

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240712

电-碳-绿证市场耦合下的源-荷双层交互优化

张国良, 蔺红, 田易之

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: “双碳”背景下, 市场主体如何统筹考虑电交易、碳交易、绿证交易以提高自身收益、降低系统碳排放、增加新能源消纳的问题亟需解决。为此, 提出一种多市场耦合的源-荷双层优化模型。首先, 为加强碳市场与其他市场的耦合, 根据火电发电占比发放碳配额, 并推导碳配额随火电出力变化的微增率, 将其计入火电商碳交易边际成本。为提高绿证市场的活跃度, 提出绿证购买不足时的阶梯惩罚机制。针对风电出力的不确定性, 采用随机优化方法构建风电出力场景, 通过 K-medoids 方法将众多场景转化为确定性场景。然后, 建立电-碳-绿证耦合的双层交互优化模型, 上层目标为主体运营成本最小, 下层目标为社会福利最大。最后, 基于 PJM5 节点系统分析, 结论验证了所建模型的有效性。所提方法可以优化资源配置, 降低系统碳排放, 提高新能源消纳。

关键词: 电力市场; 碳市场; 绿证市场; 市场耦合; 双层优化

Optimization of source-load bilayer interaction in the coupling of electricity-carbon-green certificate markets

ZHANG Guoliang, LIN Hong, TIAN Yizhi

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract: Under the "dual carbon" policy, it is crucial to address how market participants can integrate electricity trading, carbon trading, and green certificate trading to maximize their profits, reduce system carbon emissions, and increase renewable energy consumption. To tackle this issue, a multi-market coupled source-load bi-level optimization model is proposed. First, to strengthen the coupling between the carbon market and other markets, carbon allowances are allocated based on the proportion of thermal power generation. The incremental variation rate of carbon allowances with thermal power output is derived and incorporated into the marginal cost of carbon trading for thermal power producers. To stimulate activity in the green certificate market, a tiered penalty mechanism is introduced for insufficient green certificate purchases. Given the uncertainty of wind power output, a stochastic optimization method is used to construct wind power output scenarios. These are then transformed into deterministic scenarios by the K-medoids method. Subsequently, a bilayer interactive optimization model of electric-carbon-green certificate coupling is established. The upper-level objective minimizes market participants' operating cost, while the lower-level objective maximizes social welfare. Finally, based on an analysis of the PJM5 node system, the effectiveness of the proposed model is verified. The results demonstrate that the proposed method can optimize resource allocation, reduce system carbon emissions, and improve renewable energy consumption.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52367012).

Key words: electricity market; carbon market; green certificate market; market coupling; bilayer optimization

0 引言

为促进碳减排, 我国于 2020 年 9 月举办的第

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52367012); 新疆维吾尔自治区重点研发专项资助(2022B01020-3)

75 届联合国大会上提出“碳达峰、碳中和”目标^[1]。为限制碳排放量, 我国出台了碳配额制度。为促进可再生新能源在电力系统中的消纳, 我国发改委于 2017 年颁布了《关于试行可再生新能源绿色电力证书核发及自愿认购交易制度的通知》^[2], 碳交易和绿证交易在处理经济效益和环境效益上发挥着重要作用^[3-5]。

电力市场深化改革为电力行业在各领域的发展带来了不同程度的影响^[6]。文献[7]通过联合市场机制,解决了碳市场与电力市场联合运行存在的问题。文献[8]考虑促进可再生能源消纳的因素,深入分析我国各市场和机制现状,归纳出可再生能源消纳面临的挑战。文献[9]充分吸收国外经验,并结合我国电力市场建设指出我国绿证市场与电力市场、碳市场的耦合性不强。上述文献说明单一市场的价格信号难以通过市场衔接传递至电力市场主体,缺乏有效的成本传导机制,多市场耦合性不强。

