

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240643

具有激励相容特性的风电场群集中式共享储能的交易机制

高帅, 王维庆, 李笑竹, 王海云, 丁英

(可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为推动集中式储能与多风电场站间的协调互动与合作共赢, 促进新能源场站共享储能的可持续发展, 对多风电场集中式共享储能的资源分配与价格机制进行研究。首先, 构建多风电场站联合共享储能运行框架, 以实现风电场站平滑稳定并网与集中式独立储能的共享使用。其次, 基于维克里-克拉克-格罗夫斯(Vickrey-Clarke-Groves, VCG)机制提出具有激励相容特性的储能共享两阶段的交易机制。第一阶段建立以多风电场站为领导者、共享储能为跟随者的主从博弈运行模型, 以确定风电场群与储能各时段的初始交易价格。第二阶段通过双向拍卖的方式, 以社会福利最大化为目标对初始交易价格进行修正, 并利用收支差额补偿法应对 VCG 机制收支不平衡问题, 形成最终交易价格。最后, 选取新疆地区的风电数据构建算例, 验证所提机制的有效性。相比固定价格交易模式下风电场站与共享储能的交易结果, 得出风电场站收益分别上升了 11.14%、5.26%和 6.61%, 该机制为促进集中式共享储能的发展提供了参考。

关键词: 风电集群; VCG 机制; 共享储能; 激励相容; 社会福利

Trading mechanism for centralized shared energy storage in wind farm clusters with incentive-compatible characteristics

GAO Shuai, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, WANG Haiyun, DING Ying

(Engineering Research Center of Education Ministry for Renewable Energy Power Generation and Grid Connection, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: To promote cooperation between centralized energy storage and multiple wind farms for the sustainable development of shared energy storage, this paper explores the resource allocation and trading mechanisms for centralized shared energy storage in multi-wind farms. First, a joint operational framework for multiple wind farm shared energy storage is constructed to achieve smooth and stable grid connection of wind farms and shared use of centralized independent energy storage. Based on the Vickrey-Clarke-Groves (VCG) mechanism, a two-stage incentive-compatible trading mechanism for energy storage sharing is proposed. In the first stage, a master-slave game model with multiple wind farms as leaders and shared energy storage as followers determines the initial transaction prices between the wind farm cluster and the energy storage for each time period. The second stage uses a two-way auction mechanism to refine the initial transaction price, aiming to maximize social welfare. Additionally, the final transaction price is formed by using the compensation method for the difference between revenues and expenditures to address the imbalance between revenues and expenditures of the VCG mechanism. Finally, the effectiveness of the proposed mechanism is verified by an example using wind power data from the Xinjiang region. Compared with the trading results of wind farms and shared energy storage under the fixed-price trading model, the revenues of the wind farms are increased by 11.14%, 5.26% and 6.61%, respectively. The mechanism provides a reference for promoting the development of centralized shared energy storage.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52267005 and No. 52307108).

Key words: wind farm clusters; VCG mechanism; shared energy storage; incentive compatibility; social welfare

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (52267005, 52307108); 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目资助 (2023B01025)

0 引言

随着风、光发电新能源装机容量大幅增长, 新能源并网比例也不断攀升。然而, 由于新能源场站出力的间歇性和不确定性影响, 限制了其供电可靠性和消纳水平^[1-3], 同时给电力并网带来了更大的挑战。新能源侧配置储能是建设新型电力系统、推动能源绿色低碳转型的重要基础设施, 可降低间歇性电源对系统的冲击, 是实现新能源可靠稳定运行的重要途径^[4-5]。对于不同规模的场站其产消能量的不同导致了其对储能规模的需求也各有不同, 若单独配置储能将会给新能源场站带来投资回报周期长、储能资源短缺或闲置等问题, 且在部分特定场景下无法充分发挥储能的灵活性。共享储能模式作为一种极具前景的方式, 在优化储能资源利用、降低使用者成本以及提升可再生能源消费占比等方面优势显著, 因此得以迅速发展^[6-7]。经过大量学者研究, 共享储能模式在经济和运行方面都优于单一储能模式^[8]。共享储能的投资主体可以是参与者联盟共同担任^[9-10], 也可以是第三方独立运营^[11-12]。目前已有多个国家具有试点项目。第三方独立储能模式为运营商和投资者展现出极为可观的应用前景^[13]。这一态势为新能源场站带来了诸多发展契机, 使得新能源场站无须完全依赖自身力量配置储能, 从而显著降低了其在储能方面的成本投入^[14]。因此, 本文将第三方独立投资共享储能作为研究对象, 提供更具普适性和实用性的建议。

共享储能作为一种商业模式, 在新能源场站、电网和储能运营商之间能够延续发展的关键是制定合理的价格机制和交易模式, 可充分调动主体的参与积极性, 同时储能运营商也能获得合理的回报。近年来, 国内外对共享储能的交易模式和价格机制展开了研究。文献[15]提出一种创新方案, 即构建多园区以氢储能为基础的能量共享体系, 着重运用合作博弈理论进行储能容量配置规划并提出相应的优化运行策略, 再通过改进 shapely 值对联盟成员进行成本分摊。文献[16]提出基于主从博弈的共享储能交易定价模型, 采用双层优化方法, 上层以共享储能收益最大为目标确定储能服务价格, 下层以新能源场站运行成本最小优化储能使用策略。文献[17]通过买家与卖家之间进行拍卖, 由单独一方来确定储能交易价格和容量分配情况。文献[18]设计了一种共享储能商业模式, 通过联合多新能源场站, 按照固定交易机制确定储能售价; 并基于预测误差分配原则, 对共享储能所产生的收益进行科学合理的协调分配。文献[19]提出共享储能非合作博弈交

易模型, 通过多微网之间的利益关系, 研究不同利益目标下微网之间的交易情况, 达到提高储能利用率和收益的目的。然而, 上述共享储能交易机制在研究多方参与者共同参与储能交易时大都倾向于理想情况, 未考虑到不同主体之间的个体理性问题。针对不同交易主体会有策略性报价的特点, 使得在参与共享服务时, 狭隘地仅考虑自身利益的最大化, 谎报自身真实需求, 导致单一主体占据大量资源, 造成资源分布不平衡, 降低了共享储能区域的整体社会福利。因此, 共享储能模式下亟需具有激励相容特性的交易机制。激励相容特性是指主体之间在追求个人利益最大时, 正好与实现整体福利最大化相契合^[20], 促使不同规模的新能源场站自主真实报价以达到合理分配资源的目标。

在经济学领域中, 维克里-克拉克-格罗夫斯 (Vickrey-Clarke-Groves, VCG) 机制是一种用于剖析并解决资源分配难题的机制设计方法, 先后由 Vickrey、Clarke 和 Groves 三位经济学家提出^[21]。VCG 机制广泛应用于拍卖、资源分配和许可分配等研究。该机制的核心思想是通过设定一种激励机制, 让每一个参与者自愿真实报告私有信息, 从而得到社会最优的资源分配^[22]。文献[23]通过使用 VCG 机制提高了物品订单成功率和拍卖平台收益。文献[24]在城市物流方面, 使用该拍卖机制保证配送准时和同步。而文献[25]借助 VCG 机制构建了多微网向共享储能运营商拍卖的交易模式。但上述研究存在一定局限性, 并未对 VCG 机制中的收支不平衡问题予以考量。这可能会造成在实际操作中共享储能运营商难以弥补其成本亏损, 进而影响整个拍卖活动的可持续性与稳定性。

