

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.01.013

基于电碳综合边际定价的虚拟电厂 P2P 能源交易模型

王骏滕^{1,2}, 王辰煜^{1,2}, 刘兴宇^{1,2}, 李天然^{1,2}, 季振亚^{1,2}

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023;

2. 江苏省综合能源设备及集成国际联合实验室, 江苏 南京 210023)

摘要:为应对配电网络低碳化运行的挑战,并充分挖掘系统中分布式资源的灵活调控潜力,文中构建一种基于电碳综合边际定价的虚拟电厂(virtual power plant, VPP)双层点对点(peer-to-peer, P2P)交易模型。上层由配电网运营商(distribution system operator, DSO)建立基于碳排放流(carbon emission flow, CEF)技术的碳感知最优潮流模型,在此基础上计算出电碳综合边际价格,DSO可利用该价格信号协调VPP低碳调度。下层组建多VPP合作联盟,可将电动汽车规模化整合并引入碳信号引导的电动汽车灵活调度机制,建立基于贡献度的非对称纳什议价交易模型,各VPP在价格信号的引导下平衡个体与联盟利益,制定生产与交易的最优策略。然后,采用自适应交替方向乘子法(adaptive-scaling alternating direction method of multipliers, AS-ADMM)对模型进行求解,解决变量耦合导致的收敛速度问题。最后,采用改进的IEEE 33节点配电系统进行仿真验证。案例分析结果表明,所提交易模型可以通过提高分布式能源利用效率并优化负荷分布,在降低VPP运营成本的同时减少配电网碳排放。

关键词:虚拟电厂(VPP);点对点(P2P)能源交易;碳感知最优潮流;配电网节点边际电价;非对称纳什议价;自适应交替方向乘子法(AS-ADMM);负荷调度

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2026)01-0134-10

0 引言

目前,过度碳排放导致气候变化日益严峻,能源供应侧的脱碳运行变得极其迫切。鉴于此,各国纷纷提出建设以新能源为主体的新型电力系统。然而,随着新能源装机规模的不断扩大,配电网中大量分布式新能源发电存在弃风弃光现象^[1]。与此同时,以电动汽车为代表的灵活负荷侧调节资源参与调度能够显著提高电网的灵活调控能力,促进可再生能源的消纳^[2],但这些资源容量小、数量多,以个体形式参与电网调控的可操作性低^[3]。为充分挖掘灵活性资源的调节潜力,虚拟电厂(virtual power plant, VPP)技术可对灵活性资源进行规模化聚合,进而实现高效统一调度^[4-8]。

为挖掘VPP的减碳能力,文献[9]利用VPP技术聚合分布式电力资源并建立相应的碳减排调控模型;文献[10]引入VPP奖惩阶梯型碳交易模型;文献[11]建立绿证交易机制下的低碳化运营。然而,现有研究大多将碳排放成本计入发电侧后进行交易,交易伊始便增加了供应侧的经济负担,易导致激励机制失衡^[12-13]。该方法未能充分体现供需双方对碳排放的双重影响。

为重新定义用户方的排放责任并补充现有的

碳排放权分配,碳排放流(carbon emission flow, CEF)技术已成为一种有效手段。例如,文献[14]采用双重碳税机制,向供需双方征收碳税;文献[15]提出源荷两侧协调互动的两阶段优化调度模型,从负荷侧降低碳排放量;文献[16]构建两阶段低碳优化模型,在电力系统经济调度的基础上利用需求响应实现低碳运营;文献[17]提出一种两阶段框架,通过电力-碳交易中的能源安排,构建碳排放量最低的综合能源系统。上述研究大多侧重于系统层面的低碳优化运营,虽然有助于提升系统环保性,但未能充分激发用户侧的主动减排意愿,可能损害交易商的经济利益和交易偏好,进而限制电力交易的灵活性。此外,现有研究在VPP多主体资源协同调度方面仍存在显著局限,未能有效提高VPP内部清洁能源的利用效率,反而严重限制了系统整体的低碳减排潜力。

点对点(peer-to-peer, P2P)能源交易模式^[18-19]的兴起,为VPP多主体资源协同调度问题提供了创新思路。文献[20]采用交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)分布式求解综合能源微网间的纳什谈判合作运行模型。文献[21]考虑电动汽车充电策略和负荷侧需求响应,构建了一个两阶段纳什议价的智能园区P2P交易模型。现有研究在电力系统P2P能源交易领域已取得显著进展,但仍面临两个关键挑战:(1)现有

收稿日期:2025-06-24;修回日期:2025-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107100)

P2P 交易模型大多建立在简化的网络假设基础上, 未能充分考虑实际配电系统的拓扑约束, 无法确保系统的安全稳定运行; (2) 在求解方法上, 多数文献依赖 ADMM^[22-23], 但传统 ADMM 在处理含网络拓扑约束和 CEF 计算的复杂优化问题时, 收敛性和计算效率均受限。

针对现有研究的不足, 文中构建一种基于电碳综合边际定价的虚拟电厂 P2P 能源交易框架。在上层, 由配电网运营商 (distribution system operator, DSO) 建立基于 CEF 技术的碳感知最优潮流出清模型。该模型对发、用电双侧电能与碳排放进行时空耦合建模, 实现电力潮流和 CEF 的协同优化。基于此模型, 文中设计出一种配电网层面的电碳综合价格机制。DSO 可以利用价格信号引导而非直接监管的方式协调 VPP 低碳调度, 从而激发 VPP 的主动减排意愿, 更好地保护 VPP 的隐私和交易偏好。在下层, VPP 规模化整合资源并引入碳信号引导的电动汽车灵活调度机制, 建立基于贡献度的非对称纳什议价模型并采用自适应交替方向乘子法 (adaptive-scaling alternating direction method of multipliers, AS-ADMM) 进行分布式求解, 其自适应步长机制在求解文中模型时, 显著提升了算法的收敛性能。基于 IEEE 33 节点配电系统的案例研究表明, 不同网络拓扑位置 and 不同分布式新能源构成的各 VPP, 其运营成本与碳排放量均显著降低, 验证了所提交易模型在实现降本与减碳双重目标方面的有效性。

1 基于 CEF 的多 VPP 双层交易框架

文中提出的双层交易框架如图 1 所示, 简要描述如下。

(1) 从物理层面, 该架构由 DSO、多个 VPP 运营商以及连接 VPP 的公共耦合点 (point of common coupling, PCC) 组成, VPP 与 DSO 间通过 PCC 进行能量交互。每个 VPP 都由分布式柴油机、可再生能源发电与电动汽车集群构成。

(2) 从市场层面, 该架构由电碳耦合的 P2P 市场与用户侧-电网 (peer to grid, P2G) 直接交易市场共同组成, 各 VPP 运营商首先在 DSO 的价格信号引导下参与 P2P 市场交易, 以合作博弈的形式交易电能, 并将过剩的电能或供应缺口在 P2G 市场完成出清。

