

基于碳市场与绿证分配制度的源荷低碳经济调度

杨芃, 杨晓辉, 杨莉, 吴迟绿, 杨泽宇

(南昌大学信息工程学院, 南昌 330031)

摘要: 为充分发挥虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的减排潜力, 挖掘清洁能源潜在利润, 提出了一个基于二级碳市场与绿证分配制度的源荷低碳经济调度模型。首先, 针对VPP内聚合了多种能源设备的集线器, 以综合运维成本最小为优化目标; 其次, 建立基于碳配额交易与拍卖市场的二级碳市场交易体系, 模拟源侧多企业共同参与不完全信息博弈; 再次, 依据碳流理论, 将碳排放量与碳流密度结合为碳指标, 并建立荷侧绿证分配方法, 提高用户购买绿证的经济效益, 从而提高绿证价值, 使提供绿证的清洁能源企业从中获益。最后, 以一个多区域VPP模型为例, 对夏、冬两季典型日进行模拟, 算例计算结果验证了二级碳市场与绿证分配制度能有效利用市场传导机制提高环保企业收益, 鼓励高碳排放企业向低碳转型。

关键词: 碳市场; 绿色证书; 虚拟电厂; 低碳经济调度

Low-Carbon Economic Dispatching of Source and Load Based on Carbon Market and Green Certificate Allocation System

YANG Peng, YANG Xiaohui, YANG Li, WU Chilü, YANG Zeyu

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To fully unleash the emission reduction potential of virtual power plant (VPP) and tap into the potential profits of clean energy, a source-load low-carbon economic dispatching model based on the secondary carbon market and green certificate allocation system is proposed. Firstly, aiming at the hub that aggregates various energy devices within VPP, the optimization objective is to minimize the comprehensive operation and maintenance costs. Secondly, a secondary carbon market trading system based on carbon quota trading and auction markets is established to simulate the incomplete information game involving multiple enterprises on the source side. Thirdly, based on carbon flow theory, carbon emissions and carbon flow density are combined into a carbon indicator, and a green certificate allocation method for the load side is established to improve the economic benefits of users purchasing green certificates, thereby enhancing the value of green certificates and benefiting clean energy enterprises that provide them. Finally, a multi-region VPP model is used as an example to simulate typical days in summer and winter. The results of the case study verify that the secondary carbon market and green certificate allocation system can effectively utilize market transmission mechanisms to increase the revenue of environmentally friendly enterprises and encourage high-carbon emitting enterprises to transition towards low-carbon operations.

Key words: carbon market; green certificates; virtual power plant; low-carbon economic dispatching

0 引言

实现清洁能源发电平价上网已成为我国电力系统低碳转型的关键。尽管传统的补贴政策在推动清洁能源企业发展方面颇具成效^[1], 但随着企业规模

的增长, 财政负担亦随之加重。为更好地发挥市场机制的调节作用, 我国在财政补贴退坡的背景下, 推出了碳交易、绿色证书等一系列市场导向型政策^[2]。但我国的碳配额分配方式仍以免费为主, 这将在一定程度上削弱碳市场的交易活跃度, 导致碳价格疲软, 影响高排放企业的减排动力^[3]。虽然碳交易机制可以有效降低高碳企业的竞价产出^[4], 但政府对该机制的过度依赖也会对经济发展产生一定

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61963026)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61963026).

的消极影响,在推行碳交易机制时应谨慎权衡利弊^[5]。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)^[6]作为一种包含能源与负荷的新型电力协调管理系统,通过整合优化多个分布式能源,实现了能量的高效利用与降低系统碳排放。为充分挖掘VPP源荷协作的减排潜力,本文摒弃了以往仅对源侧^[7-9]或荷侧^[10-11]调度的单一视角。文献[12]提出了多种碳排放责任分摊方法,为本文研究提供了坚实的理论基础。文献[13]进一步证明了碳价对用户减排的积极作用。虽然文献[14-15]分别探讨了绿证和阶梯碳价对电力系统减排的影响,但尚未深入探究两者结合的效果。此外,现有文献在分析碳排放问题时,主要关注用户的碳排放量,忽视了反映单位能量清洁程度的碳流密度,这可能导致使用较清洁能源的用户在大量用能时也被分入高碳价区间,降低其减排意愿^[16-17]。

为充分发挥市场传导机制的减排潜力,本文构建了一个基于二级碳市场与绿证分配的源荷低碳经济调度模型。该模型在源侧通过模拟碳配额交易市场,分析不同碳配额需求对企业参与交易积极性的影响;在荷侧综合考虑碳排放量和碳流密度两个关键指标,提出了一种绿证分配模型,在保持碳排放成本差异的同时,有效降低了总成本,从而提升了用户为绿证支付更高价格的意愿。最后由算例验证所提模型对系统减排的有效性。

1 二级碳市场交易机制

鉴于碳交易制度在控制碳排放方面的市场化优势^[18],本文提出了如图1所示的二级碳市场交易机制,将政府的减排任务转变为受政府调控与利益驱动共同影响的市场行为。在该机制中,各企业基于自身目标独立行动,政府仅通过调控交易市场中的碳配额供应量来遏制投机行为。

1.1 拍卖市场

1.1.1 统一价格出清机制

拍卖市场采用多轮拍卖模式,第一轮拍卖开始时政府基于总碳配额量与总拍卖轮数设定初次拍卖的碳配额供应量。此后每轮拍卖的碳配额供应量均由政府根据历史拍卖结果与剩余碳配额量的变化情况动态调整,以实现对市场波动的实时反馈^[19]。因此,政府在第 t 轮拍卖时提供的碳配额量 $Q_{s,t}$ 为:

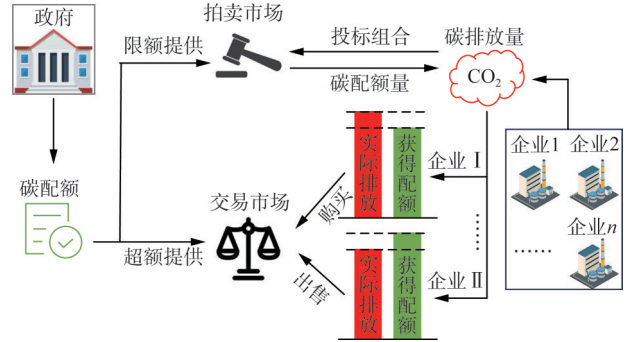


图1 二级碳市场示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the secondary carbon market

$$Q_{s,t} = \begin{cases} C_s/N, t=1 \\ \min \left\{ \sum_{i=1}^m Q_{c,i,t-1}, \frac{C_s - \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{t-1} Q_{w,i,k}}{N-t+1} \right\}, t \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_s 为系统总碳配额需求; N 为总拍卖轮次; m 、 ω 分别为参与拍卖、竞拍成功的企业数量; $Q_{c,i,t}$ 为企业 i 的第 t 轮投标量; $Q_{w,i,k}$ 为企业 i 在第 k 轮获得的碳配额量。

在第 t 轮拍卖中,当所有企业提交包含投标价格 $M_{c,i,t}$ 和投标量 $Q_{c,i,t}$ 的投标组合后,政府依据投标价格从高到低的原则依次分配碳配额。当第 ψ 家企业获得的碳配额恰好超出政府供应量时,其投标价格即被确定为该轮的成交价格 $M_{ac,t}$ 。企业 i 在本轮拍卖中获得的碳配额量 $Q_{w,i,t}$ 与出清价格 $M_{w,i,t}$ 为:

$$M_{w,i,t} = \begin{cases} M_{ac,t} = M_{c,\psi,t}, i \leq \psi \\ +\infty, i > \psi \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_{w,i,t} = \begin{cases} Q_{c,i,t}, M_{c,i,t} > M_{ac,t} \\ \min \left\{ Q_{c,i,t}, \frac{Q_{s,t} - \sum_{i=1}^{u-1} Q_{c,i,t}}{u} \right\}, M_{c,i,t} = M_{ac,t} \\ 0, M_{c,i,t} < M_{ac,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $M_{c,\psi,t}$ 为企业 ψ 第 t 轮投标价格; u 为投标价格等于出清价格的企业数量。

1.1.2 企业竞拍策略

假设共有 m 家企业参与碳市场,各企业每轮的投标量 $Q_{c,i,t}$ 为:

$$Q_{c,i,t} = \frac{(1+e)(Q_{c,i} - \sum_{k=1}^{t-1} Q_{w,i,k})}{N-t+1} \quad (4)$$

式中: e 为外部经济环境影响因子; $Q_{c,i}$ 为企业 i 期望通过拍卖市场获得的配额量。

企业 i 初始投标价格 $M_{c,i,1} \sim (M_{c,i}, M_{v,i})$ 。其中 $M_{c,i}$ 为起拍价格, $M_{v,i}$ 为企业 i 的初始价位上限。

竞拍成功后, 企业会保留投标价格继续参与拍卖。当企业获得的碳配额量超出预期时, 会选择是否继续竞拍。如果竞拍失败, 企业会根据历史拍卖数据与自身表现调整竞拍策略, 以提高胜算:

$$M_{c,i,t+1} = M_{ac,t} + \gamma(M_{v,i} - M_{ac,t}) \quad (5)$$

式中 γ 为企业风险偏好因子。

根据后悔厌恶理论, 投资者会因决策遭受损失而感到后悔, 这种情绪可能导致未来策略的改变。

1.2 交易市场

鉴于拍卖市场存在的风险, 部分企业可能面临碳配额不足的问题, 而另一些企业则可能获得过多的碳配额。因此建立交易市场供各企业买卖碳配额成为必要。为维持市场稳定, 政府会在交易市场中保留一定量的碳配额以遏制投机行为。因此, 交易市场的碳价 M_m 为:

$$M_m = \begin{cases} (1 + \alpha)M_a, \sum Q_{m,i} < 0 \\ (1 - \alpha)M_a, \sum Q_{m,i} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$M_a = \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^N Q_{w,i,t} M_{ac,t} / \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^N Q_{w,i,t} \quad (7)$$

式中: M_a 为拍卖市场出清均价; α 为价格影响因子; $Q_{m,i}$ 为企业 i 在交易市场中需买卖的碳配额量。

2 碳流计算

采用基于比例共享原则的碳排放流追踪模型进行碳流计算, 通过有功功率进行潮流跟踪, 实现碳排放责任公平分摊^[20]。以系统任意节点 j 为例, 节点碳流密度 ρ_j 与碳排放量 C_j 为:

$$\rho_j = \sum_{c \in I} \rho_c P_c / \sum_{c \in I} P_c \quad (8)$$

$$C_j = \rho_j P_j \quad (9)$$

$$\rho_j = \rho_o, \forall o \in O \quad (10)$$

式中: P_j 、 P_c 分别为流过节点 j 、 c 的有功功率; ρ_c 、 ρ_o 分别为节点 c 、 o 的节点碳流密度; I 、 O 分别为节点流入、流出支路集合。

