

# Research on the Participation Model of Virtual Power Plants in the Spot Market

Yongguo Zhou

Qianbei Power Plant, Guizhou Xidian Electric Power Co., Ltd., Bijie, Guizhou, 551800, China

## Abstract

This paper focuses on the study of virtual power plants (VPPs) with a high proportion of renewable energy participating in power spot market and carbon market coordinated trading mechanisms. It constructs a multi-market joint optimization model that integrates green certificate trading, carbon quota constraints, and electricity-carbon coupling price signals. By actively introducing carbon intensity constraints and marginal carbon emission costs, the emission reduction benefits of VPPs in peak-shaving and valley-filling as well as source-load interaction are quantitatively evaluated. A stochastic mixed-integer linear programming model based on the objective of maximizing comprehensive revenue is established. Simulation verification is conducted based on typical regional power market data. The results show that the proposed model can effectively improve the dispatch flexibility of VPPs in a multi-market environment, providing a practical path for the electricity-carbon coordination mechanism under a new-type power system.

## Keywords

carbon trading; green certificate trading; virtual power plant; trading mechanism

## 虚拟电厂参与现货市场交易模型研究

周永国

贵州西电电力股份有限公司黔北发电厂，中国·贵州 毕节 551800

## 摘要

本文注重研究含高比例可再生能源的虚拟电厂参与电力现货市场和碳市场协同交易机制，构建融合绿证交易、碳配额约束、电碳耦合价格信号的多市场联合优化模型。通过积极引入碳强度约束、边际碳排放成本，量化评估VPP在削峰填谷、源荷互动中的减排效益，建立基于综合收益最大化目标的随机混合整数线性规划模型。基于典型区域电力市场数据开展仿真验证，结果表明所提模型能有效提高VPP在多市场环境下的调度灵活性，为新型电力系统下电碳协同机制提供实践路径。

## 关键词

碳交易；绿证交易；虚拟电厂；交易机制

## 1 引言

在新型电力系统加速构建背景下，分布式可再生能源大规模接入对电网调度灵活性、碳排放管控提出了更高要求。传统电力市场机制难以统筹风电、光伏等间歇性电源、可控负荷及储能单元的协同运行，亦缺乏对机组碳排放强度的精细化约束。虚拟电厂（Virtual Power Plant, VPP）通过集中异构分布式资源，形成具备可控能力的调度主体，有效提高系统对于高比例可再生能源的消纳能力。当前，绿证交易机制为VPP履行可再生能源电力消纳责任提供市场化路径，碳排放权交易则通过碳成本内生引导低碳调度决策。基于此，本文研究VPP在电力现货市场、绿证市场、全国碳市场的各方面融合交易行为，构建考虑碳配额约束、绿证

供需平衡及源荷储协同优化的联合出清模型，量化分析电-证-碳三市场交互对于VPP运行策略、减排效益的影响，为支撑“双碳”目标下电力市场机制创新提供有力依据。

## 2 虚拟电厂参与现货市场交易机制分析

### 2.1 虚拟电厂参与市场交易机制原理

虚拟电厂利用信息通信技术和先进能量管理系统，集中分布式光伏、风电、储能装置、可控负荷、传统调峰机组等资源，构建具备统一调度能力的虚拟市场主体。其核心机制在于通过数据驱动的协同优化算法，将原本分散、不可控的分布式能源转化为可调度、可交易的灵活性资源，从而参与电力系统多时间尺度市场，有效提高新能源出力的可预测性，并通过提供调频、调峰、电压支撑等辅助服务，进一步增强电网对高比例可再生能源接入的适应能力，缓解系统惯量下降、频率稳定性恶化问题。

在市场参与维度，VPP可嵌入双边合约、日前市场、

【作者简介】周永国（1977-），男，中国贵州遵义人，本科，工程师，从事集控运行研究。

辅助服务市场、备用市场、实时平衡市场等多层次交易体系，双边合约锁定中长期收益，规避现货价格波动风险；日前市场通过滚动优化申报策略，有效实现收益最大化；辅助服务、备用市场则利用储能需求响应资源提供容量支撑，获取容量补偿；实时市场则用于修正预测偏差和应对突发供需失衡。尤其在含高比例间歇性电源的场景下，VPP 通过多市场协同报价机制，综合体现电能价值、辅助服务价值、容量价值，为构建电-碳-证协同的新型电力市场体系提供重要载体（见图 1）。

