

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.06.001

基于碳流追踪的电动汽车充电站定价方法

赵宇, 贺兴, 艾芊

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要:为应对虚拟电厂(virtual power plant, VPP)高效整合电动汽车(electric vehicle, EV)这一柔性资源时面临的动态定价机制难题,文中提出一种基于碳流追踪的EV充电站定价方法。该方法旨在利用节点碳势驱动差异化电价的制定,进而引导EV用户的充电计划,实现电网运行的经济与低碳协同优化。首先,量化EV交通与排队时间成本,采用改进迪杰斯特拉算法优化路网规划;其次,基于最优潮流结果与碳流追踪理论精确计算充电站接入点的节点碳势;最后,创新性地构建基于碳势计算结果的电-碳耦合动态定价机制,并设计分层迭代算法实现电价信号、碳势分布与用户响应的闭环反馈优化。仿真结果表明,文中所提方法在同等收益下可削减碳排放16.7%,在同等碳排放下可提升系统收益30.4%,验证了其在引导用户低碳行为、提升电网经济-环境协同效能方面的有效性。文中所提方法为VPP整合EV资源、实现电网低碳经济运行提供了兼具高效性与可操作性的技术路径。

关键词:虚拟电厂(VPP);路网规划;碳流追踪;动态定价;多层混合迭代算法;多目标优化

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)06-0002-11

0 引言

新时代的中国能源发展在全面推进能源消费方式变革的基础上,对完善节能低碳激励政策提出了新的要求^[1]。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为分布式资源聚合的核心平台,可有效平抑可再生能源波动并降低碳排放^[2-5]。然而,随着电动汽车(electric vehicle, EV)渗透率的快速提升,一方面电力领域作为主要碳排放源之一^[6],激增的电力需求必然带来更高的碳排放量,电网碳减排压力也随之提升;另一方面EV充电负荷具有时空随机性,不仅会导致电网潮流分布失衡^[7-8],更会引发碳排放空间分布的显著异质性。因此亟须设计动态定价机制引导并优化EV负荷的规模及分布。传统调度模型通常采用全局碳排放约束的简化处理方式^[9-10],这种粗粒度建模方法既无法针对性设计有效的用户行为引导机制,也难以量化定价和调度策略的实际碳减排贡献,最终制约了VPP运营的经济-环境协同效益。因此,探索碳流追踪技术如何与动态定价机制进行深度融合,成为提升VPP调度效能的关键命题。

近年来,国内外学者围绕上述问题展开大量研究。在碳排放建模方面,现有工作多采用基于发电侧边际碳排放因子的静态核算方法,或通过加权目标函数将碳排放纳入优化框架^[11-13]。此类方法的优势在于计算复杂度较低,但其无法量化负荷节点

的碳势贡献,导致调度策略难以适配局部碳减排需求^[14-15]。在利用定价引导需求侧响应的机制设计上,部分研究尝试通过分时电价引导EV充电行为^[16-17],但分时电价生成规则常常缺乏可解释性,且没有发挥EV碳减排潜力。针对上述不足,部分研究尝试结合碳流核算结果与需求侧响应机制,如利用碳市场交易收益吸引用户根据碳排放因子削减碳排放量^[18],或是依据碳势计算结果量化碳成本进行经济优化调度^[19-20]。然而这些方法或者无法解释碳流核算的必要性,只是后验地展示碳减排量价值分布^[18],或者只是依据预测数据近似计算碳势^[19],或者只采用静态的碳电折算系数,无法分析低碳引导力度的影响^[20]。此外,传统算法往往只考虑单目标,多目标问题也需要重构为单目标^[21-22],难以保证优化结果的多样性和协同效益。总之,现有研究在以下方面亟待突破:(1)节点碳势精细化建模与调度决策的深度融合机制;(2)电价-负荷-碳势动态耦合关系的闭环优化架构;(3)高维非显式多目标调度问题的高效求解方法。

在高EV渗透率的城市VPP场景下,文中针对上述挑战提出一种碳流追踪驱动的EV充电站定价方法,进而提出一套适配的多目标协同优化框架。该框架采用3层混合优化结构:最外层基于非支配排序遗传算法-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)实现多目标优化,通过显式参数调控碳减排引导力度,兼顾经济性、低碳性与可解释性;最内层基于设计的动态定价策略建立路网规划模型并求解,进而依据碳流追踪结果评估充

收稿日期:2025-06-17;修回日期:2025-09-01

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401204)

电站定价合理性; 中层设计迭代算法实现内外层参数的动态匹配, 大幅提高算法效率。文中核心技术贡献在于建立节点碳势与动态电价的关联机制, 构建电价-负荷-碳势闭环优化架构, 并依照架构开发混合多目标优化算法。

文中旨在突破传统粗粒度碳排放约束和静态电价机制的局限, 以碳流追踪技术作为动态定价依据, 创新性地构建“路网-电网-碳势-电价-路网”这一闭环链条。其核心价值在于: (1) 系统建立节点碳势与充电站动态电价的量化关联机制, 为精准引导用户低碳充电行为提供新工具; (2) 提出分层迭代优化框架, 有效解决高维、非线性、多目标协同优化的效率难题; (3) 为 VPP 实现源-荷-碳协同互动、显著提升其经济-环境综合效益提供新路径, 推动电力系统低碳化转型。

1 EV 充电站定价方法及混合优化总框架

文中提出一种基于碳流追踪的 EV 充电站定价方法, 并提出适配的分层协同调度框架, 通过动态定价机制与多目标优化算法的深度融合, 实现 VPP 低碳经济运行的全局优化。

文中所提优化框架采用外层-中层-内层 3 层递进式结构, 具体如图 1 所示。图 1 中 P 为最终电价; P_0 为基础电价; k 为碳电折算系数; e 为节点碳势。

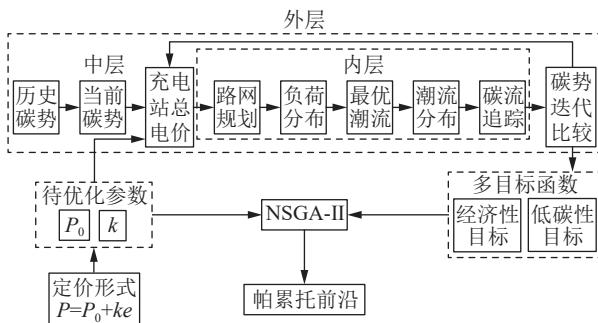


图 1 多目标优化总框架

Fig.1 Multi-objective optimization overall framework

图 1 中的分层协同调度框架通过碳流动态追踪与电价形成机制的闭环耦合实现“局部碳势-全局优化”的精准调控, 创新性地构建外层(多目标优化)-中层(迭代协调)-内层(物理建模)的 3 层解耦架构。其中碳电折算系数的引入将节点碳势动态嵌入电价形成机制, 而变步长自逼近算法有效解决了碳势-电价的循环依赖问题。这一设计使得系统在博弈均衡的同时保持了较低的计算复杂度。