综上所述, 针对第三方独立共享储能在发电侧应用与交易运行机制两方面所存在的不足, 本文提出了多风电场站两阶段优化运行模型。第一阶段考虑风电出力预测误差, 根据主从博弈确定第一阶段的能量交易价格; 第二阶段, 风电场站根据第一阶段需求向储能申报功率及其报价, 并通过 VCG 机制对其进行修正调整。本文的贡献如下:

1) 应用第三方独立共享储能与多风电场联合运行方式, 提出使用一种具有激励相容的 VCG 拍卖交易机制, 以社会福利最大化为目标协助风电场站真实投标, 确保共享储能模式的延续。

2) 由于在 VCG 拍卖交易机制的应用场景中, 该机制虽激励风电场站真实报价, 却致使共享储能运营商实际所获价值低于其真实估值, 进而产生交易差价问题, 最终造成共享储能运营商亏损。鉴于此, 提出了收支不平衡处理策略。

1 风储协同运行两阶段模型

1.1 协同运行框架

风电场站配置储能可跟踪场站自身出力计划,平抑场站出力波动性,提高风电友好并网能力,风电也可根据出力“低储高发”增加自身收益。共享储能电站所服务区域内的多个风电场站如图 1 所示。风电场站根据自身需求,通过第一阶段确定需求,第二阶段向共享储能运营商申报真实需求获得容量。共享储能模式下,风电场站相当于自身配置了储能,而无须考虑高昂的投建成本。

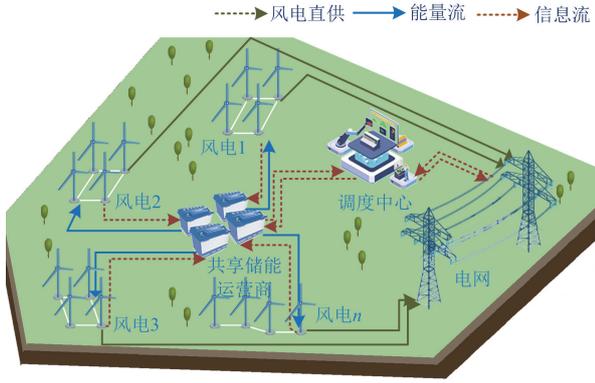


图 1 多风电场站联合共享储能并网运行框架

Fig. 1 A framework for joint shared energy storage grid-connected operation of multiple wind farms

1.2 两阶段优化运行

风电出力受到地理、气候等条件影响,为解决其波动性和不确定性问题,提出两阶段优化风电出力,保证风电并网可靠运行^[26]。风储协同并网运行包含日前阶段和实时阶段。日前阶段,利用储能自身的优势协助风电场站参与预测误差补偿,优化风电出力,避免了风电场站因储能容量不足造成的经济性问题,即通过风电场站预测误差来确定风电场站对储能的真实需求。实时阶段,通过日前阶段的需求及价格传入,再利用拍卖获得的储能容量进行充放电服务对预测误差弥补调整,达到平抑风电波动、减少因此产生的惩罚成本的目标。具体优化运行过程如图 2 所示。

1.2.1 日前阶段

日前阶段风电场站根据后一日的气象条件与预测规律将风电预测功率数据上报给电网调度中心,方便电网调度机构进行合理安排。日前阶段风电场站根据自身预测出力情况,以历史数据为例考虑弃风情况进行合理调度。其目标是最大限度地利用风电出力,尽可能提高风电场站的收益。其目标函数为

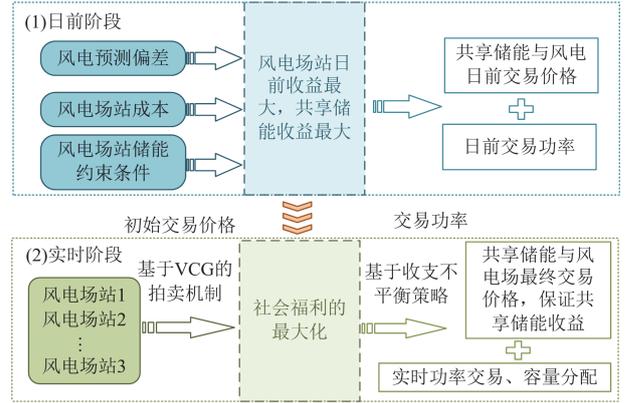


图 2 多风电场两阶段优化运行结构图

Fig. 2 Structural diagram for two-stage optimal operation of a multi-wind farm

$$\max R_i^{\text{ahead}} = R_i^{\text{sell,grid}} + R_i^{\text{ah,sell,ses}} - C_i^{\text{ah,ses}} - C_i^f = \sum_{t=1}^T \left(\xi_{\text{grid}}(t) P_i^{\text{plan}}(t) + \xi_i^{\text{ah,sell}}(t) P_i^{\text{ch}}(t) - \xi_i^{\text{ah,buy}}(t) P_i^{\text{dch}}(t) - \xi(t) |P_i^{\text{wind}}(t) - P_i^{\text{plan}}(t)| \right) \Delta t \quad (1)$$

约束条件为

$$\begin{cases} P_i^{\text{wind}}(t) + P_i^{\text{dch}}(t) = P_i^{\text{plan}}(t) + P_i^{\text{ch}}(t) \\ 0 \leq \sum_i^n (P_i^{\text{wind}}(t) + P_i^{\text{dch}}(t)) \leq P^{\text{rate}}(t) \\ 0 \leq \mu_{\text{dch}} + \mu_{\text{ch}} \leq 1 \\ S(t) = S(t-1) + \frac{P_i^{\text{dch}}(t)}{\eta_{\text{dch}}} + P_i^{\text{ch}}(t) \eta_{\text{ch}} \\ S(0) = 0.5, 0.1 \leq S(t) \leq 0.9 \\ P_i^{\text{dch}}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^{\text{dch}}(t)}{\eta_{\text{dch}}}, P_i^{\text{ch}}(t) = \sum_{i=1}^n P_i^{\text{ch}}(t) \eta_{\text{ch}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: R_i^{ahead} 为风电场站 i 的日前阶段的总收益; $R_i^{\text{sell,grid}}$ 为日前阶段的售电收益; $R_i^{\text{ah,sell,ses}}$ 为售电给共享储能运营商的收益; $C_i^{\text{ah,ses}}$ 为风电场站向共享储能购电的成本; C_i^f 为风电波动成本; n 为风电场站个数; T 为完整的时间周期,时长为 24 h; $P_i^{\text{wind}}(t)$ 为 t 时刻风电场站 i 的实际功率; $P_i^{\text{plan}}(t)$ 为风电上网计划功率; $\xi_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻日前风电上网价格; $\xi_i^{\text{ah,buy}}(t)$ 和 $\xi_i^{\text{ah,sell}}(t)$ 分别为风电场站 i 在 t 时刻日前与共享储能的购、售电价格; Δt 为采样间隔; $P_i^{\text{ch}}(t)$ 和 $P_i^{\text{dch}}(t)$ 分别为日前阶段风电场站 i 在 t 时刻的充、放电功率; $P^{\text{ch}}(t)$ 和 $P^{\text{dch}}(t)$ 分别为共享储能 t 时刻的总充、放电功率; $\xi(t)$ 为单位波动惩罚成本; $P^{\text{rate}}(t)$ 为 t 时刻风电场站和储能联合并网的最大可容纳功率; η_{ch} 和 η_{dch} 分别为充、放电效率; μ_{ch} 和 μ_{dch} 分别为充、放电状态; $S(t)$ 为 t 时刻储能荷电状态;