3 负荷碳指标与碳价区间

与传统阶梯碳价中仅考虑碳排放量的计算方法相比, 碳排放量与碳流密度更能反映不同负荷区域所承担的碳排放责任的差异性。本文将碳排放量与碳流密度结合为碳指标 f , 并基于该指标建立分级

标杆 K 界定各负荷区域的碳排放程度^[21]。

$$f_j = \sigma_1 \frac{C_j}{C_{av}} + \sigma_2 \frac{\rho_j}{\rho_{av}} \quad (11)$$

$$K = (1 - \beta)(\sigma_1 \frac{C_{av}}{C_{av}} + \sigma_2 \frac{\rho_{av}}{\rho_{av}}) = 1 - \beta \quad (12)$$

式中: j 为负荷区域; f_j 为区域 j 的碳指标; σ_1 、 σ_2 为权重系数, $\sigma_1 + \sigma_2 = 1$; C_{av} 、 ρ_{av} 分别为平均碳排放量与碳流密度; β 为减排系数。

在计算出各区域的 f_j 与 K 后, 依据表1进行分级, 确定各区域的碳排放成本 C_j ^[22]。

$$C_j = \begin{cases} f_j \lambda_1, f_j \in A \\ (1 - 2\delta)K\lambda_1 + [f_j - (1 - 2\delta)K]\lambda_2, f_j \in B \\ (1 - 2\delta)K\lambda_1 + \delta K\lambda_2 + [f_j - (1 - \delta)K]\lambda_3, f_j \in C \\ (1 - 2\delta)K\lambda_1 + \delta K\lambda_2 + 2\delta K\lambda_3 + [f_j - (1 + \delta)K]\lambda_4, f_j \in D \\ (1 - 2\delta)K\lambda_1 + \delta K\lambda_2 + 2\delta K\lambda_3 + \delta K\lambda_4 + [f_j - (1 + 2\delta)K]\lambda_5, f_j \in E \end{cases} \quad (13)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 和 λ_5 分别为不同阶梯碳价区间的碳价; δ 为碳价区间系数; A 、 B 、 C 、 D 和 E 为阶梯碳价区间。

表1 阶梯碳价分区标准

Tab. 1 Standard for tiered carbon price zoning

类型	区间	碳价
A	$f_j < (1 - 2\delta)K$	λ_1
B	$(1 - 2\delta)K \leq f_j \leq (1 - \delta)K$	λ_2
C	$(1 - \delta)K < f_j \leq (1 + \delta)K$	λ_3
D	$(1 + \delta)K < f_j \leq (1 + 2\delta)K$	λ_4
E	$f_j > (1 + 2\delta)K$	λ_5

4 源荷低碳经济调度模型

4.1 源侧经济调度

为有效调度多区域VPP各区域内及区域间的分布式能源调度, 建立如图2所示的集线器结构, 该结构能有效统一各区域内的能源单元^[23]。

目标函数为各集线器内设备运行成本最低。

$$\min [\sum_{t=1}^{24} (\varepsilon_c P_{c,t} - \varepsilon_{sc} P_{sc,t} + \varepsilon_g P_{g,t} + \sum_{x \in X} \varepsilon_x P_{x,t})] \quad (14)$$

式中: ε_c 、 ε_{sc} 、 ε_g 、 ε_x 分别为集线器购电、售电、购气、设备 x 运维成本; $P_{c,t}$ 、 $P_{sc,t}$ 、 $P_{g,t}$ 分别为集线器 t 时段购电、售电与购气量; $P_{x,t}$ 为 t 时段设备出力; X 为集线器内设备集合。

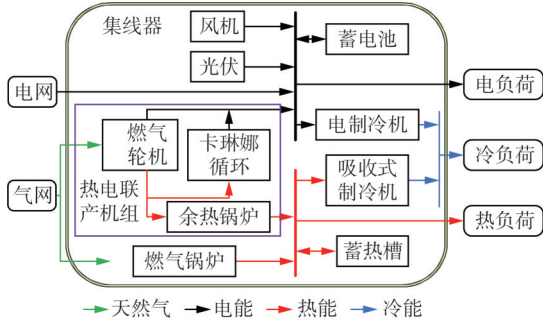


图 2 集线器结构

Fig. 2 Hub architecture

储能设备的出力约束为:

$$W_{x,t+1} = W_{x,t} + (P_{in,x,t} \eta_{ch} - P_{out,x,t} / \eta_{di}) \Delta t \quad (15)$$

$$W_{x,min} \leq W_{x,t} \leq W_{x,max} \quad (16)$$

$$W_{x,1} = W_{x,24} = W_{cy,x} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{in,x,t} \leq P_{ch,max} \mu_{x,t} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{out,x,t} \leq P_{di,max} (1 - \mu_{x,t}) \quad (19)$$

式中: $W_{x,t}$ 为 t 时段储能设备 x 存储的能量; $P_{in,x,t}$ 、 $P_{out,x,t}$ 分别为储能设备 x 充入、释放能量; η_{ch} 、 η_{di} 分别为储能充、放能效率; $W_{x,min}$ 、 $W_{x,max}$ 分别为储能设备 x 的能量下、上限; $W_{cy,x}$ 为储能设备 x 的始末循环能量; $P_{ch,max}$ 、 $P_{di,max}$ 分别为储能充、放能上限; $\mu_{x,t}$ 为储能设备 x 的状态, 其取值为 0-1; Δt 为单位时间。