1.1 外层

外层为多目标优化层, 负责生成定价策略参数并优化目标函数。

决策变量为基础电价和碳电折算系数, 二者共同构成充电站的最终定价。即:

$$P_{CS,z} = P_0 + ke_z \quad (1)$$

式中: $P_{CS,z}$ 为第 z 个充电站的充电价格; e_z 为第 z 个充电站所在节点的节点碳势。式(1)即为基于碳流追踪的 EV 充电站的定价规则, 其量化了碳排放强度对价格形成的影响, 高碳节点将产生更高的充电费用, 从而引导 EV 用户转向低碳节点充电。碳电折算系数量化了 VPP 运行中碳考量的重要程度, 其值越大则电力系统越偏向低碳性而忽略经济性。

特别指出, 碳电折算系数的取值不能独立于全国碳交易市场。碳电折算系数参考值计算如下:

$$k_0 = K \frac{\bar{P}_c}{\bar{e}} \quad (2)$$

式中: k_0 为碳电折算系数参考值; K 为低碳倡导力度系数; \bar{P}_c 为碳配额交易均价; \bar{e} 为全网平均碳排放强度。优化碳电折算系数时, 其取值空间应基于参考值合理设置。

这一定价机制与全国碳交易市场双向适配: 一方面, 充电站可作为碳责任转嫁主体自愿参与碳市场, 通过购买碳配额履行义务, 并将成本通过电价传导至用户; 另一方面, 碳电折算系数可以作为本地差异化碳价与统一碳市场之间的联动桥梁。该机制在现行政策下具有可操作性, 且适配未来可能新增的消费端碳责任政策。

多目标优化取 VPP 运营收益最大和总碳排放最低为目标函数, 即:

$$\max F_1 = - \sum_{i=1}^N C_i + \sum_{z \in Z} p_{CS,z} P_{CS,z} \quad (3)$$

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^N e_{i,gen} p_{i,gen} \quad (4)$$

式中: F_1 、 F_2 分别为 VPP 运营收益和总碳排放; C_i 为节点 i 的发电成本; N 为电网拓扑图中节点总数; $p_{CS,z}$ 为第 z 个充电站的负荷功率; Z 为 EV 充电站集合; $e_{i,gen}$ 为节点 i 电站(若有)的碳排放因子; $p_{i,gen}$ 为节点 i 的电源注入的有功潮流。不同发电类型电源的发电成本不同, 具体如下:

$$C_i = \begin{cases} c_{WT} p_{i,gen} & i \in \Omega_{WT} \\ c_{PV} p_{i,gen} & i \in \Omega_{PV} \\ c_{GT,2} p_{i,gen}^2 + c_{GT,1} p_{i,gen} + c_{GT,0} & i \in \Omega_{GT} \\ c_{TP,2} p_{i,gen}^2 + c_{TP,1} p_{i,gen} + c_{TP,0} & i \in \Omega_{TP} \end{cases} \quad (5)$$

式中: c_{WT} 、 c_{PV} 分别为风电、光伏的成本系数; $c_{GT,2}$ 、 $c_{GT,1}$ 、 $c_{GT,0}$ 分别为燃气轮机的二次、一次、启停成本系数; $c_{TP,2}$ 、 $c_{TP,1}$ 、 $c_{TP,0}$ 分别为火电机组的二次、一次、启停成本系数; Ω_{WT} 、 Ω_{PV} 、 Ω_{GT} 、 Ω_{TP} 分别为风

电、光伏、燃气轮机、火电机组的集合。

采用改进 NSGA-II 求解帕累托前沿, 通过非支配排序与拥挤度计算保证解集多样性。

1.2 中层

中层为迭代协调层, 目标为解决定价参数与碳势的循环依赖问题, 其功能为对于每组外层给定的定价参数, 输出外层所需的 2 个目标函数作为适应度函数, 以供外层优化器进行优化。步骤如下: ①接收定价参数, 基于历史数据设初始碳势; ②根据当前碳势与定价参数生成充电站电价; ③调用内层模块更新碳势; ④若计算出的节点碳势与原碳势之差大于容差, 则调用迭代算法更新节点碳势, 回到步骤②; ⑤输出 2 个目标函数值并反馈至外层。

步骤④中的迭代算法采用变步长的自逼近算法, 即:

$$e_i^{(n+1)} = \lambda \bar{e}_i^{(n)} + (1 - \lambda) e_i^{(n)} \quad (6)$$

式中: $e_i^{(n)}$ 为第 n 次迭代后节点 i 的尝试碳势; $\bar{e}_i^{(n)}$ 为将 $e_i^{(n)}$ 代入内层串联求解后抛出的参考碳势; λ 为变步长比例系数。

$$\lambda = \lambda_0 + (1 - \lambda_0) \frac{|\bar{e}_i^{(n)} - e_i^{(n)}|}{\max(\bar{e}_i^{(n)}, e_i^{(n)})} \quad (7)$$

式中: λ_0 为参考可信系数, 文中取 0.5。关于此算法的证明详见 3.2 节。

1.3 内层

内层为物理模型层, 包含路网规划、最优潮流与碳流追踪 3 个核心模块, 其功能为对于中层给定的充电站电价, 经过上述 3 个模块处理后, 输出电网的节点碳势。

路网规划模块: 基于非合作博弈模型模拟 EV 用户充电选择行为, 输入电价, 输出各充电站实际负荷, 进一步得到电网负荷分布。

最优潮流模块: 输入为电网拓扑图和负荷信息, 以网损最小为目标, 采用二阶锥规划求解电网潮流分布并输出。

碳流追踪模块: 输入为潮流结果, 结合发电机的碳排放因子, 计算电网各节点碳势。

表 1 为文中方法与传统调度方法的差异。

表 1 文中方法与传统方法的差异

Table 1 Difference between the method proposed in this paper and the traditional method

项目	传统方法	文中方法
碳排放建模	全局总量约束	节点碳势动态追踪
定价机制	固定或分时电价	碳势-电价自适应耦合
优化架构	单层联合	3 层解耦迭代
计算效率	高维参数导致收敛慢	迭代加速优化

文中方法的先进性体现在以下方面: (1) 碳管理精细化, 通过碳流追踪实现“局部调控-全局减排”的精准映射; (2) 通过动态电价与用户行为的反馈调节提升系统鲁棒性和闭环反馈能力; (3) 兼容现有调度系统, 仅需要结合碳流追踪模块进行微调。

2 路网规划

EV 充电行为具有显著的价格敏感性与空间异质性, 这为通过定价实现负荷分布调控提供了理论可行性。文中所提碳电折算系数定价机制将节点碳势差异显式嵌入价格信号生成过程, 使得 EV 用户的站点选择行为能够自发促进全网低碳目标的实现。

交通网-电网耦合系统呈现典型的双重反馈特性: 一方面, 单个 EV 用户的充电站选择决策会由于拥堵效应影响其他用户的出行成本^[23-25]; 另一方面, 这种选择会通过电网潮流重新分布进一步改变各节点的碳排放强度。具体而言, EV 用户在决策过程中需要综合评估路径行驶时间、充电等待时间和充电服务价格, 这些因素共同构成用户选择决策的广义成本函数, 并最终决定用户充电意愿强度。

基于上述特征, 文中构建一个考虑多主体博弈的路网规划模型。假设所有 EV 用户均为完全理性的决策主体且各主体间存在非合作竞争关系, 最终博弈达到纳什均衡。EV 用户实际决策过程可能受信息透明度、个人偏好或习惯惰性干扰, 但高度信息化时代弱化了其中部分因素, 减少了模型过于理想化的影响。文中模型设计了柔性边界条件, 使得模型既能反映极端电价下的用户行为突变(如充电需求压缩), 又能保持常态下的梯度特性。