$S(0)$ 为 0 时刻的储能荷电状态。

日前阶段风电场站根据自身出力偏差分别对共享储能容量的需求进行交互博弈, 以自身收益最大为目标, 采用合理的充放电策略。以交易价格作为媒介相互迭代得出每个时段的租赁价格, 并采用遗传算法初始化、更新风电场站的交易电价, 最后进行迭代求解, 得出日前阶段的交易价格。主从博弈模型^[27]如下所述。

1) 参与者: 博弈主体包含各风电场站和共享储能运营商, 并以风电场站为主体, 共享储能运营商为从体。

2) 策略: 主体风电场站的策略是通过与电网的交互, 向储能售卖电量获得收益, 合理削减租赁储能与风电波动的成本; 从体共享储能电站的策略是获得与风电场站能量和容量的交互收益、与电网交互收益及自身运维成本。

3) 收益: 以风电场站的收益最大为目标, 确定日前阶段的风电场站对于储能功率的需求及其报价。

1.2.2 实时阶段

实时阶段是基于日前阶段预测的误差, 通过储能充放电服务来弥补风电场站并网运行时的误差。实时阶段通过日前阶段计算出各风电场站所需要的储能容量及其价值, 通过与共享储能运营商双向拍卖, 在实现社会福利最大化的前提下, 确定储能容量和交易价格。实时阶段风电场站的收益为

$$R_i^{\text{real}} = R_i^{\text{grid}} + R_i^{\text{real, sell, ses}} - C_i^{\text{real, ses}} - C_i^{\text{real, f}} = \sum_{t=1}^T \left(\xi_{\text{grid}}(t) P_i^{\text{plan}}(t) + \xi_i^{\text{real, ses}}(t) P_i^{\text{real, ch}}(t) - \left[\xi_i^{\text{real, buy}}(t) P_i^{\text{real, dch}}(t) - \xi(t) P_i^{\text{wind}}(t) - P_i^{\text{plan}}(t) \right] \right) \Delta t \quad (3)$$

式中: R_i^{real} 为实时阶段风电场站 i 的总收益; R_i^{grid} 为实时阶段的风电场售电收益; $R_i^{\text{real, sell, ses}}$ 为风电场站 i 售电给储能的收益; $C_i^{\text{real, ses}}$ 为实时阶段风电场站 i 向共享储能购电的成本; $C_i^{\text{real, f}}$ 为风电场站 i 实时阶段的波动成本; $P_i^{\text{real, ch}}(t)$ 和 $P_i^{\text{real, dch}}(t)$ 分别为实时阶段风电场站 i 在 t 时刻充、放电量; $\xi_i^{\text{real, buy}}(t)$ 和 $\xi_i^{\text{real, sell}}(t)$ 分别为实时阶段风电场站 i 在 t 时刻与共享储能的购、售电价格。

风电场站通过 VCG 机制向共享储能运营商进行拍卖, 以此来确定真实的容量分配和价格。实时阶段即根据该机制对日前阶段预留储能容量和价格进行修正, 保证整个系统的福利最大化。

2 基于 VCG 机制的共享储能拍卖交易

本节采用 VCG 机制对共享储能的容量进行拍卖分配, 拍卖包含投标信息、容量分配规则和支付

规则及其效用。此外, 针对由 VCG 机制造成的收支不平衡问题, 本文提出了相应的处理策略。

2.1 投标阶段

2.1.1 风电场站投标信息

假设共享储能所服务区域内的各个风电场站自身没有建设储能, 风电场站 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 就需要向共享储能运营商进行投标报价, 包含储能容量大小及其报价。投标信息 $B_{i,t}^w$ 为

$$B_{i,t}^w = \{b_{i,t}, q_{i,t}\} \quad (4)$$

式中: $q_{i,t}$ 为风电场站 i 所需的容量大小; $b_{i,t}$ 为共享储能容量的报价。 b 表示所有风电场站的报价, 即 $b = \{b_{1,t}, b_{2,t}, \dots, b_{n,t}\}$ 。故风电场站会有 K_i 种投标方案, 假设只有一种方案会被接纳, 每个风电场站在实时阶段采用 VCG 交易机制进行拍卖。

2.1.2 共享储能投标信息

共享储能运营商作为拍卖人或是机制设计者, 将集中式储能划分为 $j(j=1, 2, \dots, m)$ 个不同容量的储能, 储能投标信息 $B_{j,t}^{\text{ses}}$ 与储能容量大小 $q_{j,t}$ 存在等价关系为

$$B_{j,t}^{\text{ses}} = q_{j,t} \quad (5)$$

当拍卖开始时, 只将共享储能容量作为交易对象, 参与主体之间共享足够的信息, 从而保证 VCG 拍卖机制的信息透明。

2.2 容量分配规则

拍卖机制所确定的目标函数一般是社会福利最大化, 本文中社会福利就是各个风电场站的效用之和。各个风电场站若要赢得远超其他竞争者的效益, 会谎报储能容量及其价值, 此举会造成其他风电场站可能获得较小的容量, 使得社会效用降低。

风电场站获得的分配容量, 会促使其产生与之相关的满意度函数, 此函数在共享储能运营商与风电场站之间起到信息传递的关键作用。可用满意度函数 $u(x_i)$ 来表示, 此函数是严格的凹函数, x_i 表示风电场站 i 所分配的储能容量, 风电场站的社会效用 $v_i(x_i)$ 由储能容量报价 b_i 和满意度函数 $u(x_i)$ 共同决定。风电场站将各自的投标信息呈交给储能运营商后, 运营商按照如式(6)规则进行分配。

$$\begin{cases} \max_{x_i} \sum_{i=1}^n b_i u(x_i) \alpha_i \\ \text{s.t. } v_i(x_i) = b_i u(x_i) \\ \sum_{i=1}^n x_i \leq C \end{cases} \quad (6)$$

式中: C 为共享储能的总容量; α_i 为一个二元变量, 风电场站 i 中标为 1, 反之则为 0。

2.3 支付规则

在 VCG 拍卖机制的支付规则中, 风电场站 i 的支付方式为: 先计算风电场站 i 不参与储能容量分配时, 其余用户的效用总和; 再计算风电场站 i 参与储能容量分配后, 其他风电场站的效用之和; 最后用前者减去后者。故风电场站 i 的支付规则 ρ_i 表示为

$$\rho_i = \sum_{\substack{\ell=1, \ell \neq i \\ x_\ell=0}}^n v_\ell(x_\ell) - \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n v_\ell(x_\ell) \quad (7)$$

同样地, 若风电场站 i 想要获得最大收益, 需要真实报价, 其收益 π_i 可表示为

$$\pi_i = \varepsilon_i u(x_i^*) - \rho_i = \varepsilon_i u(x_i^*) - \left[\sum_{\substack{\ell=1, \ell \neq i \\ x_\ell=0}}^n v_\ell(x_\ell) - \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n v_\ell(x_\ell) \right] \quad (8)$$

式中: ε_i 为风电场站 i 的真实报价; x_i^* 为风电场站 i 所分配的储能容量。

作为买方, 竞拍者最应该关注如何实现最大的效用。在一般的拍卖机制中, 竞拍者的实际效用不仅取决于自身报价, 还受到其他竞争者的报价影响, 从而在竞拍区域内产生利益冲突, 这种情况会导致所有竞拍者虚假报价, 造成整个系统的效用降低, 也会导致竞拍者之间存在不正当的竞争行为。然而, VCG 拍卖机制具有占优策略的激励相容特性, 无论其他竞争者如何报价, 只要竞拍者 i 真实投标, 就一定会获得最大的收益。

