

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.03.007

电碳联合市场下考虑风光不确定性的虚拟电厂竞标策略

赵双池, 蔺红, 王海云

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要:当前全国电力市场和碳交易市场正在同步改革, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)内部聚合的各类分布式资源不断增多, VPP 参与市场的角度出现转变。为研究 VPP 在电碳联合市场下兼顾经济性与低碳性的竞标策略, 将 VPP 作为价格制定者, 提出电碳联合市场下考虑风光不确定性的双层竞标模型。首先, 对 VPP 的运营结构与 VPP 参与电碳联合市场的机制进行介绍与分析。其次, 在此基础上构建上层以 VPP 参与电碳联合市场时自身收益最大为目标, 下层以电碳联合市场的社会福利最大化为目标的双层竞标模型。然后, 针对 VPP 内部资源中风光出力的不确定性, 采用鲁棒优化理论进行处理, 将 VPP 双层竞价模型转化为两阶段鲁棒优化模型。最后, 通过应用列与约束生成算法、强对偶理论和 Big-M 法, 将问题转化为混合整数线性规划进行求解。算例结果验证了竞标策略的可行性和有效性。

关键词:虚拟电厂(VPP); 价格制定者; 电碳市场; 竞标策略; 不确定性; 两阶段鲁棒优化

中图分类号:TM743

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)03-0076-10

0 引言

近年来, 随着“双碳”目标的提出, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为能将多种分布式资源高效整合并管理的新技术, 因具有高效、灵活、友好的并网特性而成为处理分布式资源接入电力系统问题的重要手段^[1-3]。目前, VPP 技术已逐渐应用于电力市场运营、能量管理等多个方面^[4-8]。其中, VPP 参与电力市场是一个基本场景, 而随着我国电力市场与碳交易市场机制逐渐完善, 两市场交互能为市场参与者带来更好的经济效益与低碳效益^[9-10], 故开展 VPP 参与电碳联合市场竞标策略的研究具有重要意义^[11-13]。

目前, 已有关于 VPP 参与电碳联合市场的竞标策略研究。文献[14]为研究 VPP 的电碳联合市场的交易模式, 提出 VPP 参与主市场并同时与其他 VPP 进行电-碳-备用的点对点交易模型, 兼顾了 VPP 自身收益和社会收益。文献[15]将碳交易市场引入到电力市场, 构建 VPP 在电碳一体化背景下的竞标策略, 以挖掘 VPP 内部可控资源。上述文献的 VPP 竞标策略虽然在电碳联合市场背景下制定, 但 VPP 仅作为价格接受者, 忽略了市场出清层, 本质上仍为 VPP 的内部优化调度。随着 VPP 可聚合的资源逐步增加, 其作为价格制定者参与市场成为发展趋势。文献[16]考虑到 VPP 容量逐步增加的

特点, 提出两阶段调度模型, 并将两阶段问题转换为单级多整数问题以研究 VPP 作为价格制定者的竞标行为。文献[17]视 VPP 参与电力现货市场的竞标为动态博弈关系, 将 VPP 作为决策的领导者, 市场出清作为决策的跟随者, 提出 VPP 的两阶段竞标模型。以上研究将 VPP 作为价格制定者, 虽然能确保 VPP 获利, 保障市场的社会福利, 但 VPP 仅参与电力市场, 所讨论的市场单一, 均未涉及碳交易市场。

由于 VPP 聚合的可再生能源出力具有强随机性, 其竞标策略的适用性受限^[18]。文献[19]采用机会约束规划处理可再生能源出力随机性, 实现了 VPP 的随机优化调度。文献[20]采用条件风险价值处理可再生能源随机性带来的潜在风险, 为 VPP 参与市场时的风险与收益权衡提供指导。上述方法虽然能应对不确定性对 VPP 运行的影响, 但需要足够的数据以获取准确的概率分布描述不确定性, 而鲁棒优化无须准确获取不确定参数, 可通过调节鲁棒系数使竞标策略兼顾鲁棒性与经济性, 因此更具实际应用价值^[21-25]。

综上所述, 目前考虑风光出力不确定因素, 且 VPP 作为价格制定者参与电碳联合市场的竞标策略研究较少。故文中首先分析 VPP 以价格制定者的身份参与电碳联合市场的运营机制及交易流程, 并以此为基础建立双层优化模型, 上层以 VPP 收益最大为目标优化 VPP 的投标电价与投标量, 下层以电碳联合市场的购电购碳成本最小为目标优化市场的出清价和出清量。针对 VPP 内部风光出力不

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52367012); 新疆维吾尔自治区重点研发专项资助项目(2022B01020-3)

确定性给竞标策略带来的影响,通过鲁棒优化理论将上述双层优化模型转换为考虑不确定性因素的两阶段鲁棒优化模型,并利用列与约束生成算法、强对偶理论及 Big-M 法求解。最后验证所提竞标策略可提高 VPP 参与电碳联合市场的收益并保障社会效益。

1 VPP 运营结构

文中所提 VPP 运营结构如图 1 所示。VPP 的主要供能单元有燃气轮机(gas turbine, GT)、光伏机组(photovoltaic, PV)、风力机组(wind turbine, WT),同时还考虑将柔性负荷、电动汽车(electric vehicle, EV)及储能等可快速调控资源作为辅助供应单元参与其运行。VPP 内各分布式资源将日常运行数据传递至 VPP 运营商,再由 VPP 运营商根据各资源的上传数据评估其聚合调节量以及可支配碳配额量,同时结合电力市场与碳交易市场的市场信息,形成报价报量计划参与电碳联合市场。

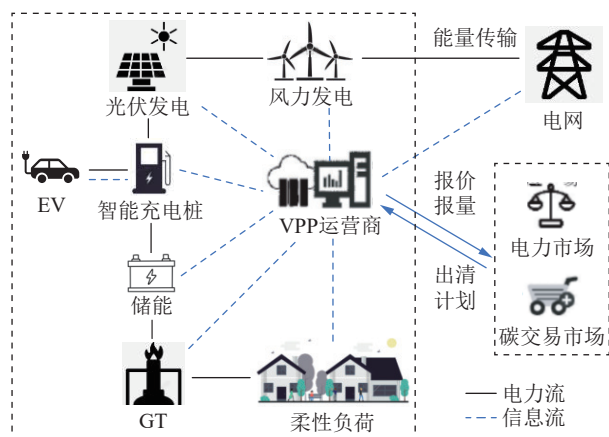


图 1 VPP 运营结构

Fig.1 Operation structure of the VPP

图 1 的运营结构表明, VPP 通过聚合 GT、PV、WT、柔性负荷、EV 及储能等资源,形成多能互补的资源池,不仅赋予其参与电力市场的能力,也凭借其高占比的低碳资源为进行碳市场交易奠定基础。因此, VPP 能通过电力市场与碳交易市场的协同参与,实现经济效益与低碳属性的双重优化。

