG3}	96 867.14		

表 6 给出了多能微网群中各微网的运行成本、SES 分摊成本及合作剩余的分配过程。联盟内各多能微网通过 SES 实现电能共享,各微网根据对储能的需求对 SES 成本进行分摊,其中 MEMG3 的分摊额最高。此外, MEMG3 的初始合作后总成本远高于合作前总成本,因为它的可再生能源盈余较高,其有义务向 SES 释放电能以供联盟内其他成员使用,导致购电成本、运维成本及碳排放成本增加。如果不重新分配合作剩余,该联盟将无法维持。

依据传统 Shapley 值法对合作剩余进行分配时, MEMG3 对于联盟总成本降低的贡献度最大,因此更倾向于给 MEMG3 分配更多,使其总成本减少 13 560.93 元, MEMG1 和 MEMG2 的分别减少 5 083.67 元和 3 543.89 元。但是,各多能微网的风险水平、能源交互贡献度及碳减排贡献度并不相同,因此该方法并不公平。结合熵权法,得到贡献因子、风险因子、环境因子的权重分别为 0.348 5、0.301 1、0.350 4。改进 Shapley 值法相比于传统 Shapley 值法分配时, MEMG1 和 MEMG2 成本又分别减少了 2 351.99 元和 207.08 元, MEMG3 相对增加了 2 559.07 元,最终各多能微网的总成本下降率分别为 16.20%、8.36% 和 38.87%。此时分配结果更加公平合理,有利于维持多能微网群的联盟稳定性。

综上,重新分配合作剩余有利于实现整体和个体效益的双赢。

4.5 不确定性影响分析

该部分在模型 9 的基础上考虑可再生能源出力的不确定性,设置 0.05、0.10 和 0.15 三个目标显著性水平,对优化结果进行对比分析,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,当 β 值增加时,风光出力的不确定性程度随之增加,导致多能微网群的总成本和碳排放量高于预期目标的概率增加。此时, Pareto 前沿曲线上升,多目标优化的满意度下降,但系统的鲁棒性也随之增强。因此,根据决策者的风险容忍度来调整 β 值,使系统在保持鲁棒性的同时获得最佳整体目标。

5 结论

本文基于合作博弈理论构建了含共享储能的多能微网群联合运行模型,并结合 Copula 函数和 MCGDT 理论,构建了考虑不确定性的多能微网群多目标优化调度模型。另外,利用改进 Shapley 值法分配合作剩余。通过算例分析得到如下结论。

1) 相比于各微网单独配置储能,以合作共建共享储能的方式实现微网间电能共享,使多能微网群总成本、总碳排放量分别降低 18.64%、30.24%。

2) 采用 Copula 函数来模拟风光出力相关性,并结合 MCGDT 理论改进不确定性置信水平,进一步提升了模型的鲁棒性,最大化规避不确定性影响,

表 6 标准 shapley 值和改进 shapley 值合作剩余分配对比

Tab. 6 Comparison of cooperative residual allocation results for standard and improved shapley values

对比指标		MEMG1	MEMG2	MEMG3	多能微网群
合作前运行成本/元		41 316. 22	40 246. 07	23 704. 84	105 267. 13
合作前总成本/元		45 912. 39	44 842. 24	28 301. 00	119 055. 63
初始值 (分配前)	合作后运行成本/元	27 489. 05	31 966. 47	32 815. 45	92 270. 97
	SES 成本分摊/元	1 123. 86	847. 52	2 624. 78	4 596. 16
	合作后总成本/元	28 612. 91	32 813. 99	35 440. 23	96 867. 14
标准 shapley 值分配	合作剩余分配值/元	5 083. 67	3 543. 89	13 560. 93	22 188. 49
	成本转移/元	12 215. 80	8 484. 36	-20 700. 16	0
	分配后总成本/元	40 828. 71	41 298. 35	14 740. 07	96 867. 14
	成本下降比率/%	11. 07	7. 90	47. 92	18. 64
改进 shapley 值分配	合作剩余分配值/元	7 435. 66	3 750. 97	11 001. 86	22 188. 49
	成本转移/元	9 863. 82	8 277. 27	-18 141. 09	0
	分配后总成本/元	38 476. 73	41 091. 27	17 299. 14	96 867. 14
	成本下降比率/%	16. 20	8. 36	38. 87	18. 64