式(7)、式(8)表明 VCG 拍卖机制具有占优策略的激励相容特性。

式(6)中的 $v_i(x_i) = b_i u(x_i)$ 为风电场站 i 关于报价 b_i 和储能容量 x_i 的函数, 亦可以表示为 $v_i(x_i, b_i)$ 。由此可以得到风电场站分配到的储能为

$$x^*(b_i, b_{-i}) = \arg \max_{\sum_{i=1}^n x_i \leq C} \sum_{i=1}^n b_i u(x_i) \quad (9)$$

式中, b_{-i} 为除去风电场站 i 其他风电场站的投标价格。其余风电场站所分配到的储能容量 $x_{-i}^*(b_{-i})$ 为

$$x_{-i}^*(b_{-i}) = \arg \max_{\sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n x_\ell \leq C} \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n b_\ell u(x_\ell) \quad (10)$$

由式(6)可得风电场站 i 的收益为

$$\pi_i = \varepsilon_i u(x_i^*(b_i, b_{-i})) + \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n v_\ell(x_\ell^*(b_i, b_{-i}), b_\ell) - \max_{\sum_{i=1}^n x_i \leq C} \sum_{\substack{\ell=1, \ell \neq i \\ x_\ell=0}}^n v_\ell(x_\ell^*(b_{-i}), b_\ell) \quad (11)$$

当风电场站 i 真实报价时, 即 $b_i = \varepsilon_i$, 此时风

电场站 i 的真实收益 $\pi_i^{\text{true}}(\varepsilon_i, b_{-i})$ 为

$$\pi_i^{\text{true}}(\varepsilon_i, b_{-i}) = \varepsilon_i u(x_i^*(\varepsilon_i, b_{-i})) + \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n b_\ell u(x_\ell^*(\varepsilon_i, b_{-i})) - \max_{\sum_{i=1}^n x_i \leq C} \sum_{\substack{\ell=1, \ell \neq i \\ x_\ell=0}}^n b_\ell u(x_\ell^*(b_{-i})) \quad (12)$$

当风电场站 i 谎报其投标信息时, 即 $b_i \neq \varepsilon_i$, 此时风电场站 i 的非真实收益 $\pi_i^{\text{false}}(b_i, b_{-i})$ 为

$$\pi_i^{\text{false}}(b_i, b_{-i}) = \varepsilon_i u(x_i^*(\varepsilon_i, b_{-i})) + \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n b_\ell u(x_\ell^*(b_i, b_{-i})) - \max_{\sum_{i=1}^n x_i \leq C} \sum_{\substack{\ell=1, \ell \neq i \\ x_\ell=0}}^n b_\ell u(x_\ell^*(b_{-i})) \quad (13)$$

将风电场站 i 真实报价与虚假报价作差, 可得收益差值 $\Delta\pi_i$ 为

$$\Delta\pi_i = \varepsilon_i u(x_i^*(\varepsilon_i, b_{-i})) + \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n b_\ell u(x_\ell^*(\varepsilon_i, b_{-i})) - \varepsilon_i u(x_i^*(b_i, b_{-i})) - \sum_{\ell=1, \ell \neq i}^n b_\ell u(x_\ell^*(b_i, b_{-i})) \quad (14)$$

从式(14)可以看出, $x_i^*(\varepsilon_i, b_{-i})$ 和 $x_\ell^*(\varepsilon_i, b_{-i})$ 是最优化效用的解。当所有风电场站的容量报价已经确定时, 式(6)的最大化问题转变为严格的凸优化问题, 故该问题存在唯一的最优解 $x^*(\varepsilon_i, b_{-i})$, 可得式(14)的解大于等于 0。以此类推, 只有当所有风电场站都如实投标时, 整体效用才能够维持非负状态。并且在这种情形下无论其他风电场站如何报价, 都不会改变这一结果。因此阐明了 VCG 拍卖机制具备占优策略激励相容特性的原因^[27]。

2.4 收支不平衡处理策略

不存在既满足激励相容性、个体理性和社会福利最大化, 又满足收支平衡的激励机制^[28]。共享储能运营商采用 VCG 机制时, 一般能够满足前 3 种情形, 然而却会遭遇资金亏损的问题。VCG 机制导致的收支不平衡问题, 则会造成共享储能运营商不愿参与交易。为解决该收支不平衡问题, 提出了一种租金分摊机制。为保障共享储能运营商的收益, 该策略具体应用在实时阶段。此阶段, 基于 VCG 拍卖机制, 在获取 VCG 交易价格后, 对共享储能运营商进行相应的补偿分摊。

共享储能的收支不平衡状况, 表现为共享储能的收益与储能支出成本的差值, 为解决共享储能运营商的亏损问题, 采取把亏损的资金融入风电场站, 使用储能进行充放电服务价格的方式来弥补其资金缺口。其中差异成本带来的价格表示为 $\xi_i^d(t)$, 其计算方式为亏损资金除以储能充放电的电量。

$$\xi_i^d(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [\xi_p(t) - \xi_i^{\text{VCG}}(t)] P_{i,t}^{\text{dch}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (P_i^{\text{ch}}(t) + P_i^{\text{dch}}(t))} \quad (15)$$

$$\xi_i^{\text{real.buy}}(t) = \xi_i^{\text{VCG}}(t) + \xi_i^d(t) \quad (16)$$

$$P^{\text{ses}} = \psi E^{\text{ses}} \quad (17)$$

式中: $\xi_i^{\text{VCG}}(t)$ 为根据 VCG 拍卖机制后的修正交易价格; $\xi_p(t)$ 为共享储能的单位功率成本; E^{ses} 为共享储能的额定容量; P^{ses} 为共享储能的额定功率极限, 设共享储能的额定容量与共享储能的额定功率极限为线性关系; ψ 为共享储能容量与功率的比例系数^[29]。

风储功率交易价格的增加会降低风电场站的收益, 即便出现这部分损失, 风电场站在储能方面的总花费也不会高于自建储能所需的成本。而且, 这种收益损失也不会降低风电场站自愿真实报价的积极性。

3 模型求解

本文提出一种共享储能运营模式, 该模式基于 VCG 机制拍卖, 同时构建了风电场站联合储能实时阶段的优化并网模型。并基于 Matlab 的 Yalmip 编程环境, 采用 cplex12.10 求解器求解。求解流程如图 3 所示。