2020年全国碳市场正式启动线上交易,碳市场是平衡电网运营低碳性与经济性的重要举措之一^[10]。文献[11]指出,因机组负荷差异、锅炉燃烧效率不同、排放因子不接近实际等因素,碳排放估算结果会产生较大误差。文献[12]考虑常规燃煤、碳捕集燃煤和燃气机组3类火电电源,将3类火电电源纳入统一的碳配额分配机制中。文献[13]针对模型中火电机组的类型和装机容量,确定了两条基准线分配碳配额。上述文献在碳配额分配时,容量相近的机组采用同一碳配额系数,或选取碳排放量均值作为初始配额基准,不同火电机组碳配额分配存在差异。因此,不能根据各机组实际的容量分配碳配额,也不能激励火电机组主动进行减排改造,无法为火电机组提供碳配额的价值参考。

2017年我国启动绿证交易,绿证市场是推动可再生能源配额制度实行的重要手段。文献[14]指出绿证市场主体参与度不够、积极性不高,绿证市场活跃度不足。文献[15]分阶段提出了各考核主体完成自身可再生能源消纳责任权重的方式。文献[16]建立以火电机组为绿证购买者的绿证交易模型。但上述文献未考虑如何提高绿证市场的活跃度,为此,本文从建立绿证购买不足时的阶梯惩罚机制的角度,探讨提高绿证市场的活跃度。

综上,本文建立电-碳-绿证耦合下的源-荷交互交易模型。首先,根据机组发电占比分配碳配额,并推导出碳配额随火电机组出力变化的微增率,将其计入火电机组碳交易边际成本,引入线性碳交易价格模型。其次,为提高绿证市场的活跃度,提出绿证购买量不足时的阶梯惩罚机制。然后,采用随机优化方法构建多个场景描述风电出力的不确定性,并对多场景进行削减,本文引入条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)理论描述风电商对待风险的厌恶程度对收益的影响。最后,建立电-碳-绿证耦合的双层交互迭代模型,设置不同的场景进行分析,验证所建模型的有效性。

1 电-碳-绿证耦合的双层迭代机制

1.1 电-碳-绿证耦合下市场主体交易框架

随着碳交易和绿证交易的不断发展,火电商、风电商、负荷聚合商等市场主体的运营成本不再局限于单一的电力市场,需要综合考虑多市场间的供需量、价格走势、自身配额等信息产生交互,这些信息会影响市场主体决策。首先,政府根据风电商实际上网电量颁发可出售的绿证数量,绿证价格由标杆电价及当地的脱硫煤标杆电价之间的差额决定,且绿证只允许交易一次^[17]。然后,直接参与电力市场的负荷聚合商和火电商需要履行可再生能源消纳责任^[18],为降低模型复杂度,本文只考虑购买绿证履行消纳责任,为避免碳交易重复计算,碳排放成本由火电商承担,政府及监管机构制定相应的绿色证书配额(绿证比例)和碳配额总量(碳排放许可因子)^[19]。火电商的运营成本包含电、碳、绿证3个市场成分,风电商和负荷聚合商的运营成本包含电、绿证两个市场成分。最后,构建如图1所示的电-碳-绿证耦合日前交易框架,并建立电-碳-绿证耦合的源-荷双层优化模型,上层模型目标为市场主体运营成本最小,下层模型目标为社会福利最大^[20]。