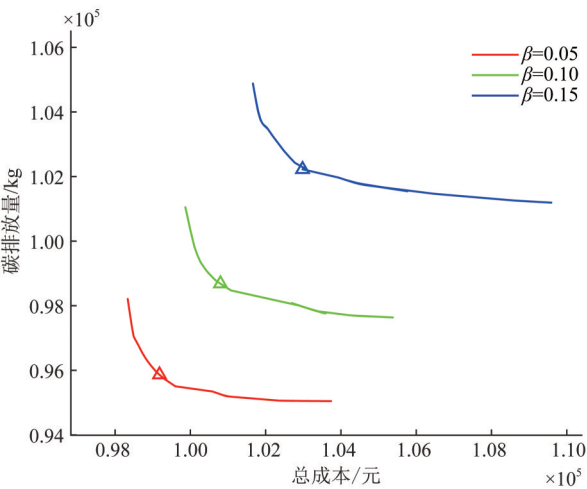


图 6 多显著性水平下的帕累托前沿对比

Fig. 6 Comparison of Pareto frontiers at multiple significance levels

提升方案应对场景变化风险的能力。

3)利用改进 Shapley 值法计算多能微网应分配的合作剩余, 相较传统 Shapley 值法分配, 微网 1、2 的成本分别降低 2 345. 38 元和 200. 63 元, 微网 3 相对增加 2 546. 01 元。交互价值贡献度越高、碳减排贡献越高、风险水平越高的微网对应分配额越高, 更能体现分配的公平性, 大大提高各微网主体参与合作的积极性。

参考文献

[1] 刘可真, 董敏, 杨春昊, 等. 基于纳什谈判的智能园区 P2P 电能交易优化运行[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 45 – 53.

LIU Kezhen, DONG Min, YANG Chunhao, et al. Optimized operation of P2P power trading in smart park based on Nash negotiation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 45 – 53.

[2] 曲建峰, 汤波, 余光正, 等. 基于源荷匹配的多微网功率交互及共享储能规划[J]. 现代电力, 2025, 42(1): 117 – 128.

QU Jianfeng, TANG Bo, YU Guangzheng, et al. Multi-microgrid power interaction and shared energy storage planning based on source-load matching [J]. Modern Electric Power, 2025, 42(1): 117 – 128.

[3] 刘俊磊, 刘新苗, 娄源媛, 等. 考虑源荷储不确定性的新型电力系统随机生产模拟方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(6): 36 – 42.

LIU Junlei, LIU Xinmiao, LOU Yuanyuan, et al. Stochastic production simulation method for new power system considering uncertainty of source network load and storage[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 36 – 42.

[4] 帅轩越, 王秀丽, 吴雄, 等. 计及电热需求响应的共享储能容量配置与动态租赁模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 24 – 32.

SHUAI Xuanyue, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Shared energy storage capacity allocation and dynamic leasing model taking into account electric heat demand response[J]. Automation of Electric Power Systems. 2021, 45(19): 24 – 32.

[5] 王钰, 郝毅, 王磊, 等. 基于改进粒子群算法的多能微网多目标优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 29 – 36, 59.

WANG Yu, HAO Yi, WANG Lei, et al. Multi-objective optimal scheduling of multi-energy microgrid based on improved particle swarm algorithm[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2023, 60(11): 29 – 36, 59.

[6] 杨秀, 柴梓轩, 刘方, 等. 考虑热动态和碳交易的电-气-热综合能源系统协调调度[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 49 – 58.