其他设备的出力约束为:

$$0 \leq P_{in,x,t} \leq P_{x,max} \quad (20)$$

$$P_{out,x,t} = P_{in,x,t} \eta_x \quad (21)$$

式中: $P_{in,x,t}$ 、 $P_{out,x,t}$ 分别为 t 时段设备 x 输入、输出功率; $P_{x,max}$ 为输入功率上限; η_x 为能量转换效率。

各集线器能量平衡约束为:

$$P_{load,t} = \sum_{x \in O} P_{out,x,t} - \sum_{x \in I} P_{in,x,t} \quad (22)$$

式中: $P_{load,t}$ 为 t 时段能量负荷; O 、 I 分别为生产、消耗相应能量的设备集合。

集线器内储能设备在储存能量的同时, 也将能量中对应的碳排放量储存其中, 并与原有碳排放量混合, 在输出时随能量流入网络中。其碳流模型为:

$$C_{in,x,t} = P_{in,x,t} \rho_{in,x,t} \Delta t \quad (23)$$

$$C_{out,x,t} = (P_{out,x,t} \rho_{x,t-1} / \eta_{di}) \Delta t \quad (24)$$

$$\rho_{x,t} = (\rho_{x,t-1} W_{t-1} + C_{in,x,t} - C_{out,x,t}) / W_t \quad (25)$$

式中: $C_{in,x,t}$ 、 $C_{out,x,t}$ 分别为 t 时段储能设备 x 充入、释放的碳排放量; $\rho_{in,x,t}$ 为 t 时段储能设备 x 充能时输

入端的碳流密度; $\rho_{x,t}$ 为 t 时段储能设备 x 内的碳流密度; W_t 为 t 时段存储的能量。

其他设备的碳流模型为:

$$\rho_{out,x,t} = \rho_{in,x,t} / N_x \eta_x \quad (26)$$

式中: $\rho_{out,x,t}$ 、 $\rho_{in,x,t}$ 分别为 t 时段设备 x 输出、输入碳流密度; N_x 为设备 x 输出端口数量。

4.2 碳市场交易

在碳市场交易中, 各集线器需要购买相应的碳配额以抵消其运营过程中产生的碳排放量, 避免触发政府设定的超额碳排放惩罚机制:

$$\min [M_{A,I} + M_{T,I} + (C_{s,I} - Q_{A,I} + Q_{T,I}) M_p] \quad (27)$$

$$M_{A,I} = \sum Q_{w,I,t} M_{ac,t} \quad (28)$$

$$M_{T,I} = Q_{T,I} M_m \quad (29)$$

式中: $M_{A,I}$ 、 $M_{T,I}$ 分别为集线器 I 参与拍卖市场、交易市场的成本; $C_{s,I}$ 为集线器 I 的总碳排放量; M_p 为超额碳排放惩罚价格; $Q_{A,I}$ 、 $Q_{T,I}$ 分别为集线器 I 在拍卖市场、交易市场中买入、售出的碳配额量; $Q_{w,I,t}$ 为集线器 I 在拍卖市场第 t 轮获得的碳配额量。

4.3 荷侧调度

为强化绿证对用户经济价值, 激发用户的购买积极性, 荷侧调度的目标函数为碳指标差异最小。

$$\min \left(\sqrt{\sum_{j=1}^n |f_{av} - f'_j| / n} \right) \quad (30)$$

$$f_{av} = \sigma_1 \left(\sum_{j=1}^n C_j - G_j \rho_{av} \right) / n C_{av} + \sigma_2 \left[\sum_{j=1}^n (C_j - \sum_{j=1}^n G_j \rho_{av}) \right] / \sum_{j=1}^n P_j \rho_{av} \Delta t \quad (31)$$

$$f'_j = \frac{\sigma_1 (C_j - G_j \rho_{av})}{C_{av}} + \frac{\sigma_2 (C_j - G_j \rho_{av})}{P_j \rho_{av} \Delta t} \quad (32)$$

$$\sum_{j=1}^n G_j \leq \sum_{t=1}^{24} (P_{pv,t} + P_{wt,t}) \quad (33)$$

式中: f_{av} 、 f'_j 分别为用户平均、区域 j 分配绿证后的碳指标; G_j 为区域 j 获得的绿证数量; $P_{pv,t}$ 、 $P_{wt,t}$ 分别为光伏、风机 t 时段的输出功率; n 为负荷区域数量; Δt 为单位时间。

4.4 求解

本文求解流程如图 3 所示, 具体步骤如下。

1) 依据输入的初始参数进行源侧经济调度, 并输出各集线器的出力与碳排放情况;

2) 将各集线器碳排放量输入碳市场交易模型

中,输出各集线器购买碳配额成本;

3) 计算多区域VPP的碳流分布情况,确定各负荷区域的碳指标与碳价区间;

4) 将各负荷区域的碳指标与碳价区间输入负荷侧调度模型,输出各区域负荷碳成本。

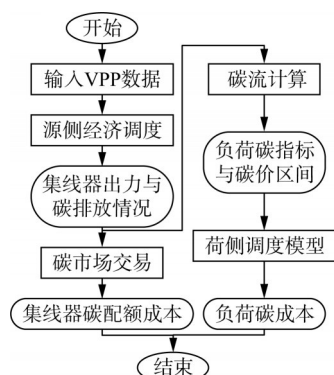


图3 求解流程

Fig. 3 Solution flow chart

5 算例分析

5.1 模型参数

为验证模型对减排的经济激励效果,构建一个结构如图4所示的多区域VPP模型。该模型采用双边电力交易与联营热、冷交易机制,模拟不同区域间的能源交易情况。其中,集线器1、2、3分别负责为工业、商业、居民负荷供电,各负荷需求如图5所示。各集线器内设备数据参考文献[23-25],分为10家子企业共同参与碳市场交易, $M_{v,i}$ 按所属集线器的碳排放量高低次序为 $1.75 M_{c,i}$ 、 $1.5 M_{c,i}$ 、 $1.25 M_{c,i}$,二级碳市场数据参考文献[19]。

