

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.018

含风电和电动汽车的 VPP 现货市场投标鲁棒优化模型

宋艺航¹, 王秀丽², 匡熠², 王刚¹, 朱宗耀², 陈先龙²

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510080;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:当风力发电商(WPG)和电动汽车(EV)聚合商组成的虚拟电厂(VPP)参与市场投标时,风电出力的不确定性、预测出力偏差以及市场价格的波动性,都是VPP在参与市场投标时需要考虑的因素。在计及上述因素的影响下,文中研究了由WPG和EV聚合商组成的VPP在日前市场和实时市场的联合竞价模型:假定VPP是价格的接受者,综合考虑日前和实时价格的不确定性,在日前市场中根据风电出力和市场价格的预测结果进行日前竞价,然后在实时市场上参与实时竞价。VPP不但可以通过EV充放电平抑WPG投标偏差,还可以根据价格信号进行充放电投标,实现削峰填谷。通过引入偏差考核机制,在日前和实时市场结束后进行统一结算。基于合作博弈理论,利用Shapley值法将总收益在WPG和EV之间根据各自的贡献进行合理分配。最后,通过算例验证了模型的可行性和有效性,结果表明VPP参与日前和实时市场可以增加收益,降低出力和价格不确定性带来的风险,为新能源参与现货市场的建设提供参考。

关键词:实时市场;风力发电商(WPG);电动汽车聚合商;虚拟电厂(VPP);鲁棒优化模型

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)03-0120-08

0 引言

随着我国电力市场改革的逐步推进,现货市场成为电力市场的重要组成部分^[1],而日前市场和实时市场是目前现货市场的主要构成形式,是影响电力商品价格和维持市场电力电量平衡的关键,在新一轮电力市场改革中起着深远意义。

风电作为一种清洁能源,具有来源广、可再生、无污染的特性,已发展成为我国新型能源结构的重要组成部分。随着我国电力市场改革的不断深入和市场的逐步开放,建立健全电力市场机制,利用市场化手段促进新能源消纳是目前普遍关注的问题^[2]。随着风电的大规模发展,其在电力市场中产生的影响越来越大。由于风电固有的不确定性和波动性,不仅给电力系统的安全与经济运行带来了挑战^[3],而且实际出力与投标出力的偏差给风力发电商(wind power generation, WPG)参与市场竞价增加了难度。通过WPG和电动汽车(electric vehicles, EV)聚合商联合运行组成虚拟电厂(virtual power plants, VPP)^[4]参与日前市场和实时市场竞价^[5],有利于缓解风力发电的不确定性对WPG参与市场竞价的影响,减少出力偏差引起的惩罚,增加发电商的总收益,为WPG参与电力市场提供了一种新的路径。

目前,关于WPG与EV联营的研究已经比较广泛。文献[6]提出了一种多VPP参与日前市场的交易策略。文献[7]基于需求响应,提出了包含风电机组、光伏机组、燃气轮机、EV和负荷的VPP同时参与双边合同市场、日前市场、实时市场和平衡市场的竞价模型,但是未考虑新能源出力的不确定性和VPP各组成部分的利润分配问题。文献[8]研究了含风电和EV的VPP与传统发电商一起参与电力市场的博弈模型,但是只考虑了日前市场,没有考虑实时市场对VPP竞价的影响。文献[9]提出了考虑计及需求侧响应的包含分布式可再生能源发电、分布式热电机组和储能电池的VPP参与日前能量市场、日内需求响应市场和实时能量市场的多阶段竞价策略,为风电和EV联营的VPP参与市场竞价提供了参考。文献[10]提出了一种考虑新能源出力不确定性的模糊优化方法。文献[11]考虑了需求响应不确定性,建立了基于激励和基于价格的需求响应VPP模型。文献[12]建立了考虑WPG和需求侧响应聚合商联营参与电力市场的多时段随机均衡模型。

目前对WPG和EV组成的VPP参与市场竞价的研究主要基于日前市场,很少考虑实时市场上由于风电出力和实时价格的不确定性对市场主体参与竞价产生的影响。文中基于已有的研究,综合考虑风电出力的不确定性、市场价格的波动性,提出同时参与日前市场和实时市场的VPP竞价模型,该模型下VPP进行两阶段竞价:第一阶段根据预测价

收稿日期:2019-11-19;修回日期:2019-12-22

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM-20170075)

格、风电出力及 EV 备用容量在日前市场分时段竞价,日前市场预测价格较低时段可作为买方投标购入电量对 EV 进行充电,在预测价格较高时段作为卖方投标卖出电量,EV 进行放电获利;第二阶段在实时市场根据最新的价格信息、风电实时出力和 EV 备用状态进行实时市场竞价,对日前投标偏差进行修正和二次购电套利,通过实时调用 EV 进行充放电以降低由不确定因素带来的风险,追求 VPP 的利润最大化,并充分考虑市场价格的不确定性,通过鲁棒方法^[13]将两阶段竞价模型转化为线性鲁棒模型进行求解。根据合作博弈^[14-15]理论,采用 Shapley 值法^[16]对 VPP 各主体进行合理利润分配。