(3) 从信息传递层面, 上层 DSO 根据 P2P 市场交易结果, 建立碳感知最优潮流模型, 并生成价格信号。各 VPP 作为代理商, 聚合分布式能源和电动

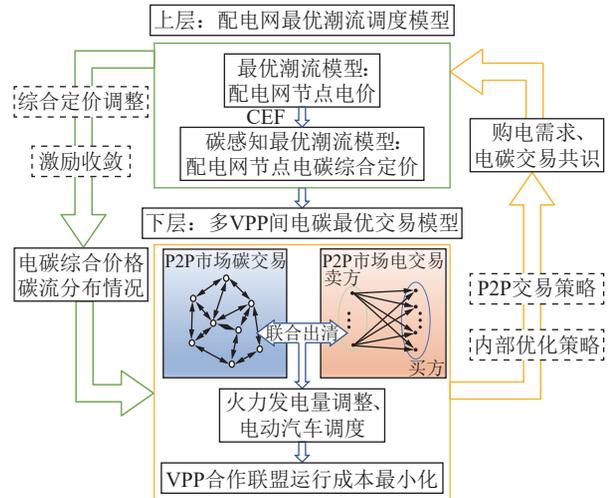


图 1 多 VPP 双层交易框架

Fig.1 Multi-VPP two-layer trading framework

汽车负荷, 根据上层价格信号进行纳什议价, 通过调整分布式柴油机发电、电动汽车充电计划, 寻求交易最优解, 并将 P2P 市场的交易均衡解反馈给上层 DSO。

2 双层交易模型的建立

2.1 上层模型

2.1.1 配电网 CEF 模型

CEF 将发电机侧的碳排放视为伴随电力潮流的虚拟流, 该虚拟流从发电节点注入并输送至用户端。通过追踪其分布, 可确定电网内各节点的碳排放强度。为量化分析此类从发电端到最终消费者端的虚拟排放流, 文献[24]提出基于网络功率和比例分摊原则的碳排放核算机制的改进模型。

图 2 为 CEF 模型中伴随功率流的碳排放情况, 该模型量化了单位电能潮流所承担的碳排放量, 并据此制定电碳综合价格。

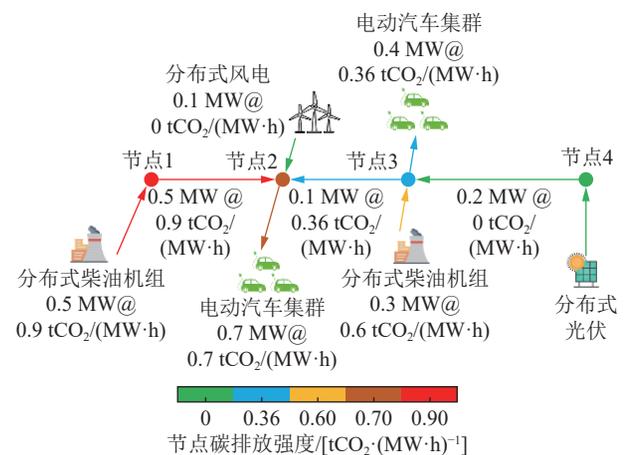


图 2 CEF 和节点碳排放强度示意

Fig.2 Schematic diagram of CEF and node carbon emission intensity

以节点 i 为例, 假设 Ω_i^+ 为配电网中流入节点 i 的节点集合, 节点碳排放强度 $e_{i,t}$ 等于 t 时刻所有注入节点 i 的碳排放强度的加权平均值, 可以表示为:

$$e_{i,t} = \frac{\sum_{j \in \Omega_i^+} e_{j,t} (P_{ij,t} - R_{ij} I_{ij,t}^2) + e_{i,t}^{FM} P_{i,t}^{FM}}{\sum_{j \in \Omega_i^+} (P_{ij,t} - R_{ij} I_{ij,t}^2) + P_{i,t}^{FM} + P_{i,t}^{RES}} \quad (1)$$

式中: $e_{j,t}$ 为集合 Ω_i^+ 中节点 j 在 t 时刻的碳排放强度; $I_{ij,t}$ 、 R_{ij} 分别为节点 i 、 j 间 t 时刻的电流和线路阻抗; $P_{ij,t}$ 、 $P_{i,t}^{FM}$ 、 $P_{i,t}^{RES}$ 分别为 t 时刻节点 j 流入节点 i 的功率流、节点 i 自身分布式柴油机组发电功率与新能源发电功率; $e_{i,t}^{FM}$ 为 t 时刻节点 i 的柴油机组发电碳排放强度, 具体如式(2)所示。

$$e_{i,t}^{FM} = 0.9 \frac{P_{i,t}^{FM}}{P_{i,t}^{FM} + P_{i,t}^{RES}} \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (2)$$

式中: Ω^{VPP} 为配电网中连接 VPP 的节点集合。

从节点 i 流出的线路碳强度为节点 i 的碳排放强度。

2.1.2 碳感知最优潮流模型

在所提出的双层市场模型中, 由于下层 VPP 不具备全天候独立平衡供需的能力, 因此不平衡的电能在配电网层面完成出清。上层 DSO 基于 P2P 交易情况建立碳感知最优潮流模型。在模型中, 与电能相关的成本可以表示为 t 时刻从上级电网购买电力 P_t^b 的成本; 与碳排放相关的成本可以表示为节点碳排放量 $E_{i,t}$ 的成本之和。具体表示为:

$$\min \sum_{t=1}^T \lambda_t P_t^b + \sum_{i \in \Omega} \sum_{t=1}^T \lambda_t^{CT} E_{i,t} \quad (3)$$

式中: λ_t 为 t 时刻从上级电网购买电力的价格; λ_t^{CT} 为 t 时刻外部碳排放价格; Ω 为配电网中所有节点的集合; T 为交易时段总数, 取 24 h。

模型最优潮流约束^[25]如下:

$$\sum_{i,j \in \Omega} [P_{ij,t} - (P_{ij,t} - R_{ij} I_{ij,t}^2) + G_{i,t} U_{ij,t}^2 - P_{i,t}^{inj}] = 0: \alpha_{i,t} \quad \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{i,j \in \Omega} [Q_{ij,t} - (Q_{ij,t} - X_{ij} I_{ij,t}^2) - B_{i,t} U_{ij,t}^2] = 0: \beta_{i,t} \quad \forall t \quad (5)$$

$$\sum_{i,j \in \Omega} [U_{i,t}^2 - 2(P_{ij,t} R_{ij} + Q_{ij,t} X_{ij}) + I_{ij,t}^2 (R_{ij}^2 + X_{ij}^2)] = U_{j,t}^2: \gamma_{i,t} \quad \forall t \quad (6)$$

$$\sum_{i,j \in \Omega} [(P_{ij,t} - R_{ij} I_{ij,t}^2)^2 + (Q_{ij,t} - X_{ij} I_{ij,t}^2)^2] \leq S_{ij,t}^2: \delta \quad \forall t \quad (7)$$

$$P_{i,t}^{inj} = P_{i,t}^l - P_{i,t}^{FM} - P_{i,t}^{RES} \quad \forall i \in \Omega; \forall t \quad (8)$$

虚拟 CEF 的限制如下:

$$\frac{1}{2} \sum_{i,j \in \Omega} e_{j,t} I_{ij,t}^2 R_{ij} + \frac{1}{2} \sum_{i \in \Omega} \left(e_{i,t}^{FM} P_{i,t}^{FM} + \frac{1}{2} P_{i,t}^l e_{i,t} \right) \leq E_{i,t}: k_{i,t} \quad \forall t \quad (9)$$