任意 EV 车主的个体优化目标为:

$$\min f_{EV,i,j} = \omega \left(t_{w,z} + \sum_{r \in R(i,z)} t_r \right) + P_{CS,z} \quad z \in Z \quad (8)$$

式中: $f_{EV,i,j}$ 为在第 i 个路网节点出发的第 j 号 EV 的成本函数; ω 为将时间成本等价为经济成本的换算系数; $t_{w,z}$ 为第 z 个充电站的充电等待时间; t_r 为在路径 r 上花费的时间; $R(i,z)$ 为从路网节点 i 出发驶向充电站 z 的可行通路集合。

整体路网规划的优化目标为:

$$\min F_{EV} = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N(i)} f_{EV,i,j} \quad (9)$$

式中: F_{EV} 为全体 EV 车主的总等价成本; $N(i)$ 为路网中第 i 个节点的车辆总数; N_R 为路网中的节点总数。

接着定义道路车流量和充电站吞吐量:

$$s_r = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N(i)} \delta_{i,j,r} \quad (10)$$

$$s_z = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N(i)} \delta_{i,j,z} \quad (11)$$

式中: s_r 为路径 r 的车流量; $\delta_{i,j,r}$ 为判断第 i 个路网节点出发的第 j 号 EV 是否通过路径 r 的布尔变量; s_z 为第 z 个充电站的吞吐量; $\delta_{i,j,z}$ 为判断第 i 个路网节点出发的第 j 号 EV 是否在充电站 z 进行充电的布尔变量。

道路车流量和充电站吞吐量会直接影响 EV 车主的交通时间和等待时间, 即:

$$t_r = t_{r,0} \left[1 + \alpha \left(\frac{s_r}{c_r} \right)^2 + \frac{\beta}{1 - s_r/c_r} \right] \quad (12)$$

$$t_{w,z} = t_{w,0} \frac{s_z^2}{1 + \theta s_z} \quad (13)$$

式中: $t_{r,0}$ 为路径 r 基础通过时间; α 为车流干扰系数; c_r 为路径 r 容量; β 为拥堵放大系数; $t_{w,0}$ 为充电基础排队时间; θ 为饱和约束系数。模型中参数 α 、 β 、 θ 考虑了部分非理性行为(如双输拥堵、随机排队服务)对实际行为过程的影响, 补充了模型的行为经济学意义。

对于路网规划问题, 还有路径容量约束, 充电站充电功率与上级电网负荷特性的等式约束, 即:

$$s_r < c_r \quad (14)$$

$$p_{CS,z} = \sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N(i)} \delta_{i,j,z} p_{EV,i,j} \quad (15)$$

式中: $p_{EV,i,j}$ 为在第 i 个路网节点出发的第 j 号 EV 的充电功率。特别指出, 这里的充电功率指的是在考察时段内的总耗能与时段长度的比值, 不是指充电口的额定功率, 所以具有可调性, 如在成本较高时 EV 车主的总充电意愿会降低, 有:

$$p_{EV,i,j} = p_0 + \frac{p_{\max} - p_0}{1 + \gamma (f_{EV,i,j} / f_{EV,0})^2} \quad (16)$$

式中: p_0 为基础充电功率; p_{\max} 为满额充电功率; γ 为高价抵触系数; $f_{EV,0}$ 为预期成本。

路网规划模型的求解难点是 EV 车主搜索最优路径时, 路网拓扑图支路权重不固定。故对迪杰斯特拉算法进行改进, 在进行路径寻优前先读取该 EV 上次迭代后的最优路径, 通过式(12)、式(13)反解出无该 EV 时的全网车流量。接着, 假设该 EV 遍历全部支路, 更新支路车流量, 将更新后的对应成本作为寻优图的支路权重。

3 基于潮流规划的碳流追踪

3.1 最优潮流优化模型

碳流分布与电网潮流存在耦合关系, 因此碳流追踪需要以精确的潮流计算为基础。文中采用最

优潮流作为碳流的依托, 在保证经济性的前提下实现碳流的高精度追踪。

最优潮流问题由于二次潮流等式的非凸性成为 NP 难问题且容易陷入局部最优, 因此需要寻找合适的优化工具和方法。现有文献指出, 配电网高电阻电抗比特性使直流潮流近似产生不可忽略的误差。而在主流解法中, 凸松弛技术凭借其理论完备性和计算效率优势, 特别适用于 VPP 调度场景^[26]。

文中基于二阶锥规划求解最优潮流问题, 目标函数为最低网损。其理论依据为对于典型径向配电网结构, 在满足以下条件时, 松弛后的最优解可严格等价于原问题解^[26]: ① 对节点负荷仅设下限约束; ② 节点电压通过后验校验; ③ 目标函数与支路电流呈非递减关系。

选择网损最小化作为目标函数具有双重意义: (1) 网损目标天然满足二阶锥规划的单调性要求, 且文中场景下负荷必取下限值; (2) 可避免单纯追求经济性导致的清洁能源过度调用, 保障传统发电单元的碳减排参与度, 进而维持系统惯量支撑能力, 这种设计体现了“碳责任共担”的核心原则^[1]。

文中最优潮流规划的目标函数为:

$$\min F_E = \sum_{(i,j) \in G_E} I_{ij} r_{ij} \quad (17)$$

式中: F_E 为网损; G_E 为电网拓扑图的支路集合; I_{ij} 为流过支路 (i,j) 的电流模值的平方; r_{ij} 为支路 (i,j) 的电阻。

潮流规划需要满足节点功率平衡约束:

$$\sum_{k \in \varsigma(j)} p_{jk} + p_{j,\text{load}} = (p_{ij}|_{i=\xi(j)} - r_{ij} I_{ij}) + p_{j,\text{gen}} \quad (18)$$

$$\sum_{k \in \varsigma(j)} q_{jk} + q_{j,\text{load}} = (q_{ij}|_{i=\xi(j)} - x_{ij} I_{ij}) + q_{j,\text{gen}} \quad (19)$$

式中: p_{jk} 、 q_{jk} 分别为流过支路 (j,k) 的有功、无功潮流; $\varsigma(j)$ 为节点 j 的子节点集合; $p_{j,\text{load}}$ 、 $q_{j,\text{load}}$ 分别为节点 j 的有功、无功负荷; $\xi(j)$ 为节点 j 的父节点; $q_{j,\text{gen}}$ 为节点 j 的电源注入的无功潮流; x_{ij} 为支路 (i,j) 的电抗。电压降落方程为:

$$V_j = V_i - 2(r_{ij} p_{ij} + x_{ij} q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij} \quad (20)$$