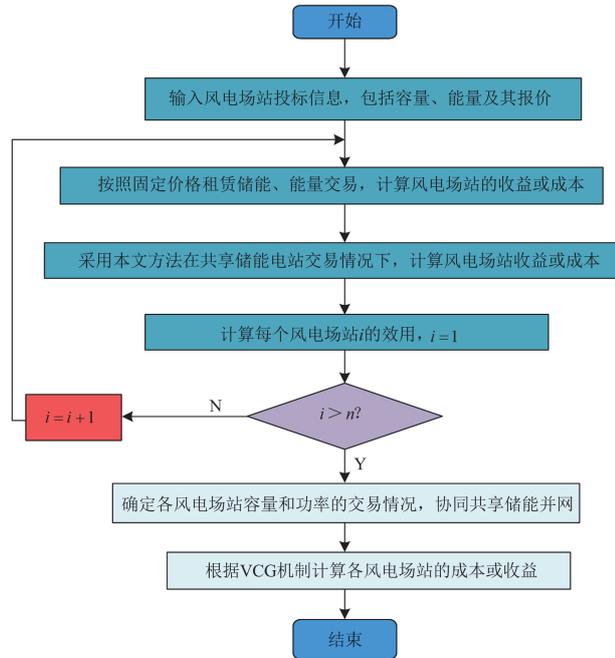


图 3 实时阶段模型求解流程图

Fig. 3 Flow chart of real-time phase model solving

4 算例分析

4.1 算例参数设置

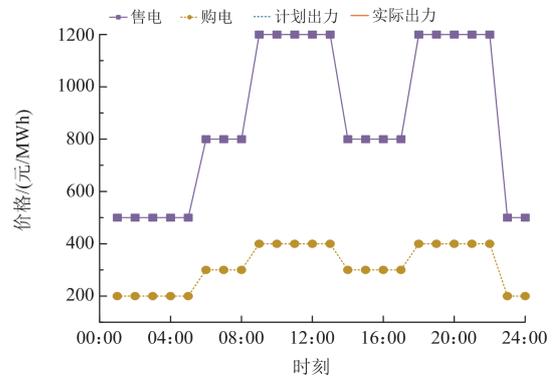
本文选取新疆某地区装机容量大小分别为 40 MW、50 MW、60 MW 的风电场站 1、2、3 的出力数据, 以及共享储能共同组成风电场站-储能并网运行。共享储能容量为 30 MWh。风电上网电价采用分时电价^[30]。共享储能参数^[31]如表 1 所示。调度运行阶段风电场站的出力数据来自于新疆地区的风电场站预测数据。风电场站将根据预测功率误差值来确定共享储能容量的需求, 其中分时电价、风电场站 1、2、3 的出力曲线如图 4 所示。

基于上述风电出力偏差, 日前阶段以风电场站收益最大化为目标与共享储能电站进行价格博弈, 日前阶段的交易价格为实时阶段风电场站对共享储能容量的报价, 如图 5 所示。

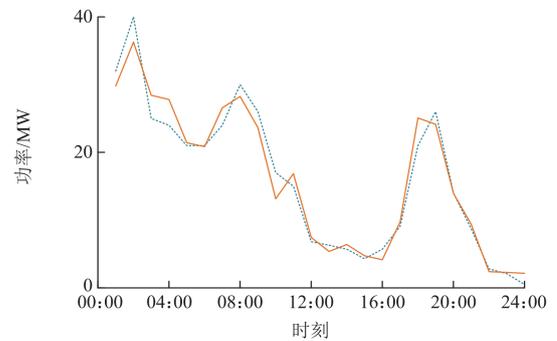
表 1 共享储能参数

Table 1 Parameters of shared energy storage

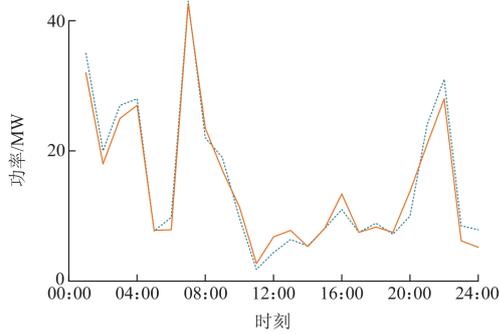
| 参数 | 值 |
|----------------|------------|
| 充放电效率 | 0.9 |
| 荷电状态初始值 | 0.5 |
| 荷电状态 | [0.1, 0.9] |
| 波动成本/(元/kWh) | 0.3654 |
| 储能运行成本/(元/kWh) | 0.207 |



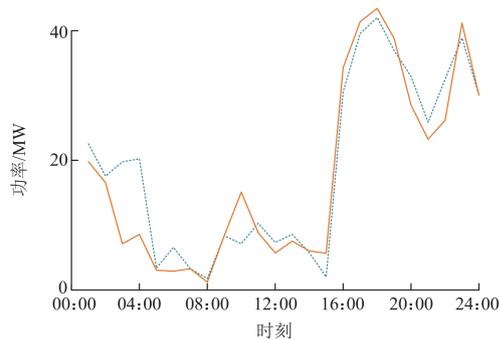
(a) 分时电价



(b) 风电场站1出力曲线



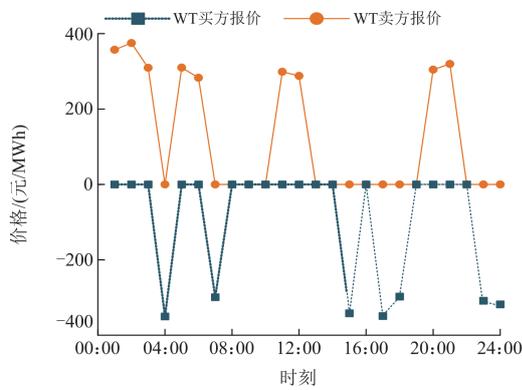
(c) 风电场站2出力曲线



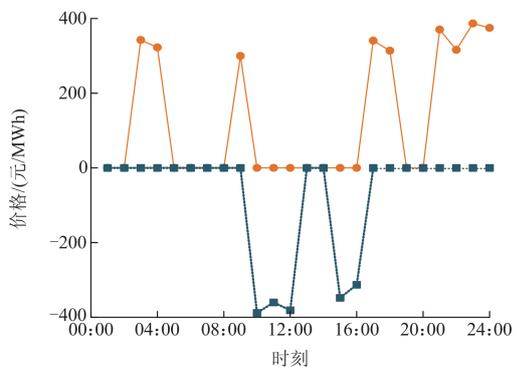
(d) 风电场站3出力曲线

图4 分时电价和风电场集群预测出力曲线

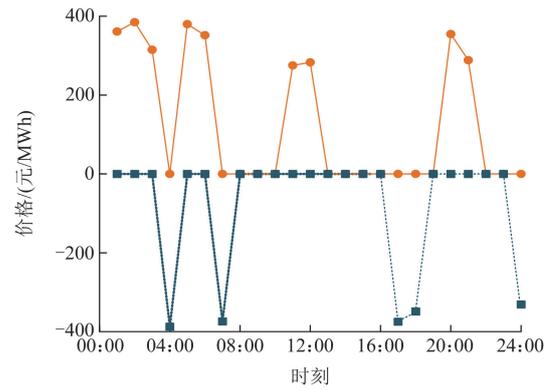
Fig. 4 Time of use power price and predicted output curves for wind farm clusters



(a) 风电场站1报价



(b) 风电场站2报价



(c) 风电场站3报价

图5 日前阶段风电场站的报价

Fig. 5 Wind farms and operators' price at the previous stage

此外，通过日前阶段3个风电场站获得了最初的储能需求，并在实时阶段向共享储能运营商进行投标，其投标情况如表2所示。

表2 不同风电场站的投标信息

Table 2 Bidding information for different wind farm stations

| 时段 | MW | | |
|-------------|--------|--------|--------|
| | 风电场站 1 | 风电场站 2 | 风电场站 3 |
| 00:00—01:00 | 1.27 | 0 | 2.78 |
| 01:00—02:00 | 0.79 | 0 | 0.99 |
| 02:00—03:00 | 0.64 | 1 | 2.64 |
| 03:00—04:00 | -1.81 | 1 | -1.80 |
| 04:00—05:00 | 0.31 | 0 | 0.11 |
| 05:00—06:00 | 1.67 | 0 | 1.69 |
| 06:00—07:00 | -2.57 | 0 | -2.57 |
| 07:00—08:00 | 0 | 0 | 0 |
| 08:00—09:00 | 0 | 1 | 0 |
| 09:00—10:00 | 0 | -1.7 | 0 |
| 10:00—11:00 | 1.41 | -1.15 | 1 |
| 11:00—12:00 | 1.21 | -2.4 | 1.21 |
| 12:00—13:00 | 0 | 0 | 0 |
| 13:00—14:00 | 0 | 0 | 0 |
| 14:00—15:00 | -0.38 | -0.5 | 0 |
| 15:00—16:00 | 0 | -2.4 | 0 |
| 16:00—17:00 | -0.65 | 1.08 | -0.65 |
| 17:00—18:00 | -2.05 | 0.6 | -3.08 |
| 18:00—19:00 | 0 | 0 | 0 |
| 19:00—20:00 | 1.04 | 0 | 1.03 |
| 20:00—21:00 | 0.72 | 1.45 | 0.72 |
| 21:00—22:00 | 0 | 0.46 | 0 |
| 22:00—23:00 | -0.18 | 1.2 | 0 |
| 23:00—24:00 | -1.65 | 0.36 | -3.64 |