式中: $Q_{ij,t}$ 、 $S_{ij,t}$ 、 $U_{ij,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 、 j 间的无功功率、视在功率和电压; X_{ij} 为节点 i 、 j 间的线路电抗; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 、节点 j 的电压; $G_{i,t}$ 、 $B_{i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 上的电导和电纳; $\alpha_{i,t}$ 、 $\beta_{i,t}$ 、 $\gamma_{i,t}$ 、 δ 、 $k_{i,t}$ 分别为式(4)—式(9)对应的对偶变量; $P_{i,t}^{inj}$ 、 $P_{i,t}^l$ 分别为 t 时刻节点 i 净负荷和负荷需求。

对于常规负载节点, 只需要计算负载消耗产生的碳排放量。对于含 VPP 节点, 必须考虑发电注入和负荷消耗产生的碳排放。根据 CEF 模型的假设, 分布式发电量伴随并行的虚拟 CEF, 在节点之间进行传输并最终被配电网中的负荷消耗。因此, 文中假设发电商和消费者平等分担碳排放责任, 即所有节点处发电商和消费者双方产生的碳排放量均乘以 1/2。

2.1.3 电碳综合价格的制定

类比传统最优潮流中节点边际电价的推导机制, 文中从碳感知最优潮流中推导出电碳综合节点边际价格 $\lambda_{i,t}^{CDLMP}$ 。 $\lambda_{i,t}^{CDLMP}$ 的组成包含两部分: (1) 功率平衡约束的对偶变量 $\alpha_{i,t}$ (即节点边际价格); (2) 节点碳排放边际价格 $\lambda_{i,t}^C$, 其为碳排放约束的对偶变量 $k_{i,t}$ 和碳排放强度 $e_{i,t}$ 的积。

$$\lambda_{i,t}^C = k_{i,t} e_{i,t} \quad (10)$$

$$\lambda_{i,t}^{CDLMP} = \alpha_{i,t} + \lambda_{i,t}^C \quad (11)$$

2.2 下层模型

2.2.1 VPP 综合收益模型

VPP 通过 PCC 连接到配电网中, 在一个交易周期内, t 时刻 VPP _{i} 运营总成本 $C_{i,t}$ 的目标函数为:

$$\min C_{i,t} = C_{i,t}^{FM} + C_{i,t}^{P2G} + C_{i,t}^C + C_{i,t}^{P2P} - C_{i,t}^{EV} \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (12)$$

式中: $C_{i,t}^{FM}$ 为 t 时刻 VPP _{i} 中分布式柴油机组发电成本; $C_{i,t}^{P2G}$ 、 $C_{i,t}^{P2P}$ 、 $C_{i,t}^C$ 分别为 t 时刻 VPP _{i} 在 P2G 市场、P2P 市场中的交易成本和缴纳的碳排放成本; $C_{i,t}^{EV}$ 为 t 时刻 VPP _{i} 中电动汽车集群的调度收益。

各类成本计算公式如下。

(1) 分布式柴油机组发电成本:

$$C_{i,t}^{FM} = a_0 (P_{i,t}^{FM})^2 + b_0 P_{i,t}^{FM} \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (13)$$

式中: a_0 、 b_0 为分布式柴油机组发电成本函数的系数。

(2) P2G 市场交易成本:

$$C_{i,t}^{P2G} = \lambda_{i,t}^{P2G,S} P_{i,t}^{P2G,S} - \lambda_{i,t}^{P2G,B} P_{i,t}^{P2G,B} \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (14)$$

式中: $P_{i,t}^{P2G,B}$ 、 $P_{i,t}^{P2G,S}$ 分别为 t 时刻 VPP _{i} 在 P2G 市场

中向配电网买、卖的电功率; $\lambda_{i,t}^{P2G,B}$ 、 $\lambda_{i,t}^{P2G,S}$ 分别为 t 时刻 VPP_{*i*} 在 P2G 市场中向配电网买、卖电的价格。

(3) P2P 市场交易成本:

$$C_{i,t}^{P2P} = \sum_{j=1, j \neq i} \left(\lambda_{i,t}^{P2P,S} P_{i,t}^{P2P,S} - \lambda_{i,t}^{P2P,B} P_{i,t}^{P2P,B} \right) \quad \forall i, j \in \Omega^{VPP} \quad (15)$$

式中: $P_{i,t}^{P2P,B}$ 、 $P_{i,t}^{P2P,S}$ 分别为 t 时刻 VPP_{*i*} 在 P2P 市场中向其他运营商 j 买、卖的电功率; $\lambda_{i,t}^{P2P,B}$ 、 $\lambda_{i,t}^{P2P,S}$ 分别为 t 时刻 VPP_{*i*} 在 P2P 市场中的买、卖电的价格。

(4) 碳排放成本:

$$C_{i,t}^C = \lambda_{i,t}^C (P_{i,t}^I + P_{i,t}^{FM}) \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (16)$$

VPP 运营约束如下:

$$P_{i,t}^{P2G} + P_{i,t}^{P2P} = P_{i,t}^I - P_{i,t}^{RES} - P_{i,t}^{FM} \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{P2G,S} \perp P_{i,t}^{P2G,B} \geq 0 \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{P2P,S} \perp P_{i,t}^{P2P,B} \geq 0 \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{FM} \leq P_{i,t,max}^{FM} \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (20)$$

式中: $P_{i,t}^{P2G}$ 、 $P_{i,t}^{P2P}$ 分别为 t 时刻 VPP_{*i*} 在 P2G 市场和 P2P 市场的交易量; $P_{i,t}^{P2P,B}$ 、 $P_{i,t}^{P2P,S}$ 分别为 t 时刻 VPP_{*i*} 在 P2P 市场的买、卖电功率; $P_{i,t,max}^{FM}$ 为 t 时刻 VPP_{*i*} 中柴油机组发电上限; 符号“ \perp ”表示 VPP_{*i*} 不能同时买卖电。

式(17)表示各 VPP 内部的功率平衡; 式(18)、式(19)分别表示 VPP 在 P2G、P2P 市场中买卖电状态约束; 式(20)表示 VPP 中柴油机组的发电上下限约束。

2.2.2 碳信号引导的电动汽车灵活调度模型

电动汽车的用电需求和节点碳排放强度间的关系是协调电动汽车充电时间和求解的关键。通过各节点在该时段对应的碳强度信号指导电动汽车做出调度调整, 并根据调整后的电动汽车充电计划更新节点的碳排放强度, 最终收敛至最优解^[26]。

将节点 i 在 t_1 、 t_2 时刻之间的转移负荷量定义为 $\gamma_{(t_1,t_2)}^{EV}$ 。假设 $e_{i,t_1} > e_{i,t_2}$, 则电动汽车由 t_1 时刻调度到 t_2 时刻充电。则电动汽车调度收益为:

$$C_{i,t}^{EV} = \lambda_{i,t}^C (e_{i,t_1} - e_{i,t_2}) \gamma_{(t_1,t_2)}^{EV} \quad \forall i \in \Omega^{VPP} \quad (21)$$

电动汽车调度收益包括根据碳强度获得的碳收益和调度成本。在新一轮的电动汽车充电计划中, 节点 i 在 t_1 、 t_2 时刻的电动汽车充电量 $P_{i,t}^C$ 调整为:

$$P_{i,t}^C = \begin{cases} P_{i,t}^C - \gamma_{(t_1,t_2)}^{EV} & t = t_1; \forall i \in \Omega^{VPP} \\ P_{i,t}^C + \gamma_{(t_1,t_2)}^{EV} & t = t_2; \forall i \in \Omega^{VPP} \end{cases} \quad (22)$$

