

具有激励相容和能源共享特性的混合储能组合拍卖

吴雄¹, 麻淞¹, 何雯雯¹, 刘炳文¹, 张子裕¹, 王鹏磊²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710054, 西安; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 430000, 武汉)

摘要: 针对综合能源微网单独配置储能经济性较低的问题, 建立了一个经济高效的电-热混合能源共享模型, 多个综合能源微网共享一个电-热混合储能装置。在电-热混合储能容量共享的研究中, 采用了一种基于多物品拍卖理论的混合储能组合拍卖方法: 每个微网分别提交多组不同的电、热储能容量需求以及相应的投标价格, 分别竞拍电化学储能容量和储热罐容量, 利用这些储能容量达到节省购电费用的目的。储能运营商则以社会福利最大化为目标决定拍卖的结果, 即储能容量如何分配给各微网可以最大化其效用。在最后的费用结算过程中采用维克瑞-克拉克-格罗夫(Vickrey-Clarke-Groves, VCG)机制计算各微网需要支付的费用。由于VCG机制具有激励相容性, 各微网没有虚假报价的动机, 都倾向于提交真实的投标价格, 保证了组合拍卖结果具有最大的社会福利。算例结果表明, 在社会福利方面, 所提的混合储能组合拍卖模式相比于一般的共享储能模式更具优势。

关键词: 组合拍卖; 能源共享; 混合储能; 激励相容; 社会福利

中图分类号: TM73; F426.61; F724.59 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202309017 **文章编号:** 0253-987X(2023)09-0162-12

Hybrid Energy Storage Portfolio Auction Based on Vickrey-Clarke-Groves Mechanism and Energy Sharing

WU Xiong¹, MA Song¹, HE Wenwen¹, LIU Bingwen¹, ZHANG Ziyu¹, WANG Penglei²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;

2. China Three Gorges Group Limited, Wuhan 430000, China)

Abstract: Aiming at the problem of the low energy storage economy of the separate configuration of integrated energy microgrids, a cost-effective electro-heat hybrid energy sharing model was established in the paper in which multiple integrated energy microgrids shared a single electro-heat hybrid energy storage device. In the research of electricity-heat hybrid energy storage capacity sharing, a hybrid energy storage combination auction method based on multi-item auction theory was adopted: Each microgrid submits multiple sets of different electricity and heat storage capacity requirements and corresponding bidding prices, bids for electrochemical energy storage capacity and heat storage tank capacity respectively, and uses the energy storage capacity to save the costs of purchasing electricity. Energy storage operators determined the outcome of the auction with the goal of maximizing social welfare, that is, how to allocate the energy storage capacity to each microgrid to maximize its utility. In the final fee settlement process, the Vickrey-Clarke-Groves (VCG) mechanism was used to calculate the fees to be paid by each microgrid. Due to the

incentive compatibility of the VCG mechanism, each microgrid had no incentive to make false quotations and tended to submit the real bid price, which ensured that the combined auction results had the greatest social welfare. The example results show that in terms of social welfare, the hybrid energy storage portfolio auction proposed in this paper has more advantages than the general shared energy storage model.

Keywords: combinatorial auctions; energy sharing; hybrid energy storage; incentive compatible; social welfare

在“双碳”目标以及低碳能源战略驱动下,可再生能源发电在众多领域发展迅速,2022年可再生能源装机比例从2016年的25%增加到31%。可再生能源的占比不断增加,部分以分布式发电形式接入到电网中^[1]。由于包括光伏和风电在内的可再生能源发电受天气影响显著^[2],具有波动性和不确定性的特点^[3],因此如何充分利用微网内的可再生能源是一个较大的挑战。

储能系统(energy storage system, ESS)是促进可再生能源消纳的有效技术^[4]。储能可通过提供各种服务来增强电力系统的弹性和可靠性,例如频率调节^[5]、电压控制^[6]、能源套利^[7]、削峰填谷^[8]、平滑可再生能源^[9]等。许多学者研究了微网中配置单个储能装置的最优调度问题^[10-12],其中微网中配置的电化学储能仅供微网自身使用。储能装置的投资成本较高^[13],从而阻碍了可再生能源的充分消纳,并导致单个微网的经济效益较低,因此多个微网之间的互联及能源共享越来越受到重视。

文献[14-17]提出了微网之间的能源共享方案,其中配备可再生能源和储能系统的一组微网集群可以通过某些交易机制进行能源交易。通过这种方式,微网可以相互交换能量以平滑微网中可再生能源的出力曲线。由于单个微网中储能容量的限制,其中的可再生能源仍然无法通过能量交易得到充分消纳。因此,在多个微网中引入共享储能^[18-20]是一种具有前景的方案。它提出一个储能系统同时或分时地为多个用户服务或提供多个辅助服务,储能共享充分利用了用户需求的多样性,可以提高共享储能的利用率和储能运营商的利润。此外,用户可以根据自身需求使用共享储能,从而节省用户自行安装储能时的固定投资。容量共享是储能共享的一种常见形式,储能容量被分成若干份,随后分配给用户。用户可以利用储能容量存储多余的能源,例如太阳能,并在必要时释放。容量共享通常在日前市场中进行,相关问题已通过博弈论^[21-22]、在线优化^[23]以及两阶段优化^[24]等方法进行了研究。

现有大多数研究侧重于单一类型的储能分配,即电化学储能,少有针对多类型储能进行容量分配的研究。此外,现有研究多聚焦于社区中的多个用户之间的能源共享,而对多个微网之间的能源共享研究较少。文献[25]提出了一种考虑配电网约束的电-氢混合共享储能分时段定价机制,但是其未解决多个微网之间能源共享的问题,而是在社区角度对多个用户之间的能源共享进行研究;文献[26-27]提出了基于合作博弈的电-热混合共享储能接入多个综合能源微网进行能源共享的研究,但是未解决微网上报其价值函数真实性的问题,即微网可能存在策略性报价以从中获取利益的行为。考虑到上述问题,本文利用基于维克瑞-克拉克-格罗夫(VCG)机制的组合拍卖理论,研究了多类型储能的分配方案。拍卖理论广泛应用于智能电网能源管理,例如文献[28-30],但是大多数研究侧重于单一类型储能分配。本文基于多单元组合拍卖理论^[31-32],建立了多类型储能的组合拍卖模型。这种类型的拍卖描述了一种更普遍的场景,即有多种类型的资源。拍卖的效率通常以是否满足社会福利最大化和是否具有真实性^[33]来评估。

综上所述,本文针对单一微网配置储能成本昂贵以及多类型共享储能尚未得到充分研究等问题,提出了电-热混合共享储能接入若干综合能源微网的数学模型,考虑了微网运行的约束条件,得到了共享储能接入后,综合能源微网的最优调度方案;其次,提出了包括电化学储能以及储热罐在内的混合储能组合拍卖模型,建立了赢家确定过程以合理分配储能容量,实现社会福利最大化,最后采用VCG机制设计了各微网的支付方案,确保了拍卖的真实性。

1 混合储能接入的综合能源微网模型

1.1 综合能源微网模型概述

综合能源微网系统中包含不同能源类型的各种设备,其系统结构如图1所示,包括电负荷、热负荷、冷负荷、风电光伏等可再生能源、燃气锅炉、燃气轮

机、电制冷装置、吸收式制冷机、电加热装置、回热炉、传热装置、电化学储能、储热罐以及储冷罐。系统的电负荷由外部电网、风电光伏以及燃气轮机供给;热负荷由燃气轮机和燃气锅炉供给;冷负荷由电制冷装置和吸收式制冷机供给。此外,系统中的电化学储能、储热罐以及储冷罐可以为电、热以及冷平衡提供支撑。