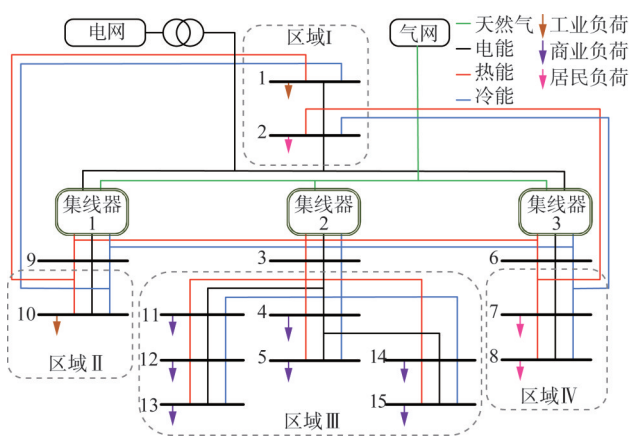
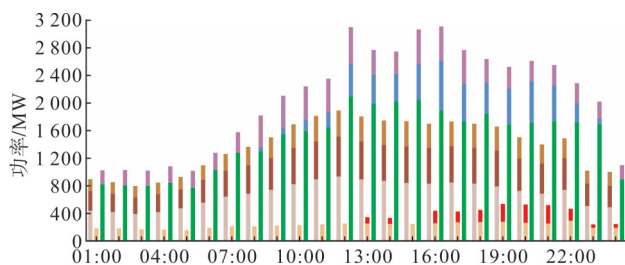
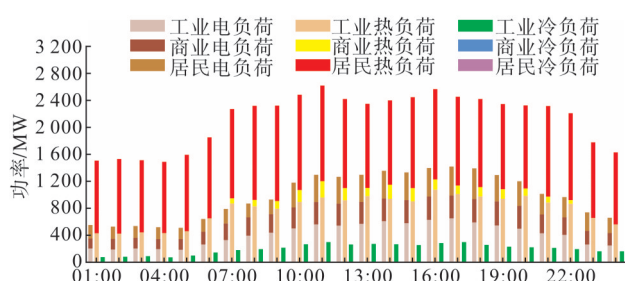


图4 多区域VPP节点图

Fig. 4 Multi-region VPP nodes diagram



(a) 夏季



(b) 冬季

图5 负荷需求

Fig. 5 Load demands

根据《中国应对气候变化的政策与行动》规划,截至2025年,中国计划将单位GDP二氧化碳排放较2020年降低18%^[26],相当于年均降低3.6%,故令 $\beta=0.04$ 。以图4所示的负荷区域为基本单位参与调度,阶梯碳价数据参考文献[27]。

5.2 建模结果及分析

5.2.1 源侧经济调度结果

各集线器在各时刻的输出功率与碳排放量如图6所示。鉴于各集线器需遵循双边电力交易合约,导致彼此之间的热、冷能协调调度尤为重要。特别是在夏季的00:00时,集线器2和3在满足各节点热负荷需求的同时,还需为集线器1中的蓄热槽提供必要的能源支持。深入分析集线器的碳排放量变化趋势,可以观察到其大体与设备出力呈正比关系。然而,碳流密度即碳排放量与输出功率的比例会随设备运行状态的动态变化而波动。这主要归咎于设备转换效率的差异:在相同功率下,转换效率的提升往往伴随着碳排放量的减少。因此,各集线器输出的碳流密度会因设备在不同时刻的出力比重的变化而改变。