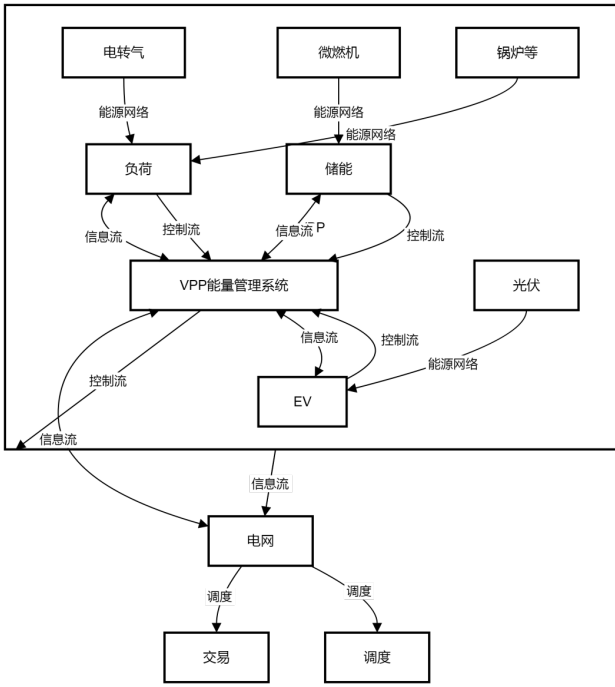


图 1 VPP 示意图

## 2.2 碳市场交易模型

本文基于碳排放强度基准法构建虚拟电厂碳交易成本机制，将燃气轮机和热电联产机组的实际排放强度进行对比，超排部分必须购入碳配额，富余配额可入市交易获益；电转气装置由于消纳绿电制氢具备负碳属性，其运行等效形成碳汇，在履约核算中抵扣系统碳成本，实现碳资产内部对冲，加强虚拟电厂在电碳耦合市场中的低碳调度能力。本文构建虚拟电厂参与碳市场的统一碳交易成本模型为：

$$C_t^c = c_c \left( \sum_{k=1}^{N_{GT}} P_{k,t}^{GT} (A_k - D_k) + \sum_{m=1}^{N_{CHP}} P_{m,t}^{CHP} (A_m - D_m) - \sum_{n=1}^{N_{P2G}} G_{n,t}^{P2G} \right) \quad (1)$$

其中， $C_t^c$  表示  $t$  时段虚拟电厂整体碳交易净成本； $c_c$  为碳排放权交易价格（元/tCO<sub>2</sub>）； $N_{GT}$ 、 $N_{CHP}$ 、 $N_{P2G}$  分别为燃气轮机、热电联产机组与电转气装置的台数； $P_{k,t}^{GT}$ 、 $P_{m,t}^{CHP}$  为对应机组在  $t$  时段的有功出力（MW）； $A_k$ 、 $A_m$  为其单位发电碳排放强度（tCO<sub>2</sub>/MWh），

$D_k$ 、 $D_m$  为政府基于碳排放强度基准分配的单位配额（tCO<sub>2</sub>/MWh）； $G_{n,t}^{P2G}$  表示 P2G 装置在  $t$  时段的产气功率，等效为负碳排放量（tCO<sub>2</sub>）。

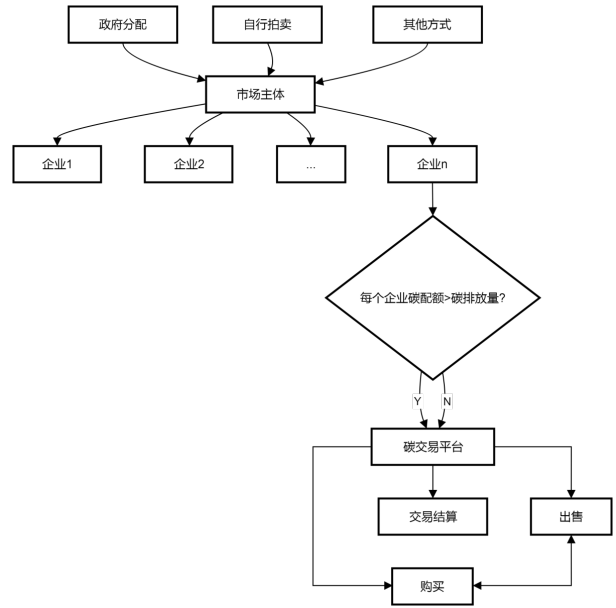


图 2 碳交易模型

## 2.3 绿证交易模型

绿证交易机制作为可再生能源配额制的有效支撑，通过标准化环境权益凭证实现跨区域流通，有效解决分布式电源地理分布不均产生的消纳限制<sup>[1]</sup>。虚拟电厂集中风电、光伏等零碳资源，不仅获取电能量市场收益，还可将其发电量对应的绿证在统一交易平台出售，形成双重收益结构，进一步提高非水可再生能源发电的环境价值，降低虚拟电厂的度电综合成本，增强其中长期合约谈判中的价格竞争力<sup>[2]</sup>。配额义务主体通过购买绿证履行消纳责任，规避行政惩罚，提升市场履约灵活性，且绿证、电能解耦交易模式打破地域限制，促进可再生能源在大范围内优化配置，推动电力市场和环境权益市场进行深度融合，为构建高效、公平、低碳的新型电力市场体系提供制度基础。