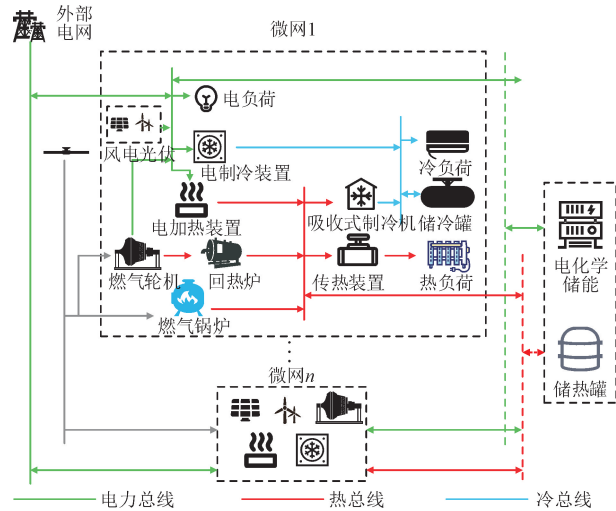


图1 配置共享储能的综合能源微网

Fig. 1 Integrated energy microgrid configured with shared energy storage

本节将介绍配备共享储能的综合能源微网集群的优化运行问题。该问题可描述为一个混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型,通过求解该模型可以获得最优调度策略,实现综合能源微网集群的最优运行。每个微网预先被分配一组电化学储能容量和储热罐容量,这两种储能容量的分配方案由各微网对两种类型储能容量的需求决定。首先介绍微网*i*获得一个需求(储能容量)组合的情况下的最优调度计划。

1.2 目标函数

优化模型旨在实现综合能源微网总运行成本最小化,包括能源设备的运行和维护成本、从天然气公司购买天然气的成本以及从外部电网购买电力的成本

$$\min C = C_{OM}^i + C_{FU}^i + C_{GD}^i \quad (1)$$

$$C_{OM}^i = \sum_{t=1}^T (C_{RES,OM}^{i,t} + C_{GT,OM}^{i,t} + C_{CD,OM}^{i,t}) \Delta t = \sum_{t=1}^T (c_{RES}^{i,t} P_{RES}^{i,t} + c_{GT,OM}^{i,t} P_{GT,out,E}^{i,t} + c_{CD,OM}^{i,t} (P_{CD,c}^{i,t} + P_{CD,d}^{i,t})) \Delta t \quad (2)$$

$$C_{FU}^i = \sum_{t=1}^T \frac{R_{FU}^{i,t}}{H_{FU}^{i,t}} (P_{GT,in}^{i,t} + P_{GB,in}^{i,t}) \Delta t \quad (3)$$

$$C_{GD}^i = \sum_{t=1}^T (c_{GD,b}^{i,t} P_{GD,b}^{i,t} - c_{GD,s}^{i,t} P_{GD,s}^{i,t}) \Delta t \quad (4)$$

式中: C 、 C_{OM} 、 C_{FU} 分别表示微网*i*的总成本、运行和维护成本、天然气成本; C_{GD} 表示微网*i*从外部电网和天然气网购买的能源成本; $C_{RES,OM}^{i,t}$ 、 $C_{GT,OM}^{i,t}$ 、 $C_{CD,OM}^{i,t}$ 分别表示光伏发电、风力发电和燃气轮机以及储冷罐的运行和维护成本; Δt 表示微网调度的时间间隔,本文取 $\Delta t=1$ h; T 表示微网调度时间的最大值,本文取 $T=24$; $c_{RES}^{i,t}$ 、 $c_{GT,OM}^{i,t}$ 、 $c_{CD,OM}^{i,t}$ 分别表示光伏、风力和燃气轮机以及储能运行和维护的成本系数; $P_{RES}^{i,t}$ 是风电、光伏在时刻*t*的出力; $P_{GT,out,E}^{i,t}$ 是燃气轮机在时刻*t*的输出电功率; $P_{CD,c}^{i,t}$ 和 $P_{CD,d}^{i,t}$ 分别表示储冷罐在时刻*t*的充冷功率和释冷功率; $R_{FU}^{i,t}$ 是天然气的价格; $H_{FU}^{i,t}$ 是天然气的热值; $P_{GT,in}^{i,t}$ 、 $P_{GB,in}^{i,t}$ 分别是燃气轮机、燃气锅炉在时刻*t*天然气的输入值; $c_{GD,b}^{i,t}$ 、 $c_{GD,s}^{i,t}$ 分别表示微网*i*在时刻*t*从外部电网购买、向外部电网出售电力的电价; $P_{GD,b}^{i,t}$ 、 $P_{GD,s}^{i,t}$ 分别表示微网*i*在时刻*t*从外部电网购买、向外部电网出售电功率。

1.3 约束条件

综合能源微网需要在合理的约束下运行,其约束条件主要包括功率平衡约束、综合能源微网与外部电网之间的购售电约束、共享储能相关约束、储冷罐相关约束以及能量供应和能量转换装置相关约束。

1.3.1 电功率平衡约束

微网中的电力来源主要包括可再生能源以及从外部电网购入的电力;电力消耗除了电负荷外还包括燃气轮机、电制冷装置以及电加热装置消耗的电力,剩余电力出售给外部电网

$$P_{RES}^{i,t} + P_{GD,b}^{i,t} + P_{ESS,BT,d}^{i,t} + P_{GT,out,E}^{i,t} = P_{EL}^{i,t} + P_{GD,s}^{i,t} + P_{ESS,BT,c}^{i,t} + P_{EC,in}^{i,t} + P_{EH,in}^{i,t} \quad (5)$$

式中: $P_{ESS,BT,d}^{i,t}$ 为共享储能中电化学储能放出的功率; $P_{EL}^{i,t}$ 为电负荷; $P_{ESS,BT,c}^{i,t}$ 为共享储能中电化学储能吸收的功率; $P_{EC,in}^{i,t}$ 为电制冷机的输入功率; $P_{EH,in}^{i,t}$ 为电加热装置的输入功率。

1.3.2 热功率平衡约束

微网中的热力来源主要包括燃气锅炉以及回热炉输出的热功率;热力消耗主要包括热交换装置和吸收式制冷机消耗的热功率

$$P_{ESS,HC,d}^{i,t} + P_{WH,out}^{i,t} + P_{GB,out}^{i,t} + P_{EH,out}^{i,t} = P_{ESS,HC,c}^{i,t} + P_{HX,in}^{i,t} + P_{AC,in}^{i,t} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t}$ 为共享储能中储热罐放出的热功率; $P_{\text{WH,out}}^{i,t}$ 为回热炉输出的热功率; $P_{\text{GB,out}}^{i,t}$ 为燃气锅炉输出的热功率; $P_{\text{EH,out}}^{i,t}$ 为电加热装置输出的热功率; $P_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t}$ 为共享储能中储热罐吸收的热功率; $P_{\text{HX,in}}^{i,t}$ 为热交换装置输入的热功率; $P_{\text{AC,in}}^{i,t}$ 为吸收式制冷机输入的热功率。

1.3.3 冷功率平衡约束

微网中的冷功率来源主要包括吸收式制冷机以及电制冷装置输出的冷功率

$$P_{\text{CD,d}}^{i,t} + P_{\text{AC,out}}^{i,t} + P_{\text{EC,out}}^{i,t} = P_{\text{CL}}^{i,t} + P_{\text{CD,c}}^{i,t} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{CD,d}}^{i,t}$ 为综合能源微网中储冷罐输出的冷功率; $P_{\text{AC,out}}^{i,t}$ 为吸收式制冷机输出的冷功率; $P_{\text{EC,out}}^{i,t}$ 为电制冷机输出的冷功率; $P_{\text{CL}}^{i,t}$ 为冷负荷; $P_{\text{CD,c}}^{i,t}$ 为综合能源微网中储冷罐吸收的冷功率。