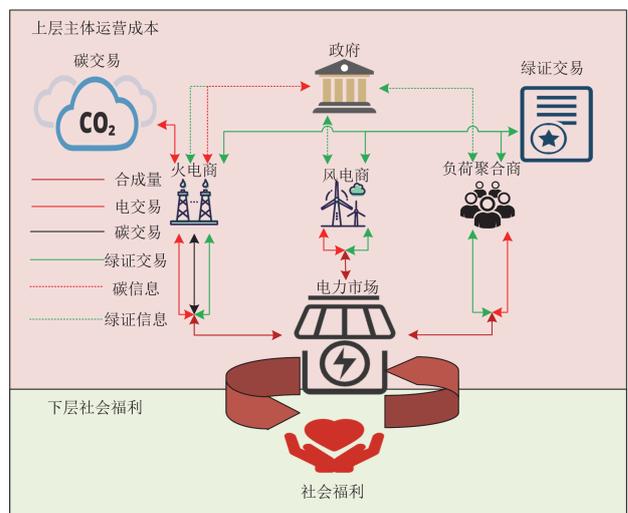


图1 电-碳-绿证耦合日前交易框架

Fig. 1 Electricity-carbon-green certificate coupling day-ahead trading framework

1.2 碳配额分配

为增强碳市场与其他市场的耦合、合理公平地分配碳配额,本文根据火电机组发电占比分配碳配额,并推导出碳配额随火电机组出力变化的微增率,将其计入火电机组交易成本,具体分配规则如下。

碳配额总量取决于负荷总需求和碳排放因子^[21],

本文采用全天平均碳排放因子进行计算。

$$Q_{\text{free},t}^{\text{CO}_2} = \varepsilon_{\text{CO}_2} \sum_{l=1}^L P_{l,t} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{free},t}^{\text{CO}_2}$ 为 t 时刻的碳配额总量; $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ 为碳排放因子; $P_{l,t}$ 为 t 时刻负荷聚合商 l 的负荷需求; L 为负荷聚合商的总量。

火电机组获得的碳配额为

$$Q_{\text{free},i,t}^{\text{CO}_2} = \frac{P_{i,t}}{\sum_{i=1}^I P_{i,t}} Q_{\text{free},t}^{\text{CO}_2} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{free},i,t}^{\text{CO}_2}$ 为火电机组 i 在 t 时刻获得的碳配额; $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时刻的出力; I 为火电机组数量。

在确定火电机组的碳配额后, 对火电机组获得的碳配额求导, 得到碳配额随火电机组出力变化的微增率 $\beta_{i,t}^*$, 如式(3)所示, 其含义为: 每增发单位电量获得的碳配额的速度。将其作为火电机组碳配额系数计入火电机组的碳交易边际成本, 以增强碳市场与其他市场的耦合。

$$\beta_{i,t}^* = \frac{\sum_{i=1}^I P_{i,t} - P_{i,t}}{\left(\sum_{i=1}^I P_{i,t}\right)^2} Q_{\text{free},t}^{\text{CO}_2} \quad (3)$$

1.3 线性碳交易价格模型

为鼓励火电机组减少碳排放, 采用线性碳交易价格模型, 如式(4)所示, 由碳交易量决定碳交易价格, 碳交易量越多, 碳交易价格越高, 反之, 碳交易价格越低。

$$\alpha_i^{\text{CO}_2} = \begin{cases} \alpha_{\min}^{\text{CO}_2}, & Q_i^{\text{CO}_2} \leq Q_{\min}^{\text{CO}_2} \\ \alpha_{\min}^{\text{CO}_2} + A, & Q_{\min}^{\text{CO}_2} < Q_i^{\text{CO}_2} < Q_{\max}^{\text{CO}_2} \\ \alpha_{\max}^{\text{CO}_2}, & Q_i^{\text{CO}_2} \geq Q_{\max}^{\text{CO}_2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} A = \frac{\alpha_{\max}^{\text{CO}_2} - \alpha_{\min}^{\text{CO}_2}}{Q_{\max}^{\text{CO}_2} - Q_{\min}^{\text{CO}_2}} Q_i^{\text{CO}_2} \\ Q_i^{\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^T (\beta_i P_{i,t} - Q_{\text{free},i,t}^{\text{CO}_2}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha_i^{\text{CO}_2}$ 为火电机组 i 的碳交易价格; $\alpha_{\max}^{\text{CO}_2}$ 和 $\alpha_{\min}^{\text{CO}_2}$ 分别为碳交易价格上、下限; $Q_{\min}^{\text{CO}_2}$ 、 $Q_{\max}^{\text{CO}_2}$ 、 $Q_{\min}^{\text{CO}_2}$ 分别为火电机组 i 在碳市场的交易量及其上下限; A 为中间变量; T 为交易周期, 本文为 24 h; β_i 为火电机组 i 的实际碳排放系数。