2 电碳联合市场下 VPP 运营机制

2.1 VPP 参与电碳联合市场方式

VPP 内部产生的电力优先用于满足其自身的负荷需求,若市场中出现供小于需的情况,则市场上的需求侧报价普遍偏高, VPP 会优先满足市场需求以提高自身收益。当市场中出现供大于需的情况时,常规发电商发电能力稳定且可根据市场需求

灵活调整发电量,而 VPP 虽然拥有柔性负荷和储能等调节手段,但调度能力受到一定限制,可能无法快速响应需求变化。在此情况下,市场往往更倾向能够提供稳定电量的常规发电商,相较之下, VPP 在电能量市场中的竞标优势较弱。此时, VPP 可将多余的风光发电量供给内部储能等资源,还可在电能量市场价格较低时作为市场中的电力购买者购买电量满足内部负荷需求,从而通过低价购电、高价售电的方式完成在市场中的套利。

在碳市场交易之前,各市场参与者都会根据基准碳配额准则获得一定量的碳配额。碳市场交易启动后,各市场参与者会根据自身碳排放与碳配额的实际情况确定参与碳交易市场的方式。而 VPP 内分布式清洁能源并不消耗所分配的碳配额,因此 VPP 可在碳交易市场中将所分配的大部分碳配额出售以完成 VPP 在碳交易市场的套利,或者将盈余碳配额分给 VPP 内的高碳机组,降低 VPP 购碳成本。

2.2 VPP 参与电碳联合市场竞标架构

市场参与者参与电碳联合市场的架构如图 2 所示。

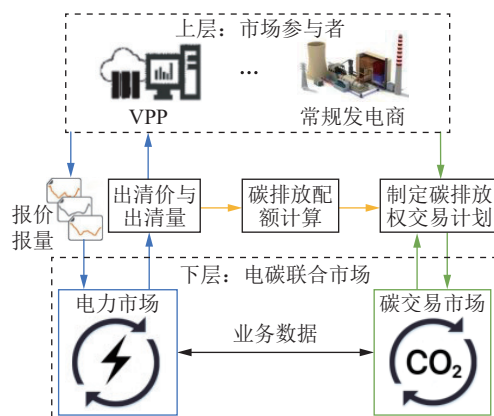


图 2 电碳联合市场架构

Fig.2 Electricity-carbon joint market architecture

上层结构中,各市场参与者需要决策在电力市场上的报价报量。在碳交易市场中,各市场参与者需要结合自身分配碳配额与实际碳排放量,选择在碳交易市场购买或出售碳配额。文中采用碳交易机制中的基准线法对市场参与者进行无偿分配碳配额,以 1 h 为一个周期,则 t 时刻的碳排放配额为:

$$E_{p,i,t} = \kappa W_{i,t} \quad (1)$$

式中: $E_{p,i,t}$ 为 t 时刻第 i 个市场参与者的碳配额; κ 为单位电量的碳配额系数; $W_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个市场参与者中履行碳配额责任的机组发电量。

机组碳排放量和机组出力成正比例关系。文中所考虑的 VPP 碳排放主要来自 GT, 因此 t 时刻的碳排放量 $E_{ac,t}^{VPP}$ 为:

$$E_{ac,t}^{VPP} = \kappa_{GT} \sum_{j=1}^{N_{GT}} P_{j,t}^{GT} \quad (2)$$

式中: κ_{GT} 为 GT 的碳排放系数; N_{GT} 为 GT 的总台数; $P_{j,t}^{GT}$ 为 t 时刻 VPP 内第 j 台 GT 的发电功率。

下层为电碳联合市场。在电力市场中, 电价的形成不仅受到供需关系影响, 还受到碳市场中碳配额价格的调节作用。碳配额价格会影响发电成本, 进而对电力市场的出清结果产生影响。电力市场价格同样也会反作用于碳交易市场, 进而影响碳配额价格。因此, 下层的电碳联合市场在接受各市场参与者的报价报量信息, 并完成两市场间的数据交互后, 实现联合出清。

3 电碳联合市场下 VPP 双层竞标模型

随着分布式资源迅速发展, VPP 所控制的资源日益丰富, 在参与市场竞标时, 能够提出较大投标量, 从而占据更高的市场份额。当市场供电不足时, VPP 能增加市场供给, 稳定市场价格; 当市场供电过剩时, VPP 能利用内部资源消纳部分过剩电能, 减少市场供应。VPP 能在一定程度上调节市场供需平衡, 进而影响市场出清结果, 因此需要将其视为价格制定者参与市场, 并将市场出清纳入决策模型, 构建双层模型以协调其竞标策略和出清结果。上层模型中, VPP 运营商以历史市场的出清数据为参考, 以自身收益最大为目标, 优化 VPP 的投标量与投标电价。下层模型则根据上层模型的优化结果和其他市场参与者的投标量和投标电价, 以社会福利最大化为目标, 优化市场的出清价格和出清量。根据电碳联合市场运行机制分析, 市场参与者的出清情况和收益将会受到碳市场影响, 故将碳市场模型加入下层市场出清模型中, 构成电碳联合市场的出清模型。

3.1 上层 VPP 决策模型

3.1.1 上层目标函数

上层以 VPP 在电力市场和碳交易市场的总体收益最大化为目标, 则目标函数可表示为:

$$F^{VPP} = \max \sum_{t=1}^T (\lambda_t^{DA} P_{w,t}^{VPP} + k_{ca} C_{qt,b} - C_{s,t}) \quad (3)$$

$$C_{s,t} = C_t^{GT} + C_t^{DR} + C_t^{EV} + C_t^{ESS} \quad (4)$$

式中: F^{VPP} 为 VPP 在电碳联合市场中的收益; T 为一个调度周期, 取 24 h; λ_t^{DA} 为 t 时刻的出清电价; $P_{w,t}^{VPP}$ 为 VPP 在 t 时刻的中标量; k_{ca} 为碳交易价格;

$C_{qt,b}$ 为 VPP 在碳交易市场下的实际交易量; $C_{s,t}$ 为 t 时刻的总运行成本; C_t^{GT} 、 C_t^{DR} 、 C_t^{EV} 、 C_t^{ESS} 分别为 t 时刻 GT 的发电成本、柔性负荷响应成本、EV 补贴成本、储能运行成本。

(1) GT 的发电成本 C_t^{GT} 。

$$C_t^{GT} = \sum_{i=1}^T \left(\sum_{u=1}^{N_u} b_u P_{u,t}^{GT} + a u_i^{GT} + c^{SUC} u_i^{GT,on} + c^{SUD} u_i^{GT,off} \right) \quad (5)$$

式中: b_u 为 GT 运行在第 u 段的成本系数; a 、 c^{SUC} 、 c^{SUD} 分别为 GT 恒定成本系数、开机成本系数、停运成本系数; N_u 为线性化的分段数; $P_{u,t}^{GT}$ 为 t 时刻 GT 运行在第 u 段的发电功率; $u_i^{GT,on}$ 、 $u_i^{GT,off}$ 、 u_i^{GT} 分别为 t 时刻 GT 的启动、停机及工作状态。