1.3.4 能量转换装置之间的耦合约束

在综合能源微网中,燃气轮机输出的热功率被回热炉全部接纳,作为回热炉的热功率输入

$$P_{\text{GT,out,H}}^{i,t} = P_{\text{WH,in}}^{i,t} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{GT,out,H}}^{i,t}$ 为燃气轮机输出的热功率; $P_{\text{WH,in}}^{i,t}$ 为回热炉输入的热功率。

由电加热装置、回热炉和燃气锅炉输出的热能经过热交换装置处理后,为微网中的热负荷提供热功率

$$P_{\text{HX,out}}^{i,t} = P_{\text{HL}}^{i,t} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{HX,out}}^{i,t}$ 为热交换装置输出的热功率; $P_{\text{HL}}^{i,t}$ 为热负荷。

1.3.5 微网中能量转换装置效率约束

燃气轮机输入的能量形式为天然气,输出的能量形式包括电能和热能;此外,不同形式的能量经由燃气锅炉、回热炉、电加热装置、电制冷装置、吸收式制冷机和热交换装置时均有一定的功率损耗

$$P_{\text{GT,out,E}}^{i,t} = \eta_{\text{GT,E}} P_{\text{GT,in}}^{i,t} \quad (10)$$

$$P_{\text{GT,out,H}}^{i,t} = V_{\text{GT}} P_{\text{GT,out,E}}^{i,t} \quad (11)$$

$$P_{\text{GB,out}}^{i,t} = \eta_{\text{GB}} P_{\text{GB,in}}^{i,t} \quad (12)$$

$$P_{\text{WH,out}}^{i,t} = \eta_{\text{WH}} P_{\text{WH,in}}^{i,t} \quad (13)$$

$$P_{\text{EH,out}}^{i,t} = \eta_{\text{EH}} P_{\text{EH,in}}^{i,t} \quad (14)$$

$$P_{\text{EC,out}}^{i,t} = \eta_{\text{EC}} P_{\text{EC,in}}^{i,t} \quad (15)$$

$$P_{\text{AC,out}}^{i,t} = \eta_{\text{AC}} P_{\text{AC,in}}^{i,t} \quad (16)$$

$$P_{\text{HX,out}}^{i,t} = \eta_{\text{HX}} P_{\text{HX,in}}^{i,t} \quad (17)$$

式中: $\eta_{\text{GT,E}}$ 为燃气轮机的电转化效率; V_{GT} 为燃气轮机的热转化效率; η_{GB} 、 η_{WH} 、 η_{EH} 、 η_{EC} 、 η_{AC} 以及 η_{HX} 分别为燃气锅炉、回热炉、电加热装置、电制冷装置、吸收式制冷机以及热交换装置的能量转换效率。

1.3.6 微网中能量转换装置的功率上下限

微网中的能源供应和能量转换设备存在功率下限和上限约束

$$P_{\text{GT,out,E}}^{i,t,\min} \leq P_{\text{GT,out,E}}^{i,t} \leq P_{\text{GT,out,E}}^{i,t,\max} \quad (18)$$

式中: $P_{\text{GT,out,E}}^{i,t,\min}$ 和 $P_{\text{GT,out,E}}^{i,t,\max}$ 分别是燃气轮机输出电功率的下限和上限。

1.3.7 共享储能中电化学储能相关约束

电化学储能吸收或放出的电功率不能低于额定功率的下限或高于额定功率的上限,且不能同时充电和放电,表达式如下

$$I_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t} P_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t,\min} \leq P_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t} \leq I_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t} P_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t,\max} \quad (19)$$

$$I_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t} P_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t,\min} \leq P_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t} \leq I_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t} P_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t,\max} \quad (20)$$

$$0 \leq I_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t} + I_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t} \leq 1 \quad (21)$$

电化学储能能在 t 时刻的储电量由 $t-1$ 时刻的储电量以及 t 时刻的充电功率和放电功率决定,同时需考虑充放电过程中的功率损耗;此外还需满足储电量上下限约束,为保证电化学储能的正常运行,0 时刻的储电量应与 T 时刻的储电量相同,表达式如下

$$E_{\text{ESS,BT}}^{i,t} = E_{\text{ESS,BT}}^{i,t-1} + \eta_{\text{ESS,BT,c}} P_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t} - P_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t} / \eta_{\text{ESS,BT,d}}, t = 2, \dots, T \quad (22)$$

$$E_{\text{ESS,BT}}^{i,\min} \leq E_{\text{ESS,BT}}^{i,t} \leq E_{\text{ESS,BT}}^{i,\max}, t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$E_{\text{ESS,BT}}^{i,0} = E_{\text{ESS,BT}}^{i,T} \quad (24)$$

式中: $I_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t}$ 和 $I_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t}$ 为 0-1 变量,分别表示共享储能中电化学储能的充放电状态,例如 $I_{\text{ESS,BT,c}}^{i,t}$ 为 1 表示电化学储能处于充电状态,为 0 则表示电化学储能未处于充电状态; $I_{\text{ESS,BT,d}}^{i,t}$ 为 1 表示电化学储能处于放电状态,为 0 则表示电化学储能未处于放电状态; $P_{\text{ESS,BT,c}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{ESS,BT,c}}^{i,\max}$ 分别是电化学储能充电功率的下限和上限; $P_{\text{ESS,BT,d}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{ESS,BT,d}}^{i,\max}$ 分别是电化学储能放电功率的下限和上限; $E_{\text{ESS,BT}}^{i,t}$ 为电化学储能能在时刻 t 的储电量; $\eta_{\text{ESS,BT,c}}$ 和 $\eta_{\text{ESS,BT,d}}$ 分别表示电化学储能的充电效率和放电效率; $E_{\text{ESS,BT}}^{i,\min}$ 和 $E_{\text{ESS,BT}}^{i,\max}$ 分别表示电化学储能能在某一时刻储电量的最小值和最大值。

1.3.8 共享储能中储热罐相关约束

储热罐吸收或放出的热功率需要满足额定功率上下限约束,且不能同时储热和放热,表达式如下

$$I_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t} P_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t,\min} \leq P_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t} \leq I_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t} P_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t,\max} \quad (25)$$

$$I_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t} P_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t,\min} \leq P_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t} \leq I_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t} P_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t,\max} \quad (26)$$

$$0 \leq I_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t} + I_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t} \leq 1 \quad (27)$$

储热罐在 t 时刻的储热量由 $t-1$ 时刻的储热量以及 t 时刻的储热功率和放热功率决定,同时需考虑热功率损耗;此外还需满足储热量上下限约束,且 0 时刻的储热量应与 T 时刻的储热量相同,表达式如下

$$E_{\text{ESS,HC}}^{i,t} = E_{\text{ESS,HC}}^{i,t-1} + \eta_{\text{ESS,HC,c}} P_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t} - P_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t} / \eta_{\text{ESS,HC,d}}, t = 2, \dots, T \quad (28)$$

$$E_{\text{ESS,HC}}^{i,\min} \leq E_{\text{ESS,HC}}^{i,t} \leq E_{\text{ESS,HC}}^{i,\max}, t = 1, \dots, T \quad (29)$$

$$E_{\text{ESS,HC}}^{i,0} = E_{\text{ESS,HC}}^{i,T} \quad (30)$$

式中: $I_{\text{ESS,HC,c}}^{i,t}$ 和 $I_{\text{ESS,HC,d}}^{i,t}$ 均为 0-1 变量,分别表示共享储能中储热罐的充放热状态; $P_{\text{ESS,HC,c}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{ESS,HC,c}}^{i,\max}$ 分别是储热罐储热功率的下限和上限; $P_{\text{ESS,HC,d}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{ESS,HC,d}}^{i,\max}$ 分别是储热罐放热功率的下限和上限; $E_{\text{ESS,HC}}^{i,t}$ 为储热罐在时刻 t 的储热量; $E_{\text{ESS,HC}}^{i,\min}$ 和 $E_{\text{ESS,HC}}^{i,\max}$ 分别是储热罐储热量的下限和上限; $\eta_{\text{ESS,HC,c}}$ 和 $\eta_{\text{ESS,HC,d}}$ 分别为储热罐的储热效率和放热效率。

