

计及碳—电一体化交易的虚拟电厂竞价策略

贾德香¹, 柳占杰¹, 高 骞², 吴 洁³

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;
3. 国网陕西省电力有限公司, 陕西 西安 710048)

摘 要:分布式能源与可调控负荷可通过虚拟电厂聚合参与电力市场、辅助服务市场以及碳交易市场。在此背景下,构建含有风能、微型燃气轮机、光能、电动汽车以及电池储能系统的虚拟电厂运行模型,并通过对碳—电一体化市场特征的进一步分析,构建虚拟电厂碳—电一体化交易策略模型,列出目标函数和各单元运行约束条件。仿真算例分析结果表明,碳交易机制的引入将显著降低高碳机组的竞价出力水平,继而影响虚拟电厂内能源出力结构以及竞价策略。仿真结果验证了碳—电一体化交易虚拟电厂竞价策略的有效性。

关 键 词:虚拟电厂;碳—电一体化交易;分布式能源;竞价策略

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.02.011 中图分类号:TM614 文章编号:1673-9140(2021)02-0089-09

Bidding strategy of the virtual power plant based on the consideration of carbon-electricity integration trading in auxiliary service market

JIA Dexiang¹, LIU Zhanjie¹, GAO Qian², WU Jie³

(1. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 3. State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: Distributed energy and controllable load can be aggregated in virtual power plants to participate in the electricity market, ancillary service market and carbon trading market. In this paper, an operation model including wind energy, micro gas turbine, photovoltaic, electric vehicle and battery energy storage system are constructed in virtual power plant. Through further analysis the carbon-electricity integrated market characteristics, a carbon-electricity integrated trading strategy model of the virtual power plant is constructed, and the objective function and operational constraints of each unit are listed. Simulation results show that the introduction of carbon trading mechanism can significantly reduce the bidding output level of high-carbon units, and then affect the energy output structure and bidding strategy in virtual power plants. The simulation results validate the effectiveness of bidding strategy for virtual power plants with integrated carbon-electricity transaction.

Key words: virtual power plant; carbon-electricity integration trading; distribution energy resource; bidding strategy

收稿日期:2019-03-07;修回日期:2019-06-02

基金项目:国家电网有限公司科技项目(52110118001S)

通信作者:贾德香(1971-),男,博士,高级工程师,主要从事能源电力系统规划、电能替代研究;E-mail:zcy610016@126.com;

大量分布式电源的接入对传统电力系统运行安全性、经济性产生了根本性影响,清洁能源高渗透率和多样化负荷的广泛接入对电网的运行安全、优化调度提出了新的挑战。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为一种新型的分布式电源协调控制与能量管理技术能够有效聚合各种分布式电源参与电力市场交易^[1]。基于互联网通信技术并依托数据互联将区域内分布式电源聚合为一个整体,统一参与电力市场、碳交易市场竞价。不同区域间 VPP 也可实现能源流的跨区域调度互补,降低电网调度难度、提升可再生能源的利用率与消纳能力,推动电网由单一的能源消费结构向多元能源消费结构的转变。

VPP 内聚合多种分布式电源、负荷以及储能系统,结合各市场实时价格信息及各单元出力特性,VPP 在电力市场中可扮演多重角色,既可作为电能供应商参与市场竞价出售电能,同时又可作为负荷从市场中购买电能满足负荷需求。凭借内部多元化的能源结构、灵活的能源供给形式和多样化的储能系统,VPP 可调度内部电源、负荷、储能系统参与辅助服务市场,为电力系统提供备用。依托 VPP 可为用户侧参与碳交易、电能交易以及辅助服务提供平台。

目前,对 VPP 参与电能交易、为系统提供辅助服务并且结合碳交易参与市场竞价的研究主要集中于 3 个方面。

1)在单一的电能竞价策略方面。文献[2]计及风机出力波动性并且以电动汽车(electric vehicle, EV)参与储能提出 VPP 收益最大 VPP 竞价策略;文献[3]构建了可再生能源机组与能源转化设备联合运行模型,以 VPP 最大收益为目标制定 VPP 竞价策略;文献[4-5]计及用户需求侧响应考虑可再生能源出力市场电价以及负荷的不确定性,提出了参与电力市场和需求侧响应的多阶段竞价模型;文献[6]利用 VPP 备用容量调度消纳分布式电源的波动性,并制定 VPP 参与日前市场的最优竞价策略;文献[7]引入奖惩机制构建含有分布式能源、分布式储能系统 VPP,制定参与电力市场经济最优竞价策略;文献[8]提出了含储热装置的热电联产—风电 VPP 双阶段优化调度方案,在满足供热负荷的前提下,可以有效降低机组的燃料成本和碳排放量,并获得更大的经济收益。

2)在计及辅助服务的竞价策略方面。文献[9-10]利用 VPP 为电力系统提供旋转备用服务,制定 VPP 参与电力市场和旋转备用市场的联合竞价策略;文献[11]计及备用市场价格,联合区域内风光水等分布式能源与供电公司构建联合调度模型,制定 VPP 与供电公司联合竞价模型;文献[12]考虑 VPP 内不同区域间的冷热电交互问题,构建计及多区域冷热电联产系统(combined cooling heating and power system, CCHP)的 VPP 参与日前能量市场和备用市场的竞价策略。