式中: V_i 为节点 i 的电压模值的平方。将潮流等式进行二阶锥松弛后有:

$$p_{ij}^2 + q_{ij}^2 \leq V_i I_{ij} \quad (21)$$

式(21)中认为节点 i 为父节点, 即 $i \rightarrow j$ 为潮流的正方向。电站上网电压平衡约束为:

$$V_i = 1 \quad i \in \rho(G_E) \quad (22)$$

式中: $\rho(G_E)$ 为电网拓扑图中含分布式电源的节点的集合。电网运行参数上下限约束为:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (23)$$

$$0 \leq I_{ij} \leq I_{\max} \quad (24)$$

$$p_{ij}^2 + q_{ij}^2 \leq S_{\max} \quad (25)$$

式中: V_{\max} 、 V_{\min} 分别为节点电压模值平方的上、下限; I_{\max} 为支路电流模值平方的上限; S_{\max} 为支路潮流的上限。分布式电源的出力上下限约束有:

$$p_{j,gen}^{\min} \leq p_{j,gen} \leq p_{j,gen}^{\max} \quad (26)$$

$$q_{j,gen}^{\min} \leq q_{j,gen} \leq q_{j,gen}^{\max} \quad (27)$$

式中: $p_{j,gen}^{\min}$ 、 $p_{j,gen}^{\max}$ 分别为节点 j 的电源的有功出力下限和上限; $q_{j,gen}^{\min}$ 、 $q_{j,gen}^{\max}$ 分别为节点 j 的电源的无功出力下限和上限。潮流正方向约束为:

$$|p_{ij}| - |r_{ij}I_{ij}| \geq 0 \quad (28)$$

$$|q_{ij}| - |x_{ij}I_{ij}| \geq 0 \quad (29)$$

路网规划结束后, 将充电站负荷纳入电网拓扑节点的考虑范围内:

$$p_{j,load} = p_{CS,z} \quad j = \zeta(z) \quad (30)$$

式中: $\zeta(z)$ 为充电站 z 在电网拓扑图中的节点编号。

3.2 碳流追踪方法

作为电力消费的直接驱动方, 用户侧负荷实质构成系统碳排放的责任源头。对 VPP 运营商而言, 建立科学的碳责任追溯体系, 并据此设计精准的价格引导机制, 是实现“电-碳”协同调控的关键。碳流计算技术通过建立用电行为与碳排放的量化关联, 可有效解决碳责任归属模糊导致的激励错配、市场信号失真引发的调度低效以及能源转型过程中的系统性风险管控等问题。

2012 年首次提出碳排放流理论^[15], 并于同年初步提出计算方法^[27], 其核心思想是通过虚拟流模型表征碳排放的时空传递过程。该理论突破传统直接排放核算的局限, 创新性地提出碳排放并非在发电节点即时释放, 而是随潮流在电网中定向传输; 负荷节点作为电能最终消耗点, 承担对应的碳排放责任; 碳流路径与潮流方向保持严格一致。

碳排放流理论体系的核心参数为节点碳势, 任意支路碳流率都是源节点碳势与该支路有功潮流的乘积, 任意节点的负荷碳流率都是该节点碳势与负荷有功功率的乘积。因此核算全节点碳势等价于实现碳流追踪。

对于单节点, 其节点碳势的定义为:

$$\frac{\sum_{i \in \mu(j)} e_i p_{ij} + e_{j,gen} p_{j,gen}}{p_{j,load} + \sum_{k \in \nu(j)} p_{jk}} = e_j \quad (31)$$

式中: $\mu(j)$ 为节点 j 的实际父节点集合, 其含义为正

向有功潮流必须从实际父节点流向考察节点, 分辨实际父节点的原因是碳流依托的潮流必须为未经过损耗的有功潮流, 否则会导致一部分真实产生的碳排随网损消失, 使最终的总核算碳排与实际不符; $\nu(j)$ 为节点 j 的实际子节点集合。

对于每个节点都可以列写一条节点碳势定义方程, 方程数量与待求的节点碳势未知数数量相同, 因此方程线性可解。将式(31)写成矩阵形式:

$$\mathbf{Fe} + \mathbf{G} = (\mathbf{S} + \mathbf{L})\mathbf{e} \quad (32)$$

式中: \mathbf{F} 为父潮流矩阵; \mathbf{e} 为节点碳势矩阵; \mathbf{G} 为发电站碳排矩阵; \mathbf{S} 为子潮流矩阵; \mathbf{L} 为负荷矩阵。父潮流矩阵的定义如下:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{p}_{21} & \cdots & \tilde{p}_{N1} \\ \tilde{p}_{12} & 0 & \cdots & \tilde{p}_{N2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{p}_{1N} & \tilde{p}_{2N} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

即:

$$F_{ij} = \tilde{p}_{ji} \quad (34)$$

$$\tilde{p}_{ij} = \begin{cases} p_{ij} & i \in \mu(j) \\ 0 & i = j \text{ 或 } i \notin \mu(j) \end{cases} \quad (35)$$

节点碳势矩阵的定义如下:

$$\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_N]^T \quad (36)$$

发电站碳排矩阵的定义如下:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} e_{1,gen} p_{1,gen} \\ e_{2,gen} p_{2,gen} \\ \vdots \\ e_{N,gen} p_{N,gen} \end{bmatrix} \quad (37)$$

子潮流矩阵的定义如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sum_{k_1 \in \nu(1)} p_{1k_1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sum_{k_2 \in \nu(2)} p_{2k_2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sum_{k_N \in \nu(N)} p_{Nk_N} \end{bmatrix} \quad (38)$$

负荷矩阵的定义如下:

$$\mathbf{L} = \text{diag}(p_{1,load} \ p_{2,load} \ \cdots \ p_{N,load}) \quad (39)$$

则经过简单的矩阵运算即可得到节点碳势的求解方程, 即:

$$\mathbf{e} = (\mathbf{S} + \mathbf{L} - \mathbf{F})^{-1} \mathbf{G} \quad (40)$$

考虑电力系统中可能出现孤立节点, 若 $\mathbf{S} + \mathbf{L} - \mathbf{F}$ 中含有零元素, 将其置为小量 ε 后再进行运算, 文中 ε 取 10^{-6} 。通过式(40)可在得到潮流运算结果后导出节点碳势结果, 实现碳流追踪。

现简要证明式(6)、式(7)算法的收敛性。首

先, 节点碳势为依附于潮流的物理概念, 所以必然存在唯一解, 即 e_i 。令本轮计算出新碳势的过程函数为 g , 即有:

$$g(e_i^{(n)}) = \bar{e}_i^{(n)} \quad (41)$$

由上述分析可知函数 $g(e_i^{(n)}) - \bar{e}_i^{(n)}$ 拥有唯一零点。不妨设 $e_i^{(n)} < e_i$, 分别依据式(1)、式(8)、式(16)、式(15)、式(30)知:

$$\begin{aligned} P_{CS,i}^{(n)} < P_{CS,i} &\Rightarrow f_{EV,i,j}^{(n)} < f_{EV,i,j} \Rightarrow p_{EV,i,j}^{(n)} > \\ p_{EV,i,j} &\Rightarrow p_{CS,i}^{(n)} > p_{CS,i} \Rightarrow p_{i,load}^{(n)} > p_{i,load} \end{aligned} \quad (42)$$

式中: $x^{(n)}$ 为变量 x 的第 n 代迭代结果。再由式(18)可知:

$$\begin{cases} p_{ij}^{(n)} < p_{ij} & j \in \mathcal{S}(i) \\ p_{\xi(i)i}^{(n)} > p_{\xi(i)i} \\ p_{i,gen}^{(n)} > p_{i,gen} \end{cases} \quad (43)$$

最后由式(31)可知:

$$\bar{e}_i^{(n)} = \frac{\sum_{j \in \mu(i)} e_j^{(n)} p_{ji}^{(n)} + e_{i,gen} p_{i,gen}^{(n)}}{p_{i,load}^{(n)} + \sum_{k \in \nu(i)} p_{ik}^{(n)}} > e_i \quad (44)$$