YANG Xiu, CHAI Zixuan, LIU Fang, et al. Coordinated scheduling of integrated electricity-gas-heat energy system considering thermal dynamics and carbon trading[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2021, 58(11): 49 – 58.

- [7] 郭宴秀, 苏建军, 刘洋, 等. 考虑电热交互和共享储能的多综合能源系统运行优化[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 138 - 145.
GUO Yanxiu, SU Jianjun, LIU Yang, et al. Operation optimization of multi-integrated energy system considering electric-thermal interaction and shared energy storage [J]. Electric Power, 2023, 56(4): 138 - 145.
- [8] 冀瑞强, 胡健, 张晓杰. 基于合作博弈的城市楼宇集群分布式储能容量共享[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 115 - 126.
JI Ruiqiang, HU Jian, ZHANG Xiaojie. Distributed energy storage capacity sharing in urban building clusters based on cooperative games [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 115 - 126.
- [9] 张世旭, 李姚旺, 刘伟生, 等. 面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 21 - 30.
ZHANG Shixu, LI Yaowang, LIU Weisheng, et al. An economic-low-carbon-reliable multi-objective optimal allocation method of cloud energy storage for microgrid cluster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 21 - 30.
- [10] 高建伟, 张艺, 高芳杰, 等. 农业综合能源系统多场景置信间隙决策低碳调度[J]. 电力建设, 2024, 45(5): 105 - 117.
GAO Jianwei, ZHANG Yi, GAO Fangjie, et al. Low-carbon dispatch for multi-scenario confidence gap decision making in agribusiness energy systems [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 105 - 117.
- [11] L Z Q, C Y P, W J Q, et al. Multi-objective optimization of multi-energy complementary integrated energy systems considering load prediction and renewable energy production uncertainties [J]. Energy, 2022(254): 124399 - 124411.
- [12] 潘崇超, 侯孝旺, 金泰, 等. 计及阶梯碳交易和可再生能源不确定性的综合能源系统低碳研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(10): 8 - 16.
PAN Chongchao, HOU Xiaowang, JIN Tai, et al. Low-carbon study of integrated energy system taking into account the uncertainty of ladder carbon trading and renewable energy [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2024, 61(10): 8 - 16.
- [13] JU Liwei, YIN Zhe, ZHOU Qingqing, et al. Nearly-zero carbon optimal operation model and benefit allocation strategy for a novel virtual power plant using carbon capture, power-to-gas, and waste incineration power in rural areas [J]. Applied Energy, 2022, 310(3): 118618.1 - 118618.16.
- [14] 彭春华, 熊志盛, 张艺, 等. 基于多场景置信间隙决策的风光储联合鲁棒规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 178 - 187.
PENG Chunhua, XIONG Zhisheng, ZHANG Yi, et al. Joint robust planning of wind power and storage based on multi-scenario confidence gap decision [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 178 - 187.
- [15] 张锴, 郭小璇, 韩帅, 等. 基于电转气反应热应用和合作博弈的电转气装置容量规划[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2801 - 2811.
ZHANG Kai, GUO Xiaoxuan, HAN Shuai, et al. Capacity planning of electricity-to-gas plant based on electricity-to-gas reaction heat application and cooperative game [J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2801 - 2811.
- [16] 胡蓉, 魏震波, 黄宇涵, 等. 基于交替乘法与Shapley分配法的多微网联合经济调度[J]. 电力建设, 2021, 42(7): 28 - 38.
HU Rong, WEI Zhenbo, HUANG Yuhuan, et al. Joint economic scheduling of multiple microgrids based on alternating multiplier method and Shapley allocation method [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7): 28 - 38.
- [17] WANG Wenting, YANG Dazhi, HUANG Nantian, et al. Irradiance-to-power conversion based on physical model chain: an application on the optimal configuration of multi-energy microgrid in cold climate [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161(2): 112356.1 - 112356.15.