3)在计及碳交易 VPP 竞价策略方面。文献[13]在 VPP 竞价中引入碳交易机制,建立了环境经济协调优化调度模型;文献[14]同时考虑电力市场电价的不确定性和碳排放对 VPP 竞价的影响,构建了 VPP 竞价模型来分析碳排放对 VPP 影响;文献[15]中 VPP 将风电机组和碳捕集机组聚合,以电力市场碳交易市场收益最大化为目标,构建了日前—实时双阶段低碳经济调度模型;文献[16]提出了一种碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型;文献[17]建立了考虑碳交易、需求侧响应机制以及风机不确定性的 VPP 竞价模型,并结合 VPP 收益制定最优碳交易策略,探讨需求侧响应机制对 VPP 竞价的影响。

通过分析可以得出,目前 VPP 的竞价策略大都是基于电力市场环境下载电能的交易分析模型,并没有将碳交易引入到电力市场中,并进行同时综合考虑,随着分布式电源渗透率增大和负荷可控能力的增加,如何充分发掘 VPP 内部的可调控资源,构建辅助服务市场环境下碳—电一体化的虚拟电厂竞价策略,对提升 VPP 运行的经济性具有重要意义。

1 虚拟电厂碳—电一体化市场运行特征分析

1.1 虚拟电厂运行结构分析

在传统电力系统中,风电、光伏以及各类负荷均独立参与市场的运行,电网缺乏对各单元运行状态的实时感知。系统无法根据分布式电源的出力特征、差异化负荷的出力特点以及各单元的碳排放水平进行统一的调度与策略的制定。依托 VPP 聚合

区域内分布式能源、负荷、储能系统是构建碳—电一体化市场的基础。

典型 VPP 运行结构如图 1 所示,微型燃气轮机 (micro turbines, MT)、光伏机组 (photovoltaic panel, PV)、风力机组 (wind turbine, WT) 为 VPP 内主要电能供应单元,依托 VPP 参与能源市场和辅助服务市场。VPP 通过对可控负荷 (controllable load, CL) 和储能系统 (energy storage system, ESS) 的调用参与电力市场和辅助服务市场的竞价。近年来电动汽车发展迅速,尽管其日常主要担任交通运输任务,但仍具有一定的储能作用,因自身结构的特殊性 EV 既可作为负荷也可作为储能系统。EV 可作为一种特殊负荷,可参与负荷响应工作也可作为储能系统参与平抑可再生能源出力波动、削峰填谷等辅助服务工作。各单元依托数据层将日常运行数据传递给 VPP 控制中心,再由控制中心根据此时用户满意度、收益、碳排放等目标的约束要求分配各发电机组的出力和负荷、储能系统的响应容量。

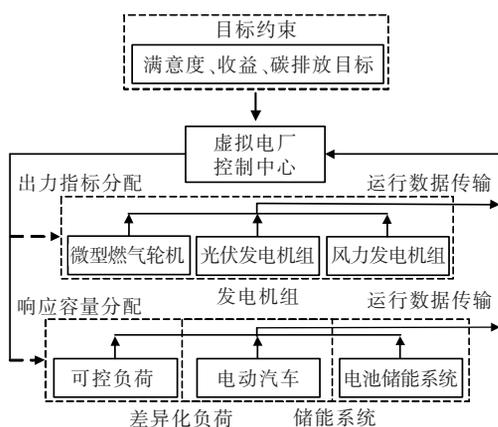


图 1 虚拟电厂运行结构

Figure 1 Operation structure of the virtual power plant

1.2 碳—电一体化市场特征分析

碳交易市场中碳排放权将作为商品参与市场交易,碳排放权如何计量与统计将成为其中的关键环节,用户侧如何界定碳排放权有无被重复利用是问题实施的难点。碳—电一体化市场不仅仅是电能的流通交易中心,同时也是碳排放权的汇集交易中心。为有效地对碳排放权实施计量,该文将采用“碳足迹”的概念,即用户在进行电能交易过程中也将其所包含的碳排放权一并交易并获取响应的收益^[17]。

虚拟电厂中碳—电一体化交易流量如图 2 所

示,VPP 中各单元参与市场交易过程实际上也是电能消费权与碳排放权同时出让的过程,其交易特征如下:

1) VPP 调用 MT 为生产电能需同时为其购买相应的碳排放权;

2) WT 与 PV 调度出力过程不产生额外的碳排放, VPP 调度中心可获取相应的碳排放权, VPP 调度中心可将碳排放权分配给 MT 或是向碳交易市场出售以获取经济收益;

3) CL 参与 VPP 运行调度,如用户在实际调度中被调用电量, VPP 将给予用户对应碳排放权的经济补偿;

4) VPP 调用 EV 与 ESS,碳排放权与电能可实现同步流动。

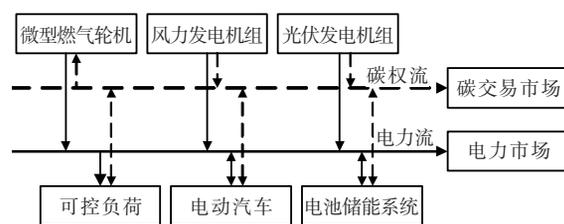


图 2 碳—电一体化交易流量

Figure 2 Carbon electric integrated transaction volume

2 碳—电一体化竞价模型

为获取更大收益,VPP 在传统电力系统基础上聚合 EV、ESS、调度 CL 等参与日前电力市场和辅助服务市场竞价。该文所构建 VPP 容量较小难以直接影响市场价格,因此,VPP 只作为价格接受者参与电力市场、辅助服务市场和碳交易市场的竞价工作。