根据电动汽车的初始功率调度计划, 节点 i 在每一时刻都有相对应的碳强度, 所以任意两时刻间都存在碳强度差, 且两时刻间电动汽车最大可转移量为 $\gamma_{(t_1,t_2),max}^{EV}$ 。对于电动汽车来说, 可根据最大碳排

放收益确定负荷转移时间段:

$$(t_i, t_j) \in \arg \max \lambda_{i,t}^C (e_{i,t_i} - e_{i,t_j}) \gamma_{(t_i,t_j),max}^{EV} \quad \forall t_i, t_j \in T \quad (23)$$

在电动汽车获利的同时, 市场交易量也随之变化。电力系统可以根据负荷需求重新调整各时段的柴油机组发电量, 通过减少在高碳价时段的传统能源发电量来缓解局部拥堵现象。

3 非对称纳什议价模型求解

3.1 非对称纳什议价模型

在配电网与 VPP 合作联盟的双层结构中, 当面临供需不平衡时, 多个 VPP 组成合作联盟, 通过纳什议价来保证所有参与者都能接受的最大利益。根据纳什议价问题的定义, 将文中 VPP 合作联盟纳什议价模型的解 x_i^* 表示为:

$$x_i^* = \arg \max \prod_{i=1}^N (F_i - f_i(x)) \quad F_i \geq f_i(x) \quad (24)$$

式中: N 为参与谈判的 VPP 总数; $f_i(x)$ 为 VPP_{*i*} 参与市场后的成本; F_i 为 VPP_{*i*} 的谈判分歧点成本, 指双方无法达成谈判时各自的利益临界点。文中分歧点设置为 VPP 不参与 P2P 市场, 仅与 DSO 交易。

在谈判过程中, 每个 VPP 的贡献量各不相同, 所以为了更合理地分配利润, 文中采取非对称纳什议价模型, 在交易定价的基础上, 将每个 VPP 的贡献量化为以自然常数 e 为底的指数函数。将 VPP 贡献能力 ξ_i 表示为:

$$\xi_i = e^{P_i^S / P_{max}^S} - e^{-P_i^B / P_{max}^B} \quad (25)$$

式中: P_i^S 、 P_i^B 分别为 VPP_{*i*} 在 P2P 市场中交易时段内出售和购买的总电功率; P_{max}^S 、 P_{max}^B 分别为 P2P 市场中各 VPP 在交易时段内出售和购买总电功率的最大值。

3.2 模型求解

3.2.1 DSO 模型求解

DSO 通过碳感知最优潮流模型实现市场出清。出清模型可通过 MATLAB+Yalmip+Gurobi 直接求解, 同步计算出各节点的碳排放强度和电碳综合价格信号。

3.2.2 VPP 模型转换和求解

由于 VPP 合作联盟模型中包含交易量和交易价格两变量的乘积, 是一个非凸非线性优化问题, 直接求解较为困难, 故文中参考文献[27]中的模型等效转化方法, 将 VPP 合作联盟模型转化为如下两个子问题。

子问题 1: 合作联盟成本最小化问题。

$$\begin{cases} \min \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^T C_{i,t} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^T C_{i,t} = \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^{\text{FM}} + C_{i,t}^{\text{P2G}} + C_{i,t}^{\text{C}} + C_{i,t}^{\text{P2P}} - C_{i,t}^{\text{EV}}) \quad \forall i \in \Omega^{\text{VPP}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: K 为合作联盟中 VPP 的总数。在子问题 1 中, 以 VPP 合作联盟总成本最小为目标, 确定 t 时刻 VPP _{i} 在 P2P 交易前的总成本 $C_{i,t}^*$ 与 P2P 交易量 $P_{ij,t}^{\text{P2P}}$ 。

子问题 2: 基于贡献能力的交易利润分配问题。

$$\begin{cases} \min \left(-\xi'_i \sum_{i=1}^K \ln \left(-C_{i,t}^* + \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^T C_{i,t}^{\text{P2P}} \right) \right) \\ \text{s.t.} -C_{i,t}^* + \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^T C_{i,t}^{\text{P2P}} \geq 0 \quad \forall i \in \Omega^{\text{VPP}} \end{cases} \quad (27)$$

式(27)中, $C_{i,t}^*$ 为子问题 1 中 VPP _{i} 目标函数最优解。各 VPP 在确定 P2P 交易量的基础上进行谈判, 确定交易价格并计算 t 时刻 P2P 交易成本的最优解 $C_{i,t}^{\text{P2P}}$ 。

3.3 AS-ADMM 算法

现有研究普遍采用 ADMM 求解多主体合作运行优化模型, 该方法在保护成员信息隐私性的同时对大规模变量具有较好的收敛性。但传统 ADMM 对惩罚因子有较强的依赖性^[28], 为提高模型求解的收敛速度, 文中对 ADMM 进行改进, 引入随机性, 在迭代过程中根据原始残差和对偶残差灵活调整第 k 次迭代的惩罚因子 v_k , 以进一步提高计算效率和收敛速度。第 $k+1$ 次迭代的惩罚因子的更新公式如下:

$$v_{k+1} = \begin{cases} v_k (1 + \lg(s_k/r_k)) & \|s_k\|_2 \geq \tau \|r_k\|_2 \\ \frac{v_k}{1 + \lg(s_k/r_k)} & \|r_k\|_2 \geq \tau \|s_k\|_2 \\ v_k & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

式中: s_k 、 r_k 分别为第 k 次迭代的原始残差和对偶残差; τ 为原始残差和对偶残差的比例系数; $1 + \lg(s_k/r_k)$ 为步长更新的比例系数。在迭代过程中, 根据残差间的比例系数对步长进行调整。当原始残差较大时, 在迭代中增加步长, 加速收敛; 反之, 则减小步长, 降低由对偶残差过大带来的目标函数振荡。

3.3.1 合作联盟成本最小化问题

VPP 合作联盟交易量达到共识的标准为:

$$\sum_{i=1}^K \sum_{j=1, j \neq i}^K (P_{ij,t}^{\text{P2P}} + P_{ji,t}^{\text{P2P}}) = 0 \quad \forall t \quad (29)$$

式中: $P_{ij,t}^{\text{P2P}}$ 、 $P_{ji,t}^{\text{P2P}}$ 分别为 t 时刻 VPP _{i} 供应给 VPP _{j} 和 VPP _{j} 供应给 VPP _{i} 的电功率, 定义子问题 1 的拉格

朗日乘子为 $\lambda_{1,ij,t}$, 惩罚因子为 $v_{1,ij,t}$, 构建子问题 1 的增广拉格朗日函数形式以及约束条件:

$$\begin{cases} \min L_1 = \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^T C_{i,t} + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1, j \neq i}^K \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{1,ij,t} (P_{ij,t}^{\text{P2P}} + P_{ji,t}^{\text{P2P}}) + \frac{v_{1,ij,t}}{2} \|P_{ij,t}^{\text{P2P}} + P_{ji,t}^{\text{P2P}}\|_2^2 \right] \\ \text{s.t.} \text{ 式(12)一式(23)} \end{cases} \quad (30)$$

3.3.2 基于贡献能力的交易利润分配问题

各 VPP 对交易贡献分配达成共识的标准为:

$$\sum_{i=1}^K \sum_{j=1, j \neq i}^K (\lambda_{ij,t}^{\text{P2P,S}} - \lambda_{ji,t}^{\text{P2P,B}}) = 0 \quad \forall t \quad (31)$$