(2) 柔性负荷响应成本 C_t^{DR} 。

$$C_t^{DR} = \sum_{i=1}^T \rho_c P_{lc,t} \quad (6)$$

式中: ρ_c 为需求响应补偿价格; $P_{lc,t}$ 为 t 时刻 VPP 中柔性负荷的削减功率。

(3) EV 补贴成本 C_t^{EV} 。

$$C_t^{EV} = \sum_{k=1}^{N_{EV}} \sum_{i=1}^T (c^{dis} P_{k,t}^{dis} - c^{ch} P_{k,t}^{ch}) \quad (7)$$

式中: N_{EV} 为 VPP 内 EV 数量; $P_{k,t}^{ch}$ 、 $P_{k,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻第 k 辆 EV 的充、放电功率; c^{ch} 、 c^{dis} 分别为 EV 的充、放电成本系数。

(4) 储能运行成本 C_t^{ESS} 。

$$C_t^{ESS} = \sum_{i=1}^T c_s (P_{s,t}^{ch} + P_{s,t}^{dis}) \quad (8)$$

式中: c_s 为储能的运行成本系数; $P_{s,t}^{ch}$ 、 $P_{s,t}^{dis}$ 分别为 t 时刻储能的充、放电功率。

3.1.2 上层约束条件

上层 VPP 的竞标决策模型中, 主要考虑的约束有 VPP 内各资源的运行约束以及 VPP 参与市场时的投标量与投标电价的约束。

(1) 风光出力约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{WT} \leq P_{t,max}^{WT} \\ 0 \leq P_t^{PV} \leq P_{t,max}^{PV} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_t^{WT} 、 P_t^{PV} 分别为 t 时刻 WT、PV 出力; $P_{t,max}^{WT}$ 、 $P_{t,max}^{PV}$ 分别为 t 时刻 WT、PV 出力上限。

(2) GT 约束。

$$\begin{cases} P_t^{GT} = \sum_{u=1}^{N_u} P_{u,t}^{GT} \\ 0 \leq P_{u,t}^{GT} \leq P_{u,max}^{GT} \mu_t^{GT,on} \\ \mu_t^{GT} - \mu_{t-1}^{GT} \leq \mu_t^{GT,on} \\ \mu_{t-1}^{GT} - \mu_t^{GT} \leq \mu_t^{GT,off} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_t^{GT} 为 t 时刻 GT 各分段出力之和; $P_{u,\max}^{\text{GT}}$ 为 GT 运行在第 u 段的最大出力。

(3) 柔性负荷约束。

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_{\text{lc},t} = \sum_{t=1}^T P_{\text{la},t} \\ D_t = D'_t - P_{\text{lc},t} + P_{\text{la},t} \\ 0 \leq P_{\text{la},t} \leq P_{\text{max}}^{\text{DR}} \\ 0 \leq P_{\text{lc},t} \leq D_t \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{la},t}$ 为 t 时刻 VPP 中柔性负荷增加的功率; D_t 为调度前 t 时刻 VPP 柔性负荷的负荷总量; D'_t 为调度后 t 时刻 VPP 柔性负荷的负荷总量; $P_{\text{max}}^{\text{DR}}$ 为柔性负荷可增加的上限。

(4) EV 相关约束。

充放电相关约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k,t}^{\text{ch}} \leq u_{k,t}^{\text{ch}} P_{k,\max}^{\text{ch}} \\ 0 \leq P_{k,t}^{\text{dis}} \leq u_{k,t}^{\text{dis}} P_{k,\max}^{\text{dis}} \\ u_{k,t}^{\text{ch}} + u_{k,t}^{\text{dis}} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $u_{k,t}^{\text{ch}}$ 、 $u_{k,t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻第 k 辆 EV 的充、放电状态; $P_{k,\max}^{\text{ch}}$ 、 $P_{k,\max}^{\text{dis}}$ 分别为第 k 辆 EV 的最大充、放电功率。

电池荷电状态约束:

$$\begin{cases} S_{k,t} = S_{k,0} + \left[\sum_{t=1}^T (u_{k,t}^{\text{ch}} P_{k,t}^{\text{ch}} \eta_k^{\text{ch}} - u_{k,t}^{\text{dis}} P_{k,t}^{\text{dis}} / \eta_k^{\text{dis}}) \Delta t \right] / \Omega_k \\ S_{k,\min} < S_{k,t} < S_{k,\max} \\ S_{k,\text{final}} \geq S_{k,\text{final},\min} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $S_{k,0}$ 、 $S_{k,t}$ 分别为第 k 辆 EV 刚入网的电量和在 t 时刻的电量; η_k^{ch} 、 η_k^{dis} 分别为第 k 辆 EV 的充、放电效率; Ω_k 为第 k 辆 EV 的电池容量; Δt 为每个时段持续的时间; $S_{k,\max}$ 、 $S_{k,\min}$ 分别为第 k 辆 EV 电量的上限、下限; $S_{k,\text{final}}$ 为第 k 辆 EV 离网时的电量; $S_{k,\text{final},\min}$ 为第 k 辆 EV 离网时, EV 车主可接受的最低电量。

(5) VPP 投标约束。

报量约束: VPP 在确定参与市场的投标量时, 应将其限定在内部分布式资源优化组合的总出力区间内。

$$0 \leq P_{b,t}^{\text{VPP}} \leq P_{t,\max}^{\text{WT}} + P_{t,\max}^{\text{PV}} + P_{u,\max}^{\text{GT}} + P_{\max}^{\text{DR}} + u_{k,t}^{\text{dis}} \frac{P_{k,\max}^{\text{dis}}}{\eta_{k,\max}^{\text{dis}}} \quad (14)$$

式中: $P_{b,t}^{\text{VPP}}$ 为 t 时刻 VPP 提交的投标量; $\eta_{k,\max}^{\text{dis}}$ 为第 k 辆 EV 的最大放电效率。

报价约束:

$$0 \leq b_t \leq B \quad (15)$$

式中: b_t 为 t 时刻 VPP 能量市场的报价; B 为 VPP 能量市场的报价上限。

储能运行约束与 EV 约束类似, 故不在此赘述。

3.2 下层联合出清模型

3.2.1 下层目标函数

市场出清层主要考虑电碳联合市场效益最大化, 以从各市场参与者处购买电能量与碳配额的成本最小为目标:

$$C_{\text{social}} = \min \sum_{t=1}^T \left[b_t (P_t^{\text{sell}} - P_t^{\text{buy}}) + \sum_{g=1}^G b_{g,t} P_{g,t} - b_t^c C_{\text{qt}} + \sum_{g=1}^G b_{g,t}^c C_{\text{qt},g} \right] \quad (16)$$