2.1 目标函数

VPP 参与市场竞价以自身收益最大为目标,竞价目标:

$$\max \sum \begin{matrix} R_{\text{bid}} + R_{\text{up}} + R_{\text{d}} + R_{\text{res}} + R_{\text{c}} - C_{\text{mt}} - C_{\text{ess}} \\ - C_{\text{ev}} - C_{\text{c}} - R_{\text{pun,w}} - R_{\text{pun,pv}} - R_{\text{sub,ev}} - R_{\text{sub,l}} \end{matrix} \quad (1)$$

式中 R_{bid} 为 VPP 参与电力市场竞价所获收益; R_{up} 、 R_{d} 、 R_{res} 分别为 VPP 参与辅助服务市场中上调、下调、旋转备用竞价所获取收益; R_{c} 为 VPP 参与碳交易所获收益; C_{mt} 、 C_{ess} 、 C_{ev} 分别为

VPP调用MT、ESS以及EV参与市场竞价支付的运行成本以及给予用户的经济补贴； C_c 为虚拟电厂从碳交易市场中购买碳排放权所支付成本； $R_{pun,w}$ 、 $R_{pun,pv}$ 分别为WT、PV竞价出力与预测出力产生偏差后的经济惩罚； $R_{sub,ev}$ 、 $R_{sub,l}$ 分别为VPP调用EV和CL参与电力市场为用户所支付的经济补贴。

$$\left\{ \begin{aligned} R_{bid} &= \sum_{\substack{i \in \phi \\ t=1}}^{24} \lambda_{bid,t} P_{bid,i,t} \\ R_{up} &= \sum_{\substack{j \in \phi \\ t=1}}^{24} \lambda_{up,t} P_{up,j,t}, R_d = \sum_{\substack{k \in \phi \\ t=1}}^{24} \lambda_{d,t} P_{d,k,t} \\ R_{res} &= \sum_{\substack{v \in \phi \\ t=1}}^{24} \lambda_{res,t} P_{res,v,t} \\ R_c &= \sum_{\substack{m \in \phi \\ t=1}}^{24} \lambda_c P_{c,m,t} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中 ϕ 为包含WT、PV、MT、EV、CL以及ESS的竞价单元集合； $P_{bid,i,t}$ 、 $P_{up,j,t}$ 、 $P_{d,k,t}$ 、 $P_{res,v,t}$ 、 $P_{c,m,t}$ 分别为 t 时刻参与电力市场、上调、下调、旋转备用和碳交易市场竞价出力大小； $\lambda_{bid,t}$ 、 $\lambda_{up,t}$ 、 $\lambda_{d,t}$ 、 $\lambda_{res,t}$ 分别为 t 时刻电力市场实时电价、辅助服务市场上调、下调、旋转备用电价； λ_c 为碳交易价格。

2.2 约束条件

1) 可再生能源的出力约束。

可再生能源出力受出力上下限、预测出力大小约束,当可再生能源竞价出力与预测出力产生偏差时,VPP需受到一定的经济惩罚。

$$\left\{ \begin{aligned} P_{bid,w,t} + P_{up,w,t} + P_{res,w,t} &\leq P_{w,up,t} \\ P_{bid,w,t} + P_{up,w,t} + P_{res,w,t} &\geq P_{w,low,t} \\ P_{bid,pv,t} + P_{up,pv,t} + P_{res,pv,t} &\leq P_{pv,up,t} \\ P_{bid,pv,t} + P_{up,pv,t} + P_{res,pv,t} &\geq P_{pv,low,t} \\ P_{bid,w,t} - P_{d,w,t} &\geq 0 \\ P_{bid,pv,t} - P_{d,pv,t} &\geq 0 \\ R_{pun,w} &= \sum_{t=1}^{24} \lambda_{bid,t} \eta |P_{bid,w,t} - P_{f,w,t}| \\ R_{pun,pv} &= \sum_{t=1}^{24} \lambda_{bid,t} \eta |P_{bid,pv,t} - P_{f,pv,t}| \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中 $P_{f,w,t}$ 、 $P_{f,pv,t}$ 分别为WT、PV预测出力； η 为惩罚系数,较大的惩罚系数VPP产生出力偏差时将受到较高的经济惩罚VPP竞价出力将趋于保守,反之VPP出力将更加激进。

2) 微型燃气轮机运行约束。

MT为VPP主要电力来源,竞价出力大小受到出力上下限、最大爬坡下降速率的约束。微型燃气轮机竞价模型为

$$\left\{ \begin{aligned} P_{bid,mt,t} + P_{up,mt,t} + P_{res,mt,t} &\leq P_{max,mt} \\ P_{bid,mt,t} - P_{d,mt,t} &\geq 0 \\ P_{up,mt,t} &\leq P_{rup,mt} \\ P_{d,mt,t} &\leq P_{rdown,mt} \\ C_{mt} &= \sum_{t=1}^{24} \lambda_{c,mt} (P_{bid,mt,t} + P_{up,mt,t} + P_{res,mt,t}) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中 $P_{max,mt}$ 为微型燃气轮机最大输出功率； $P_{rup,mt}$ 、 $P_{rdown,mt}$ 分别为燃气轮机组最大爬坡与下降速率； $\lambda_{c,mt}$ 为燃气轮机组单位出力成本。