式中: $\lambda_{ij,t}^{\text{P2P,B}}$ 为 t 时刻 VPP _{j} 在 P2P 市场中的买电价。通过求解子问题 1 得到 VPP 联盟中各成员间的交易量最优值 $P_{ij,t}^{\text{P2P}}$, 并代入到子问题 2 中:

$$\begin{cases} \min \left(-\sum_{i=1}^K \xi'_i \ln \left(-C_{i,t}^* + \sum_{j=1, j \neq i}^K \sum_{t=1}^T P_{ij,t}^{\text{P2P}} \lambda_{ij,t}^{\text{P2P}} \right) \right) \\ \text{s.t.} -C_{i,t}^* + \sum_{j=1, j \neq i}^K \sum_{t=1}^T P_{ij,t}^{\text{P2P}} \lambda_{ij,t}^{\text{P2P}} \geq 0 \end{cases} \quad (32)$$

将增广函数进行分解, 定义子问题 2 的拉格朗日乘子为 $\lambda_{2,ij,t}$, 惩罚因子为 $v_{2,ij,t}$, 得到各 VPP 子问题 2 的分布式模型:

$$\begin{cases} \min L_2 = -\sum_{i=1}^K \xi'_i \ln \left(-C_{i,t}^* + \sum_{j=1, j \neq i}^K \sum_{t=1}^T P_{ij,t}^{\text{P2P}} \lambda_{ij,t}^{\text{P2P}} \right) + \left[\lambda_{2,ij,t} (\lambda_{ij,t}^{\text{P2P,S}} - \lambda_{ji,t}^{\text{P2P,B}}) + \frac{v_{2,ij,t}}{2} \|\lambda_{ij,t}^{\text{P2P,S}} - \lambda_{ji,t}^{\text{P2P,B}}\|_2 \right] \\ \text{s.t.} \ln \left(-C_{i,t}^* + \sum_{j=1, j \neq i}^K \sum_{t=1}^T P_{ij,t}^{\text{P2P}} \lambda_{ij,t}^{\text{P2P}} \right) \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

4 案例分析

4.1 参数设置

为验证所提策略的可行性, 设定在 IEEE 33 节点配电系统上进行模拟和仿真, 对比分析位于网络中段节点和末梢节点的 VPP 以及风电型与光伏型 VPP 的优化效果。VPP 接入后的配电系统结构如图 3 所示。其中 10、19 节点接入光伏发电站, 28 节点接入风电场。3 个柴油机组的发电碳排放强度为 0.9 tCO₂/(MW·h)。将外部碳价设为 90 元/t, 柴油机组参数 a_0 、 b_0 分别为 0.012、0.02, 主要负荷和风光发电预测数据如图 4 所示。优化运行周期为 24 h, 调度时间间隔为 1 h。AS-ADMM 中初始惩罚因子为 5×10^{-4} , 收敛精度为 1×10^{-3} 。

AS-ADMM 与 ADMM 的残差收敛结果如图 5 所示。

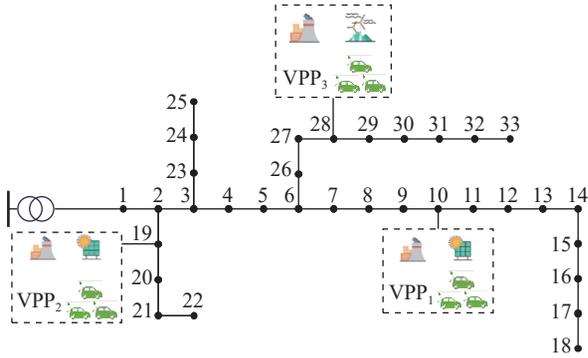


图 3 VPP 并入 IEEE 33 节点配电系统结构
Fig.3 Structure of VPP integrated into IEEE 33-bus distribution system

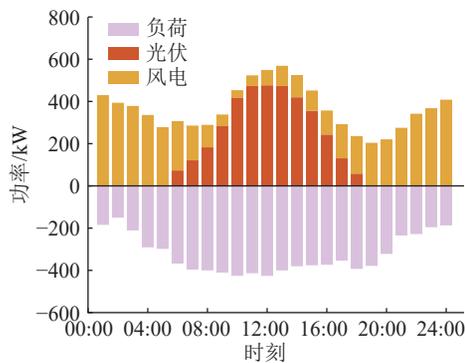


图 4 负荷、光伏与风力发电预测数据

Fig.4 Load, photovoltaic and wind power generation predicated data

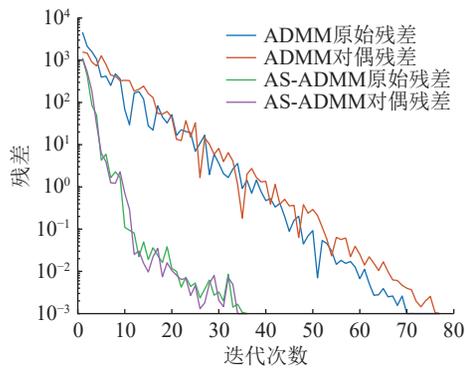


图 5 AS-ADMM 与 ADMM 残差收敛对比

Fig.5 Residual convergence comparison between AS-ADMM and ADMM

由图 5 可知, AS-ADMM 和传统 ADMM 分别于第 36 次和第 77 次迭代达到收敛。在收敛性能上, AS-ADMM 显著优于传统 ADMM。此外, 在计算速度上, AS-ADMM 的计算时间为 173.058 s, 显著快于传统 ADMM 的 421.336 s。

4.2 案例设置

为证明所提出的电碳耦合交易市场在降低成本和碳减排方面具有优越性, 建立 3 个案例, 分析 VPP 运营成本的变化和碳排放量变化, 用相同算法

进行对比研究。

案例 1: 各 VPP 不执行 P2P 交易, 只参与和 DSO 之间的 P2G 市场。

案例 2: 各 VPP 仅执行价格信号引导下的 P2P 交易, 不参与 P2G 市场。

案例 3: 各 VPP 同时参与电碳综合价格信号引导下的 P2G 和 P2P 市场; 在案例 1、2 的模型基础上考虑碳信号引导的电动汽车灵活调度模型。

4.3 优化结果分析

4.3.1 VPP 合作联盟收益变化分析

表 1 列出各案例中 VPP 合作联盟的总运营成本与碳排放总量的相关指标。需要说明的是, 假设首节点处碳强度为零, 碳排放总量指标为分布式柴油机组的发电量与碳排放强度的乘积。

表 1 VPP 合作联盟出清结果比较

Table 1 Comparison of clearing results among VPP cooperative alliances

| 案例 | 柴油机组发电量/(kW·h) | 碳排放总量/t | 总运营成本/元 |
|----|----------------|---------|----------|
| 1 | 4 834.43 | 4.16 | 7 140.65 |
| 2 | 4 283.76 | 3.89 | 6 034.86 |
| 3 | 3 406.49 | 3.07 | 4 073.68 |