式中: C_{social} 为全社会的购电-碳成本; $b_{g,t}$ 为 t 时刻常规机组 g 在电力市场的报价; G 为常规机组个数; P_t^{sell} 、 P_t^{buy} 分别为 t 时刻 VPP 在电力市场售、购电功率; $P_{g,t}$ 为 t 时刻常规机组 g 在电力市场的报量; b_t^c 、 $b_{g,t}^c$ 分别为 t 时刻 VPP 和常规机组 g 在碳交易市场的报价; C_{qt} 、 $C_{\text{qt},g}$ 分别为 VPP 和常规机组 g 参与碳交易市场的申报量, 可根据分配的碳配额与实际碳配额耗量确定。

$$b_t^c = \alpha k_{\text{ca}} + \eta_{\text{VPP}} \quad (17)$$

$$b_{g,t}^c = \gamma k_{\text{ca}} + \eta_g \quad (18)$$

式中: α 、 γ 分别为 VPP 和常规机组对市场出清价格 k_{ca} 的调整系数, 表示报价对碳交易市场出清价格的敏感度; η_{VPP} 为 VPP 在碳交易市场的固定报价; η_g 为常规机组 g 在碳交易市场的固定报价。

3.2.2 下层约束条件

(1) 功率平衡约束。

$$P_{w,t}^{\text{VPP}} + \sum_{g:(g,n) \in Q_{g,n}} P_{w,g,t} - \sum_{d:(d,n) \in Q_{d,n}} P_{d,t} = \sum_{m \in \Psi_n} B_{n,m} (\delta_{n,t} - \delta_{m,t}) : \lambda_t^{\text{DA}} \quad (19)$$

式中: $P_{w,g,t}$ 为常规机组 g 在 t 时刻的中标量; $P_{d,t}$ 为节点 d 在 t 时刻的负荷量; $B_{n,m}$ 为节点 n 、 m 之间线路上的电纳; $\delta_{n,t}$ 、 $\delta_{m,t}$ 分别为节点 n 、 m 在 t 时刻的相角; $Q_{g,n}$ 、 $Q_{d,n}$ 分别为节点 n 上的常规机组和负荷集合; Ψ_n 为节点 n 的相邻节点集合; 冒号右边为左边等式约束对应的对偶变量。

(2) 碳配额平衡约束。

$$C_{\text{qt}} - \sum_{g=1}^G C_{\text{qt},g} = 0 : k_{\text{ca}} \quad (20)$$

(3) 常规机组中标约束。

$$P_{g,\min} \leq P_{w,g,t} \leq P_{g,\max} \quad (21)$$

式中: $P_{g,\max}$ 、 $P_{g,\min}$ 分别为常规机组 g 输出功率的上限、下限。

(4) VPP 出清约束。

$$0 \leq P_{w,t}^{\text{VPP}} \leq P_{b,t}^{\text{VPP}} \quad (22)$$

(5) 传输线路容量约束。

$$\begin{cases} -L_{n,m}^{\max} \leq B_{n,m}(\delta_{n,t} - \delta_{m,t}) \leq L_{n,m}^{\max} \\ -\pi \leq \delta_{n,t} \leq \pi \end{cases} \quad (23)$$

式中: $L_{n,m}^{\max}$ 为节点 n 、 m 之间线路最大准许容量。

3.3 两阶段鲁棒竞标优化模型

制定竞标策略时, 风光出力不确定性可能导致 VPP 报量不符合实际出力, 从而在市场中承担较高的风险成本。为避免这一潜在损失, 可采用两阶段鲁棒模型处理风光出力的不确定性, 进而优化 VPP 的市场交易策略。在该模型中, 部分决策变量(如可控资源的出力)被置于内层优化模型中, 通过第一阶段的决策和第二阶段的调整, 应对风光出力的不确定性并适应性调整竞标策略。

首先引入布尔变量 $z_t^{\text{WT}+}$ 、 $z_t^{\text{WT}-}$ 、 $z_t^{\text{PV}+}$ 、 $z_t^{\text{PV}-}$ 构建不确定集合 Z 表征风光出力。

$$Z = [P_t^{\text{WT}}, P_t^{\text{PV}}]^T \in \mathbb{R}^{2N_t} \quad t = 1, 2, \dots, N_t \quad (24)$$

$$P_t^{\text{WT}} = \tilde{P}_t^{\text{WT}} + z_t^{\text{WT}+}(\bar{P}_t^{\text{WT}} - \tilde{P}_t^{\text{WT}}) + z_t^{\text{WT}-}(\underline{P}_t^{\text{WT}} - \tilde{P}_t^{\text{WT}}) \quad (25)$$

$$P_t^{\text{PV}} = \tilde{P}_t^{\text{PV}} + z_t^{\text{PV}+}(\bar{P}_t^{\text{PV}} - \tilde{P}_t^{\text{PV}}) + z_t^{\text{PV}-}(\underline{P}_t^{\text{PV}} - \tilde{P}_t^{\text{PV}}) \quad (26)$$

$$z_t^{\text{WT}+} + z_t^{\text{WT}-} \leq 1 \quad (27)$$

$$\sum_{t=1}^{N_t} (z_t^{\text{WT}+} + z_t^{\text{WT}-}) \leq \Gamma_1 \quad (28)$$

$$z_t^{\text{PV}+} + z_t^{\text{PV}-} \leq 1 \quad (29)$$

$$\sum_{t=1}^{N_t} (z_t^{\text{PV}+} + z_t^{\text{PV}-}) \leq \Gamma_2 \quad (30)$$

式中: N_t 为预测时段总数; $\tilde{P}_t^{\text{WT}}$ 、 $\bar{P}_t^{\text{WT}}$ 、 $\underline{P}_t^{\text{WT}}$ 分别为不确定集合中 WT 在 t 时刻的预测出力及上、下限; $\tilde{P}_t^{\text{PV}}$ 、 $\bar{P}_t^{\text{PV}}$ 、 $\underline{P}_t^{\text{PV}}$ 分别为不确定集合中 PV 在 t 时刻的预测出力及上、下限; $z_t^{\text{WT}+}$ 、 $z_t^{\text{WT}-}$ 分别为 t 时刻 WT 出力偏离预测值向上、向下的布尔变量, 取 1 为是, 取 0 为否; $z_t^{\text{PV}+}$ 、 $z_t^{\text{PV}-}$ 分别为 t 时刻 PV 出力偏离预测值向上、向下的布尔变量, 取 1 为是, 取 0 为否; Γ_1 、 Γ_2 为不确定性调节参数。

在不确定集合 Z 的条件下, 将 VPP 双层竞标模型转换为 min-max-min 两阶段鲁棒优化模型以求解出 VPP 最优竞标策略。两阶段鲁棒优化模型可以表示为:

$$\begin{cases} \min_x a^T x + \max_{\xi \in Z} \min_{y \in Q(x, \xi)} (b^T \xi + c^T y) \\ \text{s.t.} \quad Dx = 0 \\ \quad Hx \leq h \\ \quad Ey = 0 \\ \quad Fy \leq f \\ \quad Ax + By + C\xi \leq d \end{cases} \quad (31)$$