4.2 中标结果分析

考虑到不同的投标类型会对交易造成不同的影响，本文买卖双方采用“或”交易关系，共享储能

运营商可以同时向多个风电场站进行容量租赁或功率交易, 同时单一风电场站也可以向多个储能电站进行售卖, 保证交易的成功率, 进一步提高了本文所提出机制的可行性。

图 6 分别是 3 个风电场站的中标情况和电功率平衡图。该情形下, 设定“1”代表风电实际出力小于预期出力, 风电场站需作为买家要向储能运营商购买功率;“-1”则代表风电实际出力大于预期出力, 风电场站需作为卖家向储能运营商售卖功率。确保

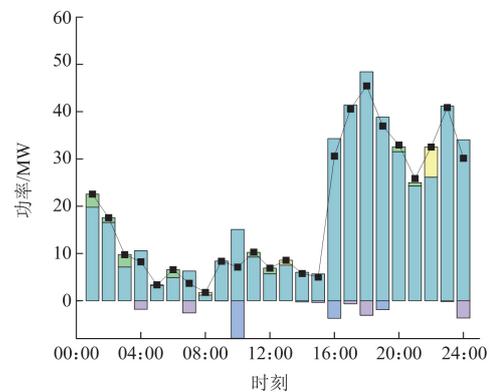
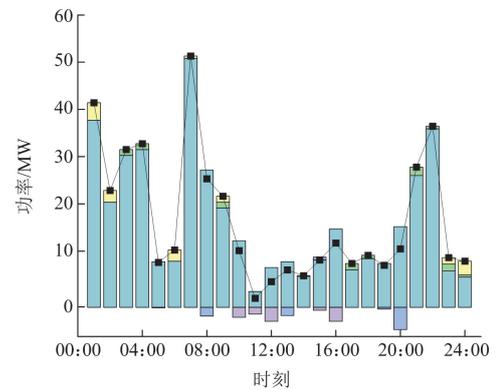
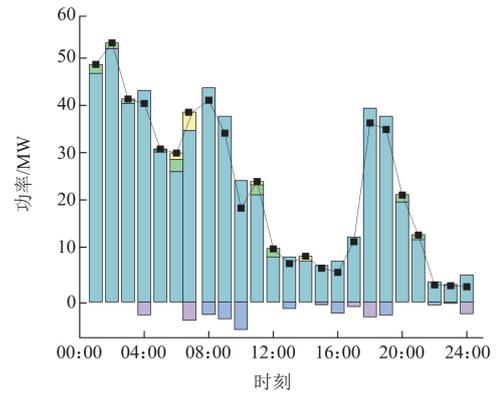
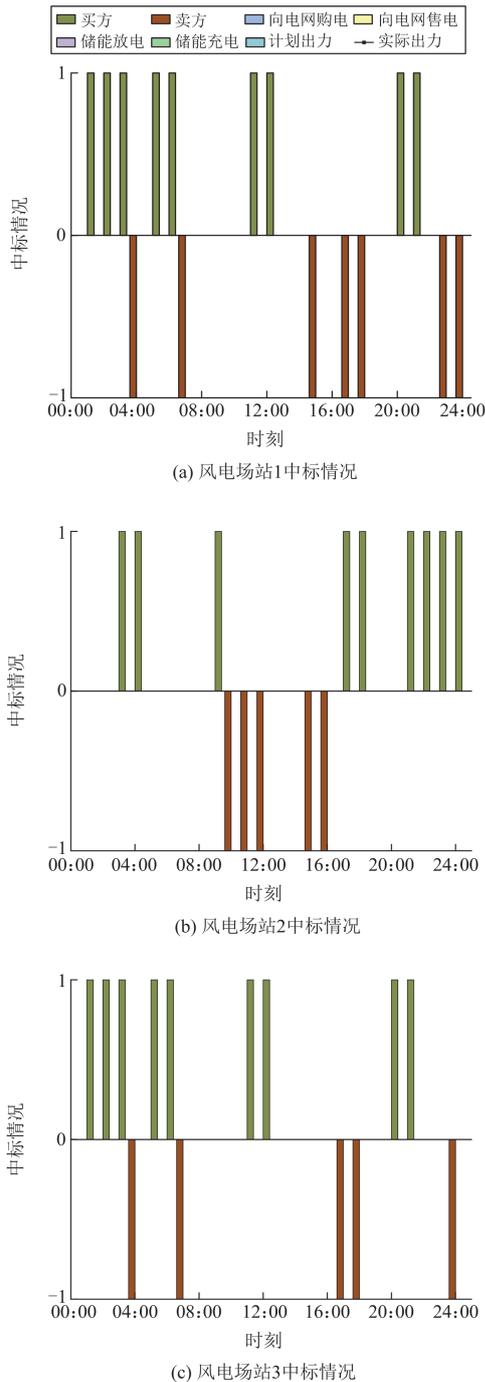


图 6 风电场站中标情况及其电功率平衡

Fig. 6 Winning bids for wind farms and their electrical power balance

福利最大化需要遵循的原则是: 买家为确保中标, 会尽量报出低价; 而卖家为确保中标, 会尽量报出高价。风电场站既作为买家又可以作为卖家, 与共享储能运营商有着同样的身份。因此, 中标的成功率主要取决于双方主体的报价, 例如风电场站 3 的自身出力偏多, 对储能的能量与容量需求更大。为最大限度提升自身效益, 在完成计划出力且有盈余

后, 相关主体更多地选择作为卖家, 凭借较高报价中标以售卖资源。而风电场站 1、2 的出力偏差较大, 往往作为买家, 需要以较低报价中标。

4.3 算例结果分析

通过 VCG 机制计算得出各风电场站所支付的费用, 其通过拍卖获得的容量以及自身收益如表 3 所示。通过 VCG 拍卖交易机制的效用计算可得到储能的容量分配。

表 3 各风电场站最优分配容量

Table 3 Optimal allocation of capacity for each wind farm station

| 风电场站 | 容量/MWh | 支付费用/元 | 收益/元 |
|------|--------|---------|------------|
| 1 | 9.32 | 5293.90 | 119 415.71 |
| 2 | 8.15 | 4804.52 | 204 844.24 |
| 3 | 12.48 | 8097.95 | 285 205.33 |
| 2 | 8.50 | 4954.80 | 204 092.03 |
| 3 | 12.00 | 7692.61 | 275 176.36 |