由表 1 可知, 案例 1 中 VPP 未参与 P2P 交易, 仅依赖电网购电和高排放柴油机组发电, 导致总成本最高。相比之下, 案例 2 通过引入 P2P 交易机制, 充分利用其他 VPP 富余的新能源发电量, 并根据实时碳价动态调整生产与交易策略, 显著降低了运营成本。案例 3 中的 VPP 在上层 DSO 所提供的电碳综合价格信号的引导下实现两级市场协同优化, 优先在 P2P 市场中进行交易并为用户提供低价电力, 当 P2P 需求饱和时, 灵活切换至 P2G 市场; 另外, 通过碳信号引导的电动汽车灵活调度机制, 最终实现经济效益与低碳减排的双重优化。

4.3.2 各 VPP 不同机制下运营情况

选取图 3 中光伏型 VPP₁、VPP₂ 与风电型 VPP₃, 分析不同案例中各 VPP 的出清结果, 如表 2 所示。

表 2 不同案例中 VPP 出清结果对比

Table 2 Comparison of VPP clearing results in different cases

| 案例 | 运营成本/元 | | | 柴油机组发电量/(kW·h) | | |
|----|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | VPP ₁ | VPP ₂ | VPP ₃ | VPP ₁ | VPP ₂ | VPP ₃ |
| 1 | 2 276.23 | 2 371.51 | 2 492.91 | 1 628.46 | 1 657.25 | 1 548.72 |
| 2 | 1 891.26 | 1 967.06 | 2 176.54 | 1 481.24 | 1 493.14 | 1 309.38 |
| 3 | 1 431.40 | 1 326.27 | 1 316.01 | 1 150.76 | 1 184.85 | 1 070.88 |

由表 2 可知, 案例 3 与案例 1 相比, VPP₁、VPP₂、

VPP₃ 的运营成本分别减少了 844.83、1 045.24、1 176.90 元, 柴油机组发电量分别减少了 477.70、472.40、477.84 kW·h。结合表 1 可知, 案例 2、3 中碳排放总量较案例 1 分别减少 0.27、1.09 t, 总运营成本分别减少 1 105.79 元和 3 066.97 元, 从而实现各 VPP 运营成本与碳排放量的协同优化。

图 6 为分布式柴油机组发电量与节点碳排放边际价格的正相关特性。案例 1 中柴油机组发电量维持在较高水平且呈现明显的峰谷特性, 说明此时 VPP 仅通过 P2G 市场与 DSO 进行交易, 传统能源在缺乏市场调节机制下只能刚性运行。相比之下, 案例 2 和案例 3 可基于电碳价格信号在 P2P 市场进行电能交易, 显著改变了分布式柴油机组的运行模式, 而案例 3 通过碳信号引导的电动汽车智能调度机制充分发挥系统灵活性, 相比案例 2, 进一步降低了分布式柴油机组的出力。

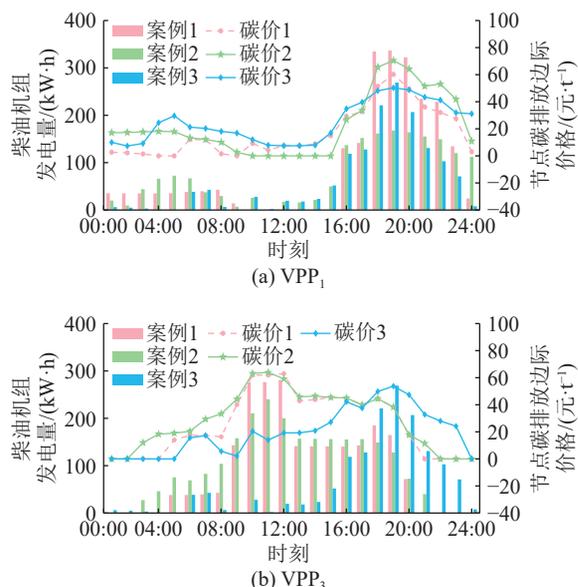


图 6 分布式柴油机组发电量与碳排放量
Fig.6 Power generation and carbon emissions from distributed diesel engine group

上述 VPP 内部的运营优化影响了配电网整体的节点碳排放强度分布。图 7 比较 3 种案例下跨 32 个节点的 24 h 碳强度分布。在案例 1 中, 由于峰值需求仅通过柴油发电机发电和电网购电来满足, 碳强度在一天中始终保持较高。相比之下, 案例 2 利用 P2P 交易, 根据 VPP 之间的供需差异, 在高峰期购买来自其他 VPP 剩余的清洁能源, 可以降低节点碳排放强度, 进而减少整个系统的碳排放量。案例 3 通过市场间的灵活切换和电动汽车灵活调度, 实现了节点碳排放强度在时间和空间维度的降低。

4.3.3 电动汽车灵活调度机制对 P2P 交易的影响

为验证电动汽车充电计划调整对 P2P 市场和

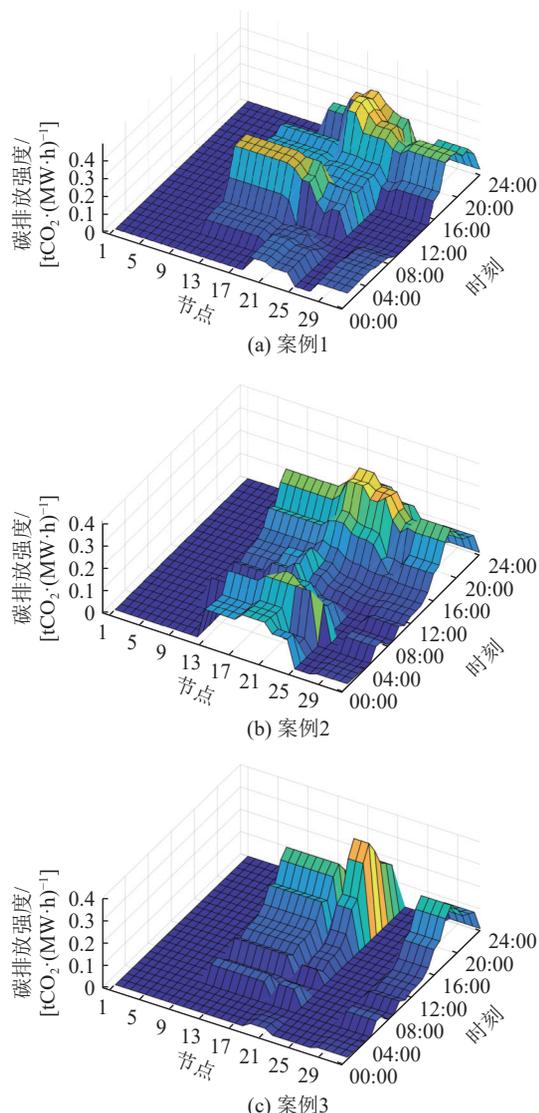


图 7 配电网节点碳排放强度

Fig.7 The node carbon emission intensity of the distribution network

VPP 运营成本的影响, 文中对比了充电计划调整后负荷分布、P2P 交易价格和交易量的变化。图 8 为案例 2 和案例 3 下 VPP₁ 和 VPP₃ 的 P2P 交易价格和负荷分布。图 9 为案例 2 和案例 3 中各 VPP 在一天内的 P2P 能量交易量。

通过分析 P2P 交易价格可以发现, 电价水平与负荷需求呈现明显的正相关关系, 用电高峰时段往往伴随着更高的交易价格。在优化调整后的电动汽车充电方案中, 充电时段呈现出从高价时段向低价时段转移的显著趋势。碳信号引导的电动汽车灵活调度机制不仅显著降低了 VPP 的购电成本, 还通过主动避开高碳排放时段充电, 实现碳减排的协同效益。