1 VPP 竞价基本原理

随着我国现货市场的建立,吸引更多市场主体参与竞争。WPG 作为新兴市场主体,由于风电出力的不确定性,在完全的市场竞争中不具有优势。同时,随着 EV 的普及,EV 的储能电池有着巨大的可利用空间。因此,可考虑将 WPG 和 EV 聚合成 VPP 运营商在日前和实时市场进行联合竞价,如图 1 所示。

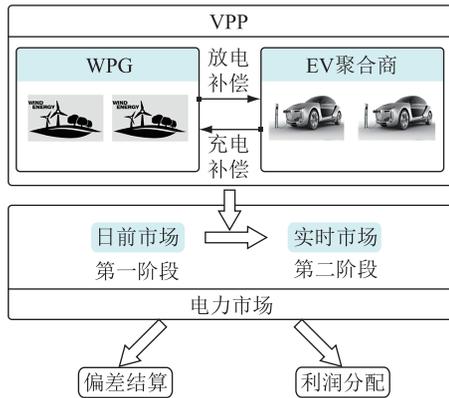


图 1 VPP 参与日前和实时市场

Fig.1 VPP participating in the day-ahead and real-time market

首先在日前市场根据风电出力及 EV 各时段的电池使用预测信息,VPP 制定日前竞价策略,以 1 h 为单位分时段进行投标,对于价格较高时段,VPP 增加投标量,将 EV 的可用存储电量作为发电量投标;而对于价格较低时段,VPP 减少投标量,风电超发的电量存储到 EV 中。在实时市场上,VPP 可获得最新的价格信息和风电实时出力信息,根据这些信息对日前市场的竞价策略进行调整得到最新竞价策略,参与实时市场竞价。通过在实时市场中的调整只能在一定程度上弥补出力偏差,因此还需要将风电实时多发的电量存储到 EV,短缺的电量通过

EV 放电进行补充。在实时市场结束后统一进行偏差结算和 VPP 内部各主体的利润分配。通过聚合成 VPP 参与市场报价,不但可以降低 WPG 由于出力预测误差而导致的偏差惩罚,还可以有效利用 EV 的储能资源,为其带来额外收益。

2 VPP 竞价理论模型

2.1 VPP 参与日前市场竞价

风电和 EV 聚合商组成的 VPP 在日前市场竞价时,需要通过风电预测模型^[17]获得未来 24 h 的风电出力信息,并结合历史数据计算出未来 24 个时段内的 EV 可调用容量。VPP 根据以上信息在日前市场进行分时段竞价,提交第 t 时段的投标出力 $Q_{VPP,t}^{DA}$,以 1 h 为一个时段的长度, λ_t^{DA} 为日前市场的价格,VPP 在日前市场的竞价投标获得的收益 F^{DA} 为:

$$F^{DA} = \sum_t \lambda_t^{DA} Q_{VPP,t}^{DA} \quad (1)$$

由 WPG 和 EV 聚合商组成的 VPP 参与市场竞价时,EV 可作为灵活储能装置通过充放电对风电出力进行补偿,平抑由风力波动造成的投标偏差^[18-20]。同时可根据市场价格和负荷状态参与市场竞价,在满足 EV 行驶需求的前提下,在用电低谷期价格较低时进行充电功率投标,在用电高峰期价格较高时进行放电功率投标,在削峰填谷的同时可以通过价差获得额外利润。EV 聚合商在日前市场第 t 个时段的投标可表示为:

$$Q_{EV,t}^{DA} = P_{out,t}^{DA} u_{out,t}^{DA} - P_{in,t}^{DA} u_{in,t}^{DA} - L_t \quad (2)$$

式中: $P_{in,t}^{DA}$, $P_{out,t}^{DA}$ 分别为 EV 在日前市场的充、放电投标功率; L_t 为第 t 个时段的 EV 行驶需求; $u_{in,t}^{DA}$, $u_{out,t}^{DA}$ 为控制变量,当 EV 聚合商进行充电投标时, $u_{in,t}^{DA}$ 取值为 1,进行放电投标时, $u_{out,t}^{DA}$ 取值为 1。 $u_{in,t}^{DA}$, $u_{out,t}^{DA}$ 满足如下关系:

$$u_{in,t}^{DA} + u_{out,t}^{DA} \leq 1 \quad (3)$$

因此,VPP 在日前市场的投标出力包括了 WPG 根据风电出力预测结果进行的投标出力和 EV 的投标出力,VPP 在日前市场第 t 个时段的总投标出力可表示为:

$$Q_{VPP,t}^{DA} = Q_{WG,t}^{DA} + Q_{EV,t}^{DA} \quad (4)$$

式中: $Q_{WG,t}^{DA}$ 为 WPG 在日前市场第 t 个时段的投标出力。

2.2 VPP 参与实时市场竞价

VPP 在日前市场完成对次日 24 个时段的投标竞价后参与实时市场。VPP 根据实时市场的价格预测信息,调整 EV 的充放电计划,形成实时竞价策

略,在实时市场上进行竞价以弥补风电出力偏差并实现进行削峰填谷。由于实时市场的投标限制和可调用EV的容量限制,VPP不可能完全弥补风电出力偏差,实时市场结束后,还需对偏差进行结算。因此,VPP在实时市场的竞价模型中可以表示为:

$$F^{RT} = \sum_{t=1}^{24} \lambda_t^{RT} Q_{VPP,t}^{RT} \quad (5)$$

式中: F^{RT} 为VPP在实时市场获得的收益; λ_t^{RT} 为第 t 个时段实时市场的电价; $Q_{VPP,t}^{RT}$ 为VPP在实时市场第 t 个时段等效投标容量。 $Q_{VPP,t}^{RT}$ 可表示为:

$$Q_{VPP,t}^{RT} = P_{out,t}^{RT} u_{out,t}^{RT} - P_{in,t}^{RT} u_{in,t}^{RT} - w_t^+ P_t^+ u_t^+ - w_t^- P_t^- u_t^- \quad (6)$$