若风电场站如实报价参与拍卖, 各自获得的共享储能容量分别为 9.32 MWh、8.15 MWh 和 12.48 MWh。VCG 机制具有激励相容的特性, 并保证交易过程中的主体能够真实拍卖自身所需和所需物品的价值。假设有风电场站谎报投标信息, 当风电场站 2 选择提高竞价, 其获得的储能容量从 8.15 MWh 增加到 8.5 MWh, 其支付成本虽然上升了 3.1%, 但其收益却下降了 0.36%, 风电场站 2 获得了较大的容量, 分配给其他两个风电场站的容量减少, 不仅导致风电场站 2 的收益减少, 还会影响风电场站 1 和风电场站 3 的收益。同理, 假如风电场站 3 不是真实投标, 其分配容量从 12.48 MWh 下降到 12 MWh, 支付成本虽然下降了 5.1%, 但风电场站 3 的收益也随之下降了 3.52%。因此各风电场站在最优效用下的储能容量分别为 9.32 MWh、8.15 MWh 和 12.48 MWh。

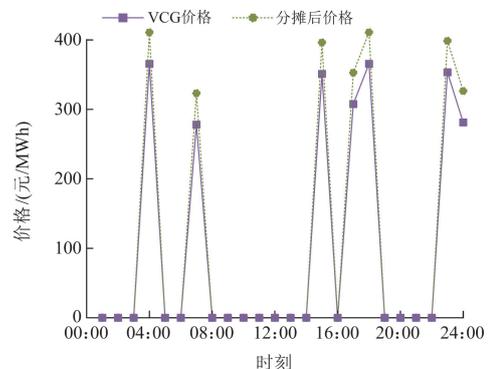
实时阶段, 储能系统充分发挥平抑风电波动的能力, 以对各风电场站预测误差进行弥补调整。从图 6 中可以看出, 3 个风电场站可借助向共享储能运营商拍卖的方式, 实现风储协同并网。在自身出力不足和盈余时向储能运营商购售能量, 以此达到优化并网的状态。基于 VCG 机制, 风电场站在能量交互过程中, 需优先与共享储能运营商开展能量交换, 再与电网进行能量平衡调配。由于夜间风量较大, 风电场站 1、2 在 00:00—08:00 时段的风电出力较大, 倾向于向储能运营商和电网售电, 而在白天风速小出力较小时作为买家进行购电。风电场站 3 在 16:00—24:00 时段的出力较大, 除了向储能充电, 该时段的发电量也可满足晚间用电高峰, 达到计划出力的目标。

4.4 VCG 机制收支不平衡处理

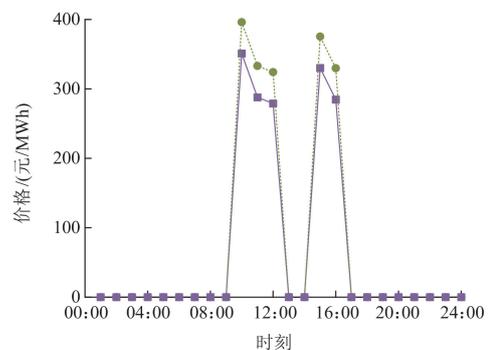
VCG 拍卖交易机制可以有效分配共享储能容量, 通过这种较为精准的资源调配, 不仅提升了储能资源的利用效率, 还极大地激发了市场活力, 有力推动了共享储能在当前储能市场更进一步的发展与广泛推广。然而, VCG 机制会造成共享储能运营商收支不平衡, 即共享储能作为该交易机制中的拍卖人, 需要支付参与主体的总费用大于参与者支付给共享储能运营商的总费用。在信息不完全、不透明或风电场站之间有“合作密谋”的情况下, 共享储能运营商无法确定储能资源真实的分配情况和价格, 从而造成自身的收支不平衡。基于此, 将储能亏损成本分摊至各风电场站与储能充放电功率交易价格上, 将亏损资金除以所有风电场站与共享储能运营商之间的交易量, 得到补偿电价 $\zeta_i^d(t)$, 将补偿电价与 VCG 价格叠加作为最终分摊后的交易价格, 以弥补共享储能运营商的收益, 如图 7 所示。

4.5 不同交易模式对比分析

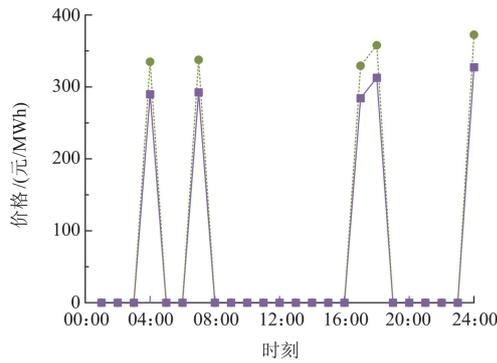
在 VCG 拍卖机制交易过程中, 为充分展现该机制的优势, 将其与风电场站先前采用的方式进行对比。在文献[32]中所提及的方式下, 风电场站依据自身需求, 与共享储能运营商进行单独的固定储能报价。在相同容量和功率的情况下, 不同交易运行机制的风电场站整体成本、收益情况如表 4 所示。



(a) 风电场站1与储能交易价格



(b) 风电场站2与储能交易价格



(c) 风电场站3与储能交易价格

图 7 风储交易价格

Fig. 7 Wind storage trading price

表 4 不同模式下的租赁储能成本和收益

Table 4 Cost and revenue of leased energy storage under different models

| 风电场站 | 1 | 2 | 3 |
|--------------|------------|------------|------------|
| VCG 拍卖机制/MWh | 9.32 | 8.15 | 12.48 |
| 成本/元 | 4293.9 | 5991.75 | 8097.95 |
| 收益/元 | 119 415.71 | 204 844.24 | 285 205.33 |
| 固定租赁机制/MWh | 9.32 | 8.15 | 12.48 |
| 成本/元 | 6027.4 | 7534.25 | 12 054.79 |
| 收益/元 | 107 450.39 | 194 602.02 | 267 530.36 |

由表 4 可以看出, 通过对比 VCG 拍卖机制和固定租赁储能两种容量机制, 可以得出两种机制下所有风电场站集群的储能容量租赁成本分别为 18 383.59 元和 25 616.62 元, 收益分别为 609 465.28 元和 569 582.77 元。储能容量越大, 风电场站能够储存或售卖的功率也越大, 在面对自身出力波动时的惩罚也就越小, 收益也相应的越大。在两种交易方式下, 可以得出相较于固定模式下的储能租赁, 本文所提 VCG 拍卖机制的共享储能容量分配方案可以给社会带来更大的福利, 整体风电场站的收益也随之增大。

5 结论

为解决共享储能模式的运行交易机制问题, 同时保证共享储能运营商和各风电场站能够自愿加入该模式, 使得整个社会福利最大化, 本文提出了基于 VCG 机制拍卖方法的风储联合两阶段优化运行策略。通过算例仿真分析得出了如下结论。

1) 本文通过风电场站联合共享储能两阶段运行, 第一阶段基于各风电场站功率预测误差值, 运用主从博弈的方式, 确定了风电场站对储能容量及其报价的真实需求。第二阶段通过 VCG 拍卖交易

机制, 修正和优化了日前阶段风电场站的储能容量和报价, 相较于储能固定价格交易模式, 各风电场站整体收益分别提升了 11.14%、5.26%和 6.61%。

2) 相较于未考虑共享储能收支不平衡的情况, 本文将运营商的亏损成本分摊至风电场站的能量交易价格中, 弥补了储能运营商的价格缺口, 有效保障了储能运营商在该运行情况下的延续性。

本文基于历史数据的风电出力及其偏差, 尚未对风电不确定性出力给风电联合共享储能系统造成的影响进行量化。且本文仅考虑了单一的风电出力, 下一步将考虑风电、光伏新能源整体出力不确定性, 深入探究在共享储能商业模式下的运行状况, 以进一步提升共享储能在电力储能市场中的灵活性和延续性。