即 $e_i^{(n)} < e_i < \bar{e}_i^{(n)}$, 唯一解必取在相邻 2 次迭代结果之间。这一点很容易定性分析, 当设定的节点碳势值比真实值偏低时, 总充电价格降低, 从而吸引更多车辆去该充电站充电, 总充电意愿升高, 该充电站负载加重, 这就迫使 VPP 调动更多非清洁能源充电站在线路损耗率更高的情况下供电, 随后计算得出的节点碳势必然升高。由式(6)、式(7)可知:

$$e_i^{(n)} < e_i^{(n+1)} < \bar{e}_i^{(n)} \quad (45)$$

于是必有:

$$|e_i^{(n+1)} - e_i| \leq \max(|e_i^{(n)} - e_i|, |\bar{e}_i^{(n)} - e_i|) \quad (46)$$

这代表任意一次迭代中的新碳势和原碳势必然确定真解的一个上界和一个下界, 而每经过一次迭代, 都能至少给出一个不更宽松的上界或下界。考虑取到等号的条件, 即 $\bar{e}_i^{(n)} = 2e_i - e_i^{(n)}$, 由式(6)知:

$$e_i^{(n+1)} = 2\lambda e_i + (1 - 2\lambda)e_i^{(n)} \quad (47)$$

当且仅当 $e_i^{(n)} = e_i$ 时才有 $e_i^{(n+1)} = e_i^{(n)}$, 说明除非收敛到真解, 否则新碳势和原碳势间或相邻两代碳势取值间不会同时发生振荡, 所以最终上下界必然收敛到真解。

4 算例仿真

4.1 测试系统配置

构建“交通-电力”耦合测试系统, 具体结构如图 2 所示。算例模型包含: (1) 交通网络。基于某市区的实际路网简化, 包括 31 个节点、42 条路径, 设置 5 个充电站, 分别为 CS1—CS5。 (2) 车辆模型。

路网中每个节点都有 10~20 台车, 车辆数服从均匀分布。时间-经济换算系数基于上海市人均时薪一半, 取 0.1 元/s(即 36 元/h); 道路参数参考中型商业区路网和居民区路网仿真, 取基础通行时间 60 s、容量 10、车流干扰系数 0.1、拥堵放大系数 0.1; 满额充电量基于主流小型 EV 的一半电池容量, 取 5 kW·h, 最低充电量置 0; 高价抵触系数基于价格弹性, 取 0.5; 预期成本定为常规电费的 0.5 倍, 取 0.2 元/(kW·h)。(3) 电网模型。模型取自标准 IEEE 33 节点系统, 包含 1 台火电机组(TP1)、1 台燃气轮机(GT1)、1 处光伏电站(PV1)和 1 处风场(WP1), 各发电机组的关键参数如表 2 所示。

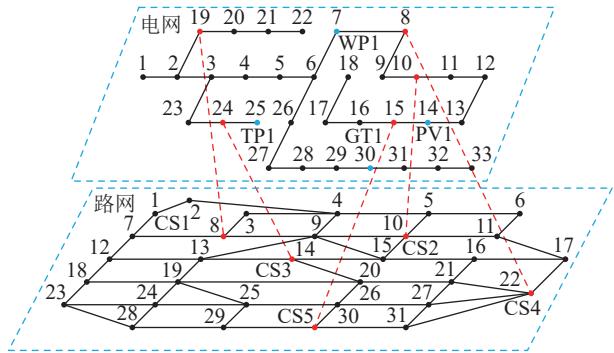


图 2 路网-电网耦合网拓扑

Fig.2 Topology of route-power coupling network

表 2 发电机组关键参数

Table 2 Key parameters of power generation units

机组	电网节点	容量/MW	配置无功补偿器容量/(MV·A)	碳排放因子/[tCO ₂ ·(MW·h) ⁻¹]
TP1	25	2	0.6	0.855
GT1	30	1.6	0.6	0.392
PV1	14	0.8	0.6	0.005
WP1	7	1.2	0.6	0.002

对于各机组的发电成本参数, 取 $c_{TP,2} = 0.006$ 、 $c_{TP,1} = 35$ 、 $c_{TP,0} = 300$ 、 $c_{GT,2} = 0.013$ 、 $c_{GT,1} = 60$ 、 $c_{GT,0} = 125$ 、 $c_{PV} = 65$ 、 $c_{WT} = 40$ 。在式(5)中, 功率的单位皆为 MW·h, 成本的单位皆为元。路网中充电站的关键参数如表 3 所示, 节点碳势最大容许误差为 0.1 kgCO₂/(MW·h)。

表 3 充电站关键参数

Table 3 Key parameters of charging stations

充电站	路网节点	电网节点	基础排队时间/s	饱和约束系数
CS1	8	19	800	10
CS2	10	10	1 000	10
CS3	14	24	500	6
CS4	22	8	400	8
CS5	30	15	1 000	6

4.2 对比场景设计

为验证框架有效性,设置4种调度模式。模式1:传统经济调度($k=0$);模式2:固定碳价调度($k=5$ 元/kgCO₂);模式3:文中框架(动态优化);模式4:理想低碳模式(不计经济性)。

特别地,模式2参数取值基于式(2)近似得出,式(2)中参数取2022年全国平均碳排放因子0.537 tCO₂/(MW·h)和2022年国际碳配额结算均价81欧元/tCO₂,为增强低碳引导前后的对比度,低碳倡导力度系数取4,最终计算得到参考碳电折算系数为5元/kgCO₂。另外,模式4含义为EV车主总会选择低碳节点,但是目标取值仍与总电价有关, k 的取值仍有优化空间,所以不能简单解释为 $k=\infty$ 。

4.3 优化结果分析

4.3.1 经济-环境权衡关系

图3为不同调度模式下帕累托前沿对比。

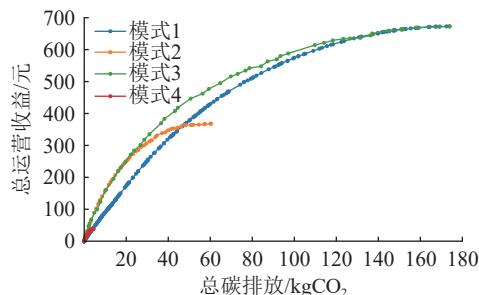


图3 不同调度模式下VPP多目标优化帕累托前沿对比

Fig.3 Comparison of Pareto frontiers for multiple-objective optimization of VPP under different dispatching modes

算例以碳排放低而收益高为目标,即各帕累托前沿的下方为实际可行域。从图3可以看到,模式3前沿高于模式1、2、4,验证了文中框架的有效性;随着收益提高,单位收益对应的碳排放成本也在提高。所有调度方法的起始点都为原点,意为既不耗电也不产生碳排放,模式1的前沿终点与模式3一致,代表只考虑经济性忽略低碳性时,传统调度与文中方法都可以达到收益上限,此时的碳排放也一致;模式2、4的前沿都较短,这是因为固定碳价或过分强调低碳会限制VPP的运营潜力,VPP会因碳价不合理而失去部分用户,其中模式4的表现尤其明显,证明只考虑低碳是不切实际的;模式2在前沿曲线前段(代表VPP经营不善)与文中方法结果接近,说明此时虽然失去了路途较远或是附近碳排严重的潜在用户,但节碳效果十分显著。相比之下模式1在前沿曲线前段斜率最低,代表环境效益和经济效益双输。