式中: P_t^+, P_t^- 分别为VPP在第 t 个时段投标的正、负偏差; w_t^+, w_t^- 分别为第 t 个时段的正、负偏差惩罚系数; u_t^+, u_t^- 分别为正、负偏差的控制变量,取值为0或1; $P_{in,t}^{RT}, P_{out,t}^{RT}$ 分别为EV聚合商第 t 个时段参与实时市场的投标充、放电功率; $u_{in,t}^{RT}, u_{out,t}^{RT}$ 分别为充、放电投标功率的控制变量,取值为0或1。变量满足:

$$u_t^+ + u_t^- \leq 1 \quad (7)$$

$$u_{in,t}^{RT} + u_{out,t}^{RT} \leq 1 \quad (8)$$

2.3 VPP 日前和实时市场联合竞价模型

考虑EV的电池在充放电过程中会产生损耗成本,可表示为:

$$C_{bat,t} = c(P_{out,t}^{DA} + P_{out,t}^{RT} + P_{out,t}^{COM} + P_{in,t}^{DA} + P_{in,t}^{RT} + P_{in,t}^{COM}) \quad (9)$$

式中: $C_{bat,t}$ 为电池在第 t 个时段进行充放电产生的损耗成本; c 为充放电成本系数; $P_{out,t}^{COM}$ 为风电出力不足时EV补偿风电的出力; $P_{in,t}^{COM}$ 为风电出力过剩时存储到EV的电力。因此,VPP参与日前和实时市场获得的总利润为:

$$F = F^{DA} + F^{RT} - C_{bat} \quad (10)$$

VPP日前和实时市场联合竞价模型的目标函数为:

$$\begin{aligned} \max \sum_{t=1}^{24} [& \lambda_t^{DA} (Q_{WG,t} + P_{out,t}^{DA} u_{out,t}^{DA} - P_{in,t}^{DA} u_{in,t}^{DA} - L_t) + \\ & \lambda_t^{RT} (P_{out,t}^{RT} u_{out,t}^{RT} - P_{in,t}^{RT} u_{in,t}^{RT} - P_t^- w_t^- u_t^- - P_t^+ w_t^+ u_t^+) - \\ & c(P_{out,t}^{DA} + P_{out,t}^{RT} + P_{out,t}^{COM} + P_{in,t}^{DA} + P_{in,t}^{RT} + P_{in,t}^{COM})] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)表示WPG和EV聚合商组成的VPP在日前和实时两阶段竞价后利润的最大化。

竞价模型的约束条件为:

$$\begin{cases} Q_{VPP,t}^{DA} = Q_{WG,t} + P_{out,t}^{DA} u_{out,t}^{DA} - P_{in,t}^{DA} u_{in,t}^{DA} - L_t \\ Q_{VPP,t}^{RT} = P_t^+ u_t^+ + P_t^- u_t^- + P_{out,t}^{RT} u_{out,t}^{RT} - P_{in,t}^{RT} u_{in,t}^{RT} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_t^+ = P_t - Q_{WG,t} - P_{in,t}^{COM} u_{in,t}^{COM} + P_{out,t}^{COM} u_{out,t}^{COM} \\ P_t^- = Q_{WG,t} - P_t + P_{in,t}^{COM} u_{in,t}^{COM} - P_{out,t}^{COM} u_{out,t}^{COM} \end{cases} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{in,t}^{DA} + P_{in,t}^{RT} + P_{in,t}^{COM} \leq \bar{P}_{in} \quad (14)$$

$$0 \leq P_{out,t}^{DA} + P_{out,t}^{RT} + P_{out,t}^{COM} \leq \bar{P}_{out} \quad (15)$$

$$\begin{cases} Q_{WG,t} \leq z_{\alpha}^- \bar{\sigma}_{WG,t} + \bar{\mu}_{WG,t} \\ Q_{WG,t} \geq z_{1-\alpha}^- \bar{\sigma}_{WG,t} + \underline{\mu}_{WG,t} \end{cases} \quad (16)$$

$$Q_{VPP,t} \leq \bar{Q}_{VPP,t} \quad (17)$$

$$E_{t+1} = E_t - \frac{(P_{out,t}^{DA} + P_{out,t}^{RT} + P_{out,t}^{COM})}{\eta_{dis}} \Delta t + \eta_{ch} (P_{in,t}^{DA} + P_{in,t}^{RT} + P_{in,t}^{COM}) \Delta t \quad (18)$$

$$L_t \leq E_t \leq \bar{S}_{bat} \quad (19)$$

$$\begin{cases} u_{in,t}^{DA} + u_{out,t}^{DA} \leq 1 \\ u_{in,t}^{RT} + u_{out,t}^{RT} \leq 1 \\ u_t^+ + u_t^- \leq 1 \\ u_{in,t}^{COM} + u_{out,t}^{COM} \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

$$Q_{WG,t}, L_t, P_{out,t}^{DA}, P_{in,t}^{DA}, P_{out,t}^{RT}, P_{in,t}^{RT}, P_{out,t}^{COM}, P_{in,t}^{COM}, P_t^+, P_t^- \geq 0 \quad (21)$$