式中: x 、 y 为各个阶段的决策变量; ξ 为不确定参数; a 、 b 、 c 为目标函数的系数向量; $Q(x, \xi)$ 为在给定第一阶段决策 x 和不确定参数 ξ 的条件下, 第二阶段变量 y 所满足的可行解集合; h 、 f 、 d 为约束条件的常数向量; A 、 B 、 C 、 D 、 H 、 E 、 F 为约束条件的系数矩阵。

最外层 min 优化模型为阶段 1, 主要优化决策 VPP 在电碳联合市场中的竞标量、竞标价及各资源启停计划。此阶段需要在不确定参数实现之前确定初始竞标策略, 则阶段 1 的变量为:

$$x = (b_t, P_t^{\text{sell}}, P_t^{\text{buy}}, b_t^c, C_{\text{qt}}, \mu_t^{\text{GT}}, \mu_t^{\text{GT, on}}, \mu_t^{\text{GT, off}}, \mu_{k,t}^{\text{ch}}, \mu_{k,t}^{\text{dis}}, \mu_{\text{ESS},t}^{\text{ch}}, \mu_{\text{ESS},t}^{\text{dis}}) \quad (32)$$

式中: $\mu_{\text{ESS},t}^{\text{ch}}$ 、 $\mu_{\text{ESS},t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时刻储能的充、放电状态。

内层 max-min 优化模型为阶段 2, 主要通过 max 层找到最恶劣的风光波动场景, 再通过 min 层对最恶劣场景下 VPP 各资源出力进行优化。内层会对优化结果进行反馈, 最外层则根据反馈结果调整竞标策略, 以确保风光出现波动时, 仍能实现最优的竞标策略。阶段 2 的变量为:

$$y = (P_t^{\text{GT}}, P_{\text{lc},t}, P_{k,t}^{\text{ch}}, P_{k,t}^{\text{dis}}, P_{s,t}^{\text{ch}}, P_{s,t}^{\text{dis}}) \quad (33)$$

4 模型求解

针对上述两阶段鲁棒优化模型, 采用列与约束生成算法将其分解为主问题和子问题进行交替求解^[18]。分解后的模型如下:

$$\begin{cases} \min_{x, \{y_r\}, L} (a^T x + L) \\ \text{s.t.} \quad L \geq c^T y_r + b^T \xi_r^* \quad \forall r = 1, 2, \dots, l \\ \quad Dx = 0 \\ \quad Hx \leq h \\ \quad Ey_r = 0 \\ \quad Fy_r \leq f \\ \quad Ax + By_r + C\xi_r^* \leq d \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} \max_{\xi \in Z} \min_{y \in Q(x^*, \xi)} (b^T \xi + c^T y) \\ \quad Ey = 0 \quad \lambda \\ \quad Fy \leq f \quad \gamma \\ \quad Ax^* + By + C\xi \leq d \quad \pi \end{cases} \quad (35)$$

式中: L 为主问题目标中的最坏情形上界; y_r 为第 r 个最坏情形下的第二阶段应对策略; ξ_r^* 为子问题求得的第 r 个最坏情形下的不确定参数; l 为不确定情形的样本数量; x^* 为子问题中固定的第一阶段决策; λ 、 γ 、 π 为约束条件对应的对偶变量。

子问题求解出的最恶劣场景将作为主问题求解的前提, 主问题优化得到的结果将成为子问题求解最恶劣场景及最优目标值的参考^[18]。采用对偶

理论将其内层 max-min 转换为单层 max 模型进行求解, 如式(36)所示。

$$\begin{cases} \max_{\xi \in Z, \pi, \lambda, \gamma} (b^T \xi + (d - Ax^* - C\xi)^T \pi + f^T \gamma) \\ \text{s.t. } F^T \gamma + E^T \lambda + B^T \pi \leq c \\ \gamma \geq 0 \\ \pi \geq 0 \end{cases} \quad (36)$$

单层 max 模型中由于 $\xi^T C^T \pi$ 为非线性, 使得单层问题求解困难, 故采用 Big-M 法对其线性化处理后进行求解。

5 算例分析

5.1 算例数据

文中采用 2 个常规机组与 1 个 VPP 参与市场运行, 在 IEEE 33 节点系统中验证所提策略的有效性。常规机组 G1、G2 的容量分别为 250、200 MW。GT 参数见文献[26]。风光及柔性负荷预测值如图 3 所示, 同时考虑 WT 与 PV 出力的不确定性, 将其预测误差设为 20% 以构造不确定集合。储能的容量为 30 MW·h, 为防止储能的过度使用, 其充、放电上限为自身容量的 95%, 下限为自身容量的 15%, 充电和放电功率分别为容量的 30% 与 40%, 充、放电的效率为 90%。

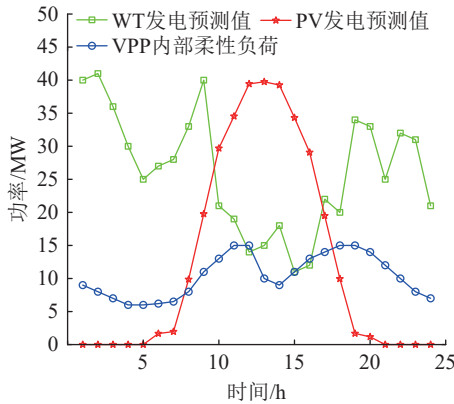


图 3 风光、柔性负荷预测值

Fig.3 Forecasted values of wind, solar and flexible loads

5.2 仿真结果分析

为验证所提竞价策略的优越性, 设定如下场景。

场景 1: 各市场参与者仅考虑参与电力市场。

场景 2: 各市场参与者同时参与电力市场与碳交易市场。

5.2.1 各场景下市场出清结果分析

各市场参与者在场景 1 与场景 2 下的出清结果分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知, 当各市场参与者只考虑参与电力市场时, 常规机组 G1 和 G2 的

中标量占主导, VPP 的中标量较少。这是因为 VPP 由分布式能源聚合而成, 体量较小, 报价相对于常规机组 G1 与 G2 较高, 故 VPP 在只考虑参与电力市场时, 优势并不明显。对比分析场景 1 和场景 2 下的出清结果, 当电力市场与碳交易市场联合运行时, 常规机组的中标量相对减少, VPP 的中标量相对增加。这是因为常规机组为高碳机组, 碳市场的引入将碳成本传导至发电侧, 从而增加常规机组的发电成本, 提高其在市场上的报价, 故市场出清时常规机组的中标量减少。而 VPP 内聚合大量分布式清洁能源, 其投标电价与投标量更具竞争力。图 6 给出了市场运营商接收到各市场参与者的投标策略后的出清电价。文中引用节点电价, 并采用电力市场平衡约束的对偶乘子。电力市场包含 33 个节点, 其节点电价呈白天高、夜晚低的趋势, 与负荷趋势相同。