模式1、2的帕累托前沿有唯一交点,发生在

[48 kgCO₂, 365元]处,考察该点对应的基础电价,模式1为2.86元/(kW·h),模式2为0.93元/(kW·h),差距极大。计入碳价折算后,模式2的CS1—CS5总电价分别为2.79、1.91、5.22、1.43、1.93元/(kW·h),即模式1、2在CS1处电价较为接近,CS2、CS4、CS5处模式2电价显著更低,CS3处则显著更高。相较模式1,模式2的电价中折算后的碳价比例远超50%,说明模式2是低碳主导的定价方法。但这并不意味着模式2比模式1更好,虽然模式2感知到了CS3对应节点处碳势极高,但由于模式2过于敏感的定价策略,CS3附近EV都不选择CS3,而是去更远的其他充电站充电。这不仅导致EV自身更高的交通成本,也导致其余EV被迫承受拥堵、排队带来的时间成本,进而导致所有EV充电意愿降低,经济效益不足。在文中考虑的目标下,二者的表现完全一致,不分优劣,对比图3中模式3的帕累托前沿,算例系统的充电站定价策略还有极大的优化空间。

4.3.2 节点碳势分布

为展示文中框架的优化效果,取模式2最高收益368元时模式1—模式3的节点碳势,如图4所示。子图(a)、(b)、(c)分别对应模式1—模式3的节点碳势。

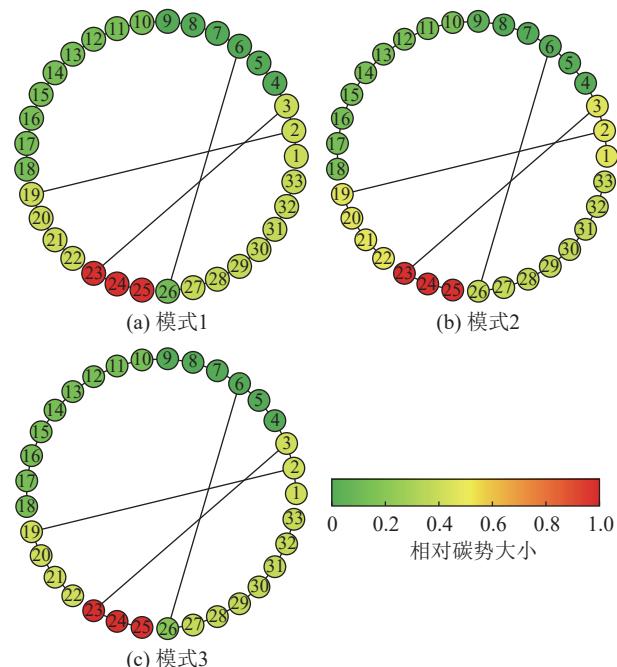


图4 不同调度模式下电网节点碳势对比

Fig.4 Comparing of carbon potential at grid nodes under different dispatching modes

从图4可以看到,节点碳势受机组碳排放因子影响,不同调度模式下碳势分布近似,但仍然可以看到模式2的26号节点与模式1、模式3差距明

显,这也导致了模式 2 的减碳表现最差,印证了图 3 中的结果。模式 1、模式 3 的节点碳势非常近似,但总碳排放却差距较大,须进一步分析。

4.3.3 用户行为影响

采用与 4.3.2 节相同的场景,图 5 为不同调度模式下 EV 充电负荷分布情况。

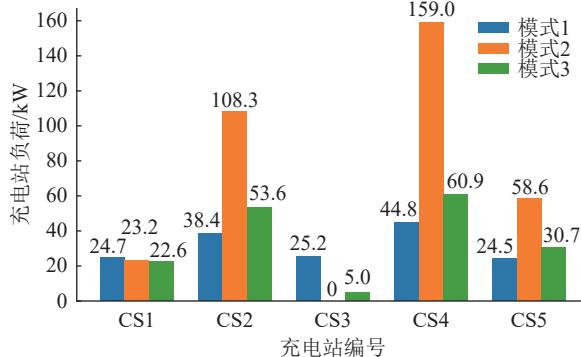


图 5 不同调度模式下各充电站负荷对比

Fig.5 Comparison of charging station load under different dispatching modes

从图 5 可以看到,不同调度方式下充电站负荷差距极大:模式 1 各充电站负荷相近,对碳势高低没有敏感度;模式 2 过于强调节碳,由于 CS3 附近有火电,几乎没有 EV 来充电,导致为了获得相同的收益,其他充电站负载较重,但其他充电站碳势虽然小于火电,在重载下仍然产生了更多的碳排放;模式 3 介于模式 1 与模式 2 之间,对重碳节点有明显规避,对轻碳节点有明显鼓励,但并不过分强调,结果最优,验证了优化碳电折算系数的必要性。

4.3.4 动态定价响应

考察相同基础电价下不同调度模式对节碳系数的优化效果。基础电价取 2.18 元/(kW·h),表 4 为不同调度模式下充电价格、总运营收益和总碳排放。

表 4 不同调度模式下充电站定价及目标结果

Table 4 Pricing of charging stations and objective results under different dispatching modes

调度模式	定价/[元·(kW·h) ⁻¹]					总运营收益/元	总碳排放/kgCO ₂
	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5		
1	2.18	2.18	2.18	2.18	2.18	623	122
2	4.04	3.16	6.47	2.68	3.18	133	8
3	3.05	2.60	3.97	2.39	2.60	315	28
4	5.58	3.88	9.80	3.07	3.96	1.7	0.1

从表 4 可以看到,不同调度方式对低碳的重要性评估差异较大,最看重低碳的模式 4 的 VPP 几乎无法运营,模式 2 其次,模式 1 完全不看重所以运营收益最高,模式 3 处于模式 1、模式 2 之间。分析可得,模式 3 相比模式 2 多排碳 250%,运营收益提

升 137%;模式 3 相比模式 1 运营收益虽然减少 49%,但碳减排达到 77%,兼顾了经济性和低碳性。

进一步统计表 4 中模式 1—模式 4 用户的充电站选择和充电意愿,结果如表 5 所示。

表 5 不同调度模式下用户充电站选择及充电意愿

Table 5 Choosing of charging stations and total power load under different dispatching modes

调度模式	EV 台数					总充电功率/kW
	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	
1	63	67	59	59	54	370.0
2	0	17	0	50	13	55.5
3	24	70	4	64	21	152.1
4	0	0	0	0	10	16.6

从表 5 可以看到,模式 1 有充电意愿的 EV 台数最高,模式 3 其次,模式 4 最少,与碳电折算系数的取值呈反相关,符合直观认识。另一方面,模式 1 中各充电站 EV 台数十分接近,说明此时 EV 用户选择充电站时不考虑低碳性,模式 2—模式 4 结果显示若考虑低碳性,用户最愿意选择 CS4,其次是 CS2 和 CS5,CS3 最少,与图 4 的节点碳势结果、表 4 的定价结果吻合。对比模式 2 和模式 3,模式 3 中即使节点碳势接近,选择 CS2 的台数远多于 CS5,进一步提高碳价后二者才接近,这是因为用户选择充电站的依据不仅包含充电价格,还需要考虑路网车流分布。价格信号区分不大时,CS2 更靠近路网中心,远比边缘的 CS5 更有吸引力,但进一步提高差价后二者都只能吸引周边少量车辆。最后,模式 1 中单位电能产生的经济效益和碳排放量为 [1.68 元, 0.33 kgCO₂],模式 3 中则是 [2.07 元, 0.18 kgCO₂],说明文中所提定价策略可以同时提升经济效益并降低碳排放。