式(12)为VPP的日前和实时市场投标约束;式(13)为与VPP投标偏差相关的约束,描述了VPP投标的正负偏差;式(14)为EV聚合商充电功率约束,表示在第 t 个时段EV聚合商的日前市场充电投标功率、实时市场充电投标充电功率和风电补偿给EV的充电功率之和为正,并且不超过电池1h内充电功率的上限 \bar{P}_{in} ;式(15)为EV放电功率约束,同样需要满足放电功率的上下限要求;式(16)为风机出力的上下限约束,服从正态分布的随机变量, $\bar{\mu}_{WG,t}, \bar{\sigma}_{WG,t}^2$ 分别为 $\bar{Q}_{WG,t}$ 的期望值、方差, $\underline{\mu}_{WG,t}, \underline{\sigma}_{WG,t}^2$ 分别为 $\underline{Q}_{WG,t}$ 的期望值、方差, z_{α}^- 为标准正态分布的上 α 分位点;式(17)为VPP日前市场投标不能超过其上限;式(18)为第 t 个时段电池的电量约束,等于第 $t-1$ 个时段充放电之后的剩余电量, η_{ch}, η_{dis} 分别为EV储能电池的充、放电效率;式(19)为第 t 个时段的电量在满足EV行驶需求的同时不能超过电池的最大容量, L_t 为第 t 个时段EV的行驶需求, \bar{S}_{bat} 为EV聚合商所有EV的最大电池容量;式(20)为相关控制变量的取值关系;式(21)保证了决策变量的非负性。

3 VPP 竞价鲁棒优化模型求解

3.1 价格不确定性鲁棒优化模型

日前和实时市场的价格对竞价策略有着重要影响,因此日前市场和实时市场价格的不确定性是

制定竞价策略时必须考虑的因素^[21-23]。文中通过鲁棒优化方法综合考虑日前和实时市场的价格不确定性,可将第2节中的VPP日前和实时联合竞价模型转变为鲁棒线性规划模型,目标函数和约束条件分别如式(22)、式(23)所示。

$$\begin{aligned} \min \{ & (\Gamma^{\text{DA}} V^{\text{DA}} + \Gamma^{\text{RT}} V^{\text{RT}}) + \sum_{t=1}^{24} (\eta_t^{\text{DA}} + \eta_t^{\text{RT}}) - \\ & \sum_{t=1}^{24} \left[\frac{1}{2} (\bar{\lambda}_t^{\text{DA}} + \underline{\lambda}_t^{\text{DA}}) (Q_{\text{WG},t} + P_{\text{out},t}^{\text{DA}} u_{\text{out},t}^{\text{DA}} - \right. \\ & \left. P_{\text{in},t}^{\text{DA}} u_{\text{in},t}^{\text{DA}} - L_t) + \frac{1}{2} (\bar{\lambda}_t^{\text{RT}} + \underline{\lambda}_t^{\text{RT}}) \times \right. \\ & \left. (P_{\text{out},t}^{\text{RT}} u_{\text{out},t}^{\text{RT}} - P_{\text{in},t}^{\text{RT}} u_{\text{in},t}^{\text{RT}} - P_t^- w^- u_t^- - P_t^+ w^+ u_t^+) - \right. \\ & \left. c(P_{\text{out},t}^{\text{DA}} + P_{\text{out},t}^{\text{RT}} + P_{\text{out},t}^{\text{COM}} + P_{\text{in},t}^{\text{DA}} + P_{\text{in},t}^{\text{RT}} + P_{\text{in},t}^{\text{COM}}) \right] \} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{cases} V^{\text{DA}} + \eta_t^{\text{DA}} \geq \frac{1}{2} (\bar{\lambda}_t^{\text{DA}} - \underline{\lambda}_t^{\text{DA}}) y_t^{\text{DA}} \\ V^{\text{RT}} + \eta_t^{\text{RT}} \geq \frac{1}{2} (\bar{\lambda}_t^{\text{RT}} - \underline{\lambda}_t^{\text{RT}}) y_t^{\text{RT}} \\ -y_t^{\text{DA}} \leq Q_{\text{WG},t} + P_{\text{out},t}^{\text{DA}} - P_{\text{in},t}^{\text{DA}} - L_t \leq y_t^{\text{DA}} \\ -y_t^{\text{RT}} \leq P_{\text{out},t}^{\text{RT}} - P_{\text{in},t}^{\text{RT}} + P_t^+ w^+ - P_t^- w^- \leq y_t^{\text{RT}} \\ V^{\text{DA}}, V^{\text{RT}}, \eta_t^{\text{DA}}, \eta_t^{\text{RT}}, y_t^{\text{DA}}, y_t^{\text{RT}} \geq 0 \end{cases} \quad \text{式(12)一 式(21)中的所有约束条件} \quad (23)$$