1.4 绿证阶梯惩罚机制

为提高绿证市场交易活跃度, 建立绿证购买量不足时的阶梯惩罚机制 $C_{\text{cf}}^{\text{green}}$, 如式(6)所示, 根据绿证缺额调整惩罚标准, 以刺激绿证需求者积极

购买绿证完成考核。

$$C_{\text{cf}}^{\text{green}} = \begin{cases} \alpha_{\text{green}} Q_{\text{cf}}^{\text{green}}, & 0 \leq Q_{\text{cf}}^{\text{green}} < D \\ \alpha_{\text{green}} D + \alpha_{\text{green}} (1 + \alpha_{\text{cf}}) Q_{\text{cf}}^{\text{green}} (Q_{\text{cf}}^{\text{green}} - D), & D \leq Q_{\text{cf}}^{\text{green}} < 2D \\ \alpha_{\text{green}} (2 + \alpha_{\text{cf}}) D + \alpha_{\text{green}} (1 + 2\alpha_{\text{cf}}) Q_{\text{cf}}^{\text{green}} (Q_{\text{cf}}^{\text{green}} - 2D), & 2D \leq Q_{\text{cf}}^{\text{green}} < 3D \\ \alpha_{\text{green}} (3 + 3\alpha_{\text{cf}}) D + \alpha_{\text{green}} (1 + 3\alpha_{\text{cf}}) Q_{\text{cf}}^{\text{green}} (Q_{\text{cf}}^{\text{green}} - 3D), & Q_{\text{cf}}^{\text{green}} \geq 3D \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Q_{\text{cf}}^{\text{green}} = Q_{\text{green}} - Q_{\text{buy}}^{\text{green}} \\ Q_{\text{green}} = \sum_{t=1}^T \beta_{\text{green}} P \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Q_{\text{cf}}^{\text{green}}$ 、 $Q_{\text{buy}}^{\text{green}}$ 、 Q_{green} 分别为考核周期结束时绿证缺额、绿证购买量、完成考核所需的绿证量; α_{green} 为单位绿证交易价格; α_{cf} 为绿证缺额惩罚系数; D 为惩罚区间长度; β_{green} 为绿证比例; P 为绿证需求商的中标电量。

2 电-碳-绿证耦合的源-荷双层优化模型

2.1 上层模型

上层模型以各主体运营商成本最小为目标。

2.1.1 火电商运营成本

火电商的运营成本 F_i 包括火电机组煤耗成本、碳交易成本和绿证交易成本, 目标函数如式(8)所示。

$$\min F_i = \sum_{t=1}^T (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + \sum_{t=1}^T \alpha_i^{\text{CO}_2} Q_i^{\text{CO}_2} + \alpha_{\text{green}} Q_{\text{buy},i}^{\text{green}} + C_{\text{cf},i}^{\text{green}} - \sum_{t=1}^T \alpha_{i,t} P_{i,t} \quad (8)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 分别为火电机组 i 运营成本的二次项、一次项、常数项系数; $Q_{\text{buy},i}^{\text{green}}$ 为火电机组 i 购买的绿证数量; $C_{\text{cf},i}^{\text{green}}$ 为火电机组 i 绿证缺额惩罚成本; $\alpha_{i,t}$ 为 t 时刻火电机组 i 的日前优化电价。