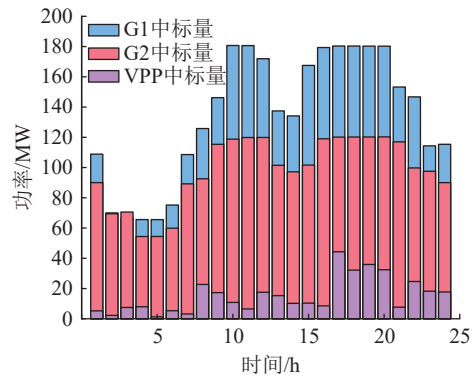


图 4 电力市场下出清量

Fig.4 Clearing quantity in the electricity market

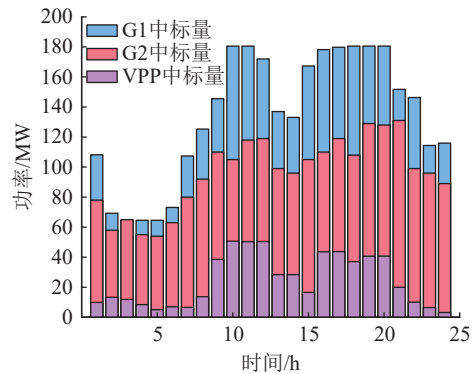


图 5 电碳联合市场下出清量

Fig.5 Clearing quantity in the electricity-carbon joint market

5.2.2 各场景下 VPP 收益分析

VPP 运营商各场景收益如表 1 所示。

对比表 1 中的场景 1 和场景 2 可以看出, 由于场景 2 考虑 VPP 参与电碳联合市场, 且 VPP 因聚合了大量分布式清洁能源而具备较好的低碳特性,

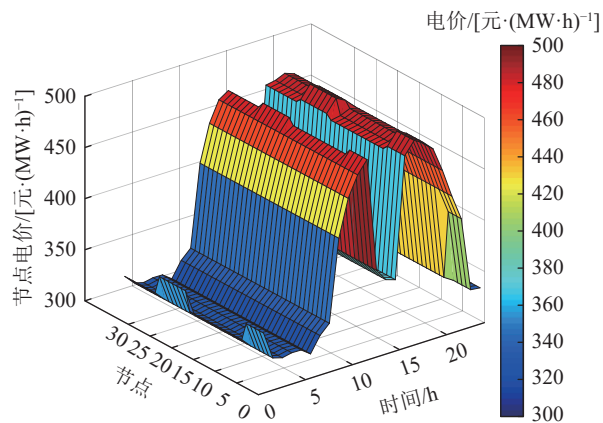


图 6 市场出清电价

Fig.6 Market clearing price

表 1 VPP 运营商各场景收益

Table 1 Revenue of VPP operator in different scenarios

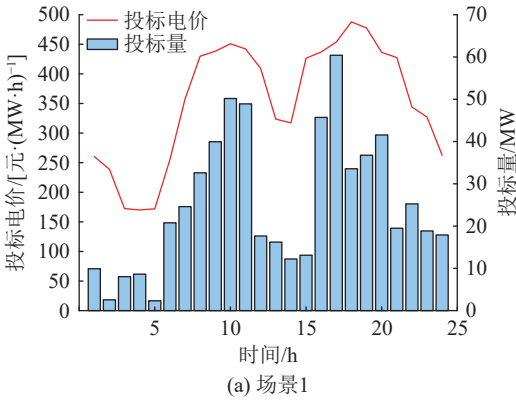
场景	电力市场 收益/元	碳交易 收益/元	VPP总 收益/元	碳排放/t
场景1	164 895	0	164 895	593
场景2	189 614	14 626	204 240	440

因此可将盈余碳配额分配给内部需要购买碳配额的机组或在碳交易市场中出售,从而节省部分购碳成本或获得售碳收益。相较于场景 1,场景 2 的 VPP 总收益增加 39 345 元,说明 VPP 参与电碳联合市场的竞价策略能更好地分配自身资源,从而获得更高的收益。对比场景 2 与场景 1 的碳排放可知,场景 2 的碳排放减少 153 t。这主要是因为引入碳交易市场后,VPP 内具有高碳特性的 GT 需要支付高额的碳交易权购买成本,导致其内部资源出力顺序改变,从而实现减碳的效果。从表 1 可以看出,电碳联合市场下的竞价策略可以有效提升 VPP 的收益,减少碳排量,提高 VPP 在含多主体市场中的竞争力。

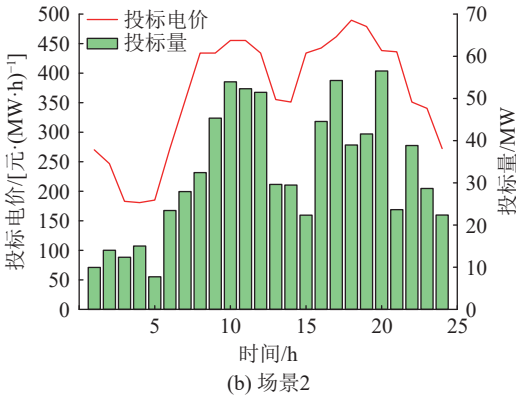
5.2.3 各场景下 VPP 投标策略分析

图 7 给出了 VPP 在场景 1 与场景 2 中最优投标策略。市场参与者在碳交易市场的交易量见图 8。

场景 1 与场景 2 中 VPP 的投标电价均与供需关系成正相关。市场出清电价较高时,VPP 为获得更多收益,将提高其在电力市场中的报价。而 VPP 的投标量主要会受到电价、风光出力以及碳交易市场中供需关系的影响,如 13 时—15 时,场景 1 与场景 2 中电价均较低,但此时的风光发电量较多,使 VPP 电能与碳配额有盈余。由图 8 可知,在碳交易市场中常规机组 G1 和 G2 需要购买一定数量的碳配额,而场景 2 中因考虑参与碳交易市场,



(a) 场景1



(b) 场景2

图 7 VPP 运营商投标策略

Fig.7 Bidding strategy of VPP operators

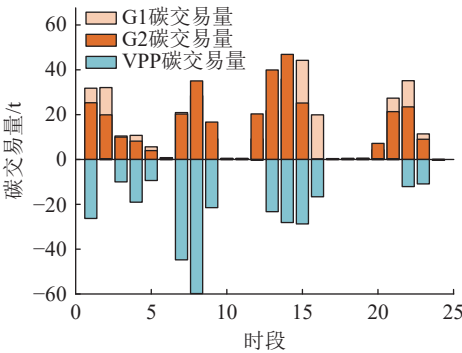


图 8 市场参与者在碳交易市场的交易量

Fig.8 Trading volume of market participants in the carbon trading market

VPP 可以在碳交易市场中出售碳配额获得收益,故在场景 2 中 VPP 的投标量大于场景 1。同时在夜晚电价较低时段,VPP 会选择购电满足其内部负荷需求,以减少发电成本。