本文通过绿证交易机制量化虚拟电厂（VPP）在中长期合约中的电价构成，核心表达式为：

$$\pi_{con}^{VPP} = \pi_G^{VPP} + \pi_{con}^{TPu} \quad (2)$$

其中， $\pi_{con}^{VPP}$  表示虚拟电厂参与电力市场所签订的综合合约电价（元/kWh）； $\pi_G^{VPP}$  为其所聚合的风电、光伏等可再生能源发电单元通过绿证交易获得的附加收益折算至单位电量的价格，反映环境权益的货币化价值； $\pi_{con}^{TPu}$  为不含绿证收益的基准电能量合约价格，由电力供需关系和系统边际成本决定。约束条件  $\pi_G \leq \pi_{con}^{avg}$  表明绿证溢价受市场平均合约电价  $\pi_{con}^{avg}$  的上限约束，防止环境权益过度资本化导致价格扭曲。

### 3 算例分析

#### 3.1 算例说明

为了验证所提电-碳-证协同交易模型的有效性,构建含燃气机组、风电、光伏、100 MWh 电池储能的虚拟电厂仿真系统,设定碳价 20 /t、绿证价格 6.9 /(MW·h),设计三类对比情景:基准情景下 VPP 独立运行,不参与环境权益市场;情景二积极引入碳交易机制,通过碳成本内化抑制高碳机组出力;情景三同步融合碳市场、绿证交易。

#### 3.2 结果分析

为了深入研究不同市场参与模式对虚拟电厂调度行为的影响,本文基于仿真结果构建调度对比分析表(见下表)。结果表明,随着碳交易、绿证交易机制不断引入,燃气机组出力由 2598 MW·h 逐步降至 2329 MW·h,下降幅度达到 10.4%,反映碳成本约束有效抑制高碳电源运行。可再生能源并网电量则从 982 MW·h 提升至 1320 MW·h,增幅 34.4%,说明绿证收益显著增强风电、光伏的经济调度优先级<sup>[3]</sup>。

表 1 VPP 机组调度结果

情景	参与市场机制	燃气机组出力 (MW·h)	可再生能源并网电量 (MW·h)
1	无碳/绿证交易	2598	982
2	仅参与碳交易	2532	1199
3	同时参与碳与绿证交易	2329	1320

#### 3.3 VPP 收益

为了系统评估多市场参与对虚拟电厂经济性的影响,构建收益-成本结构对比表(见下表)。结果表明,情景 3(同步参与碳市场和绿证交易)总运行成本降至 15.80 万美元,较情景 1 和 2 分别降低 3.75%、1.88%,主要原因是绿证收益摊薄可再生能源边际成本,合理优化机组组合<sup>[4]</sup>。预测偏差惩罚成本由 1.03 万下降至 0.26 万美元,下降幅度 74.7%,反映环境权益收益增强调度鲁棒性。碳交易收益从

0.25 万提升至 0.52 万美元,绿证贡献 0.79 万美元,推动净收益由 4.78 万增至 6.67 万美元。尤其在碳约束、绿证激励协同作用下,虚拟电厂主动提升风电、光伏渗透率,实现经济性和低碳性双重优化,验证电-碳-证耦合机制对新型市场主体的引导效能<sup>[5]</sup>。

表 2 VPP 收益

情景	运行成本 (万)	惩罚成本 (万)	碳交易收益 (万)	绿证收益 (万)	净收益 (万)
1	16.52	1.03	—	—	4.78
2	16.2	0.58	0.25	—	5.68
3	15.8	0.26	0.52	0.79	6.67

### 4 结语

本文构建的电-碳-证协同交易模型有效分析了碳市场与绿证机制对含高比例可再生能源虚拟电厂的调度引导作用。仿真结果表明,双市场联动显著抑制高碳机组出力,提升风电、光伏消纳水平,降低系统碳强度,同时通过环境权益变现增强经济可行性。在未来研究中,需进一步考虑碳配额动态分配机制、绿证与电力耦合出清规则、不确定性出力下的鲁棒优化策略,以支撑虚拟电厂在多时间尺度环境下的精细化决策。

#### 参考文献

- [1] 郭育村. 虚拟电厂参与现货市场交易模型研究[D]. 华北电力大学,华北电力大学(北京),2023.
- [2] 宋懿洋. 计及虚拟电厂降维模型的电力现货市场出清方法研究[D]. 华北电力大学,华北电力大学(北京),2024.
- [3] 张钧钊. 虚拟电厂参与电-碳联合市场的交易机制及竞价策略研究[D]. 河南:郑州大学,2023.
- [4] 王千淳,杜欣慧,赵薇,等. 考虑碳交易下虚拟电厂参与现货市场竞价和调度策略[J]. 现代电力,2024,41(1):152-160.
- [5] 李继传,罗朝春,王宇,等. 适应大峰谷差的虚拟电厂市场化交易机制研究[J]. 湖南电力,2025,45(2):129-136.