3) 电池储能运行约束。

储能装置的功率调节能力有助于提高风光电源及电动汽车充电站的规划容量,促进清洁能源的使用^[18],使VPP具有更大的市场竞价裕度。ESS性能受到充放电功率、电池容量、实时荷电状态(state of charge,SOC)等因素限制,为防止过度充放电对电池造成损伤,引入SOC状态约束机制。VPP电池储能系统竞价模型为

$$\left\{ \begin{aligned} P_{bid,ess,t} + P_{up,ess,t} + P_{res,ess,t} &\leq P_{dis,ess,t} \\ P_{d,ess,t} - P_{bid,ess,t} &\leq P_{char,ess,t} \\ P_{dis,ess,t} &\leq S_{ess,t} \\ S_{ess,t} - P_{dis,ess,t} + P_{char,ess,t} &\leq S_{max} C_{max,ess} \\ S_{ess,t+1} &= S_{ess,t} - \frac{P_{dis,ess,t}}{\eta_{dis}} + \eta_{char} P_{char,ess,t} \\ S_{min} &\leq \frac{S_{ess,t}}{C_{max,ess}} \leq S_{max} \\ P_{char,ess,t} &\leq P_{maxchar,ess} \alpha_{ess,t} \\ P_{dis,ess,t} &\leq P_{maxdis,ess} \beta_{ess,t} \\ C_{ess} &= \sum_{t=1}^{24} \lambda_{c,ess} P_{bid,ess,t} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中 $P_{char,ess,t}$ 、 $P_{dis,ess,t}$ 分别为 t 时刻ESS充、放电功率； $\alpha_{ess,t}$ 、 $\beta_{ess,t}$ 为0-1变量， $\alpha_{ess,t}=1$ 、 $\beta_{ess,t}=0$ 表示ESS充电， $\alpha_{ess,t}=0$ 、 $\beta_{ess,t}=1$ 表示ESS放电， $\alpha_{ess,t}=0$ 、 $\beta_{ess,t}=0$ 表示ESS未投入运行； $P_{maxchar,ess}$ 、 $P_{maxdis,ess}$ 分别为ESS最大充、放电功率； $S_{ess,t}$ 为 t 时刻ESS电能存储状态；为防止过度充放电对电池造成损伤， S_{max} 、 S_{min} 为ESS最大、最小SOC值；

$C_{\max, \text{ess}}$ 为 ESS 最大容量; η_{char} 、 η_{dis} 分别为 ESS 充、放电效率; $\lambda_{c, \text{ess}}$ 为电池单位出力产生的折价损耗。

4) 电动汽车运行约束。

EV 发展迅速,大量 EV 投入运行为其参与由 VPP 引导的市场竞价提供了基础。大多数电动汽车一天内仅充一次电,而且在工作地以及居住地停放时间较长,因此 EV 多数时间均处于空闲状态^[19],利用 EV 参与 VPP 运行调度,一方面用户可以获得一定的收益,另一方面也可提升电网运行的经济性。EV 参与电力市场,运行约束:

$$\begin{cases} P_{\text{bid}, \text{ev}, t} + P_{\text{up}, \text{ev}, t} + P_{\text{res}, \text{ev}, t} \leq P_{\text{dis}, \text{ev}, t} \\ P_{\text{d}, \text{ev}, t} - P_{\text{bid}, \text{ev}, t} \leq P_{\text{char}, \text{ev}, t} \\ P_{\text{dis}, \text{ev}, t} \leq S_{\text{ev}, t} \\ S_{\text{ev}, t} - P_{\text{dis}, \text{ev}, t} + P_{\text{char}, \text{ev}, t} \leq S_{\max} C_{\max, \text{ev}} \\ S_{\text{ev}, t+1} = S_{\text{ev}, t} - \frac{P_{\text{dis}, \text{ev}, t}}{\eta_{\text{dis}}} + \eta_{\text{char}} P_{\text{char}, \text{ev}, t} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_{\min} \leq \frac{S_{\text{ev}, t}}{C_{\max, \text{ev}}} \leq S_{\max} \\ P_{\text{char}, \text{ev}, t} \leq P_{\max \text{char}, \text{ev}} \alpha_{\text{ev}, t} \\ P_{\text{dis}, \text{ev}, t} \leq P_{\max \text{dis}, \text{ev}} \beta_{\text{ev}, t} \end{cases}$$

$$C_{\text{ev}} = \sum_{t=1}^{24} \lambda_{c, \text{ev}} P_{\text{bid}, \text{ev}, t}$$

$$R_{\text{sub}, \text{ev}} = \sum_{t=1}^{24} \left[(\lambda_{c, \text{evsub}} + \delta \lambda_{\text{bid}, t}) P_{\text{bid}, \text{ev}, t} + (\lambda_{c, \text{evsub}} + \delta \lambda_{\text{d}, t}) P_{\text{d}, \text{ev}, t} + (\lambda_{c, \text{evsub}} + \delta \lambda_{\text{up}, t}) P_{\text{up}, \text{ev}, t} + (\lambda_{c, \text{evsub}} + \delta \lambda_{\text{res}, t}) P_{\text{res}, \text{ev}, t} \right] \quad (7)$$

为吸引用户注册 EV 参与调度 VPP 需给予用户一定的经济补贴,该文用户补贴由基础和动态补贴两部分组成, $\lambda_{c, \text{evsub}}$ 为基础补贴价格, δ 为动态补贴系数。其他参数含义类比电池储能运行约束条件可得。