2.1.2 风电商运营成本

本文采用随机优化的方法处理风电出力不确定性问题。首先, 采用历史数据信息并利用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)模型对新能源出力功率进行预测。然后, 由历史数据得到不确定性的概率密度函数, 通过蒙特卡洛模拟法生成大量场景描述不确定性。最后, 通过 K-medoids 方法得到数量有限且具有代表性的出力场景, 具体场景生成和削减方法见文献[22]。风电商的成本主要来源于一次投资建设成本, 本文采用平均化度电成本衡量风电商的发电成本^[23], 考虑到风电商对风险厌恶

的程度不同, 本文引入 CVaR 理论描述风电商对待风险的厌恶程度对收益的影响, 并参考文献[22]将风电商的目标函数线性化, 如式(9)所示。

$$\min F_j = \beta \sum_{s=1}^S \rho_s (C_{s,j}^{\text{da}} - C_{s,j}^{\text{pun}}) + (1-\beta)(v + \frac{1}{\alpha} \sum_{s \in S} \rho_s z_s) \quad (9)$$

$$\begin{cases} C_{s,j}^{\text{da}} = \sum_{t=1}^T \left(\frac{T_j \beta_j + M_j + R_j}{Q_j^{\text{av}}} P_{j,t} - \alpha_{\text{green}} Q_{\text{sell},j}^{\text{green}} - \alpha_{j,t} P_{j,t} \right) \\ C_{s,j}^{\text{pun}} = \sum_{t=1}^T [\alpha_{j,t} (P_{j,t}^{\text{pred}} - P_{j,t})] \\ Q_{\text{sell},j}^{\text{green}} = \sum_{t=1}^T (1 - \beta_{\text{green}}) P_{j,t} \\ z_s \leq C_{s,j}^{\text{da}} - C_{s,j}^{\text{pun}} - v \\ z_s \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: F_j 为风电商的运营成本; β 为风电商在风险和收益之间的权衡系数, $\beta \in (0,1)$; ρ_s 为场景 s 的概率; S 为场景集合总数; $C_{s,j}^{\text{da}}$ 为风电商的运行成本; $C_{s,j}^{\text{pun}}$ 为风电功率偏差惩罚费用; v 为风电商的 VaR; α 为置信水平; z_s 为引入的松弛变量; T_j 为风电商总投资成本; β_j 为投资成本回收因子; M_j 和 R_j 分别为维护费用和运行费用; Q_j^{av} 为年平均发电量; $P_{j,t}$ 为 t 时刻风电商的申报功率; $Q_{\text{sell},j}^{\text{green}}$ 为风电商售出的绿证数量; $\alpha_{j,t}$ 为 t 时刻风电商优化电价; $P_{j,t}^{\text{pred}}$ 为 t 时刻风电商 j 的预测功率。

2.1.3 负荷聚合商运营成本

负荷聚合商运营成本 F_l 包括购买电能费用和购买绿证费用。本文将负荷聚合商视为负的发电商参与市场报价^[24], 用负荷需求量的二次函数表示负荷聚合商的运营成本, 如式(11)所示。

$$\min F_l = \sum_{t=1}^T \left(\alpha_{l,t} P_{l,t} - \alpha_{\text{green}} Q_{\text{buy},l}^{\text{green}} - C_{\text{cf},l}^{\text{green}} - a_l P_{l,t}^2 - b_l P_{l,t} - c_l \right) \quad (11)$$

式中: $\alpha_{l,t}$ 为 t 时刻负荷聚合商 l 的日前优化电价; $Q_{\text{buy},l}^{\text{green}}$ 为负荷聚合商 l 购买的绿证数量; $C_{\text{cf},l}^{\text{green}}$ 为负荷聚合商 l 绿证缺额惩罚成本; a_l 、 b_l 、 c_l 分别为负荷聚合商 l 运营成本的二次项、一次项、常数项系数。约束条件如下。

1) 火电申报功率约束

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (12)$$

式中, $P_{i,\max}$ 和 $P_{i,\min}$ 分别为火电机组 i 申报功率的上下限。

2) 火电爬坡约束

$$P_i^{\text{down}} \Delta t \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_i^{\text{up}} \Delta t \quad (13)$$

