

用户侧参与电-碳市场的协同交易与调度策略研究

张启文¹, 张小东¹, 朱明辉¹, 刘道晴², 韩洁平³, 戈泽琦⁴

1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048
2. 国网英大碳资产管理(上海)有限公司, 上海 200120
3. 东北电力大学 经济管理学院, 吉林 吉林 132012
4. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012

DOI: 10.61369/SSSD.2025150044

摘 要 : 本文针对两大核心问题展开研究: 一是用户在制定购电策略时, 往往未充分纳入碳排放成本; 二是电力市场与碳市场各自独立运作, 导致用户侧的购电、购碳策略难以形成有效协同。为此, 本文提出了电碳市场用户侧协同交易决策研究, 构建了四类模型, 分别是用户侧用电计划模型、用户侧参与电力市场交易模型, 以及两类用户侧参与碳市场交易模型。研究以电力聚合商与三个用户共同组成的小型工业园区为具体案例, 以此展开相关的讨论与分析。

关 键 词 : 同户侧; 电-碳市场; 协同交易

Research on Collaborative Trading and Dispatch Strategies for User-side Participation in the Power-Carbon Market

Zhang Qiwen¹, Zhang Xiaodong¹, Zhu Minghui¹, Liu Daoqing², Han Jieping³, Ge Zeqi⁴

1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an, Shaanxi 710048
2. State Grid Yingda Carbon Asset Management (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200120
3. School of Economics and Management, Northeast Electric Power University, Jinlin, Jilin 132012
4. school of electrical engineering, Northeast University of Electric Power, Jinlin, Jilin 132012

Abstract : This paper addresses two core issues: first, users often fail to fully incorporate carbon emission costs when formulating electricity procurement strategies; second, the independent operation of electricity markets and carbon markets makes it difficult to achieve effective coordination in user-side electricity and carbon procurement strategies. To address these challenges, this study proposes research on coordinated trading decisions for electricity and carbon markets at the user side, establishing four models: a user-side electricity consumption planning model, a user-side participation in electricity market trading model, and two types of user-side participation in carbon market trading models. The research uses a small industrial park composed of a power aggregator and three users as a specific case study to conduct relevant discussions and analyses.

Keywords : same household side; electricity carbon market; collaborative trading

引言

“双碳”目标下, 全国碳市场稳步运行与电力市场共同构成影响企业用能成本和决策的关键环境^[1]。但当前用户制定购电策略时常未将电力消费的碳排放成本作为关键决策变量。电碳成本分离使用户难制定协同优化交易策略, 这既增加用户用能成本, 还削弱碳市场通过价格信号引导用户主动减排的激励作用, 制约了整体减排效率^[2]。因此引导用户打破电碳市场决策壁垒开展用户侧参与电-碳市场的协同交易与调度策略对降低用户成本、激发市场活力、推动能源消费侧高质量减排具有重要意义^[3]。

本文提出了一个用户侧参与电碳市场协同交易与调度的策略框架。研究首先构建了电力市场与碳市场的交易成本测算模型, 以精准刻画用户的成本构成^[4]; 其次, 建立了一个综合性的双层优化决策模型, 其上层以用户总成本最小化为目标, 下层则模拟市场出清过程以求解最优交易策略。最后, 通过一个包含一个电力聚合商与三个典型用户的小型工业园区算例, 验证了所提模型的有效性, 并揭示了其协同效益^[5]。

一、用户侧交易决策模型构建

通过设立模型假设, 构建了用户侧用电计划与电力市场交易

模型, 模型的核心目标是为企业提供用电与交易的综合决策方案, 以实现经济性最优化^[6]。所涉及的决策要素及其关联如图1所示。

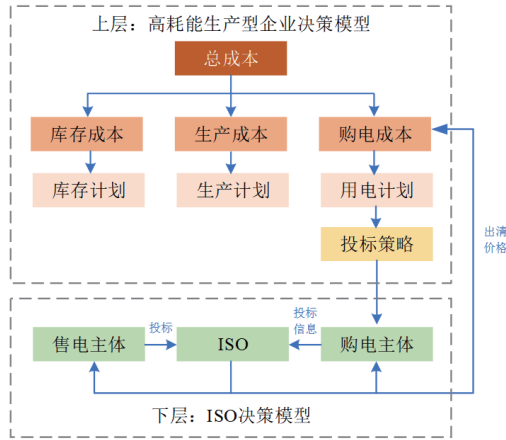


图1 高耗能生产型企业的决策

二、用户侧用电计划模型

高耗能制造业企业的用电计划模型如公式 (1) 至 (3) 所示:

$$\min_{b_u} C_1 + \max_{u \in U} \min_z C_2 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} b_{nt} \lambda_{nt} \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} (su_{int} y_{int} + p_{int} V_{int} + c_{int}^p Q_{int} + h_{int} X_{int} + \sum_{m \in \phi_n} C_{lnmt}) \quad (3)$$