1.3.9 储冷罐相关约束

储冷罐吸收或放出的冷功率需要满足额定功率上下限约束,且不能同时充冷和释冷,表达式如下

$$I_{\text{CD,c}}^{i,t} P_{\text{CD,c}}^{i,\min} \leq P_{\text{CD,c}}^{i,t} \leq I_{\text{CD,c}}^{i,t} P_{\text{CD,c}}^{i,\max} \quad (31)$$

$$I_{\text{CD,d}}^{i,t} P_{\text{CD,d}}^{i,\min} \leq P_{\text{CD,d}}^{i,t} \leq I_{\text{CD,d}}^{i,t} P_{\text{CD,d}}^{i,\max} \quad (32)$$

$$0 \leq I_{\text{CD,c}}^{i,t} + I_{\text{CD,d}}^{i,t} \leq 1 \quad (33)$$

储冷罐在 t 时刻的储冷量由 $t-1$ 时刻的储冷量以及 t 时刻的充冷功率和释冷功率决定,同时需考虑冷功率损耗;此外还需满足储冷量上下限约束,且 0 时刻的储冷量应与 T 时刻的储冷量相同,表达式如下

$$E_{\text{CD}}^{i,t} = E_{\text{CD}}^{i,t-1} + \eta_{\text{CD,c}} P_{\text{CD,c}}^{i,t} - P_{\text{CD,d}}^{i,t} / \eta_{\text{CD,d}}, t = 2, \dots, T \quad (34)$$

$$E_{\text{CD}}^{i,\min} \leq E_{\text{CD}}^{i,t} \leq E_{\text{CD}}^{i,\max}, t = 1, \dots, T \quad (35)$$

$$E_{\text{CD}}^{i,0} = E_{\text{CD}}^{i,T} \quad (36)$$

式中: $I_{\text{CD,c}}^{i,t}$ 和 $I_{\text{CD,d}}^{i,t}$ 均为 0-1 变量,分别表示综合能源微网中储冷罐的充冷和释冷状态; $P_{\text{CD,c}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{CD,c}}^{i,\max}$ 分别是储冷罐充冷功率的下限和上限; $P_{\text{CD,d}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{CD,d}}^{i,\max}$ 分别是储冷罐释冷功率的下限和上限; $E_{\text{CD}}^{i,t}$ 为储冷罐在时刻 t 的储冷量; $E_{\text{CD}}^{i,\min}$ 和 $E_{\text{CD}}^{i,\max}$ 分别是储冷罐储冷量的下限和上限; $\eta_{\text{CD,c}}$ 和 $\eta_{\text{CD,d}}$ 分别为储冷罐的充冷效率和释冷效率。

1.3.10 综合能源微网和外部电网功率交换约束

微网与外部电网的购售电功率需满足功率上限和下限约束,且不能同时购电和售电,表达式如下

$$I_{\text{GD,b}}^{i,t} P_{\text{GD,b}}^{i,\min} \leq P_{\text{GD,b}}^{i,t} \leq I_{\text{GD,b}}^{i,t} P_{\text{GD,b}}^{i,\max} \quad (37)$$

$$I_{\text{GD,s}}^{i,t} P_{\text{GD,s}}^{i,\min} \leq P_{\text{GD,s}}^{i,t} \leq I_{\text{GD,s}}^{i,t} P_{\text{GD,s}}^{i,\max} \quad (38)$$

$$0 \leq I_{\text{GD,b}}^{i,t} + I_{\text{GD,s}}^{i,t} \leq 1 \quad (39)$$

式中: $I_{\text{GD,b}}^{i,t}$ 和 $I_{\text{GD,s}}^{i,t}$ 为 0-1 变量,分别表示综合能源微网与外部电网的购电和售电状态,例如, $I_{\text{GD,b}}^{i,t}$ 为 1 代表综合能源微网从外部电网购电;为 0 则代表微网未从外部电网购电。 $P_{\text{GD,b}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{GD,b}}^{i,\max}$ 分别是微网从外部电网购电功率的下限和上限; $P_{\text{GD,s}}^{i,\min}$ 和 $P_{\text{GD,s}}^{i,\max}$ 分别是微网向外部电网售电功率的下限和上限。

2 混合储能组合拍卖方案

配置储能后,微网可在电价和天然气价格较低时购入较多能源并储存在电化学储能和储热罐中,在电价和天然气价格较高时释放,通过此过程减少购电成本,储能容量增加时微网 i 的运行成本减少。通过第 1 节提出的计算方法可计算出分配不同储能容量时微网 i 的运行成本;随后要确定在共享储能总容量一定时,怎样合理分配各微网的储能容量以实现总社会福利最大。本节提出了一种组合拍卖方案来确定共享储能容量分配方案以及相应的支付方案。

2.1 投标过程

本文使用异或(XOR)竞价语言,在 XOR 竞价中,每个投标者可以提交多个二元组构成的集合,二元组由一个物品集合和投标者对物品集合的出价组成,表示投标者最终只获得这些集合中的一个。XOR 表示不同二元组之间的互斥性。

在拍卖中,储能运营商充当拍卖人,将储能容量出售给作为投标人的综合能源微网。共有电化学储能容量以及储热罐容量 2 种类型的储能容量资源。拍卖人将 n 类型储能容量划分为 H_n 个单位。每个微网 i 都会提交 K_i 种投标方案,包括其对储能容量的需求以及对相应需求的出价,表示为 $\{b_{i,k}, d_{i,k}\}$,其中 $d_{i,k}$ 称为微网 i 的第 k 个容量需求, $b_{i,k}$ 是其对该需求的出价。微网 i 在投标过程中的需求量表示为 $d_{i,k} = \{d_{i,k,n}\}$,其中 $k \in K_i$,表示微网 i 的 K_i 种投标方案中的第 k 种方案; $n \in \{1, 2\}$,表示微网 i 对 2 种不同类型储能容量需求的第 n 种。每个微网会提交多个需求以及相应的估价,但最多只有一个投标方案最终被接受; $d_{i,k,n} \in \{0, 1, \dots, H_n\}$,表示微网 i 在其第 k 个需求中请求的 n 类型储能容量的份数。

如果微网 i 的其中一个需求得到满足,那么该微网成为赢家。对于如实向拍卖人上报价值 v_i 的微网有 $b_{i,k} = v_i(d_{i,k})$,即其出价可由对容量需求 $d_{i,k}$ 的估值 $v_i(d_{i,k})$ 给出。一个拍卖过程 (X, P) 由赢家确定规则 X 和支付规则 P 定义。拍卖人首先接收各综合能源微网 i 的投标 B_i ,然后计算赢家确定结

果 $X(\mathbf{B}) = \{x_{i,k}\}$ 和支付结果 $X(\mathbf{B})$, 其中 $\mathbf{B}_i = \{b_{i,k}, d_{i,k}\}_{k \in [K_i]}$ 。微网 i 的效用定义为其价值减去其付款

$$U_i(\mathbf{B}) = \sum_{k \in [K_i]} v_{i,k} x_{i,k} - \pi_i \quad (40)$$

式中: $x_{i,k}$ 为 0-1 变量, 表示综合能源微网 i 的第 k 个投标方案是否被接受; $v_{i,k}$ 表示微网 i 的第 k 个需求的价值; π_i 表示微网 i 最终支付结果, 即付款。通常认为每个微网只想最大化自己的效用。因此, 每个微网都会策略性地上报价值以期增加效用。激励相容性是拍卖的重要属性之一, 定义如下: 在拍卖中, 对于所有微网 i 的投标策略以及所有除了微网 i 以外的微网的投标策略, 当且仅当微网 i 如实按照价值报价时, 其获得效用最大, 则此拍卖激励相容。