式中: P_i^{up} 和 P_i^{down} 分别为火电机组 i 的爬坡速率上下限; Δt 为单时段步长。

3) 风电申报功率约束

$$0 \leq P_{j,t} \leq P_{j,t}^{\text{pred}} \quad (14)$$

4) 负荷总需求约束

$$P_{l,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (15)$$

式中, $P_{l,\max}$ 和 $P_{l,\min}$ 分别为负荷聚合商 l 申报负荷总需求的上下限。

2.2 下层模型

下层模型以最大社会福利即最小化负的社会福利为目标^[25], 下层目标函数如式(16)所示。

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \alpha'_{i,t} P'_{i,t} + \sum_{j=1}^J \alpha'_{j,t} P'_{j,t} - \sum_{l=1}^L \alpha'_{l,t} P'_{l,t} \right) \quad (16)$$

式中: F_2 为负的社会福利; J 为风电商的数量; $\alpha'_{i,t}$ 、 $\alpha'_{j,t}$ 、 $\alpha'_{l,t}$ 分别为 t 时刻火电机组 i 、风电商 j 、负荷聚合商 l 在电力市场的申报电价; $P'_{i,t}$ 、 $P'_{j,t}$ 、 $P'_{l,t}$ 分别为 t 时刻火电机组 i 、风电商 j 、负荷聚合商 l 的申报功率。

为突出本文碳市场、绿证市场对电力市场的影响, 假设火电商、风电商、负荷聚合商均基于自身边际成本报价, 暂不考虑发电商的策略性竞价行为。则火电机组 i 的报价函数如式(17)所示。

$$\alpha'_{i,t} = 2a_i P'_{i,t} + b_i + \alpha_i^{\text{CO}_2} (\beta_i - \beta_{i,t}^*) + \alpha_{\text{green}} \beta_{\text{green}} \quad (17)$$

风电商 j 的报价函数如式(18)所示。

$$\alpha'_{j,t} = \sum_{t=1}^T \left[\frac{T_j \beta_j + M_j + R_j}{Q_j^{\text{av}}} - \alpha_{\text{green}} (1 - \beta_{\text{green}}) \right] \quad (18)$$

负荷聚合商 l 的报价函数如式(19)所示。

$$\alpha'_{l,t} = 2a_l P'_{l,t} + b_l + \alpha_{\text{green}} \beta_{\text{green}} \quad (19)$$

约束条件如下。

1) 系统功率平衡

$$\sum_{i=1}^I P'_{i,t} + \sum_{j=1}^J P'_{j,t} = \sum_{l=1}^L P'_{l,t} \cdot \lambda_{\text{Load}} \quad (20)$$

式中, λ_{Load} 为系统功率平衡的拉格朗日乘子向量。

2) 绿证总量约束

$$\sum_{i=1}^I Q_{\text{buy},i}^{\text{green}} + \sum_{l=1}^L Q_{\text{buy},l}^{\text{green}} \leq \sum_{j=1}^J Q_{\text{sell},j}^{\text{green}} \quad (21)$$

3) 碳配额总量约束

$$\sum_{i=1}^I Q_{\text{free},i,t}^{\text{CO}_2} \leq Q_{\text{free},t}^{\text{CO}_2} \quad (22)$$

4) 报价约束

$$\begin{cases} \alpha'_{i,\min} \leq \alpha'_{i,t} \leq \alpha'_{i,\max} \\ \alpha'_{j,\min} \leq \alpha'_{j,t} \leq \alpha'_{j,\max} \\ \alpha'_{l,\min} \leq \alpha'_{l,t} \leq \alpha'_{l,\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $\alpha'_{i,\max}$ 、 $\alpha'_{i,\min}$ 、 $\alpha'_{j,\max}$ 、 $\alpha'_{j,\min}$ 、 $\alpha'_{l,\max}$ 、 $\alpha'_{l,\min}$ 分别为 t 时刻火电商 i 、风电商 j 、负荷聚合商 l 在电力市场申报电价的上下限。