4.4 关键性能指标

4.3 节基于固定收益研究碳排放或基于固定碳排放研究收益,实际上不同调度模式的 VPP 应各自挑选合适的运行点,如对于更看重低碳的模式 2,应适当降低基础电价,让碳价调控用户行为而非依旧保持高基础电价。

针对模式 1—模式 3 取典型运行点进行比较。对模式 1 取最高收益的 70%,对模式 2 取低碳运行基础下的收益上限,而对模式 3 分别取典型经济点和典型减碳点,并令其经济性和低碳性分别等于模式 1、2 的典型运行点。结果如表 6 所示。

由表 6 可知:(1)保持总运营收益不变,相比模式 1,模式 3 碳减排 16.7%,证明碳流追踪方法对碳排放的精准调控能力。(2)对于同样的碳排放,相

表 6 不同调度模式下典型运行点关键性能指标比较
Table 6 Comparison of key performance indicators at typical operating points under different dispatching modes

调度模式	VPP运营收益/元	总碳排放量/kgCO ₂
模式1	462	67.6
模式2	368	60.3
模式3(经济)	462	56.3
模式3(低碳)	480	60.1

比模式 2, 模式 3 运营收益提高 30.4%, 证明动态碳电折算系数优化在低碳调度时对保持经济性的必要性和优越性。

最后, 为评估文中提出的变步长自逼近算法代替多参数求解的可行性, 比较二者对模式 3 进行多目标优化的运行结果, 如表 7 所示。对比方法如下: 待优化参数共 6 个, 分别为基础电价、CS1—CS5 的碳价; 约束条件为碳价比例关系与节点碳势一致。选取 2 种不同精度的对比算法供比较。

表 7 不同算法的优化性能比较

Table 7 Comparison of optimization performance of different algorithms

性能参数	文中方法	对比方法 (低精度)	对比方法 (高精度)
决策变量数	2	6	6
约束条件数	0	4	4
种群规模	20	20	50
迭代次数	100	100	500
HV/(元·tCO ₂)	189	178	188
帕累托前沿覆盖率/%	100	82	100
C(文中方法, 对比方法)/%		62	7
运行时间/s	3 610	1 289	16 010

注: 因碳排放上限约 180 kgCO₂, 收益下限为 0 元, 故超体积度量(hypervolume, HV)参考点取(180 kgCO₂, 0 元); 帕累托前沿覆盖率的定义为该代个体中不被其他个体支配而组成帕累托前沿的比例; C(A, B) 为 B 解集中被 A 支配的解的比例。

由表 7 可知, 对比方法因无需多次迭代节点碳势结果而单个体的计算时间较短, 但此方法决策变量数远多于文中方法, 在相同的求解规模下尚未较好收敛, 解集质量较差; 若提高求解规模使得解集质量接近文中方法, 所需时间则相比文中方法提升 343%, 验证了文中方法的高求解效率。

5 结论

文中针对 VPP 在整合高渗透率 EV 充电负荷时面临的经济调度与碳减排协同难题, 提出一种基于碳流追踪的 EV 充电站动态定价方法及分层协同优化框架。通过构建交通-电力耦合系统仿真算例,

验证了所提方法在精准量化节点碳势、引导低碳充电行为、提升系统协同效益方面的有效性。主要结论如下:

(1) 建立碳势-电价动态耦合机制, 通过外层多目标优化、中层迭代协调、内层物理建模的三层解耦架构, 实现节点碳势驱动动态电价形成。算例表明, 该框架在维持经济性的同时, 可降低系统碳排放 16.7%。

(2) 构建电价-负荷-碳势闭环反馈架构, 实验证实优化后的碳价附加可引导 EV 用户向低碳节点迁移, 使系统在同等碳排放水平下收益提升 30.4%, 验证了依据碳势进行调控的有效性。

(3) 开发混合求解策略, 解决含碳流约束的高维非显式优化问题。帕累托前沿分析表明, 所提方法显著优于固定碳价或纯经济调度模式, 证实碳电协同优化对 VPP 多目标决策的有效性。

尽管所提方法在典型场景中表现良好, 但仍需要在以下方向进行深化研究:

(1) 交易机制完善。当前定价方法仅为理论分析, 并未与实际相结合, 未来将融合电力市场交易机制, 探索碳流追踪的实际应用场景, 通过电-碳耦合提升 VPP 经济性与系统可靠性。

(2) 参数自适应能力提升。预设碳电折算系数依赖人工调参, 受限于商业敏感参数可获性。未来需要探索隐私保护下的在线参数动态校准机制。

(3) 用户行为建模深化。现有模型基于理性假设, 后续可融合实时行为反馈数据构建考虑有限理性的多周期动态演化模型, 提升现实适用性。

文中通过碳流追踪技术将节点碳排放强度嵌入电价形成机制, 为 VPP 精细化管控 EV 柔性资源提供了可解释、可量化的动态定价依据。未来工作将进一步探索复杂背景下碳-电-交通协同优化范式, 推动新型电力系统低碳经济运行。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 政府白皮书: 新时代的中国能源发展 [EB/OL]. (2020-12-22) [2025-04-23]. <http://www.scio.gov.cn/gxzt/dtzt/2020/xsddzgnyfzbps/>.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. Government white paper: China's energy development in the new era [EB/OL]. (2020-12-22) [2025-04-23]. <http://www.scio.gov.cn/gxzt/dtzt/2020/xsddzgnyfzbps/>.
- [2] 梁露, 李佳承, 韩长江, 等. 运行风险与资源随机波动影响下的虚拟电厂优化调度方法 [J]. 供用电, 2023, 40(12): 22-31.
LIANG Lu, LI Jiacheng, HAN Changjiang, et al. Optimal scheduling method of virtual power plant under the influence of operational risk and random fluctuation of resources [J]. Distri-