激励相容意味着无论其他微网上报的价值是何值, 真实提交投标价格都是微网 i 的效用最大化策略。在激励相容的情形下, 如果微网 i 策略性地上报价值, 即谎报价值, 其获得的效用减少^[34]。在每个微网都是理性个体的情况下, 可认为上报真实价值是占优策略。第 2.2 小节设计了赢家确定规则 X 和支付规则 P , 以实现激励相容。

2.2 赢家确定问题

赢家确定的目标是最大化社会福利, 在本文中, 社会福利是所有微网的效用之和。为了最大化社会福利, 拍卖人(储能运营商)倾向于将共享储能资源分配给上报价值较高的综合能源微网。这意味着储能容量会分配给最需要的微网, 一些出价最低的微网可能无法获得储能容量。令 $\mathbf{V}$ 为一组储能容量对微网的价值, 在 $\mathbf{B} = \mathbf{V}$ 的情况下, 即微网都上报真实价值, 社会福利等于所有微网上报价值总和与所有微网支付费用的差值。赢家确定问题由下式描述

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i,k} \sum_{i \in [N], k \in [K_i]} b_{i,k} x_{i,k} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{k \in [K_i]} x_{i,k} \leq 1, \forall i \in [N] \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in [N], k \in [K_i]} d_{i,k,n} x_{i,k} & \leq H_n, \forall n \in [M] \\ x_{i,k} & \in \{0, 1\}, \forall i \in [N], k \in [K_i] \end{aligned} \quad (42)$$

式中: $b_{i,k}$ 为综合能源微网 i 对其第 k 个投标方案给出的报价, 也即对其第 k 个投标方案上报的价值; $d_{i,k,n}$ 为综合能源微网 i 的第 k 个投标方案对第 n 种储能容量的需求量, 例如 $n=1$ 代表对电化学储能容量的需求, $n=2$ 代表对储热罐容量的需求。式(41)表示每个综合能源微网最多只有一个投标被接受; 式(42)表示分配的共享储能容量总和不超过储能的总容量。

2.3 制定支付方案

2.2 节中的赢家确定问题规定了储能容量的分配方式, 假设给定微网 i 投标的输入量 $\mathbf{B}_i$, 赢家确定算法可以返回 $x_{i,k}$ 的解, 记作 $x_{i,k}^N$ 。在赢家确定问题中, 微网 i 的报价 b_i 可能会与其真实价值 v_i 不同, 即 $b_i \leq v_i$, 以期在拍卖中获取更多的利益。为实现激励相容, 让微网上报其真实价值 v_i 从而实现社会福利最大化, 采用基于 VCG 机制的定价方法^[34]。

关于 VCG 机制定价方法的激励相容性, 已有很多研究阐述了证明方法。不失一般性, 下面简要介绍多物品拍卖中 VCG 机制激励相容性的证明: 令 χ 为赢家确定问题计算结果 $\mathbf{x}$ 的可行域, $\mathbf{x}^N$ 为赢家确定问题的最优解, 表示各个微网 i 的需求是否被满足; p^N 为最优解对应的目标函数值。为便于说明微网 i 上报真实价值的实现机理, 下面用 $\mathbf{Q}$ 表示储能容量的总集, $\mathbf{S}$ 表示储能容量的一个子集, q_r 表示微网对储能容量的需求值, 则有

$$\mathbf{x}^N = \operatorname{argmax}_{\mathbf{x}} \left\{ \sum_{i \in N} \sum_{S \in \mathbf{Q}} b_i(\mathbf{S}) \cdot x_i(\mathbf{S}) \mid \mathbf{x} \in \chi \right\} \quad (43)$$

$$p^N = \inf \left\{ \sum_{i \in N} \sum_{S \in \mathbf{Q}} b_i(\mathbf{S}) \cdot x_i(\mathbf{S}) \mid \mathbf{x} \in \chi \right\} \quad (44)$$

$$p_{-i}^N \triangleq \inf \left\{ \sum_{l \in N \setminus i} \sum_{S \in \mathbf{Q}} b_l(\mathbf{S}) \cdot x_l(\mathbf{S}) \right\} \quad (45)$$

式中: p_{-i}^N 表示微网 i 不参与拍卖时, 其他 $N-1$ 个微网的赢家确定问题最优解。

$$x_l(\mathbf{S}) \leq 1, \forall l \in N \setminus i \quad (46)$$

$$\sum_{l \in N \setminus i} \sum_{S \in \mathbf{Q}} |S| \cdot x_l(\mathbf{S}) \geq q_r \quad (47)$$

$$x_l(\mathbf{S}) = \{0, 1\}, \forall \mathbf{S} \in \mathbf{Q}, l \in N \setminus i \quad (48)$$

式(46)表示每个微网 l 最多只能有一个需求被满足; 式(47)表示分配的容量总和不超过储能的总容量。此问题与前述赢家确定问题的不同之处在于, 微网 i 不包括在所有微网集合中, 即没有微网 i 时其他微网的分配结果。VCG 机制表明, 微网 i 的加入会使其他 $N-1$ 个微网的总效用减少, 因为微网 i 会从原来的 $N-1$ 个微网中获取一定的储能容量。把减少的总效用称为损害金额, 每个微网 i 应该支付其向全体微网带来的损害金额。用 $\pi_i(\mathbf{b}_{-i})$ 来表示微网 i 应向全体微网支付的损害金额, 对于每个微网, 应支付的损害金额为

$$\pi_i(\mathbf{b}_{-i}) \triangleq p_{-i}^N - \sum_{l \in N \setminus i} \sum_{S \in \mathbf{Q}} b_l(\mathbf{S}) x_l^N(\mathbf{S}) \quad (49)$$

将全部微网的投标价格表示为 $\mathbf{b} = (\mathbf{b}_i, \mathbf{b}_{-i})$, 微网 i 的效用为 $U_i(\mathbf{b}) = v_i(\mathbf{x}(\mathbf{b})) - \pi_i(\mathbf{b})$, 每个微网 i 都可能会谎报其价值来最大化其效用

$$\max_{B_i} (b_i(\mathbf{x}(\mathbf{b})) - \pi_i(\mathbf{b})) \quad (50)$$

社会福利是所有微网的效用之和,表示为

$$\sum_i U_i(\mathbf{b}) = \sum_i (b_i(\mathbf{x}(\mathbf{b})) - \pi_i(\mathbf{b})) \quad (51)$$

定理 1 在解决赢家确定问题时,当且仅当所有微网提交其真实价值作为投标价格时,才能实现社会福利最大化。

证明 令 $b_i(\mathbf{x})$ 为微网 i 根据赢家确定问题的解 $\mathbf{x}$ 作出的投标价格,通过式(49)和(50)可表示为

$$\min_{b_i} (p_{-i} - \sum_{l \in N \setminus i} (b_l(\mathbf{x}(\mathbf{b})) - v_l(\mathbf{x}(\mathbf{b}))) \quad (52)$$

由于 p_{-i} 独立于 b_i , 微网 i 只需根据式

$$\min_{b_i} (-\sum_{l \in N \setminus i} (b_l(\mathbf{x}(\mathbf{b})) - v_l(\mathbf{x}(\mathbf{b}))) \text{ 确定投标价格 } b_i.$$