式中: $\Gamma^{\text{DA}}, \Gamma^{\text{RT}}$ 为鲁棒控制系数,控制该鲁棒模型决策过程中违反约束的概率水平; $\Gamma^{\text{DA}} \in [0, J_{\text{num}}^{\text{DA}}]$; $\Gamma^{\text{RT}} \in [0, J_{\text{num}}^{\text{RT}}]$; $J^{\text{DA}}, J^{\text{RT}}$ 分别为目标函数日前、实时市场中表示价格不确定性的系数的集合; $J_{\text{num}}^{\text{DA}}, J_{\text{num}}^{\text{RT}}$ 分别为集合 $J^{\text{DA}}, J^{\text{RT}}$ 的元素个数; $V^{\text{DA}}, V^{\text{RT}}$ 为对偶变换引入的辅助决策变量; $\eta^{\text{DA}}, \eta^{\text{RT}}, y^{\text{DA}}, y^{\text{RT}}$ 为对偶变换所引入的辅助决策变量组成的矩阵。上述鲁棒模型为非线性,采用大 M 法对非线性条件转化为线性混合整数规划模型进行求解。

3.2 利润分配

3.1 节建立的模型是 WPG 和 EV 聚合商进行协同竞价,从而减少投标偏差,实现 VPP 整体利润最大化,最后还需对利润进行合理分配,才能对双方起到激励作用,增强参与协同竞价的意愿和积极性。

针对 VPP 的利润采用 Shapley 值法进行分配。假设市场有 N 个参与者,其中有 n 个 WPG 和 m 个 EV 聚合商组成 VPP 联合竞价,构成联盟 S ,利用 Shapley 值计算各参与者的利润为:

$$\varphi_i = \sum_S \omega(S_{\text{num}}) [V(S) - V(S/\{i\})] \quad (24)$$

$$\omega(S_{\text{num}}) = \frac{(N - S_{\text{num}})! (S_{\text{num}} - 1)!}{N!} \quad (25)$$

式中: $V(S)$ 为联盟 S 的合作收益; $S/\{i\}$ 为 S 中除去第 i 个成员的集合; φ_i 为第 i 个成员应该分配的利润; $\omega(S_{\text{num}})$ 为与 S 有关的加权函数; S_{num} 为联盟 S 中所有成员的个数。

4 算例分析

4.1 数据设置

假设在日前市场中有 1 个 WPG 和 1 个 EV 聚合商以合作方式构成 VPP 参与市场竞价,且风电各时段出力的上下限服从标准正态分布。参数设定为:EV 代理商各时段的电池充、放电功率上限 \bar{P}_{in} , \bar{P}_{out} 均为 8 MW;电池容量 \bar{S}_{cap} 为 25 MW;风机实际出力高于投标出力时的正偏差惩罚系数 w^+ 为 0.5;风机实际出力低于投标出力时的负偏差惩罚系数 w^- 为 1.5;电池的老化成本为 1 200 美元/MW;风机的投标容量上限 $Q_{\text{WG},t}^{\text{max}}$ 为 100 MW,充放电效率均为 98%。

4.2 计算结果及分析

首先对比 WPG 和 EV 聚合商单独参与日前和实时市场竞价和组成 VPP 联合参与日前和实时市场竞价的结果;然后对比不同的鲁棒控制系数下 VPP 的整体收益的区别;通过调整日前和实时市场的鲁棒控制系数,观察 VPP 在日前和实时联合竞价过程中的收益变化;最后利用 Shapley 值法对 VPP 各成员进行合理的利润分配。

4.2.1 WPG 与 EV 聚合商单独竞价和联合竞价

图 2 为 WPG 在单独参与市场竞价和与 EV 聚合商组成 VPP 联合参与市场竞价的出力偏差。从图中可以看出,WPG 单独参与市场竞价时的偏差较大,通过与 EV 聚合商联合参与市场,对于预测误差较小的时段,可以通过 EV 聚合商的充放电补偿将偏差降为 0,对于预测误差较大的时段,也可以有效降低偏差。因此,通过联合竞价可以大幅减少因偏差而产生的惩罚费用。

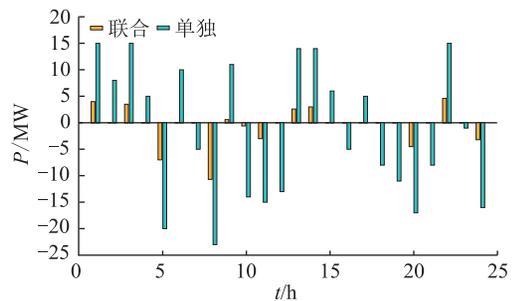


图2 WPG 单独竞价和联合竞价的偏差
Fig.2 Deviation of WPG separate bidding and joint bidding

WPG 参与日前和实时市场的联合竞价时 WPG 的投标和 VPP 投标对比见图 3。可以看出,在实时电价比日前电价高时,EV 聚合商进行放电投标,反之,EV 聚合商进行充电投标。在联合竞价条件下,价格信号是 VPP 参与投标的风向标,对 VPP 参与削峰填谷起到很好的激励作用。