5) 碳交易运行机制与约束。

碳交易机制的引入实现了碳排放权的量化,将“碳排放权”设置为一种商品参与市场交易。由于碳交易成本的引入,系统机组的运行成本将会发生改变。当火电机组的碳排放量过高时需要从碳市场额外购买碳配额从而增加火电的运行成本,当发电成本增加到一定程度影响其自身的发电收益时,电厂将会通过限制机组的出力来对运行策略做出调整^[20]。依托市场机制实现碳排放的调节,继而改善

能源消费结构,高碳排放企业在碳交易机制中需支付高额成本用以购买碳排放权,低碳企业在碳交易机制中可获取额外碳排放权以获取一定收益,碳交易机制的实现可推动发电企业向绿色低碳方向转变。碳交易机制运行约束:

$$P_{c, m, t} = P_{\text{bid}, w, t} + P_{\text{up}, w, t} + P_{\text{res}, w, t} + P_{\text{bid}, \text{pv}, t} + P_{\text{up}, \text{pv}, t} + P_{\text{res}, \text{pv}, t} \quad (8)$$

$$C_{c, t} = \lambda_c (P_{\text{bid}, \text{mt}, t} + P_{\text{up}, \text{mt}, t} + P_{\text{res}, \text{mt}, t}) \quad (9)$$

式中 $C_{c, t}$ 为 t 时刻 VPP 碳排放权购买成本。

6) 需求侧负荷响应及用户满意度约束。

该文以用户经济收益定义用户满意度,用户满意度的高低直接影响用户侧市场的开拓与发展。较高的用户满意度可吸引更多用户参与注册到 VPP 中去, EV 与 CL 的提升将使 VPP 具有更强的调节能力从而提升自身的经济性。满意度定义为

$$R_{\text{sat}} = \frac{R_{\text{sub}, \text{ev}} + R_{\text{sub}, \text{il}}}{R_{\max}} \quad (10)$$

式中 $R_{\text{sub}, \text{ev}}$ 、 $R_{\text{sub}, \text{il}}$ 分别为用户注册电动汽车和参与负荷响应所获取补贴; R_{\max} 为当前环境下用户理论所能获取最大收益。

调用 CL 用于补偿竞价出力与预测出力偏差,可提升 VPP 整体经济收益。

$$\begin{cases} P_{\text{pun}, t} = P_{\text{pun}, w, t} + P_{\text{pun}, \text{pv}, t} - P_{\text{il}, t} \\ \begin{cases} R_{\text{sub}, \text{il}} = a \lambda_{\text{bid}, t} P_{\text{il}, t} \\ 0 \leq P_{\text{il}, t} \leq b P_{1, t} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中 a 为可控负荷经济补贴系数,由 VPP 运行商制定,取值大小将影响用户参与负荷响应收益; b 为负荷参与比例,用于约束用户可参与负荷响应的最大值。

7) VPP 运行条件约束。

$$P_{\text{bid}, t} + P_{\text{up}, t} + P_{\text{res}, t} - P_{\text{low}, t} \geq P_{1, t} \quad (12)$$

式(12)表明 VPP 出力应首先满足注册用户负荷需求,系统无需向 VPP 中额外传输电能,此时对于电力系统中的 VPP 仅作为发电商来参与市场竞价。

2.3 求解方法

通过分析可得,该文提出的基于碳-电一体化交易的 VPP 竞价策略模型属于典型的混合整数非线性规划模型(MINLP),该文将基于 GAMS 软件通过调用 CPLEX 和 BARON 求解器来求解。BARON 并不需要给定精确初始点,具有较强的全局搜索能力。

3 算例分析

3.1 参数说明

该文根据 WT 和 PV 的出力特性假定 VPP 中新能源机组竞价出力存在区间。VPP 在日前市场竞价时,未来 24 h 的 VPP 竞价出力均在出力区间范围内进行波动。该文所选取负荷仅为与 VPP 签约用户的负荷总量并非本地区全部负荷。因当前 VPP 容量较小且时刻与大电网相连无需考虑消纳问题。因此,VPP 内新能源机组出力占其签约用户负荷比例较高。24 h 负荷水平 WT,PV 预测出力及出力区间如表 1 所示;日前市场电价水平、备用市场上调、下调、旋转备用电价如图 3 所示。

表 1 可再生能源预测出力及其上、下限

Table 1 Load levels, renewable energy forecast output and bidding interval in next 24 hours MW

时刻	风机 上限	风机 预测	风机 下限	光伏 上限	光伏 预测	光伏 下限	负荷 水平
01:00	6.11	9.05	2.50	0.00	0.00	0.00	27.18
02:00	6.44	9.97	2.53	0.00	0.00	0.00	26.52
03:00	9.19	10.32	2.82	0.00	0.00	0.00	25.81
04:00	9.12	12.08	3.87	0.00	0.00	0.00	25.42
05:00	9.62	11.74	3.18	0.00	0.00	0.00	25.02
06:00	10.22	12.07	2.89	0.00	0.00	0.00	25.58
07:00	7.48	10.65	2.47	0.00	0.00	0.00	26.49
08:00	5.72	9.53	2.06	0.00	0.00	0.00	27.83
09:00	5.45	8.45	1.33	0.00	0.00	0.00	28.83
10:00	4.88	6.83	1.11	0.21	0.30	0.09	29.65
11:00	5.01	5.97	1.32	2.03	2.92	0.88	30.06
12:00	5.60	6.36	1.48	7.78	11.17	3.39	30.62
13:00	5.01	7.90	1.66	8.76	13.28	4.52	31.14
14:00	3.83	9.65	1.47	10.37	14.89	4.52	30.74
15:00	4.33	10.52	1.24	9.37	13.88	4.52	30.23
16:00	5.60	10.91	1.98	8.06	11.57	3.51	29.98
17:00	8.28	11.26	2.71	7.43	10.66	3.23	30.41
18:00	11.11	12.69	4.04	5.68	8.15	2.47	30.81
19:00	11.11	12.65	4.55	3.01	4.33	1.31	31.01
20:00	11.11	12.59	4.25	0.70	1.01	0.31	30.97
21:00	11.41	13.01	4.47	0.21	0.30	0.09	30.62
22:00	9.78	11.83	3.67	0.00	0.00	0.00	30.22
23:00	8.01	12.13	2.99	0.00	0.00	0.00	29.29
24:00	7.39	12.74	2.53	0.00	0.00	0.00	27.99