微网 i 改变这一结果的唯一方式是改变 $\mathbf{x}$ 的值,即通过拍卖人求解问题 $\max_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} (-\sum_{l \in N \setminus i} (b_l(\mathbf{x}) + v_l(\mathbf{x})))$ 的结果 $\mathbf{x}$ 来确定投标价格 b_i 。如果 $b_i(\mathbf{x}) = v_i(\mathbf{x})$, 则赢家确定问题的结果与问题 $\max_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} (\sum_{l \in N \setminus i} (b_l(\mathbf{x}) + v_l(\mathbf{x})))$ 的结果相同。所以对于所有微网,上报真实价值,即 $b_i(\mathbf{x}) = v_i(\mathbf{x})$ 都是最优策略。相反,如果有的微网不上报真实价值,那么基于赢家确定问题的计算结果对社会福利而言就不是最优的。

从式(49)可以看出,微网 i 支付的费用不取决于其投标 b_i , 而是取决于其他微网的真实价值,即 b_{-i} 。如果提交投标价格 $b_i(\mathbf{S}) \leq v_i(\mathbf{S})$, 则会支付更多的费用,理性的微网 i 没有谎报价值的动机,因此基于 VCG 机制的收费是激励相容的。值得注意的是,VCG 机制虽然可以实现激励相容,却也具有收支不平衡的特性^[34]。在经济学中存在一些机制,不需要机制设计者额外投入资金,即机制设计者的预算在事后是平衡的。VCG 机制通常不具备预算平衡的性质,会造成机制设计者(本文中的机制设计者为共享储能运营商,同时也作为拍卖人)资金池亏损。在拍卖研究中,拍卖人的基本目标通常是社会福利最大化,本文主要考虑实现组合拍卖的激励相容性。假如拍卖人只是为了自身获取更多利润,完全可以不采取拍卖方式,而是按照非合作博弈等方式来进行储能容量交易。如果出现资金池亏损的情况,可通过补贴等方式避免拍卖人亏损,故本文不再考虑 VCG 机制预算不平衡的特性。

最后,在本文中,根据 VCG 机制,微网 i 需要支付的费用为

$$\pi_i(v_{i,k} d_{i,k}) = \sum_{l \neq i} \sum_{k \in [K_l]} (v_{l,k} x_{l,k}^{-i}) - \sum_{l \neq i} \sum_{k \in [K_l]} (v_{l,k} x_{l,k}^N) \quad (53)$$

式中: $v_{l,k}$ 表示除去微网 i 以外,其他每个微网 l 的价值; $x_{l,k}^N$ 为所有微网均参与拍卖时的分配结果,表示除去微网 i 以外其他每个微网 l 的第 k 个需求是否中标; $x_{l,k}^{-i}$ 为微网 i 不参与拍卖时,其他 $N-1$ 个微网的分配结果,表示微网 l 的第 k 个需求是否中标。

3 模型求解

本文提出的基于 VCG 机制和能源共享的混合储能组合拍卖模型为 MILP 模型,可以使用成熟的商业求解器求解。由于拍卖满足激励相容,假设微网在投标中如实上报其价值。具体组合拍卖流程如图 2 所示。

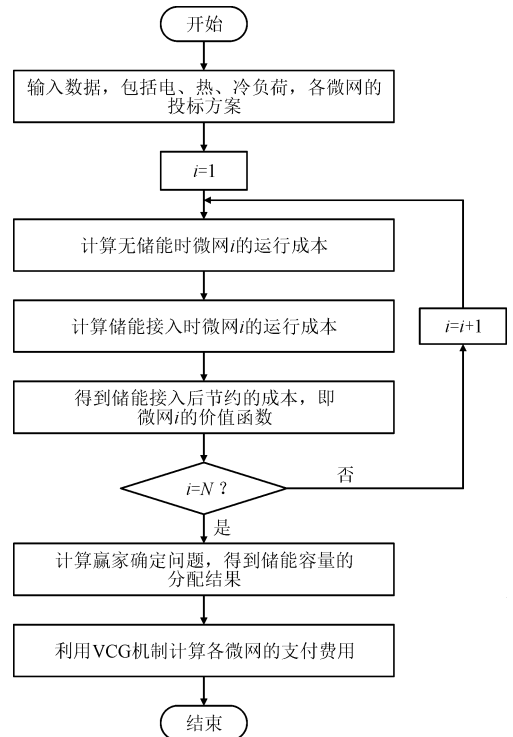


图 2 组合拍卖流程

Fig. 2 Combined auction process

4 算例分析

4.1 基本数据

本文采用表 1 所示的分时电价,综合能源微网从外部电网购买电能。电价最高的时段为 08:00—11:00 和 18:00—23:00,是用电高峰期,而电价最低的时段为 23:00—07:00。此外,出售到外部电网的上网电价为 0.34 元/(kW·h)。本文针对 9 个综合能源微网进行能源共享的案例进行研究,各微网除电负荷和热负荷不同外,其他设备参数均相同,其中

设备的具体参数引用自文献[26];共享储能中的电化学储能和储热罐容量均为 3 000 kW·h。

表 1 分时电价数据

Table 1 The real-time electricity trading prices		
时段	时间范围	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
谷时段	23:00—07:00	0.47
	07:00—08:00	
非高峰时段	11:00—18:00	0.87
	08:00—11:00	
峰时段	18:00—23:00	1.09

调度时间段内的风光出力数据取自某工业园区的风光出力预测数据,其中基本场景中微网 1 的风光预测出力曲线如图 3 所示。

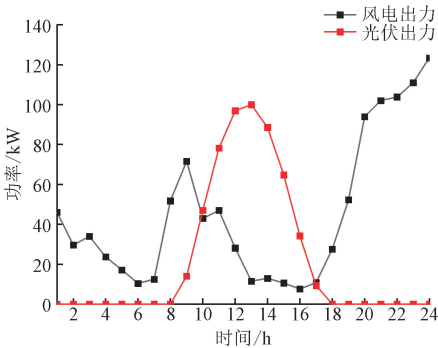


图 3 风光预测出力曲线

Fig. 3 Forecast output curve of renewable energy

调度时间段内的电、热以及冷负荷数据取自文献[27],其中基本场景中微网 1 的负荷曲线如图 4 所示。

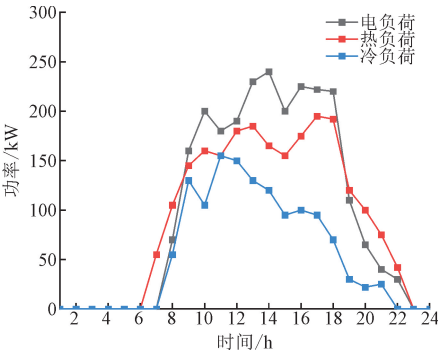


图 4 电、热以及冷负荷曲线

Fig. 4 Electrical, thermal and cooling load curves

对微网 1 进行若干案例研究,以评估共享储能在微网中的性能。对微网 1,根据接入的电化学储能容量以及储热罐容量的不同配比,考虑 16 种不同的投标方案,其中不同投标方案的储能容量见表 2。

表 2 不同场景的储能容量

Table 2 Energy storage capacity for different scenarios

方案	电化学储能容量/(kW·h)	储热罐容量/(kW·h)
方案 1	0	0
方案 2	0	200
方案 3	0	400
方案 4	0	600
方案 5	200	0
方案 6	200	200
方案 7	200	400
方案 8	200	600
方案 9	400	0
方案 10	400	200
方案 11	400	400
方案 12	400	600
方案 13	600	0
方案 14	600	200
方案 15	600	400
方案 16	600	600