5.2.4 VPP 内部资源优化分析

图 9 给出了电碳联合市场下 VPP 获得出清量后内部各分布式资源的出力情况。

为获取更多收益,VPP 会根据价格信号安排内部各分布式资源出力,具体分析如下。

由图 9 可知,储能与 EV 运行基础策略大致相同,在负荷电价较低时段(时段 1—时段 7),储能与 EV 充电;在负荷电价较高时段(时段 10—时段 12、

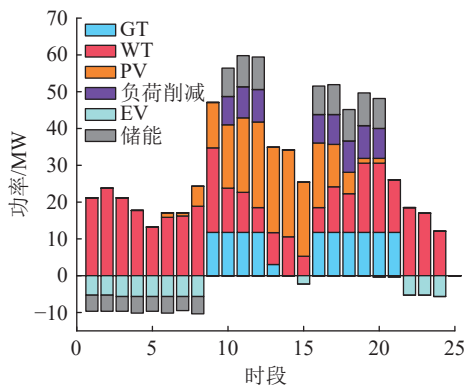


图9 场景2下VPP内部资源优化结果
Fig.9 Optimization results of internal resources within the VPP under scenario 2

时段16—时段20), 储能放电。EV与储能在低电价时充电以降低购电成本, 而储能可以在高电价时放电, 利用电价差提高VPP收益。随着碳交易市场的引入, 由于GT具有高碳特性, 在电价较低的时段, 售电收益不足以覆盖碳成本, 具有亏损的风险, 故GT低发甚至是停发, 只在电价较高的时段高发甚至是满发。风光机组因低碳特性, 在发电时并不会消耗碳配额, 且节省下的碳配额还能传递给VPP内部的GT或参与碳交易市场获得收益, 因此在电碳联合市场下VPP内的风光机组总被优先安排出力。

5.2.5 VPP鲁棒优化分析

通过调整鲁棒系数 γ 的值, 能够得到具有不同鲁棒性的VPP竞标策略, 而 γ 代表决策方案抵御风险的能力。 γ 在决定VPP竞标策略时起至关重要的作用, 可以帮助决策者了解不同 γ 对竞标策略的影响, 并根据其风险偏好和收入目标制定更合理的竞标策略。表2列出了不同 γ 下VPP的运行成本、风险成本及收益的变化情况。

表2 不同 γ 下的优化结果对比
Table 2 Comparison of optimization results under different γ 单位: 元

γ	两阶段鲁棒			静态鲁棒		
	风险成本	运行成本	总收益	风险成本	运行成本	总收益
0.1	15 879	21 544	213 580	15 934	21 626	212 524
0.2	14 203	26 531	226 453	14 297	26 767	224 420
0.3	10 322	31 225	253 145	10 456	31 683	248 881
0.4	9 854	32 240	245 132	10 114	33 035	239 569
0.5	8 423	33 973	219 560	8 806	35 219	209 569

由表2可知, 随着 γ 的增大, 风光出力波动区间变大, 此时由风光出力波动带来的风险成本呈下降趋势, 即VPP为避免风险选择更具鲁棒性的竞标策略, 以应对更加恶劣的风光波动场景; 而运行成本

呈上升趋势, 这是因为 γ 增大使VPP的鲁棒性提升, 故需要加大VPP内部可控资源出力并预留部分备用以应对风光出力不确定性, 从而增加了VPP的运行成本, 降低了竞标策略的经济性。VPP的总收益随着 γ 的增大呈先增大再减小的趋势, 当 γ 取0.3时, VPP的总收益最大。同时对比分析两阶段鲁棒和静态鲁棒两种方法处理不确定性, 可以看出, 两阶段鲁棒的风险成本与运行成本更小, 总收益更大。因此, 考虑两阶段鲁棒模型处理风光出力的不确定性可以使VPP的竞标策略具有更强的应对风光出力不确定的能力, 还可以使VPP的总收益达到最优, 此时竞标策略兼顾了鲁棒性与经济性。

6 结论

文中提出了一种VPP参与电碳联合市场的双层竞标模型, 用于确定在联合市场下作为价格制定者的VPP的竞标策略, 得出的结论如下:

- (1) 相较于单独参与电力市场, 聚合众多分布式资源的VPP在电碳联合市场下可以获得更多收益。
- (2) VPP以价格制定者的身份参与电碳联合市场, 将市场出清层纳入竞标策略, 能兼顾VPP的收益和市场社会福利与运行效率。
- (3) VPP中风光出力预测的不确定性会对预期收益产生影响, 适当调整鲁棒参数可以引导决策者在考虑不确定性带来的风险的情况下, 制定电力和碳交易市场的竞标策略, 从而使VPP在较为极端的风光出力不确定性场景下仍具备获取可观收益的能力, 兼顾竞标策略的鲁棒性和经济性。

所提模型为电碳联合市场下VPP的竞标策略提供了思路。在后续研究中, 将进一步考虑多VPP参与市场时的出价不确定性以及VPP在获得出清结果后内部各资源的收益分配问题。

参考文献:

[1] 于东民, 王晓鹏, 孙钦斐, 等. 基于VPP碳流计算的多目标多时间尺度优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 30-38.
YU Dongmin, WANG Xiaopeng, SUN Qinfei, et al. Multi-objective multi-timescale optimal scheduling based on VPP carbon flow calculation[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 30-38.
[2] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683, 1904.
ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, et al. Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683, 1904.