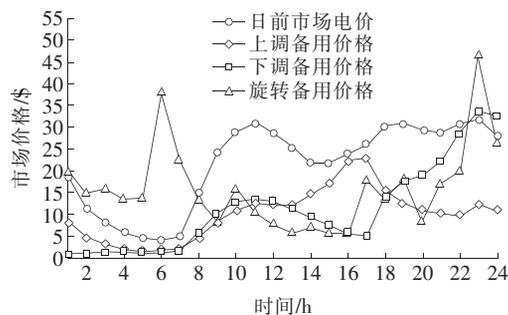


图 3 日前市场备用市场电价水平

Figure 3 Day-ahead prices in energy and AS markets

该文假设 MT 最大出力为 15 MW;ESS 最大容量为 16 MW·h,最大充电功率为 4.5 MW,最大放电功率为 5.5 MW;EV 等效最大容量为 15 MW·h,最大充放电功率均为 5.75 MW;VPP 每 MW 出力碳权交易价格为 22.976 \$。为防止过度充放电对电池产生的损伤,电池最大 SOC 为 90%,最小 SOC 为 10%,充放电效率均为 95%。负荷调控比例为 20%,可控负荷经济补贴系数 a 为 10%,出力偏差惩罚系数 b 为 5%。用户满意度最小值为 70%。

3.2 算例分析

在无碳交易约束下为满足负荷需求,提升经济性,VPP 可充分调用 MT 机组参与市场竞价出力,因其具有出力稳定波动小等特征具有良好的经济性。此状态下 VPP 总竞价收入为 19 073 \$,不考虑碳排放成本及碳交易市场,新能源机组与燃气轮机机组参与主能源市场竞价出力、辅助服务市场,如图 4、5 所示。

MT 具有良好的经济性及出力稳定性,24 h 总竞价出力几乎均处于满负荷运行状态,MT 参数市场为 VPP 主要收入来源。尽管 MT 的投入有效提升 VPP 经济收益,但在碳交易机制引入电力市场并且碳交易市场日益完善的背景下,调用 MT 需要支付高额的碳交易权购买成本,从而制约了 VPP 经济性的提升。探究碳交易机制引入后各单元出力情况,对 VPP 竞价策略的制定与能源结构的调整起到关键作用。引入碳交易机制各单元竞价出力情况如图 6、7 所示。

计及碳交易的 VPP 总收益为 18 975 \$,与无碳交易 VPP 对比收益略有下降,通过对比图 4、6 和图 5、7,可得结论如下。

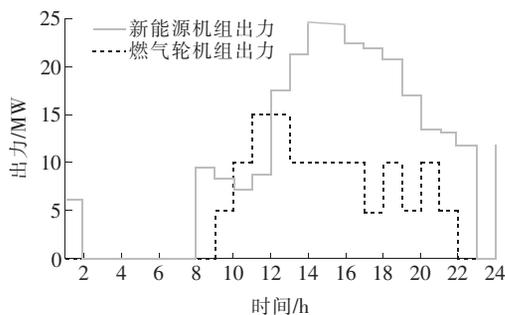


图 4 无碳交易约束主能源市场中各单元竞价出力情况

Figure 4 Unit bidding output in the main energy market without carbon trading constraint

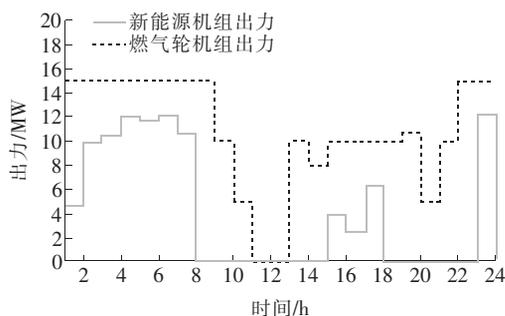


图 5 无碳交易约束辅助服务市场中各单元竞价出力情况

Figure 5 Unit bidding output in the ancillary service market without carbon trading constraint

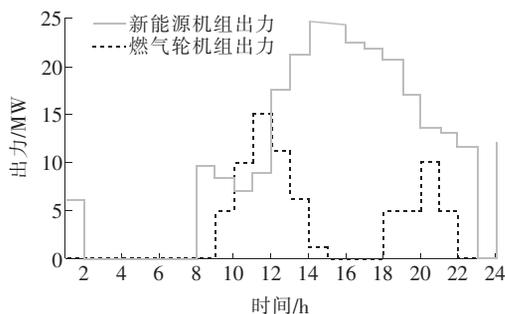


图 6 考虑碳交易主能源市场中各单元竞价出力情况

Figure 6 Unit bidding output in the main energy market considering carbon trading