4.2 计算结果分析

4.2.1 共享储能在综合能源微网中的效用分析

按照本文的模型求解流程对综合能源微网 1 求解。选取投标方案 11,调度时间段内的电平衡和热平衡情况如图 5 和图 6 所示。

除可再生能源外,大部分电力由燃气轮机提供。微网从外部电网购买的电力很少,因为有更廉价的方式来满足用户的需求。热能主要由电加热器和回热炉提供,而冷负荷主要由电制冷机和吸收式制冷机提供。此外,微网中的储能在负荷转移中起着至关重要的作用。

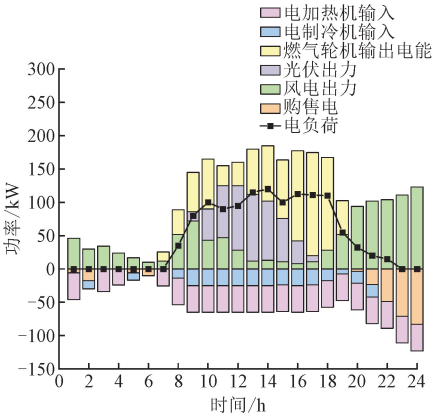


图 5 调度时间段内的电平衡情况

Fig. 5 Electrical balance over the dispatch period

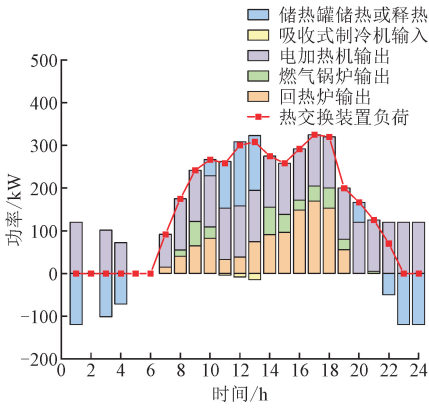


图 6 调度时间段内的热平衡情况

Fig. 6 Thermal balance over the scheduling period

由于夜间负荷需求较低,风力发电产生的剩余电力主要通过两种方式被消纳:①储存在电化学储能中;②通过电加热器转换为热能,然后储存在储热罐中,且电化学储能和储热罐在电价高峰时间放电,在电价低谷时间充电。由此可见共享储能不仅在促进可再生能源消纳方面起着重要作用,而且能节约购电成本。

4.2.2 赢家确定过程的计算结果

每个微网都提交了如表 2 所示的 16 种不同的投标方案,表 3 给出了各微网最终被接受的投标方案。

表 3 各微网被接受的投标方案

Table 3 Bidding proposals accepted for each microgrid

微网	电化学储能 容量/(kW·h)	储热罐 容量/(kW·h)
微网 1	400	400
微网 2	400	400
微网 3	0	600
微网 4	400	200
微网 5	400	200
微网 6	200	600
微网 7	600	0
微网 8	400	0
微网 9	200	600

根据不同微网电、热、冷负荷特性的差异,一定容量的电化学储能或者一定容量的储热罐对不同微网产生的价值不同,式(41)~(44)表示的赢家确定问题以社会福利最大化为目标。表 3 中各微网最终被接受的投标方案表明:电化学储能对微网 3 的福利提升较少,所以电化学储能容量优先分配给微网 3 以外的其他微网;储热罐对微网 7、8 的福利提升较少,所以储热罐容量优先分配给微网 7、8 以外的其他微

网。电化学储能容量或储热罐容量都优先分配给最需要这些容量的微网,进而实现社会福利最大化。

4.2.3 各微网需要支付的费用

根据 VCG 机制,微网 i 需要支付的费用可按式(53)计算。由于本文针对 24 h 进行优化调度,即每隔 24 h 进行一次拍卖过程,微网需要支付每日的储能费用,具体的支付结果见表 4。

表 4 各微网需要支付的费用

Table 4 The fees that each microgrid needs to pay

微网	支付的费用/元
微网 1	118.318
微网 2	119.651
微网 3	41.923
微网 4	104.018
微网 5	106.753
微网 6	88.146
微网 7	137.061
微网 8	93.496
微网 9	88.146

4.2.4 不采用组合拍卖方式的微网效益分析

本节比较文献[35]中第 4 种储能共享模式与本文提出的组合拍卖方案对综合能源微网的效用差异。在文献[35]第 4 种储能共享模式中,共享储能由储能运营管理,并由储能运营商来决定储能容量或功率的价格,根据微网在每一时刻对储能中电功率和热功率的需求以及与储能的能量交换决策来实现共享储能的控制。表 5 给出了这种储能共享模式下各个微网花费的总成本;表 6 给出了本文组合拍卖模式下的能源共享中各个微网运行的总成本以及支付的费用。

表 5 文献[35]第 4 种储能共享模式时各微网的成本

Table 5 The cost of each microgrid in the fourth energy storage sharing mode of the literature [35]

微网	总成本/元
微网 1	1 732.582
微网 2	1 706.660
微网 3	2 618.192
微网 4	1 431.750
微网 5	1 860.082
微网 6	2 781.296
微网 7	2 734.064
微网 8	1 553.072
微网 9	1 664.567
所有微网总成本	18 082.260

表 6 组合拍卖中各微网运行成本及需要支付的费用

Table 6 The operating costs and fees to be paid for each microgrid in the combined auction			
微网	运行成本/元	支付的费用/元	总成本/元
微网 1	391.445	118.318	509.763
微网 2	712.261	119.651	831.912
微网 3	1 180.444	41.923	1 222.367
微网 4	1 373.216	104.018	1 477.234
微网 5	1 689.620	106.753	1 796.373
微网 6	2 036.849	88.146	2 124.995
微网 7	2 339.647	137.061	2 476.708
微网 8	2 685.591	93.496	2 779.087
微网 9	3 009.270	88.146	3 097.416
所有微网总成本	15 418.340	897.512	1 6315.860

在组合拍卖方案中,各个微网所花费的总成本为运行成本和根据 VCG 机制支付给储能运营商的费用之和。为了比较两种方案下的社会福利,只需比较两种方案微网所花费的总成本之和,根据表 5 和表 6 中的结果,两种方案下微网花费的总成本分别为 18 082.26 元和 16 315.86 元,结果表明,与一般的共享储能模式相比,本文提出的基于组合拍卖的能源共享方案可带来更大的社会福利。

5 结 论

为解决综合能源微网配置储能成本昂贵的难题,同时使社会福利最大化,本文提出了电-热混合共享储能接入的综合能源微网的优化调度模型,随后提出了一种基于 VCG 机制的组合拍卖方案,并进行了算例仿真分析,验证了模型的有效性。

本文提出了一种具有电-热混合共享储能的综合能源微网集群的数学模型,通过使用这种模型可实现综合能源微网的日前最优调度,且电化学储能和储热罐的接入实现了综合能源微网中能量的有效利用,并节约购电成本,同时提出了一种具有激励相容性的组合拍卖方法,将共享储能容量资源分配给综合能源微网集群。在组合拍卖过程中,微网向拍卖人(储能运营商)提交其储能容量需求和相应的出价,拍卖人随即确定赢家并运用 VCG 机制确定各微网的付款。该过程中赢家确定算法保证了社会福利的最大化,且 VCG 机制的运用避免了微网的策略性报价行为。算例分析结果表明,本文提出的基于组合拍卖的能源共享方案能带来比一般共享储能方案更大的社会福利。

本文的研究尚未考虑风电、光伏预测出力数据以及负荷预测数据的不确定性,而是采用了历史的真实数据。下一步的工作是在混合能源共享数学模型中考虑预测数据的不确定性。

参考文献:

[1] 陈寒,唐忠,鲁家阳,等. 基于 CVaR 量化不确定性的微电网优化调度研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 105-115.
CHEN Han, TANG Zhong, LU Jiayang, et al. Research on optimal dispatch of a microgrid based on CVaR quantitative uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 105-115.