- [3] 彭道刚, 税纪钧, 王丹豪, 等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 602-615.
PENG Daogang, SHUI Jijun, WANG Danhao, et al. Review of virtual power plant under the background of "dual carbon"[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 602-615.
- [4] 仪忠凯, 许银亮, 吴文传. 考虑虚拟电厂多类电力产品的配电侧市场出清策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 143-151.
YI Zhongkai, XU Yinliang, WU Wenchuan. Market clearing strategy for distribution system considering multiple power commodities offered by virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 143-151.
- [5] 宋梦, 经昕怡, 蔡昉峰, 等. 基于产消者能量-备用联合共享的虚拟电厂优化运营方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(18): 3-13.
SONG Meng, JING Xinyi, CAI Yunfeng, et al. Optimal operation method for virtual power plant based on joint sharing of energy and reserve of prosumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 3-13.
- [6] 许星原, 陈皓勇, 黄宇翔, 等. 虚拟电厂市场化交易中的挑战、策略与关键技术[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 745-757.
XU Xingyuan, CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, et al. Challenges, strategies and key technologies for virtual power plants in market trading[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 745-757.
- [7] 陶伟健, 艾芊, 李晓露. 虚拟电厂协同调度及市场交易的研究现状及展望[J]. 南方电网技术, 2024, 18(12): 62-76.
TAO Weijian, AI Qian, LI Xiaolu. Research status and prospects of collaborative scheduling and market trading of virtual power plants[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(12): 62-76.
- [8] 王健, 郑峻峰, 黄际元, 等. 虚拟电厂关键技术综述与发展展望[J]. 供用电, 2023, 40(12): 43-54,86.
WANG Jian, ZHENG Junfeng, HUANG Jiyuan, et al. Key technology and development prospects of virtual power plants[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 43-54,86.
- [9] 张楠. 中国碳排放权交易市场运行状况及其效率分析: 基于碳交易价格的测算[J]. 工业技术经济, 2023, 42(4): 100-107.
ZHANG Nan. Analysis on the operation status and efficiency of China's carbon emission trading market: based on the calculation of carbon trading price[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2023, 42(4): 100-107.
- [10] 王一, 吴洁璇, 王浩浩, 等. 碳排放权市场与中长期电力市场交互作用影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(10): 44-54.
WANG Yi, WU Jiexuan, WANG Haohao, et al. Analysis of interactions between carbon emission trading market and medium-and long-term electricity market[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(10): 44-54.
- [11] 彭纪权, 金晨曦, 陈学通, 等. 我国电力市场与全国碳排放权交易市场交互机制研究[J]. 中国能源, 2020, 42(9): 20-24, 47.
PENG Jiquan, JIN Chenxi, CHEN Xuetong, et al. Research on interaction mechanism between electricity market and national carbon market of China[J]. Energy of China, 2020, 42(9): 20-24,47.
- [12] 刘亚鑫, 蔺红, 马越, 等. 考虑分时碳价的虚拟电厂分布鲁棒竞标方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(8): 12-19.
LIU Yaxin, LIN Hong, MA Yue, et al. Distributionally robust bidding method for virtual power plant considering time-of-use carbon price[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(8): 12-19.
- [13] 张钧钊, 姜欣, 段世杰, 等. 虚拟电厂参与电-碳联合市场运行的竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 108-118.
ZHANG Junzhao, JIANG Xin, DUAN Shijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant to participate in the power-carbon joint market[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 108-118.
- [14] 沈思辰, 韩海腾, 周亦洲, 等. 基于条件风险价值的多虚拟电厂电-碳-备用 P2P 交易模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 147-157.
SHEN Sichen, HAN Haiteng, ZHOU Yizhou, et al. Electricity-carbon-reserve peer-to-peer trading model for multiple virtual power plants based on conditional value-at-risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 147-157.
- [15] 贾德香, 柳占杰, 高骞, 等. 计及碳—电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 89-97.
JIA Dexiang, LIU Zhanjie, GAO Qian, et al. Bidding strategy of the virtual power plant based on the consideration of carbon-electricity integration trading in auxiliary service market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 89-97.
- [16] 宋大为, 尹硕, 何洋, 等. 基于虚拟电厂的多元小微主体参与现货市场的竞价策略[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 75-84.
SONG Dawei, YIN Shuo, HE Yang, et al. Bidding strategy of multiple small and micro entities participating in the spot market based on virtual power plant[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 75-84.
- [17] HU J K, JIANG C W, LIU Y Y. Short-term bidding strategy for a price-maker virtual power plant based on interval optimization[J]. Energies, 2019, 12(19): 3662.
- [18] 周博, 吕林, 高红均, 等. 多虚拟电厂日前鲁棒交易策略研究[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2694-2703.
ZHOU Bo, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Robust day-ahead trading strategy for multiple virtual power plants[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2694-2703.
- [19] AGHDAM F H, JAVADI M S, CATALÃO J P S. Optimal stochastic operation of technical virtual power plants in reconfigurable distribution networks considering contingencies[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,

- 2023, 147: 108799.
- [20] 王俊, 徐箭, 王晶晶, 等. 基于条件风险价值的虚拟电厂参与能量及备用市场的双层随机优化[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2502-2510.
- WANG Jun, XU Jian, WANG Jingjing, et al. Bi-level stochastic optimization for a virtual power plant participating in energy and reserve market based on conditional value at risk[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2502-2510.
- [21] 周亦洲, 吴俊钊, 孙国强, 等. 面向多级电-碳耦合市场的虚拟电厂两阶段鲁棒交易策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(18): 38-46.
- ZHOU Yizhou, WU Junzhao, SUN Guoqiang, et al. Two-stage robust trading strategy for virtual power plant in multi-level electricity-carbon coupling market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 38-46.
- [22] 刘一欣, 郭力, 王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4013-4022, 4307.
- [23] 李欣, 陈英彰, 李涵文, 等. 考虑碳交易的电-热综合能源系统两阶段鲁棒优化低碳经济调度[J]. 电力建设, 2024, 45(6): 58-69.
- LI Xin, CHEN Yingzhang, LI Hanwen, et al. Two-stage robust optimization of low-carbon economic dispatch for electricity-thermal integrated energy system considering carbon trade[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 58-69.
- [24] 邱彬, 杨瑞雪, 王凯, 等. 考虑源-荷灵活协调响应的综合能源系统两阶段鲁棒优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2025, 37(1): 43-53, 63.
- QIU Bin, YANG Ruixue, WANG Kai, et al. Two-stage robust optimization of integrated energy system considering flexible source-load coordinated response[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(1): 43-53, 63.
- [25] 朱光远, 林济铿, 罗治强, 等. 鲁棒优化在电力系统发电计划中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5881-5892.
- ZHU Guangyuan, LIN Jikeng, LUO Zhiqiang, et al. Review of robust optimization for generation scheduling in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5881-5892.
- [26] 韩帅, 吴宛璐, 郭小璇, 等. 含多类型资源虚拟电厂鲁棒竞标模型研究[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 20-29.
- HAN Shuai, WU Wanlu, GUO Xiaoxuan, et al. Research on robust bidding model of virtual power plant with multi-type resources[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 20-29.

作者简介:



赵双池

赵双池(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为虚拟电厂、电碳市场 (E-mail: 2232477431@qq.com);

蔺红(1969), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定运行控制及新能源并网发电技术、源荷协调及电力经济;

王海云(1973), 女, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源发电并网技术。

Bidding strategies for virtual power plants under the electricity-carbon joint market taking into account wind and solar uncertainties

ZHAO Shuangchi, LIN Hong, WANG Haiyun

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: As China's electricity and carbon markets undergo coordinated reforms, the growing integration of distributed resources within virtual power plants (VPPs) is shifting their role in market participation. To explore bidding strategies that balance economic efficiency and carbon reduction under the electricity-carbon joint market, this paper models VPPs as price makers and proposes a bi-level bidding framework considering wind and solar uncertainty. The upper level maximizes the VPP's profit, while the lower level maximizes social welfare in the joint market. To handle renewable generation uncertainty, robust optimization is employed to transform the bi-level model into a two-stage robust problem. The model is then solved as a mixed-integer linear program using the column-and-constraint generation algorithm, strong duality and the Big-M method. Case studies confirm the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

Keywords: virtual power plant (VPP); price maker; electricity-carbon market; bidding strategy; uncertainty; two-stage robust optimization

(编辑 陆海霞)