式中: C_1 为购电成本; C_2 为其他总成本 (除购电成本外, 含生产成本、库存成本、运输成本及缺货成本); b_{int} 为节点 n 在时段 t 的投标量; h_{int} 为单位库存持有成本; X_{int} 为库存水平; C_{lnmt} 为相邻节点间运输成本; su_{int} 为生产启动成本; y_{int} 为 0-1 变量 (表是否生产); 为单位生产成本 (不含能耗成本); Q_{int} 为产量; λ_{int} 为节点 n 在时段 t 的市场出清电价。

产品需求约束如公式 (4) 和 (5) 所示:

$$U: \{u = D_{int} \in R^{|\mathcal{H}| \times |\mathcal{T}|}\} \quad (4)$$

$$D_{int} \begin{cases} D_{int} = \bar{D}_{int} + \varepsilon_{int}^+ (\hat{D}_{int} - \bar{D}_{int}) + \varepsilon_{int}^- (\bar{D}_{int} - \hat{D}_{int}), n \in N, \\ \varepsilon_{int}^+ + \varepsilon_{int}^- \leq 1, t \in T, n \in N, \\ \varepsilon_{int}^+, \varepsilon_{int}^- \in [0, 1], t \in T, n \in N, \\ \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} (\varepsilon_{int}^+ + \varepsilon_{int}^-) \leq \Gamma_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: U 为未确定集合; u 为 U 中未确定场景的元素; D_{int} 为产品需求及名义值; $\hat{D}_{int}$ 和 $\bar{D}_{int}$ 分别为产品最高、最低需求; ε_{int}^+ 和 ε_{int}^- 为 $[0, 1]$ 区间辅助变量 (控制需求从名义值上下偏离程度)。

$$z = (y_{int}, V_{int}, Q_{int}, X_{int}, W_{int}) \quad (6)$$

式中: y_{int} 是为表示产品是否进行生产的 0-1 变量; V_{int} 为缺货量; X_{int} 为库存水平; Q_{int} 为代表产量; W_{int} 为产品的运输量。

库存约束和运输约束以及产量约束如公式 (7) 至 (11) 所示

$$\forall u \in U, \exists z \in f(b_{nt}, u) \quad (7)$$

$$X_{int(t-1)} + Q_{int} + V_{int} - \sum_{m \in \phi_n} W_{lnmt} - D_{int} = X_{int}, i \in I, t \in T, n \in N \quad (8)$$

$$0 \leq X_{int} \leq X_{int}^{\max}, i \in I, t \in T, n \in N \quad (9)$$

$$-W_{lnmt}^{\max} \leq W_{lnmt} \leq W_{lnmt}^{\max}, i \in I, m \in \phi_n, t \in T, n \in N \quad (10)$$

$$Q_{int}^{\min} y_{int} \leq Q_{int} \leq Q_{int}^{\max} y_{int}, i \in I, t \in T, n \in N \quad (11)$$

投标量约束如公式 (12) 所示:

$$\sum_{i \in I} e_{in} Q_{int} + L_{nt} \leq b_{nt}, t \in T, n \in N \quad (12)$$

运输成本约束如公式 (13) 至 (14) 所示:

$$C_{lnmt} \geq \max\{0, c_{lnmt}^r W_{lnmt}\}, i \in I, t \in T, n \in N, m \in \phi_n \quad (13)$$

$$y_{int} \in \{0, 1\}, b_{nt}, V_{int}, Q_{int}, I_{int}, W_{lnmt} \in R \quad (14)$$

式中: n 和 m 表示节点的索引; N 是包含所有节点的集合; t 是时间段的索引; T 是所有时间段在用电期内的集合; ϕ_n 是在所有节点中与节点 n 相连接的集合; P_{int} 为单位缺货成本; W_{lnmt} 是产品的运输量; $X_{int}^{\max}$ 是允许持有的最大库存水平; $W_{lnmt}^{\max}$ 为最大运输量, e_{in} 是产品生产的单位能耗; L_{nt} 泛指企业生产运作中, 与产品制造无直接关联且无法转移的电能消耗。

三、用户侧参与电力市场交易模型

$$\min \sum_{g \in \Omega_g} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} p_{gt} q_{gt} - \sum_{i \in \Lambda_n} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} \bar{b}_{it} q_{it} \quad (15)$$