[2] SALAMA H S, MAGDY G, BAKEER A, et al. Adaptive coordination control strategy of renewable energy sources, hydrogen production unit, and fuel cell for frequency regulation of a hybrid distributed power system [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 34.

[3] 白斌,韩明亮,林江,等. 含风电和光伏的可再生能源场景削减方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 141-149.
BAI Bin, HAN Mingliang, LIN Jiang, et al. Scenario reduction method of renewable energy including wind power and photovoltaic [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 141-149.

[4] 孙伟卿,罗静,张婕. 高比例风电接入的电力系统储能容量配置及影响因素分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 9-18.
SUN Weiqing, LUO Jing, ZHANG Jie. Energy storage capacity allocation and influence factor analysis of a power system with a high proportion of wind power [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 9-18.

[5] 颜全椿,顾文,范立新,等. 储能协助风电机组参与电网调频控制策略研究 [J]. 现代电力, 2022, 39(5): 537-546.
YAN Quanchun, GU Wen, FAN Lixin, et al. Energy storage assists wind turbines to participate in grid frequency regulation control strategy research [J]. Modern Electric Power, 2022, 39(5): 537-546.

[6] 丁凯,郑剑,李伟,等. 基于用户侧储能的电压暂降分级治理方案及其经济性分析 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(10): 3381-3390.
DING Kai, ZHENG Jian, LI Wei, et al. Hierarchical voltage sag mitigation scheme based on user-side energy storage systems and its economic analysis [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(10): 3381-3390.

- [7] 党晓圆, 赖伟. 基于能量套利的储能价值评估模型[J]. 现代电子技术, 2021, 44(23): 180-186.
DANG Xiaoyuan, LAI Wei. Energy storage value assessment model based on energy arbitrary [J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(23): 180-186.
- [8] 陈睿彬, 陆玲霞, 包哲静, 等. 电池储能系统参与用户侧削峰填谷的鲁棒优化调度策略[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 66-76.
CHEN Ruibin, LU Lingxia, BAO Zhejing, et al. Robust optimal dispatch strategy for battery energy storage system participating in user-side peak load shifting [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(10): 66-76.
- [9] 何海婷, 柳亦兵, 巴黎明, 等. 用于平滑风力发电机输出功率的储能系统配置研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(7): 945-951.
HE Haiting, LIU Yibing, BA Liming, et al. Research on energy storage system configurations of smoothing wind turbine output power [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(7): 945-951.
- [10] YAN Xiaohe, GU Chenghong, WYMAN-PAIN H, et al. Capacity share optimization for multiservice energy storage management under portfolio theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1598-1607.
- [11] SHI Yuanyuan, XU Bolun, WANG Di, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains [C]// 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 1.
- [12] SHARMA I, DONG Jin, MALIKOPOULOS A A, et al. A modeling framework for optimal energy management of a residential building [J]. Energy and Buildings, 2016, 130: 55-63.
- [13] 赵淑敏, 陈俊. 基于全寿命周期成本的光伏+储能投资效益分析[J]. 电工技术, 2022(16): 42-45.
ZHAO Shumin, CHEN Jun. Benefit analysis of photovoltaic+ energy storage investment based on life cycle cost [J]. Electric Engineering, 2022(16): 42-45.
- [14] 高松, 何俊, 杨松坤, 等. 基于交替方向乘子法的多微电网能量共享方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 113-120.
GAO Song, HE Jun, YANG Songkun, et al. Energy management of interconnected microgrid based on alternating direction method of multipliers method [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 113-120.
- [15] 郑海林, 温步瀛, 朱振山, 等. 共享储能模式下多微电网博弈优化方法[J]. 电器与能效管理技术, 2022(2): 12-20.
ZHENG Hailin, WEN Buying, ZHU Zhenshan, et al. Optimization of multi microgrid game method under shared energy storage mode [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(2): 12-20.
- [16] 吴锦领, 楼平, 管敏渊, 等. 基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2711-2721, 27-28.
WU Jinling, LOU Ping, GUAN Minyuan, et al. Operation optimization strategy of multi-microgrids energy sharing based on asymmetric Nash bargaining [J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2711-2721, 27-28.
- [17] 李咸善, 方子健, 李飞, 等. 含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6611-6624.
LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6624.
- [18] 李笑竹, 陈来军, 殷骏, 等. 面向低碳供能的多园区共享氢储能系统容量规划[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2534-2544.
LI Xiaozhu, CHEN Laijun, YIN Jun, et al. Capacity planning of multiple parks shared hydrogen energy storage system for low-carbon energy supply [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2534-2544.
- [19] 张青苗, 陈来军, 马恒瑞, 等. 基于主从博弈的共享储能分时电价策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(7): 82-88.
ZHANG Qingmiao, CHEN Laijun, MA Hengrui, et al. Time-of-use price strategy for shared energy storage based on Stackelberg game [J]. Smart Power, 2022, 50(7): 82-88.
- [20] 冶兆年, 赵长禄, 王永真, 等. 基于纳什议价的共享储能能源互联网络双目标优化[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(7): 40-48.
YE Zhaonian, ZHAO Changlu, WANG Yongzhen, et al. Dual-objective optimization of energy networks with shared energy storage based on Nash bargaining [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(7): 40-48.
- [21] KALATHIL D, WU Chenye, POOLLA K, et al. The sharing economy for the electricity storage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 556-567.
- [22] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4379-4390.

- [23] XIE Kan, ZHONG Weifeng, LI Weijun, et al. Distributed capacity allocation of shared energy storage using online convex optimization [J]. *Energies*, 2019, 12(9): 1642.
- [24] ZHAO Dongwei, WANG Hao, HUANG Jianwei, et al. Virtual energy storage sharing and capacity allocation [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1112-1123.
- [25] LAI Shuying, QIU Jing, TAO Yuechuan. Credit-based pricing and planning strategies for hydrogen and electricity energy storage sharing [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(1): 67-80.
- [26] ZHANG Hanlin, ZHOU Suyang, GU Wei, et al. Optimal operation of micro-energy grids considering shared energy storage systems and balanced profit allocations [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2023, 9(1): 254-271.
- [27] CAO Wenzhi, XIAO Jiangwen, CUI Shichang, et al. An efficient and economical storage and energy sharing model for multiple multi-energy microgrids [J]. *Energy*, 2022, 244(Part B): 123124.
- [28] ZHONG Weifeng, XIE Kan, LIU Yi, et al. Topology-aware vehicle-to-grid energy trading for active distribution systems [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2137-2147.
- [29] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD H, SCHOBBER R, et al. Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2012, 3(3): 1170-1180.
- [30] ZHOU Ruiting, LI Zongpeng, WU Chuan, et al. Demand response in smart grids: a randomized auction approach [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2015, 33(12): 2540-2553.
- [31] KRYSTA P, TELELIS O, VENTRE C. Mechanisms for multi-unit combinatorial auctions with a few distinct goods [C]//*Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Richland, SC, USA: IFAAMAS Press, 2013: 691-698.
- [32] KRYSTA P, TELELIS O, VENTRE C. Near-optimal approximation mechanisms for multi-unit combinatorial auctions [C]//*Proceedings of the 24th International Conference on Artificial Intelligence*. Palo Alto, CA, USA: AAAI Press, 2015: 4275-4281.
- [33] NISAN N, RONEN A. Computationally feasible VCG mechanisms [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2007, 29(1): 19-47.
- [34] MEDIWATHTHE C P, SHAW M, HALGAMUGE S, et al. An Incentive-Compatible energy trading framework for neighborhood area networks with shared energy storage [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 467-476.
- [35] DAI Rui, ESMAEILBEIGI R, CHARKHGARD H. The utilization of shared energy storage in energy systems: a comprehensive review [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(4): 3163-3174.

(编辑 武红江)