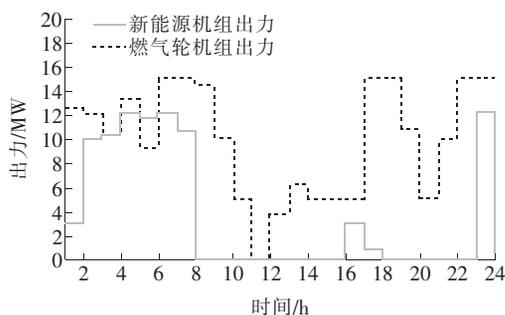


图 7 考虑碳交易辅助服务市场中各单元竞价出力情况

Figure 7 Unit bidding output in the ancillary service market considering carbon trading

1) 在 01:00—10:00、18:00—24:00 时, 新能源机组总竞价出力处于较低水平, VPP 需调用 MT 以满足负荷需求, 11:00—18:00 时可再生能源出力回升, 较大程度满足用户负荷需求。碳交易机制的引入提升了 MT 的运行成本, 为降低碳排放权购买成本需缩减 MT 竞价出力大小。因此, MT 出力水平产生显著下降。

2) 碳交易权的购买使 MT 经济性产生明显下滑, 为使 VPP 收益最大化提升 VPP 经济性, 需加大可再生能源的出力水平。在当前算例下, 新能源机组出力已经达到饱和, 因此, 碳交易机制的引入对新能源机组竞价出力并未造成很大影响。

3) 该算例中可再生能源渗透率不高, 出力难以完全满足负荷需求, VPP 内清洁能源出售碳排放权所获收益小于 MT 机组购买碳排放权成本, 因而造成 VPP 总竞价收益略有下降, VPP 总竞价出力水平有所下滑。

碳交易机制的引入使得 VPP 获利更具多元化, 合理调整 VPP 内新能源机组以及 MT 机组竞价出力大小, 可通过较小的经济成本获取较大的环境收益。该算例中考虑碳排放交易前、后, MT 竞价总出力由 383.8 下降至 316.2 MW·h, 而其经济总收益仅下降 98 \$。因此, 碳交易机制的引入在一定程度上保障了 VPP 运营商的经济收益, 也有效降低了区域内污染物以及温室气体的排放水平, 具有经济与社会意义。

未来随着对环境要求的提升, 电力市场中碳交易价格将逐渐提升, 为进一步分析碳交易机制的引入对 VPP 运行以及竞价策略的影响, 基于原始竞价模型对碳交易价格进行调整, 分别取原始碳价的 110%、130%、150%、200% 进一步分析。

不同碳交易价格下 MT 竞价出力水平如图 8 所示。结合图 4~7 可以看出, 碳交易机制的引入直接影响了 MT 竞价出力的大小, 且随着碳交易价格的提升未避免更高碳交易成本 MT 在日前市场中总竞价出力呈现下降趋势。

不同碳交易价格下 VPP 竞价收益大小如表 2 所示。VPP 竞价收益随着碳交易机制的引入以及碳交易价格的提升, 收益呈现先下降后提升的趋势, 分析结果: ①碳交易机制的引入使得 MT 发电成本提

升,MT 出力下滑但仍处于较高水平,在低碳交易价格下,出售碳排放权所获收益小于购买碳排放权成本因而造成 VPP 总竞价收益略有下降;②随着碳交易价格的提升,MT 出力进一步下滑,为满足用户用能需求需调用新能源机组,新能源机组因出力不产生碳排放可获得一定的碳权补贴,在满足 VPP 内 MT 出力后可将碳权出售以获取更高收益,因此随着碳交易价格升高,VPP 竞价收益可获得提升;③考虑未来 VPP 中新能源机组渗透率逐渐提升,碳交易机制的引入可使其在电力市场中更具竞争力,新能源机组收益的提升也可推动可再生能源的持续发展。

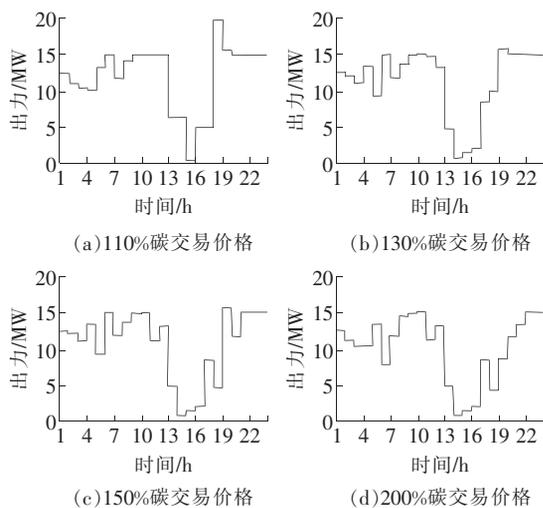


图 8 不同碳交易价格下 MT 竞价出力

Figure 8 MT bidding output under different carbon trading prices

表 2 不同碳交易价格 VPP 竞价收益

Table 2 VPP revenue under different carbon trading prices

碳价比率/%	收益/\$	碳价比率/%	收益/\$
原始	19 073	130	19 376
100	18 975	150	19 733
110	19 084	200	20 798

4 结语

该文构建了辅助服务市场开放背景下的虚拟电厂碳—电一体化交易竞价策略的分析模型,进一步分析碳交易机制的引入对虚拟电厂竞价策略和多样化分布式电源出力的影响。碳交易机制的引入可有效降低碳排放水平,降低温室气体与污染物的排放量,依托市场机制高效灵活的推动了 VPP 内部能源结构进行调整,以经济手段促进了可再生能源的发