在案例 2 中, 由于 VPP₁ 和 VPP₂ 的光伏发电曲线高度相似, 电力供需呈现同质化趋势, 在 P2P 市

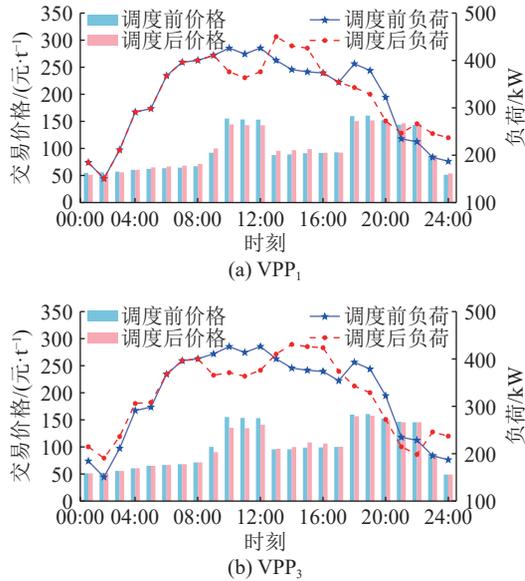


图8 调整前后负荷分布和 P2P 交易价格对比

Fig.8 Comparison of load and P2P trading prices before and after adjustment

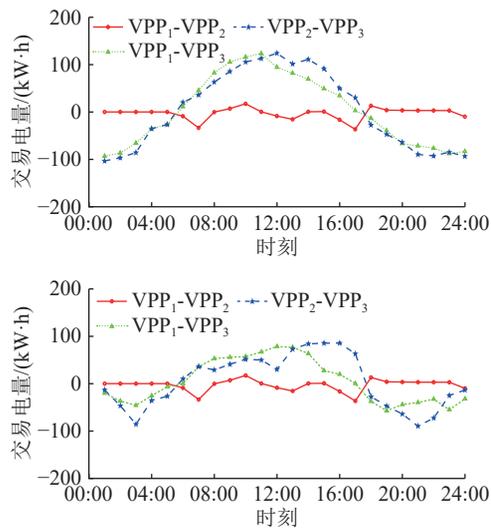


图9 调整前后 P2P 交易电量对比

Fig.9 Comparison of P2P trading electricity before and after adjustment

场难以形成有效的电力互济,导致高峰需求时刻缺乏可交易电量,电能交易价格上涨。相比之下,案例3引入碳信号引导的电动汽车灵活调度模型,电动汽车作为灵活负荷自行根据电碳综合价格信号动态调整充电时段,为打破可再生能源同质化带来的P2P市场僵局提供了创新性解决方案。

5 结论

文中构建一种基于电碳综合定价的VPP双层P2P能源交易模型,通过案例分析,得出以下结论:

(1) 上层DSO模型将CEF技术与最优潮流相结合,在满足配电网潮流约束的情况下,通过虚拟

CEF,为P2P交易制定电碳综合价格。在仿真实验中,在价格信号的引导下,案例2、3中碳排放量分别减少0.27、1.09 t。

(2) 下层提出的P2P能源交易策略能够实现VPP和DSO的协同优化,有效解决了VPP的收益分配和隐私问题。通过对VPP中负荷的调度和交易中可再生能源的消纳,案例2和案例3中VPP合作联盟运营成本分别减少1105.79元和3066.97元。

未来工作中,考虑在模型中加入电动汽车灵活性供应曲线,以量化和激励不同调度灵活性水平的电动汽车贡献度;并引入分布式新能源出力不确定性建模机制,提升VPP应对新能源出力波动的能力。

致谢

本文得到江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX25_2014)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 杨亦珂, 郑鹏远, 毛冉, 等. 不确定裕度分段量化和弃风弃光分段惩罚的孤岛型微电网经济调度算法[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 73-81.
YANG Yiqi, ZHENG Pengyuan, MAO Ran, et al. Islanded microgrid economic dispatch based on segmented quantization of uncertainty margin and segmented penalty of curtailed wind and solar power[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(1): 73-81.
- [2] 王明月, 刘东, 魏力鹏, 等. 电动汽车参与虚拟电厂优化调控的状态推演策略研究[J]. 供用电, 2024, 41(1): 14-25,41.
WANG Mingyue, LIU Dong, WEI Lipeng, et al. Research on state deduction strategy of electric vehicle participating in optimal regulation of virtual power plant[J]. *Distribution & Utilization*, 2024, 41(1): 14-25,41.
- [3] 陈霆威, 曾君, 张轩, 等. 面向规模化分布式可再生能源并网的群网协同互动优化方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(15): 73-83.
CHEN Tingwei, ZENG Jun, ZHANG Xuan, et al. Cluster-grid cooperative interaction optimization method for large-scale distributed renewable energy integration[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(15): 73-83.
- [4] 李明扬, 张智. 基于强化学习的含分布式风-光-储虚拟电厂优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 50-56.
LI Mingyang, ZHANG Zhi. Optimal scheduling of virtual power plants with distributed wind-light-storage based on reinforcement learning[J]. *Smart Power*, 2024, 52(8): 50-56.
- [5] 王呈, 高赐威. 基于滚动优化的虚拟电厂资源聚合策略研究[J]. 供用电, 2025, 42(11): 29-36.
WANG Cheng, GAO Ciwei. Research on resource aggregation strategy of virtual power plant based on rolling optimization[J]. *Distribution & Utilization*, 2025, 42(11): 29-36.
- [6] 王家怡, 贺帅佳. 计及新型分布式资源与电碳交易的虚拟电厂分布鲁棒低碳调度模型[J]. 电力建设, 2025, 46(7): 13-26.