参考文献

- [1] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [2] 李宽宏. 基于 Wasserstein 条件生成对抗网络的新能源出力场景生成方法[J]. 供用电, 2023, 40(3): 86-94.
LI Kuanhong. A method for renewable energy power generation based on Wasserstein conditional generative adversarial networks[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(3): 86-94.
- [3] 上官甲天, 茅云寿. 计及新能源不确定性微能源网优化运行研究[J]. 供用电, 2023, 40(8): 92-99.
SHANGGUAN Jiatian, MAO Yunshou. Optimal operation of micro-energy networks considering new energy uncertainty[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8): 92-99.
- [4] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15-24.
LI Jianlin, YU Xiaodong, YU Zhengzang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.
- [5] 吴晋波, 宋兴荣, 刘永刚, 等. 采用调控云数据的新能源与储能电站 AGC 控制方法研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 128-134.
WU Jinbo, SONG Xingrong, LIU Yonggang, et al. Research and application of AGC control method for new energy and energy storage power stations using data of

- regulation cloud[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(2): 128-134.
- [6] 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.
- [7] 张翔, 王翌, 周振宇, 等. 考虑光伏集成 5G 基站用能模式的多主体共享储能优化配置[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(3): 97-106.
ZHANG Xiang, WANG Zhao, ZHOU Zhenyu, et al. Optimal configuration of shared energy storage system for multi-entities considering PV integrated 5G base station energy consumption modes[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(3): 97-106.
- [8] 李笑竹, 陈来军, 杜锡力, 等. 发电侧共享储能运营机制与交易模式研究综述[J]. *电气工程学报*, 2023, 18(1): 188-200.
LI Xiaozhu, CHEN Laijun, DU Xili, et al. Research status and prospect of shared energy storage operation mechanism and trading mode on generation side[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023, 18(1): 188-200.
- [9] 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.
- [10] 臧云帆, 夏晟, 李嘉文, 等. 含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24): 90-101.
ZANG Yunfan, XIA Sheng, LI Jiawen, et al. A robust game optimization scheduling method for shared energy storage micro electric network group distribution[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24): 90-101.
- [11] ZAIDI B H, BHATTI D M S, ULLAH I. Combinatorial auctions for energy storage sharing amongst sssthe households[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 19: 291-301.
- [12] 林墨涵, 刘佳, 唐早, 等. 考虑多能耦合共享储能的微网多智能体混合博弈协调优化[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(4): 132-141.
LIN Mohan, LIU Jia, TANG Zao, et al. Coordinated optimization of mixed microgrid multi-agent game considering multi-energy coupled shared energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(4): 132-141.
- [13] WANG Q, ZHANG X, YI C, et al. A novel shared energy storage planning method considering the correlation of renewable uncertainties on the supply side[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(4): 2051-2063.
- [14] 唐西胜, 李伟, 沈晓东. 面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(9): 178-191.
TANG Xisheng, LI Wei, SHEN Xiaodong. Research progress and prospect of energy storage planning method for new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(9): 178-191.
- [15] 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 a multi parks hydrogen energy storage system for low-carbon energy supply[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(7): 2534-2544.
- [16] 帅轩越, 马志程, 王秀丽, 等. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 679-690.
SHUAI Xuanyue, MA Zhicheng, WANG Xiuli, et al. Optimal operation of shared energy storage and integrated energy microgrid based on leader-follower game theory[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 679-690.
- [17] 孙偲, 郑天文, 陈来军, 等. 基于组合双向拍卖的共享储能机制研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1732-1739.
SUN Si, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. Energy storage sharing mechanism based on combinatorial double auction[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1732-1739.
- [18] 杨帆, 王维庆, 程静, 等. 基于误差分配原则的发电侧共享储能容量规划研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 91-102.
YANG Fan, WANG Weiqing, CHENG Jing, et al. Capacity planning of shared energy storage on the generation side based on the error distribution principle[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 91-102.
- [19] 闫东翔, 陈玥. 共享储能商业模式和定价机制研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(23): 178-191.
YAN Dongxiang, CHEN Yue. Review on business model and pricing mechanism for shared energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(23): 178-191.

- [20] HURWICZ L. The design of mechanisms for resource allocation[J]. *The American Economic Review*, 1973, 63(2): 1-30.
- [21] MONDAL S, RUFFINI M. Fairness guaranteed and auction-based x-haul and cloud resource allocation in multi-tenant O-RANs[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(6): 3452-3468.
- [22] YOU J S, JUAREZ R. Incentive-compatible simple mechanisms[J]. *Economic Theory*, 2021, 71(4): 1569-1589.
- [23] 刘旭东, 张学杰, 张骥先, 等. 基于竞价的租赁车辆资源分配和定价机制[J]. *计算机应用*, 2018, 38(8): 2423-2430. LIU Xudong, ZHANG Xuejie, ZHANG Jixian, et al. Auction based vehicle resource allocation and pricing mechanism for car rental[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(8): 2423-2430.
- [24] XU S, SHAO S, QU T, et al. Auction-based city logistics synchronization[J]. *IIEE Transactions*, 2018, 50(9): 837-851.
- [25] 吴雄, 麻淞, 何雯雯, 等. 具有激励相容和能源共享特性的混合储能组合拍卖[J]. *西安交通大学学报*, 2023, 57(9): 162-173. WU Xiong, MA Song, HE Wenwen, et al. Hybrid energy storage portfolio auction based on Vickrey-Clarke-Groves mechanism and energy sharing[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2023, 57(9): 162-173.
- [26] JORDEHI A R, TABAR V S, JIRDEHI M A. A two-stage stochastic model for security-constrained market clearing with wind power plants, storage systems and elastic demands[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 51: 104550.
- [27] 陆秋瑜, 杨银国, 谢平平, 等. 风电场集群租赁共享储能两阶段优化运行策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 1146-1165. LU Qiuyu, YANG Yinguo, XIE Pingping, et al. Two-stage optimal operation strategy of wind farm cluster leasing shared energy storage[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 1146-1165.
- [28] 安麒, 王剑晓, 武昭原, 等. 高比例可再生能源渗透下的电力市场价值分配机制设计[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(7): 13-22. AN Qi, WANG Jianxiao, WU Zhaoyuan, et al. Benefit allocation mechanism design of electricity markets with penetration of high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(7): 13-22.
- [29] 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 lease model considering electricity-heat demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 24-32.
- [30] 田欣, 陈来军, 李笑竹, 等. 基于主从博弈和改进 Shapley 值的分布式光伏社区共享储能优化运行策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2252-2261. TIAN Xin, CHEN Laijun, LI Xiaozhu, et al. Optimal scheduling for energy storage sharing among communities with photovoltaic resource based on Stackelberg game and improved Shapley value[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2252-2261.
- [31] 江岳文, 郑晨昕. 风电场群联合共享储能两阶段协同并网优化[J]. *电网技术*, 2022, 46(9): 3426-3439. JIANG Yuewen, ZHENG Chenxin. Two-stage operation optimization for grid-connected wind farm cluster with shared energy storage[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(9): 3426-3439.
- [32] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(21): 2-8. KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(21): 2-8.

收稿日期: 2024-05-26; 修回日期: 2024-08-26

作者简介:

高 帅(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源储能优化并网方面的研究; E-mail: 1424718464@qq.com

王维庆(1959—), 男, 通信作者, 博士生导师, 教授, 研究方向为电力系统自动化和风电机组智能控制。E-mail: wwq59@xju.edu.cn

(编辑 许威)