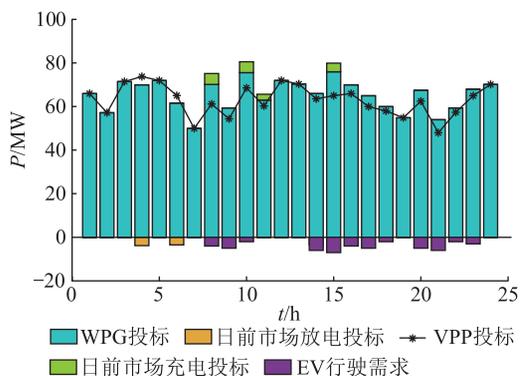


图3 联合竞价时 WPG 投标和 VPP 投标对比
Fig.3 Comparison of WPG bidding and VPP bidding in joint bidding

4.2.2 不同鲁棒控制系数下 VPP 竞价结果分析

文中建立的鲁棒优化模型可以通过改变鲁棒控制系数 Γ^{DA} , Γ^{RT} 的取值调整违反约束的概率水平。由于日前市场和实时市场分别对应着 24 个时段的价格, Γ^{DA} , Γ^{RT} 在 $[0, 24]$ 内取值,两者不同的取值组合分别反映决策者在日前和实时市场的保守水平和风险厌恶程度。由于在鲁棒控制系数取值接近时,其决策结果变化不明显,因此文中将风险厌恶程度分为低、中、高 3 个层级,分别对应 Γ^{DA} , Γ^{RT} 取值为 0, 12, 24。表 1 为 Γ^{DA} , Γ^{RT} 在 7 种不同取值组合下目标函数的最优值。

表 1 Γ^{DA} 和 Γ^{RT} 不同取值组合下的 VPP 目标利润
Table 1 VPP target profit under different combinations of Γ^{DA} and Γ^{RT}

场景	Γ^{DA}	Γ^{RT}	VPP 目标利润/美元
一	0	0	200 990
二	0	12	200 380
三	0	24	200 270
四	12	0	178 230
五	24	0	171 020
六	12	12	177 390
七	24	24	170 060

Γ^{DA} , Γ^{RT} 的不同取值组合代表了不同的约束违反概率水平,取值越大,代表违反约束概率水平越低,决策者最终承担的风险水平越低。从表 1 可以看出,不同的违反约束概率水平对 VPP 的最大利润会产生不同程度的影响。场景一表示决策者不

考虑日前和实时市场的风险,该场景下所承担的风险最高,但是利润也最大。随着 Γ^{DA} , Γ^{RT} 取值逐渐增大,所对应的违反约束概率水平降低,决策者做出的决策逐渐倾向于保守,所承担的风险也降低,但是目标收益也逐渐减少。对比场景三和场景六可以发现 Γ^{DA} , Γ^{RT} 取值之和相同,场景三表示决策者在日前市场做出最乐观的决策,在实时市场做出最保守的决策,场景六表示决策者综合考虑日前和实时市场风险做出的决策,最终场景六比场景三有着更多的目标利润。以场景一作为参考,对比场景二和场景四、场景三和场景五,可以发现当 Γ^{DA} , Γ^{RT} 改变相同的值时,前者对目标收益的影响更大。综上,可以得出以下结论:

(1) VPP 参与日前和实时市场联合竞价时,目标收益随着需要承担风险的增大而增加,决策者可综合考虑自身风险承担能力和风险厌恶程度做出合理决策;

(2) VPP 参与日前和实时竞价时,由于日前市场投标量占比较实时市场更高,因此日前市场的决策调整引起的收益波动更大;

(3) 决策者在决策过程中需要同时考虑日前和实时市场的风险水平,合理组合实现风险对冲,保证收益较高的同时降低承担的风险。

图 4、图 5 分别给出了当鲁棒控制系数按照表 1 中的不同场景进行取值时,VPP 参与日前和实时市场联合竞价的计算结果。

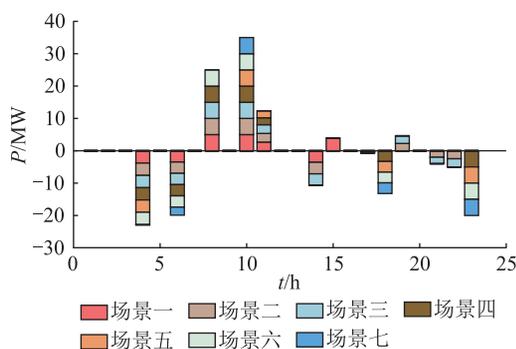


图 4 不同场景下 EV 在日前市场充放电投标功率
Fig.4 Bidding power of EV in day-ahead market under different scenarios

在不同的违反概率约束水平下,EV 聚合商在日前市场的充放电投标结果有所差别。对比表 1 中的鲁棒系数组合,从图 4 中可以发现日前和实时市场的鲁棒系数的改变均会对日前市场的投标决策造成影响,但是前者变化产生的影响更加明显。图 5 中 EV 聚合商在实时市场的投标决策受实时市场的鲁棒控制系数变化影响较大。图 6 给出了不同场景下 EV 聚合商电量储备与行驶需求情况。