式中: p_{gt} 与 q_{gt} 分别是电力市场中售电方的报价及中标量; $\bar{b}_{it}$ 与 q_{it} 分别是电力市场中购电方的报价及中标量; $\sum_{g \in \Omega_g} q_{gt} + \sum_{m \in \phi_n} B_{nm} (\theta_{mt} - \theta_{nt}) = b_{nt} + \sum_{i \in \Lambda_n} \bar{b}_{it} : \lambda_{nt}, t \in T, n \in N$ (16)

$$\begin{aligned} 0 \leq q_{gt} \leq q_{gt}^{\max}, \forall g, t \in T \\ 0 \leq \bar{b}_{it} \leq \bar{b}_{it}^{\max}, \forall i, t \in T \end{aligned} \quad (17)$$

式中: g 和 i 分别用于指代电力市场中的售电方与购电方; Ω_n 与 Λ_n 分别用于表示电力市场中的售电方群体与购电方群体; $q_{gt}^{\max}$ 与 $\bar{b}_{it}^{\max}$ 分别是售电方及购电方的投标量;

$$B_{nm} (\theta_{mt} - \theta_{nt}) \leq F_{nm}^{\max}, t \in T, n \in N, m \in \phi_n \quad (18)$$

式中: B_{nm} 是输电线路的电纳; θ_{nt} 是输电网络节点的电压相位角度; $F_{nm}^{\max}$ 是输电线路的容量限制; ref 是参考节点的索引。

$$-\pi \leq \theta_{nt} \leq \pi, t \in T, n \in N \quad (19)$$

$$\theta_{nt} = 0, n = ref, t \in T \quad (20)$$

在上述模型基础上, 形成了用电计划与电力市场交易的双层决策模型, 如式 (21) 所示。

$$\begin{cases} \min_{b_u} C_1 + \max_{u \in U} \min_z C_2 \\ \min \sum_{g \in \Omega_g} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} p_{gt} q_{gt} - \sum_{i \in \Lambda_n} \sum_{n \in N} \sum_{t \in T} \bar{b}_{it} q_{it} \end{cases} \quad (21)$$

四、用户侧参与碳市场交易模型

生产活动中对应的实际负荷电量的 CO_2 排放量如公式 (22) 所示:

$$E_{c,k} = Q_{a,k} \cdot E_{eCO_2} \quad (22)$$

式中, $E_{c,k}$ 为电力负荷电量在第 k 月所对应的生产活动的 CO_2 排放量; E_{eCO_2} 为电力的 CO_2 排放系数。

应发碳配额公式如 (23) 所示:

$$C_{ad,k} = E_{c,k} \cdot R \quad (23)$$

式中， $C_{ad,k}$ 为企业在第 k 月实际应发碳配额； R 为市场调节系数。

为防止企业出现买不到所需碳配额的情况，本文会设定企业碳配额使用的增长上限。根据上一年度的企业实际应发碳配额，则本年度的碳配额可供使用量如公式 (24) 所示^[7]：

$$C_{s,k} = C_{ad-1,k} \cdot L \quad (24)$$

式中， $C_{s,k}$ 为第 k 月企业可供使用碳配额； $C_{ad-1,k}$ 为上一年度第 k 月企业实际应发碳配额； L 为碳配额使用增长限值。

本年度第 k 月最优购电量如公式 (25) 所示：

$$Q_{i+1,k} = \min \left\{ Q_{y,k} + Q_{m,k} + Q_{n,k}, \frac{C_{s,k}}{E_{CO_2}} \right\} \quad (25)$$

绿色证书实现了证电统一与分离两种联动模式。用户的碳市场成本或收益 C^{CO_2} 将直接由其绿证数量决定，如公式 (26) 所示：

$$C^{CO_2} = P^{CO_2} (\theta^{CO_2} Q - K) \quad (26)$$

式中： Q 代表用户购买火电的数量，而绿电的使用量不计入碳排放考核范围； P^{CO_2} 表示碳配额价格， K 免费碳配额是指无偿分配给用户的碳排放额度。当用户购买 Q 单位电力并同时购买相当于 Q^s 单位电力的绿色证书时，碳排放考核可将相应数量的绿电量予以扣减后用户参与碳市场的成本或收益 C^{CO_2} 如公式 (27) 所示：

$$C^{CO_2} = P^{CO_2} [\theta^{CO_2} (Q - Q^s) - K] \quad (27)$$

式中， Q^s 为所购绿证的电量。故用户购买绿色电力增加的碳交易收益如公式 (28) 所示：

$$\Delta C^{CO_2} = C^{CO_2} - C^{CO_2} = P^{CO_2} \theta^{CO_2} Q^s \quad (28)$$