5.2.2 二级碳市场调度结果

拍卖市场的竞拍动态如图7所示,二级碳市场交易结果如表2所示。从季节层面分析,尽管夏冬

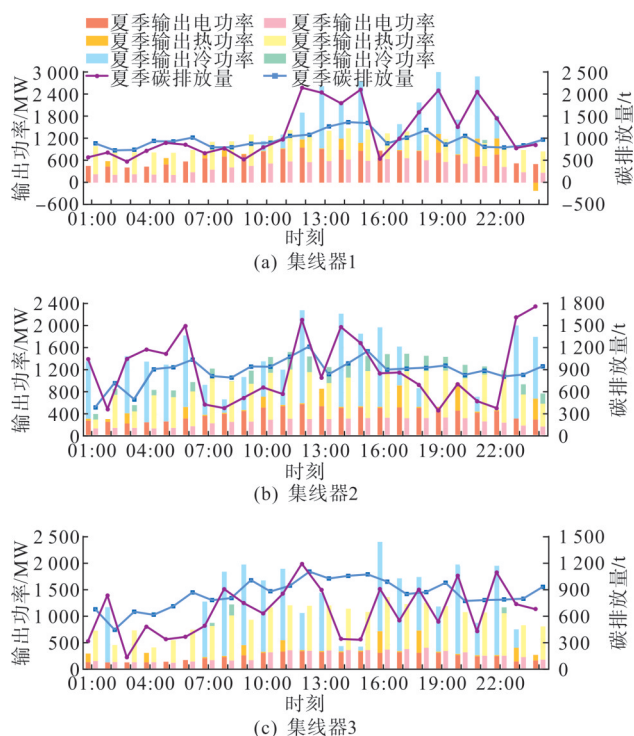


图6 集线器输出功率与碳排放量

Fig. 6 Output power and carbon emissions of hubs

两季碳排放总量相近,但受市场随机性因素影响,夏季时企业参与拍卖的积极性较高,导致总出清价格与成交量均较冬季有所提升。这一趋势促使政府增加碳配额供应量,使部分企业较早获得足够的碳配额并退出拍卖,因此最后4轮竞争烈度较冬季有所降低。与此同时,由于碳配额供应充足,碳交易市场呈现买方市场特征,碳配额单价较冬季降低约23%。经计算,夏季碳配额均价为40.1元/t,冬季为39.7元/t,与两季实际碳排放量比例基本吻合。

从集线器层面分析,由于各集线器的碳排放量存在差异,参与拍卖的策略及效果也各不相同。例

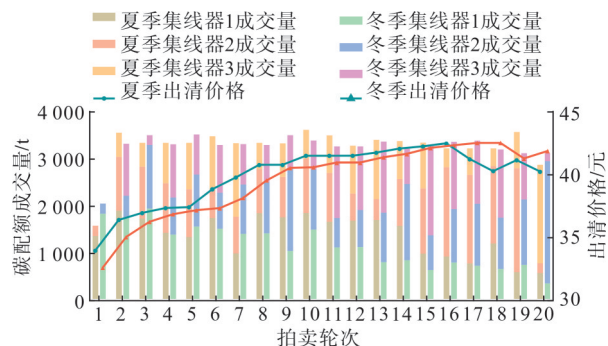


图7 拍卖市场竞拍动态

Fig. 7 Auction market bidding dynamics

表2 碳市场交易结果

集线器(季节)	总成本		
	拍卖市场	交易市场	合计
1(夏)	111.0	-1.3	109.7
2(夏)	85.2	1.9	87.1
3(夏)	66.3	-0.6	65.7
1(冬)	90.8	-1.6	89.2
2(冬)	89.3	-3.8	85.5
3(冬)	79.5	5.4	84.9

如,集线器1为获取更多碳配额,在拍卖初期便采取激进策略,恰逢此时出清价格较低,故其最终成交均价仅为39.3元/t,相较于其他集线器的40.3元/t更具优势。而集线器3由于两季碳排放量均为最低,致使初始投标价格相对保守,初期未能成功获得碳配额。然而,通过策略调整及投标价格提升,该集线器迅速开始获取碳配额,并最终与其他集线器的成交均价相近。简而言之,二级碳市场交易机制能有效发挥市场调节作用,使碳配额价格围绕其价值自由波动。

为全面剖析政府减排政策对集线器成本结构的影响,以冬季拍卖市场为例,从碳配额需求差异与价格影响因子变化两个关键维度,定量分析这些因素对企业成本的影响机制。

在分析碳配额需求差异的场景中,假设各集线器所需碳配额量为碳排放量的100%、80%、50%,则拍卖市场各轮出清价格如图8所示,各集线器总成本如表3所示。分析发现,碳配额需求的减少在拍卖初期对市场影响显著。然而,自第6轮起,随着碳配额获取紧迫性的提升及政府碳配额供应量的减少(受前期拍卖结算影响),各轮次出清价格均呈现上涨趋势,甚至部分低碳配额需求出清价格出现反超。总体而言,碳配额均价仍与碳配额需求保持正比关系,例如集线器2在不同碳配额需求下的购入均价分别为40.1元/t、30.0元/t、19.1元/t。

在分析价格影响因子变化的场景中,图9展示了卖方市场中 α 对交易市场的影响。经研究发现,交易市场的碳价涨幅与 α 呈正相关关系。这意味着,在交易市场中,随着 α 的减少,出售碳配额的集线器获利变低,而需要购入碳配额的集线器成本也相应减少,降低了拍卖市场中购买碳配额的经济驱动力,使原本过热的碳市场交易热度得以回归正

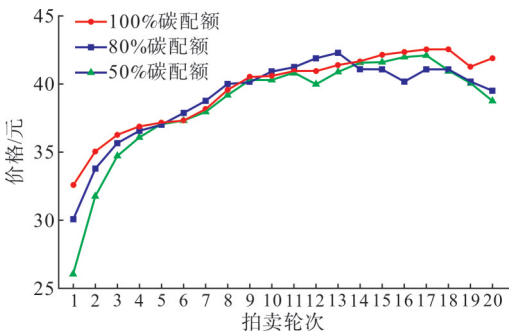


图 8 不同碳配额需求时出清价格

Fig. 8 Clearing prices for different carbon quota requirements

表 3 不同碳配额需求时总成本

Tab. 3 Total cost under different carbon quota requirements

集线器	总成本 万元		
	碳配额量 100%	碳配额量 80%	碳配额量 50%
1	89.1	71.6	43.5
2	85.5	66.1	40.7
3	74.1	63.9	36.3

常。相反地,在买方市场中呈现出相反的趋势。总体而言,政府在碳市场交易启动之前可以通过预测拍卖市场热度,提前改变 α 的取值从而调控企业在碳市场中的积极性,避免因部分企业的投机行为导致碳配额价格过度背离其价值。