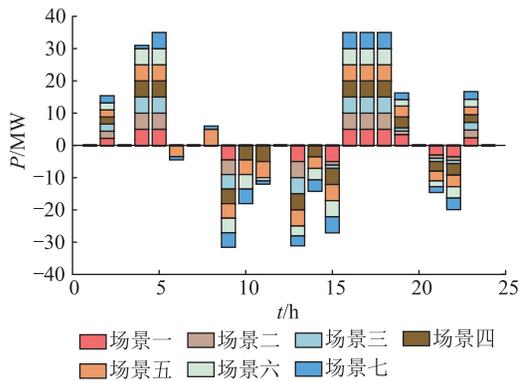


图5 不同场景下EV在实时市场充放电投标功率

Fig.5 Bidding power of EV in real-time market under different scenarios

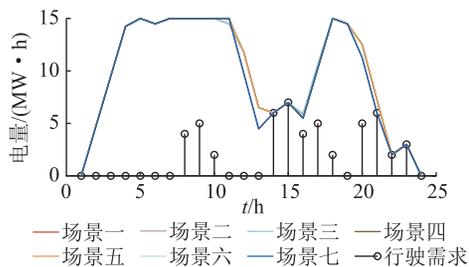


图6 各场景下EV聚合商电量储备与行驶需求情况

Fig.6 Reserve and driving demand situation of EV aggregator under different scenarios

图6中,不同场景下EV聚合商的电量储备变化趋势主要受价格影响,假定初始时刻EV聚合商的电量处于满状态,10h前处于用电低谷期,日前和实时价格较低,EV聚合商通过WPG冗余电量满足EV行驶需求。当WPG出力不足时,从市场上购电满足行驶需求,因此电池电量基本不变;10h以后,开始进入中午的用电高峰期,此时的日前和实时市场价格急剧升高,EV聚合商除了满足WPG的出力偏差和行驶需求之外,通过放电投标对其他负荷进行供电。从14h开始,再次进入用电低谷期,随着价格的降低EV聚合商通过充电投标对EV进行充电,18h以后,开始进入晚高峰,EV聚合商进行放电投标对其他负荷供电,WPG和EV聚合商通过参与日前和实时市场联合竞价,起到削峰填谷的作用。

4.2.3 基于Shapley值的利润分配

前述提到的两层利润分配均为基于Shapley值利润分配方法,因此文中以第一层利润分配为例进行讨论。

1个WPG和1个EV聚合商联合参与市场竞价和单独参与市场竞价所获得的目标利润如表2所示。从表中可以看出,在单独竞价时,WPG由于偏差惩罚较大导致目标利润比联合竞价低,EV聚合

商通过参与日前和实时市场获取利润弥补了一部分用于满足行驶需求的成本。联合竞价有效弥补了WPG的出力偏差,提高了WPG收益,同时WPG的额外出力满足了EV的行驶需求,大幅度降低了购电成本,最终EV聚合商的目标利润转为盈余。

表2 不同情况下的目标利润

Table 2 Target profit under different scenarios 美元

场景	风电商	EV聚合商	总利润
单独竞价	176 660	-2 010	174 650
联合竞价	189 030	1 960	200 990

5 结论

文中建立了风电和EV联合参与日前和实时市场竞价的鲁棒优化模型,WPG通过EV的充放电补偿降低投标偏差,WPG用多发的电量满足EV的行驶需求,2个主体之间通过合作达到利润的最大化。建立鲁棒优化模型,考虑日前和实时市场的价格不确定性,通过算例分析验证得到以下结论:

(1) 由于风电出力的不确定性和波动性增加了WPG参与电力市场竞价的风险,WPG和EV聚合商通过构成VPP参与市场竞价有效平抑出力偏差,有利于决策者更好地参与市场竞价,降低决策带来的风险;

(2) 在该模型中,市场主体可以根据风险厌恶程度和目标利润期望改变日前和实时市场的违约约束概率水平,增加决策的合理性;

(3) VPP参与日前和实时市场,可以充分发挥各主体的资源优势,在实现自身利润最大化的同时,通过价格信号引导新能源的消纳,起到削峰填谷的作用,实现资源的合理配置和社会福利的最大化。

下一步的研究工作包括:综合考虑VPP与需求响应资源参与日前和实时市场竞价;考虑VPP报价对市场出清结果的影响;研究包含EV不确定性的决策模型等。

参考文献:

- [1] 邹鹏,陈启鑫,夏清,等. 国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议[J]. 电力系统自动化,2014,38(13):18-27.
ZOU Peng, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Logical analysis of spot market design in foreign countries and enlightenment and policy suggestions for china[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 18-27.
- [2] 赵勇强, CHOU Ella, 刘坚. 促进系统灵活性和可再生能源消纳的电力市场体系[J]. 中国能源, 2019, 41(1): 19-24.