五、用户购电及碳交易成本最小化模型

目标函数：

$$F_2 = \min_{Q_j^{GU}, Q_j^{RU}} \left[\sum_{t \in T} (P_{jt}^{GU} Q_{jt}^{GU} + P_{jt}^{RU} Q_{jt}^{RU}) + P_{CO_2} (\sum_{t \in T} \theta_{CO_2} Q_{jt}^{GU} - K_j) \right] \quad (29)$$

式中：第一项表示用户 j 的火电和绿电的购电成本之和；第二项表示用户 j 的碳配额交易成本，其中 P_{CO_2} 表示碳配额价格， k_j 表示免费分配给用户 j 的碳配额。 $P \setminus \sup 14(GU)$ 和

$P \setminus \sup 14(RU)$ 分别表示 t 时段聚合商对用户 j 的火电和绿电报价， $Q \setminus \sup 14(GU)$ 和 $Q \setminus \sup 14(RU)$ 分别表示用户 j 在 t 时段的火电和绿电购电量。

约束条件：

$$Q_{jt}^{UMIN} \leq Q_{jt}^{GU} + Q_{jt}^{RU} \leq Q_{jt}^{UMAX} \quad t \in T \quad (30)$$

$$\sum_{t \in T} (Q_{jt}^{GU} + Q_{jt}^{RU}) = Q_j^C \quad t \in T \quad (31)$$

$$K_j - \sum_{t \in T} \theta_{CO_2} Q_{jt}^{GU} \leq E_j^{sMAX} \quad t \in T \quad (32)$$

$$\sum_{t \in T} \theta_{CO_2} Q_{jt}^{GU} - K_j \leq E_j^{bMAX} \quad t \in T \quad (33)$$

式中： Q_{jt}^{UMIN} 表示用户 j 在 t 时段的最低负荷， Q_{jt}^{UMAX} 表示用户 j 在 t 时段的最高负荷。 $Q \setminus \sup 14(C)$ 表示用户 j 的总负荷。

E_j^{sMAX} 为用户 j 碳配额出售上限，是指当用户的实际碳排放量低于其免费获得的配额时，其所允许出售的富余配额的最高数量，若

用户 j 只购买绿电则可将免费配额 K_j 卖光； E_j^{bMAX} 为用户 j 碳配额购买上限，是指当用户的实际碳排放量超过其免费配额时，为完成碳排放考核而允许其购入的额外配额数量上限。

六、结论

本研究围绕电碳市场用户侧如何协同制定交易策略展开，旨在解析电力市场与碳市场之间的交互机制，及其对用户购电行为与减排决策的影响^[8]。研究发现，电碳市场通过市场耦合形成以碳权为核心的市场体系，不仅有助于促进新能源装机增长和负荷用电，也加速了传统发电方式的低碳转型^[9]。发电企业通过优化碳配额使用，实现碳排放成本的有效控制；而用户侧在购电过程中将碳排放成本纳入考量，借助中长期购电组合策略与日前市场中的电碳联合需求响应，显著降低了用能成本与碳排放水平^[10]。研究构建了电力市场与碳市场的交易成本模型，建立了电碳交易的双层优化决策框架，并针对不同政策情景分析了用户侧的交易策略选择。通过算例验证，模型表现出良好的有效性。结果显示，在分时电价与直购电模式下，用户通过调整生产计划、合理利用低价时段组织生产，能够有效实现用电成本的节约。

参考文献

- [1] 王正位, 张跃星. "双碳"目标背景下绿色金融与电力市场协同发展研究[J]. 新金融, 2023(2).
- [2] 华昊辰, 辛世禹, 陈星莺, 等. 基于"虚拟碳储存"的需求侧电-碳耦合交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2131-2143.
- [3] 马莉. 电碳市场协同发展 助力实现碳排放"双控"目标[J]. 中国电力企业管理, 2023(22): 50-53.
- [4] 杨玲玲, 马向春. 电力市场环境下碳排放权分配模型的研究[J]. 陕西电力, 2022(2).
- [5] 陈思齐. 面向新型电力系统的负荷聚合商多元市场协同交易模型[D]. 华北电力大学(北京), 2023.
- [6] 全球能源互联网发展合作组织. 用电技术发展与展望 水利电力[M]. 中国电力出版社, 2021.
- [7] 代应, 戴佳宏, 宋寒, 等. 碳交易下驱动企业碳减排的碳配额机制[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024(4).
- [8] 黄国日, 尚楠, 梁梓杨, 等. 绿色电力消费与碳交易市场的链接机制研究[J]. 电网技术, 2024(002): 048.
- [9] 刘婷, 康玲. 碳排放权交易对电力企业价值的路径研究[J]. 商业观察, 2025(24).
- [10] 季聪, 尹飞, 孙权, 戚文君, 苏红莉. 用户侧碳排放指标体系构建及典型场景应用[C]//2021电力行业信息化年会. 中国电机工程学会, 2021.