- [18] 王凌梓, 沈海波, 邓力源, 等. 基于相似日聚类与WOA-BiLSTM-Copula算法的短期风光功率相关性概率区间预测方法[J/OL]. 南方电网技术, 1 - 8[2024 - 12 - 11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241211.1815.002.html>.
WANG Lingzi, SHEN Haibo, DENG Liyuan, et al. A probabilistic interval prediction method for short-term wind power correlation based on similar day clustering and WOA-BiLSTM-Copula algorithm [J/OL]. Southern Power System Technology, 1 - 8[2024 - 12 - 11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241211.1815.002.html>.
- [19] 彭春华, 陈露, 张金克, 等. 基于分类概率机会约束IGDT的配网储能多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2809 - 2819.
PENG Chunhua, CHEN Lu, ZHANG Jinke, et al. Multi-objective optimal allocation of distribution network energy storage based on classified probabilistic chance constrained IGDT [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2809 - 2819.
- [20] 田婷. 基于实际贡献修正Shapley值法的全过程工程咨询联合体利益分配机制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [21] SHANG T, LIU P, GUO J. How to allocate energy-saving benefit for guaranteed savings EPC projects? a case of China [J]. Energy, 2020, 191(1): 1 - 11.
- [22] 刘蓉晖, 赵增凯, 孙改平, 等. 考虑不同风险偏好的虚拟电厂优化策略及利润分配[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 154 - 161.
LIU Ronghui, ZHAO Zengkai, SUN Gaiping, et al. Optimization strategy and profit allocation of virtual power plant considering different risk preferences [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 154 - 161.
- [23] 潘华, 高旭, 姚正, 等. 计及储能效益的综合能源系统利益分配机制研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 25 - 32.
PAN Hua, GAO Xu, YAO Zheng, et al. Research on benefit distribution mechanism of integrated energy system taking into account the benefits of energy storage [J]. Smart Power, 2022, 50(5): 25 - 32.
- [24] GAO Jianwei, GAO Fangjie, YANG Yu, et al. Configuration optimization and benefit allocation model of multi-park integrated energy systems considering electric vehicle charging station to assist services of shared energy storage power station [J]. Journal of Cleaner Production, 2022(336): 130381.1 - 130381.16.
- [25] 陈志坚, 翁菡宏, 等. 基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 148 - 155.
CHEN Zhi, HU Zhijian, WENG Changhong, et al. Multi-stage planning of integrated energy system in parks based on stepped carbon trading mechanism [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148 - 155.
- [26] 陈伟, 路源, 何欣, 等. 计及风光就地消纳的设施农业产业园区综合能源系统多目标优化调度方法[J]. 电力建设, 2021,

42(7): 20–27.

CHEN Wei, LU Yuan, HE Xin, et al. Multi-objective optimal scheduling method of integrated energy system in facility agriculture industrial park taking into account local consumption of wind and light[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(7): 20–27.

- [27] 崔杨, 郭福音, 仲悟之, 等. 多重不确定性环境下的综合能源系统区间多目标优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2964–2975.

CUI Yang, GUO Fuyin, ZHONG Wuzhi, et al. Inter-area multi-objective optimal scheduling of integrated energy systems

under multiple uncertainty environments [J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2964–2975.

收稿日期: 2024-06-06; 网络首发日期: 2025-01-20

作者简介:

高建伟(1972), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为综合能源系统、风险管理与决策理论, gaojianwei111@sina.com;

王紫莹(1999), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为多能微网优化调度, wangziying0123@163.com;

孟琪琛(1997), 男, 博士研究生, 研究方向为能源环境管理, 120222106010@ncepu.edu.cn。

广 告

南方电网公司电网仿真重点实验室……………封二
南方电网科技创新中心……………封三

南方电网公司直流输电技术全国重点实验室……………A1
南方电网电力科技股份有限公司……………A2