- ZHAO Yongqiang, CHOU Ella, LIU Jian. Electricity market system that promotes system flexibility and renewable energy consumption[J]. Energy of China, 2019, 41(1): 19-24.
- [3] 赵俊华, 文福拴, 薛禹胜, 等. 计及电动汽车和风电出力不确定性的随机经济调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 22-29.
- ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Power system stochastic economic dispatch considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 22-29.
- [4] 陈春武, 李娜, 钟朋园, 等. 虚拟电厂发展的国际经验及启示[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2258-2263.
- CHEN Chunwu, LI Na, ZHONG Pengyuan, et al. Review of virtual power plant technology abroad and enlightenment to china[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2258-2263.
- [5] RAHIMIYAN M, BARINGO L. Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: a price-taker robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2676-2687.
- [6] 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, LYU Lin, GAO Hongjun, et al. Robust day-ahead trading strategy for multiple virtual power plants[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2694-2703.
- [7] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1759-1767.
- ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Strategic bidding model for virtual power plant in different electricity markets considering electric vehicles and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1759-1767.
- [8] 王晔, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 155-164.
- WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-164.
- [9] 宋巍, 王佳伟, 赵海波, 等. 考虑需求响应交易市场的虚拟电厂多阶段竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 35-45.
- SONG Wei, WANG Jiawei, ZHAO Haibo, et al. Research on multi-stage bidding strategy of virtual power plant considering demand response market[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 35-45.
- [10] AL-AWAMI A T, AMLEH N A, MUQBEL A M. Optimal demand response bidding and pricing mechanism with fuzzy optimization: application for a virtual power plant[J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017, 53(5): 5051-5061.
- [11] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3630-3637.
- NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei, et al. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630-3637.
- [12] 王晔, 王留晖, 张少华. 风电商与 DR 聚合商联营对电力市场竞争的影响[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 110-116.
- WANG Xian, WANG Lihui, ZHANG Shaohua, et al. Impacts of cooperation between wind power producer and DR aggregator on electricity market equilibrium[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 110-116.
- [13] BERTSIMAS D, SIM M. The price of robustness[J]. Operations Research, 2004, 52(1): 35-53.
- [14] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
- LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [15] 张晨, 韩新阳, 白翠粉, 等. 基于合作博弈的电力市场模式下售电商购电策略模型[J]. 中国电力, 2017, 50(6): 177-184.
- ZHANG Chen, HAN Xinyang, BAI Cuifen, et al. Reliability evaluation of power generation system with wind power and reactive power balance[J]. Electric Power, 2017, 50(6): 177-184.
- [16] CONTRERAS J, KLUSCH M, KRAWCZYK J B. Numerical solutions to Nash-Cournot equilibria in coupled constraint electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 195-206.
- [17] 陈宁, 沙倩, 汤奕, 等. 基于交叉熵理论的风电功率组合预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 29-34.
- CHEN Ning, SHA Qian, TANG Yi, et al. A combination method for wind power prediction based on cross entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 29-34.
- [18] 魏龙飞, 刘广一, 张怀春, 等. 基于图计算的虚拟电厂报价辅助决策系统[J]. 供用电, 2019, 36(11): 41-47.
- WEI Longfei, LIU Guangyi, ZHANG Huaichun, et al. Graph computing based virtual power plant bidding-assistance systems[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(11): 41-47.
- [19] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014(13): 92-102.
- YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plant considering uncertain outputs from plug in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(13): 92-102.
- [20] 蒋林湖, 万伟江, 丁霄寅, 等. 一种基于直接蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷模型[J]. 供用电, 2018, 35(4): 20-25.
- JIANG Linru, WAN Weijiang, DING Xiaoyin, et al. Electric vehicle charging load model based on direct Monte-Carlo method[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(4): 20-25.
- [21] 高红, 廖斌, 屈东明. 基于电动汽车云平台的大数据存储与管理[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(4): 45-49.
- GAO Hong, LIAO Bin, QU Dongming. The big data storage and

- management based on the electric vehicles cloud platform[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(4):45-49.
- [22] 赵文瑄, 汤宗尧, 谭林林, 等. 多优化目标下无线充电电动汽车与风电协同调度研究[J]. 供用电, 2018, 35(9):22-27. ZHAO Wenxuan, TANG Zongyao, TAN Linlin, et al. Research on coordination scheduling of wireless charging electric vehicle and wind power under multi-objective optimization[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9):22-27.
- [23] 朱兰, 刘伸, 唐陇军, 等. 充放电不确定性响应建模与电动汽车代理商日前调度策略[J]. 电网技术, 2018, 42(10):3305-3317. ZHU Lan, LIU Shen, TANG Longjun, et al. Modeling of char-

ging and discharging uncertainty and research on day-ahead dispatching strategy of electric vehicle agents [J]. Power System Technology, 2018, 42(10):3305-3317.

作者简介:



宋艺航

宋艺航(1986),男,博士,副研究员,从事电力市场、电力经济相关工作(E-mail: allensoon@163.com);

王秀丽(1961),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统可靠性、电力市场;

匡熠(1995),男,硕士在读,研究方向为电力市场。

Spot market bidding strategy for virtual power plants with wind power and electric vehicles

SONG Yihang¹, WANG Xiuli², KUANG Yi², WANG Gang¹, ZHU Zongyao², CHEN Xianlong²

(1. Energy Development Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For virtual power plants(VPP) composed of wind power generation(WPG) and electric vehicles(EV), uncertainty of wind power output, deviation between wind power forecast and actual output, randomness of EV and the volatility of market prices need to be considered when participating in market bidding. Considering above factors, two stage bidding model for VPP to participate day-ahead and real-time market is proposed. VPP can not only reduce the bidding deviation of wind power through EV charging and discharging, but also make bidding strategies according to the price signal to realize peak clipping and valley filling. Based on cooperative game theory, the Shapley method is used to reasonably distribute the total profit between WPG and EV according to their respective contributions. Finally, feasibility and effectiveness of proposed model are verified by an example. The results show that VPP can increase the profit and reduce the risk caused by output and price uncertainty, and provide reference for the construction of new energy participation in the spot market.

Keywords: real-time market; wind power generation(WPG); electric vehicle aggregator; virtual power plant(VPP); robust optimization model

(编辑 吴楠)