- WANG Jiayi, HE Shuaijia. Distributed robust low-carbon dispatching model of virtual power plant considering new distributed resources and carbon trading[J]. *Electric Power Construction*, 2025, 46(7): 13-26.
- [7] 黄蔚亮, 王斐, 张扬, 等. 虚拟电厂规模化灵活资源集群优化配置[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(6): 451-461.
- HUANG Weiliang, WANG Fei, ZHANG Yang, et al. Optimal allocation of large scale flexible resource clusters in virtual power plant[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025, 46(6): 451-461.
- [8] 胡安妮, 张天策, 李庚银, 等. 考虑电动汽车参数一致性的虚拟电厂云边协同调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(20): 113-124.
- HU Anni, ZHANG Tiance, LI Gengyin, et al. Cloud-edge collaborative scheduling method for virtual power plants considering consistency of electric vehicle parameters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(20): 113-124.
- [9] 冯毅焜, 戴朝华, 何祥照, 等. 铁路虚拟电厂及其碳减排策略[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2025: 1-11. (2025-03-24) [2025-04-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=ZGDC20250321004>.
- FENG Yichen, DAI Chaohua, HE Xiangzhao, et al. Railway virtual power plant and its carbon emission reduction strategy [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2025: 1-11. (2025-03-24) [2025-04-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=ZGDC20250321004>.
- [10] 李明冰, 李强, 管西洋, 等. 市场环境下考虑多元用户侧资源协同的虚拟电厂低碳优化调度[J]. *中国电力*, 2025, 58(2): 66-76.
- LI Mingbing, LI Qiang, GUAN Xiyang, et al. Market oriented low-carbon optimal scheduling of virtual power plants considering multiple user-side resources coordination[J]. *Electric Power*, 2025, 58(2): 66-76.
- [11] 骆钊, 耿家璐, 黎博文, 等. 考虑碳-绿证交易机制的虚拟电厂分布鲁棒优化调度[J]. *电力建设*, 2023, 44(10): 137-148.
- LUO Zhao, GENG Jialu, LI Bowen, et al. Distributionally robust optimal dispatching for virtual power plants considering carbon-green certificate trading mechanism[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(10): 137-148.
- [12] 何恒靖, 周尚礼, 张乐平, 等. 电网侧动态碳排放计量模型及方法[J]. *现代电力*, 2025, 42(1): 39-45.
- HE Hengjing, ZHOU Shangli, ZHANG Leping, et al. Model and methodology for dynamic carbon emission metering on power grid side[J]. *Modern Electric Power*, 2025, 42(1): 39-45.
- [13] 吴杏平, 康重庆, 袁启恒. 我国碳排放影响因素及电力碳排放核算方法研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(S1): 1-18.
- WU Xingping, KANG Chongqing, YUAN Qiheng. A review of the impact factors of carbon emissions and the accounting methods for electricity carbon emissions in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(S1): 1-18.
- [14] ZHANG G T, CHENG P Y, SUN H, et al. Carbon reduction decisions under progressive carbon tax regulations: a new dual-channel supply chain network equilibrium model[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 27: 1077-1092.
- [15] 蔡新雷, 董锴, 崔艳林, 等. 考虑碳排放流与需求响应的电力系统两阶段优化调度[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(5): 81-90.
- CAI Xinlei, DONG Kai, CUI Yanlin, et al. Two-stage optimal dispatch of power system considering carbon emission flow and demand response[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(5): 81-90.
- [16] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(10): 1-11.
- CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low-carbon optimal scheduling of a power system source-load considering coordination based on carbon emission flow theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(10): 1-11.
- [17] 刘哲远, 邢海军, 程浩忠, 等. 考虑碳排放流及需求响应的综合能源系统双层优化调度[J]. *高电压技术*, 2023, 49(1): 169-178.
- LIU Zheyuan, XING Haijun, CHENG Haozhong, et al. Bi-level optimal scheduling of integrated energy system considering carbon emission flow and demand response[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 169-178.
- [18] KHORASANY M, PAUDEL A, RAZZAGHI R, et al. A new method for peer matching and negotiation of prosumers in peer-to-peer energy markets[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(3): 2472-2483.
- [19] 张锐, 张鑫, 周立德, 等. 考虑效益最大化的智能电网 P2P 区块链能源交易方法研究[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(4): 113-121, 129.
- ZHANG Rui, ZHANG Xin, ZHOU Lide, et al. Research on energy trading method of P2P blockchain in smart grid considering benefit maximization[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(4): 113-121, 129.
- [20] 曹猛, 解超, 尹纯亚, 等. 计及源荷不确定性的多综合能源微网协同优化运行策略[J]. *电网与清洁能源*, 2025, 41(3): 112-124.
- CAO Meng, XIE Chao, YIN Chunya, et al. Co-optimized operation strategy for multiple integrated energy microgrids considering source-load uncertainty[J]. *Power System and Clean Energy*, 2025, 41(3): 112-124.
- [21] 刘可真, 董敏, 杨春昊, 等. 基于纳什谈判的智能园区 P2P 电能交易优化运行[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 45-53.
- LIU Kezhen, DONG Min, YANG Chunhao, et al. Optimal operation of P2P electric power trading in smart park based on Nash negotiation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 45-53.
- [22] 韩禹歌, 陈来军, 王召健, 等. 基于自适应步长 ADMM 的直

- 流配电网分布式最优潮流[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 26-37.
- HAN Yuxin, CHEN Laijun, WANG Zhaojian, et al. Distributed optimal power flow in direct current distribution network based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(11): 26-37.
- [23] 彭大健, 肖浩, 裴玮, 等. 基于 ADMM 的共享储能参与电网辅助服务的分布式优化模型[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 1-8.
- PENG Dajian, XIAO Hao, PEI Wei, et al. Distributed optimization model of shared energy storage participating in power grid auxiliary service based on ADMM[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(2): 1-8.
- [24] LIU X Y, YAO Y T, LI T R, et al. Data-driven peer-to-peer energy trading based on prosumer-driven carbon-aware distribution locational marginal price[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2025, 13(5): 1836-1848.
- [25] LU Z L, BAI L Q, WANG J X, et al. Peer-to-peer joint electricity and carbon trading based on carbon-aware distribution locational marginal pricing[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(1): 835-852.
- [26] QIU D W, DONG Z H, WANG Y, et al. Decarbonising the GB power system via numerous electric vehicle coordination[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(4): 5880-5894.
- [27] 顾欣, 王琦, 胡云龙, 等. 基于纳什议价的多微网综合能源系统分布式低碳优化运行策略[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1464-1482.
- GU Xin, WANG Qi, HU Yunlong, et al. Distributed low-carbon optimal operation strategy of multi-microgrids integrated energy system based on Nash bargaining[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(4): 1464-1482.
- [28] 王磊, 徐志龙, 杨晨宇, 等. 虚拟电厂集群电-碳联合优化建模及求解方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(23): 29-40.
- WANG Lei, XU Zhilong, YANG Chenyu, et al. Modeling and solving method of electricity-carbon joint optimization for virtual power plant clusters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(23): 29-40.

作者简介:



王骏滕

王骏滕(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为电力市场交易及虚拟电厂优化调度(E-mail: 3214441468@qq.com);

王辰煜(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为微电网优化调度;

刘兴宇(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统优化运行。

Peer-to-peer energy trading model for virtual power plants based on integrated electricity-carbon marginal price

WANG Junteng^{1,2}, WANG Chenyi^{1,2}, LIU Xingyu^{1,2}, LI Tianran^{1,2}, JI Zhenya^{1,2}

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Provincial International Joint Laboratory for Integrated Energy Equipment and Systems, Nanjing 210023, China)

Abstract: In response to the challenges of low-carbon operation in distribution networks and to fully exploit the flexible regulation potential of distributed resources, a bi-level peer-to-peer (P2P) trading model for virtual power plants (VPPs) based on integrated electricity-carbon marginal pricing is developed. In the upper level, a carbon-aware optimal power flow model based on carbon emission flow (CEF) technology is established by the distribution system operator (DSO). An integrated electricity-carbon marginal price is calculated, which is used by the DSO to coordinate low-carbon scheduling of VPPs. In the lower level, a multi-VPP coalition is formed to aggregate electric vehicles (EVs) at scale. A flexible EV scheduling mechanism guided by carbon signals is introduced. An asymmetric Nash bargaining model based on contribution degrees is constructed, where VPPs balance individual and coalition interests under price signals to determine optimal production and trading strategies. The model is solved by the adaptive-scaling alternating direction method of multipliers (AS-ADMM) to address convergence issues caused by variable coupling. Finally, simulation verification is carried out on a modified IEEE 33-bus distribution system. Case study results show that the proposed trading model reduces VPP operating costs and lowers carbon emissions of the distribution network by improving distributed energy utilization and optimizing load distribution.

Keywords: virtual power plant (VPP); peer-to-peer (P2P) energy trading; carbon-aware optimal power flow; distribution locational marginal pricing; asymmetric Nash bargaining; adaptive-scaling alternating direction method of multipliers (AS-ADMM); load dispatch

(编辑 陆海霞)