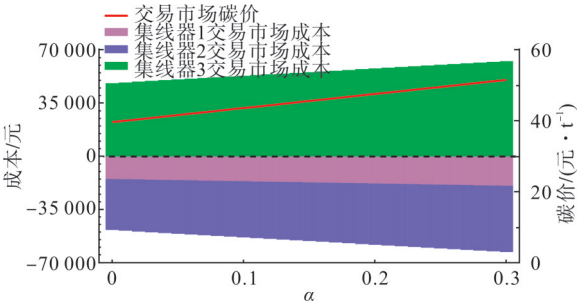


图 9 不同价格影响因子时交易市场成本

Fig. 9 Transaction market costs with different price impact factors

5.2.3 荷侧调度结果

为验证本文所提荷侧调度模型对绿证经济效益的影响,对以下 3 种情形进行对比分析。

- 1) 未实施绿证分配;
- 2) 依据清洁能源设备能量流动特性分配绿证;
- 3) 采用本文提出的绿证分配策略。

根据模型仿真结果,夏季与冬季各负荷区域在不同情境下的碳指标如图 10 所示,各区域的碳排

放成本如表 4 所示。

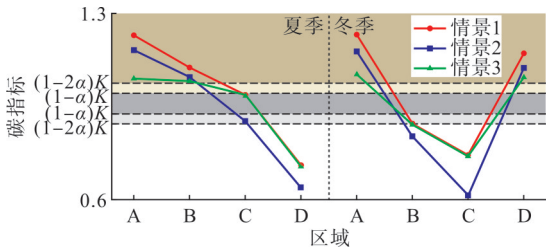


图 10 不同情景下各区域碳指标

Fig. 10 Regional carbon indicators under different scenarios

表 4 不同季节时各区域成本

Tab. 4 Costs in different regions during different seasons

	万元		
	夏季成本		
	情景 1	情景 2	情景 3
区域 I	7.12	5.44	2.37
区域 II	3.49	2.41	2.11
区域 III	0.90	0.06	0.89
区域 IV	0.00	0.00	0.00
总计	11.51	7.91	5.37
	冬季成本		
	情景 1	情景 2	情景 3
区域 I	7.21	5.33	2.84
区域 II	0.01	0.00	0.01
区域 III	0.00	0.00	0.00
区域 IV	5.10	3.46	2.50
总计	12.32	8.79	5.35

相较于情景 1,情景 2 与情景 3 虽然分配了相同数量的绿证,但二者在减排成效上呈现出显著差异:情景 2 仅为 7.13 万元,而情景 3 则达到了 13.11 万元。具体来说,平均每张绿证在情景 2 中能为用户节约 12.85 元,而在情景 3 中则能节约 24.50 元。

对于用户而言,情景 2 的分配方式可能导致清洁能源使用较多的负荷区域获得更多绿证,但这种方式未能充分发挥绿证的经济效益。相比之下,情景 3 将绿证主要分配给处于高污染区区域,如夏季区域 I 的碳指标降幅高达 13%,而区域 IV 则保持不变。这种分配策略在保持各区域碳排放成本差异的同时,有效降低了用户的用能成本。

6 结论

本文旨在构建政府调控下的基于碳市场与绿证

分配制度的源荷低碳经济调度模型,通过深入研究二级碳市场交易与绿证分配制度在不同市场间的传导机制,揭示清洁能源企业的潜在利润增长点,为可再生能源企业在政府补贴退坡后的可持续发展提供新的策略视角。研究结论如下。

1) 多区域 VPP 能有效实现不同区域、不同能源之间的功率协调调度,显著提高了资源配置的灵活性和效率。

2) 碳配额的供应量对碳市场的交易价格具有显著影响,政府在制定碳配额政策时需综合权衡减排目标与企业经营状况,通过科学设定碳配额在企业碳排放量中的占比,实现企业的良性发展与社会低碳转型的共赢局面。

3) 本文提出的绿证分配模型基于碳排放量与碳流密度对用户的碳排放程度进行分级,确保了分级的公正性和准确性。

4) 荷侧调度模型在保持用户碳排放成本差异性的基础上,降低了荷侧总成本,提升了绿证的减排效益,使用户愿意支付更高的价格购买绿证,为清洁能源企业提供更多利润空间的同时,也促进了社会利益的最大化和政府减排目标的顺利实现。