- bution & Utilization, 2023, 40(12): 22-31.
- [3] 杨丰任, 王鸿, 王致杰. 基于碳排放生产优先级的综合能源虚拟电厂优化运行策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 192-202.
YANG Fengren, WANG Hong, WANG Zhijie. Optimal operation strategy of integrated energy virtual power plant based on production priority of carbon emission[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 192-202.
- [4] 艾芊, 刘敦楠. 虚拟电厂关键技术与市场机制[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(4): 361-362.
AI Qian, LIU Dunnan. Key technology and market mechanism of virtual power plant[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(4): 361-362.
- [5] 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.
- [6] 代贤忠. 碳中和对能源领域的影响 [EB/OL]. (2021-10-17)[2025-04-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1702895338045951179&wfr=spider&for=pc>.
DAI Xianzhong. The impact of carbon neutrality on energy sector [EB/OL]. (2021-10-17)[2025-04-23]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1702895338045951179&wfr=spider&for=pc>.
- [7] 张美霞, 孙铨杰, 杨秀. 考虑多源信息实时交互和用户后悔心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 632-645.
ZHANG Meixia, SUN Quanjie, YANG Xiu. Electric vehicle charging load prediction considering multi-source information real-time interaction and user regret psychology[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 632-645.
- [8] 袁洪涛, 徐潇源, 严正, 等. 电动汽车集中充换电设施规划和优化运行研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 157-174.
YUAN Hongtao, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Review of centralized EV charging and battery swapping facility planning and optimal scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 157-174.
- [9] 陈登勇, 刘方, 刘帅. 基于阶梯碳交易的含 P2G-CCS 耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2042-2054.
CHEN Dengyong, LIU Fang, LIU Shuai. Optimization of virtual power plant scheduling coupling with P2G-CCS and doped with gas hydrogen based on stepped carbon trading[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2042-2054.
- [10] 袁桂丽, 刘骅骐, 禹建芳, 等. 含碳捕集热电机组的虚拟电厂热电联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4440-4449.
YUAN Guili, LIU Huaqi, YU Jianfang, et al. Combined heat and power optimal dispatching in virtual power plant with carbon capture cogeneration unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4440-4449.
- [11] 李嘉祺, 陈艳波, 陈来军, 等. 工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3190-3200.
LI Jiaqi, CHEN Yanbo, CHEN Laijun, et al. Low-carbon economy optimization model of integrated energy system in industrial parks[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3190-3200.
- [12] FU X Q, BAI J H, SUN H B, et al. Optimizing agro-energy-environment synergy in agricultural microgrids through carbon accounting[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(5): 4819-4834.
- [13] LUO J, ZHUO W Y, LIU S Y, et al. The optimization of carbon emission prediction in low carbon energy economy under big data[J]. IEEE Access, 2024, 12: 14690-14702.
- [14] WANG W Y, HUO Q H, LIU Q R, et al. Energy optimal dispatching of ports multi-energy integrated system considering optimal carbon flow[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(5): 4181-4191.
- [15] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流分析理论初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 38-43, 85.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary theoretical investigation on power system carbon emission flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 38-43, 85.
- [16] QIAN T, SHAO C C, LI X L, et al. Multi-agent deep reinforcement learning method for EV charging station game[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 1682-1694.
- [17] 史文龙, 秦文萍, 王丽彬, 等. 考虑电动汽车需求和分时电价差异的区域电网 LSTM 调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3573-3587.
SHI Wenlong, QIN Wenping, WANG Libin, et al. Regional power grid LSTM dispatch strategy considering the difference between electric vehicle demand and time-of-use electricity price[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3573-3587.
- [18] 李姚旺, 张宁, 杜尔顺, 等. 基于碳排放流的电力系统低碳需求响应机制研究及效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2830-2842.
LI Yaowang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Mechanism study and benefit analysis on power system low carbon demand response based on carbon emission flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2830-2842.
- [19] 孙笑天, 卫志农, 陈胜, 等. 考虑碳流需求响应的园区低碳经济运行策略[J]. 电力建设, 2025, 46(5): 84-95.
SUN Xiaotian, WEI Zhinong, CHEN Sheng, et al. Strategy for low-carbon economic operation in industrial parks considering carbon flow demand response[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(5): 84-95.
- [20] 孙志媛, 孙艳, 刘默斯, 等. 考虑碳流需求响应的电力系统低碳运行策略[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 95-103.
SUN Zhiyuan, SUN Yan, LIU Mosi, et al. Low-carbon operation strategy of power system considering carbon flow demand

- response[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 95-103.
- [21] LI Y B, CHENG H H, LIN Z M, et al. Multi-objective optimization scheduling problem of VPP on generation side and demand side based on time-of-use electricity price[C]//2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT). Shanghai, China. IEEE, 2022: 494-498.
- [22] 秦子恺, 黄婧杰, 周任军, 等. 计及源-荷不确定性的虚拟电厂多目标鲁棒优化调度[J]. 电力系统及其自动化, 2023, 35(6): 13-21.
QIN Zikai, HUANG Jingjie, ZHOU Renjun, et al. Multi-objective robust optimal scheduling of virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(6): 13-21.
- [23] YUAN Q, YE Y J, TANG Y, et al. A novel deep-learning based surrogate modeling of stochastic electric vehicle traffic user equilibrium in low-carbon electricity-transportation nexus[J]. *Applied Energy*, 2022, 315: 118961.
- [24] SANER C B, TRIVEDI A, SRINIVASAN D. A cooperative hierarchical multi-agent system for EV charging scheduling in presence of multiple charging stations[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(3): 2218-2233.
- [25] 叶宇剑, 袁泉, 汤奕. 面向双碳目标的交通网-电网耦合网络中电动汽车负荷低碳优化方法[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 72-79.
YE Yujian, YUAN Quan, TANG Yi. Electric vehicle charging
- demand low carbon optimization in traffic-grid coupling networks towards "dual carbon" goal[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 72-79.
- [26] 林哲, 胡泽春, 宋永华. 最优潮流问题的凸松弛技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3717-3728.
LIN Zhe, HU Zechun, SONG Yonghua. Convex relaxation for optimal power flow problem: a recent review[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3717-3728.
- [27] 周天睿, 康重庆, 徐乾耀, 等. 电力系统碳排放流的计算方法初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 44-49.
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing, XU Qianyao, et al. Preliminary investigation on a method for carbon emission flow calculation of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 44-49.

作者简介：



赵宇

赵宇(2002), 男, 硕士在读, 研究方向为虚拟电厂分布式资源调度、电力系统潮流计算与优化(E-mail: 805984470@sjtu.edu.cn);

贺兴(1986), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力时空大数据分析、能源系统数字孪生与元宇宙;

艾芊(1969), 男, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电、微电网、人工智能在电力系统中的应用等。

Pricing method for electric vehicle charging stations based on carbon flow tracing

ZHAO Yu, HE Xing, AI Qian

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the challenge of dynamic pricing mechanisms in the efficient integration of electric vehicles (EVs) in virtual power plants (VPPs), a pricing method for EV charging stations based on carbon flow tracking is proposed. The method is designed to utilize node carbon potential to drive the formulation of differentiated electricity prices, thereby guiding the charging plans of EV users and achieving the economic and low-carbon synergistic optimization of grid operations. Specifically, the process is initiated with the quantification of EV traffic and queueing time costs, followed by the optimization of road network planning through an improved Dijkstra algorithm. Then, based on the optimal power flow results and carbon flow tracking theory, the node carbon potential at the charging station access points is accurately calculated. Subsequently, an innovative electricity-carbon coupled dynamic pricing mechanism is constructed based on the carbon potential calculation results, and a hierarchical iterative algorithm is designed to enable a closed-loop feedback optimization of electricity price signals, carbon potential distribution, and user response. Simulation results demonstrate that the proposed method can reduce carbon emissions by 16.7% at the same level of revenue, and increase system revenue by 30.4% at the same level of carbon emissions, thereby its effectiveness in guiding low-carbon behavior and enhancing the economic-environmental synergy of the grid is confirmed. A technically efficient and operable path for the VPP integration of EV resources and the realization of low-carbon economic operation in the grid is provided by this method.

Keywords: virtual power plant (VPP); road network planning; carbon flow tracing; dynamic pricing; multi-layer hybrid iterative algorithm; multi-objective optimization

(编辑 方晶)