展。VPP 参与碳交易市场使 VPP 收益多元化,对推进市场机制的建立以及制度的探索起到了积极作用。

参考文献:

- [1] 刘鑫,吴红斌,王鲸杰,等. 市场环境下考虑需求响应的虚拟电厂经济调度[J]. 中国电力,2020,53(9):172-180.
LIU Xin, WU Hongbin, WANG Jingjie, et al. Economic dispatch of a virtual power plant considering demand response in electricity market environment[J]. Electric Power, 2020, 53(9):172-180.
- [2] 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,2014,38(13):92-102.
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain output from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):92-102.
- [3] 郑宇,李杨,焦丰顺,等. 含风电机组与电转气设备的虚拟电厂竞价策略[J]. 电力建设,2017,38(7):88-95.
ZHENG Yu, LI Yang, JIAO Fengshun, et al. Bidding strategies for virtual power plants including wind power generation units and power-to-gas facilities[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(7):88-95.
- [4] 何黎君,程杉,陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020,48(11):10-17.
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11):10-17.
- [5] 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):1759-1766.
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):1759-1766.
- [6] Peik-Flerfeh, Malahat, Seifi, et al. Decision making of a virtual power plant under uncertainties for bidding; in a day-ahead market using point estimate method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1):88-98.

- [7] 赵洪山,刘然.奖惩机制下虚拟电厂优化调度效益分析[J].电网技术,2017,41(9):2840-2846.
ZHAO Hongshan,LIU Ran. Eenefit analysis of optimal schedule of virtual power plant under reward-punishment mechanism[J]. Power System Technology,2017,41(9):2840-2846.
- [8] 胡泽斌,王进,王珑,等.含储热罐的热—电虚拟电厂双阶段优化调度[J].智慧电力,2019,47(11):79-85.
HU Zebin,WANG Jin,WANG Long,et al. Two-stage optimal dispatching of thermo-electric virtual power plant with heat storage tank[J]. Smart Power,2019,47(11):79-85.
- [9] Mashhour E, Moghaddas-Tafreshi S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: Problem formulation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (2):949-956.
- [10] 许喆,陈玮,丁军策,等.考虑省间差异及可再生能源优先消纳的南方区域市场主体同台竞价机制[J].供用电,2020,37(5):73-78.
XU Zhe,CHEN Wei,DING Junce,et al. Southern regional electricity market bidding mechanism considering regional differences and preferential consumption of renewable energy[J]. Distribution & Utilization,2020,37(5):73-78.
- [11] 董文略,王群,杨莉.含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型[J].电力系统自动化,2015,39(9):75-81.
DONG Wenlue,WANG Qun,YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(9):75-81.
- [12] 周亦洲,孙国强,黄文进,等.多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6780-6790.
ZHOU Yizhou,SUN Guoqiang,HUANG Wenjin,et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(23):6780-6790.
- [13] 潘晨,滕欢,宫毓斌,等.用户侧互动模式下的微电网优化协调调度策略研究[J].电测与仪表,2019,56(5):51-56.
PAN Chen,TENG Huan,GONG Yubin,et al. Research on optimal coordination scheduling strategy of micro-grid in user-side interactive mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2019,56(5):51-56.
- [14] 孙国强,袁智,许晓慧,等.碳排放约束下虚拟电厂鲁棒优化竞标模型[J].电力自动化设备,2017,37(2):97-103.
SUN Guoqiang,YUAN Zhi,XU Xiaohui,et al. Bidding model based on robust optimization for virtual power plant under Carbon emission constraint [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):97-103.
- [15] 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.
ZHOU Renjun,SUN Hong,TANG Xiafei,et al. Carbon capture unit and wind power under double Carbon constraint [J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(6):1675-1683.
- [16] 张立辉,戴谷禹,聂青云,等.碳交易机制下计及用电行为虚拟电厂经济调度模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):154-163.
ZHANG Lihui,DAI Guyu,NIE Qingyun,et al. Economic dispatch model of virtual power plant considering electricity consumption under a Carbon trading mechanism [J]. Power System Protection and Control,2020,48(24):154-163.
- [17] 刘铠诚,何桂雄,郭炳庆.考虑电价碳价及风功率不确定性的风—火虚拟电厂运行优化策略[J].电力科学与技术学报,2018,33(3):101-107.
LIU Kaichen,HE Guixiong,GUO Bingqing. Optimal strategy for wind-fire virtual power plant considering uncertainties of wind power fluctuations and price randomness of electricity and Carbon[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(3):99-105.
- [18] 黄宗龙,江修波,刘丽军.低碳化背景下配电网“源—储—荷”多目标优化配置[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):36-45.
HUANG Zonglong,JIANG Xiubo,LIU Lijun. Multi-objective optimal allocation of "generation-storage-load" under the low-carbon background [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(5):36-45.
- [19] 常小强,宋政湘,王建华.基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J].高压电器,2020,56(8):1-5.
CHANG Xiaoqiang,SONG Zhengxiang,WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on Monte Carlo algorithm[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(8):1-5.
- [20] 谷万江,王飞,田小蕾,等.考虑储能及碳交易成本的电热联合系统优化调度策略[J].电网与清洁能源,2020,36(7):109-118.
GU Wanjiang,WANG Fei,TIAN Xiaolei,et al. Optimal scheduling strategy for combined electric and thermal systems considering energy storage and carbon transaction costs[J]. Power System and Clean Energy,2020,36(7):109-118.