参考文献

- [1] 柴瑞瑞,李纲. 可再生清洁能源与传统能源清洁利用: 发电企业能源结构转型的演化博弈模型[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(1): 184 - 197.
CHAI Ruihui, LI Gang. Renewable clean energy and clean utilization of traditional energy: an evolutionary game model of energy structure transformation of power enterprises [J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2022, 42 (1) : 184 - 197.
- [2] 陈荃,张丹宏,郑淇源,等. 电-碳-绿证市场耦合下发电商报价与出清双层优化[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 121 - 133.
CHEN Quan, ZHANG Danhong, ZHENG Qiyuan, et al. Bi-level optimization strategy for biddings and clearing of power suppliers under the coupling of electricity, carbon, and green certificate market [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 121 - 133.
- [3] SONG Yazhi, LIU Tiansen, LIANG Dapeng, et al. A fuzzy stochastic model for carbon price prediction under the effect of demand-related policy in China's carbon market[J]. Ecological Economics, 2019(157): 253 - 265.
- [4] LIU Xiaou. Research on bidding strategy of virtual power plant considering carbon-electricity integrated market mechanism [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022 (137): 1 - 20.
- [5] TANG Ling, WU Jiaqian, YU Lean, et al. Carbon allowance auction design of China's emissions trading scheme: a multi-agent-based approach[J]. Energy Policy, 2017(102): 30 - 40.
- [6] 仪忠凯,侯朗博,徐英,等. 市场环境下灵活性资源虚拟电厂聚合调控关键技术综述[J]. 中国电力, 2024, 57 (12): 82 - 96.
YI Zhongkai, HOU Langbo, XU Ying, et al. Aggregation and operation key technology of virtual power plant with flexible resources in electricity market environment: review [J]. Electric Power, 2024, 57 (12): 82 - 96.
- [7] GIUNTOLI M, POLI D. Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 942 - 955.
- [8] 赵越,张轩,赵晨,等. 计及多利益主体的配电侧动态定价与市场出清策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 137 - 144.
ZHAO Yue, ZHANG Xuan, ZHAO Chen, et al. Dynamic pricing and market clearing strategy for power distribution considering multiple stakeholders [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 137 - 144.
- [9] 李建林,梁策,张则栋,等. 新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 104 - 116.
LI Jianlin, LIANG Ce, ZHANG Zedong, et al. Analysis of energy storage policies and business models in new power system [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (7) : 104 - 116.
- [10] 宋永华,包铭磊,丁一,等. 新电改下我国电力现货市场建设关键要点综述及相关建议[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (10): 3172 - 3187.
SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, et al. Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3172 - 3187.
- [11] 龚超,张轩,赵越,等. 考虑虚拟电厂可调能力的综合需求响应市场出清策略[J]. 南方电网技术, 2021, 15(12): 56 - 65.
GONG Chao, ZHANG Xuan, ZHAO Yue, et al. Market clearing strategy of integrated demand response considering adjustable capacity of virtual power plant [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(12): 56 - 65.
- [12] 张宁,李姚旺,黄俊辉,等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2 - 12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2 - 12.
- [13] 杨威,龚学良,曾智健,等. 碳排放交易市场机制对电力市场的影响: 基于碳价需求响应的电力市场用户行为分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(8): 59 - 67.
YANG Wei, GONG Xueliang, ZENG Zhijian, et al. Impacts of ETS mechanism on electricity market: behavior analysis of market customers based on carbon-oriented demand response [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16 (8) : 59 - 67.
- [14] ARILD H, EIRIK S. Amundsen. Prices vs. percentages: Use of tradable green certificates as an instrument of greenhouse gas mitigation[J]. Energy Economics, 2021(99): 1 - 15.
- [15] 邓叶恒,杨莉,杨晓辉,等. 基于机会约束规划的热电联供微电网低碳经济调度[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(3): 92 - 97.
DENG Yeheng, YANG Li, YANG Xiaohui, et al. Low-carbon economic dispatch of combined heat and power microgrids based on opportunity constrained programming [J].

- Research and Exploration in Laboratory, 2023, 42(3): 92 – 97.
- [16] WANG Rutian, WEN Xiangyun, WANG Xiuyun, et al. Low carbon optimal operation of integrated energy system based on carbon capture technology, LCA carbon emissions and ladder-type carbon trading[J]. Applied Energy, 2022, 311: 1 – 14.
- [17] LI Na, ZHAO Xunwen, SHI Xunpeng, et al. Integrated energy systems with CCHP and hydrogen supply: A new outlet for curtailed wind power[J]. Applied Energy, 2021 (303): 1 – 11.
- [18] 邓盛盛, 陈皓勇, 肖东亮, 等. 考虑碳市场交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(1): 143 – 151.
DENG Shengsheng, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. Equilibrium analysis of oligopoly electricity market considering carbon market trading [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(1): 143 – 151.
- [19] 周德群, 周显扬, 丁浩. 多市场协同下的可再生能源电力竞价策略研究[J]. 中国管理科学, 2023, 31(1): 248 – 255.
ZHOU Dequn, ZHOU Xianyang, DING Hao. Research on renewable electricity bidding strategy under multi-market coordination [J]. Chinese Journal of Management Science, 2023, 31(1): 248 – 255.
- [20] 刘昱良, 李姚旺, 周春雷, 等. 电力系统碳排放计量与分析方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2220 – 2236.
LIU Yuliang, LI Yaowang, ZHOU Chunlei, et al. Overview of carbon measurement and analysis methods in power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2220 – 2236.
- [21] 程昱舒. 考虑碳流追踪和用户碳排放程度评级的绿色责任证书分配模型[J]. 现代电力, 2023, 40(6): 890 – 898.
CHENG Yushu. Green responsibility certificate allocation model considering carbon flow tracking and user carbon emission level rating[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(6): 890 – 898.
- [22] YANG Xiaohui, HUANG Zezhong, XIAO Riying, et al. Optimisation and analysis of an integrated energy system with hydrogen supply using solar spectral beam splitting preprocessing[J]. Energy, 2024(287): 1 – 15.
- [23] 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 a virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780 – 6790.
- [24] 周伟, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 61 – 69.
ZHOU Wei, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Low-carbon dispatch of park-level integrated energy system considering improved ladder-type carbon trading and flexible output of combined heat and power unit [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 61 – 69.
- [25] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1614 – 1626.
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1614 – 1626.
- [26] 国务院办公厅. 中国应对气候变化的政策与行动[EB/OL]. (2021 – 10 – 27). [2021 – 10 – 27]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/27/content_5646697.htm.
- [27] 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.

收稿日期: 2024-04-20; 网络首发日期: 2024-07-17

作者简介:

杨芃(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统运行优化;

杨晓辉(1978), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为新能源并网控制、电力电子在新能源中的应用, yangxiaohui@ncu.edu.cn;

杨莉(1977), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统方式、调度、发电领域。