3 求解过程

以各主体运营商在电力市场申报的电量、电价作为上下层优化的交互变量, 通过各主体运营商的运营成本将电-碳-绿证市场耦合, 具体求解步骤如下。

- 1) 初始化火电商、风电商、负荷聚合商、碳市场和绿证市场参数;
- 2) 各主体运营商基于自身运营成本向电力市场申报电量、电价, 电力市场根据申报信息考虑电网安全运行约束, 基于社会福利进行优化;
- 3) 碳市场和绿证市场根据电力市场优化结果发布碳市场和绿证市场交易信息;
- 4) 各市场交易信息重新返回至主体运营商, 重新向电力市场申报, 进行新一轮迭代优化;
- 5) 校验电网安全运行约束、碳交易约束、绿证交易约束等, 当所有市场主体上层模型的申报信息与下层模型的优化结果接近, 符合收敛精度要求时, 得到最终优化结果, 否则返回步骤 2)。

4 算例分析

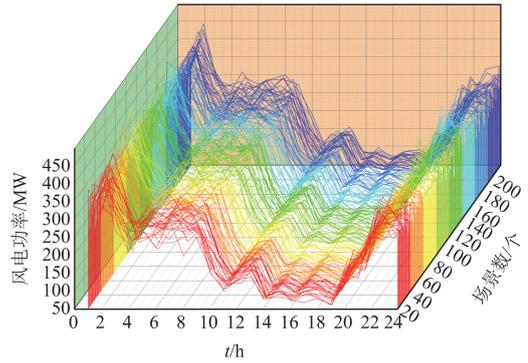
4.1 参数设置

采用改进后的 PJM5 节点系统分析, 该系统共有 5 个火电机组 G1—G5, 1 个风电场 PW, 3 个负荷聚合商 L1—L3, 各属不同主体运营商, 即 5 个火电商, 1 个风电商, 3 个负荷聚合商, 火电机组相关参数见文献[26], α 取 0.95, β_{green} 为 0.08, α_{green} 为 100 元/本, 碳排放因子 $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ 为 0.625 t/MWh, 燃煤机组燃料成本为 725 元/t, 燃气机组燃料成本为 2.3 元/m³, 风电的度电成本为 280 元/MWh, 采用场景生成获得 200 个场景, 经削减后得到 5 个风电出力场景, 如图 2 所示, 表 1 为削减后的风电出力场景概率。以风险系数 $\beta = 0.5$ 为例, 验证所建模型有效性。

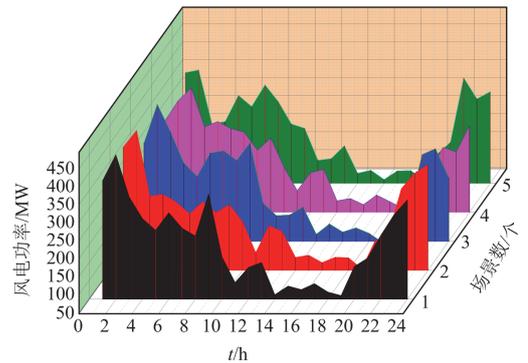
4.2 碳配额分配及绿证阶梯惩罚机制分析

4.2.1 碳配额分配方法对比分析

通过设置电-碳市场耦合场景, 对比分析本文所提碳配额分配方法与传统基准线分配方法。图 3 为各火电机组碳配额变化微增率, 其值越大表示单



(a) 场景生成



(b) 场景削减

图 2 风电出力的场景生成和削减

Fig. 2 Scenario generation and reduction of wind power output

表 1 风电出力场景概率

Table 1 Probability of wind power output scenario

场景	1	2	3	4	5
概率/%	26.6	14.4	25.2	22.0	11.8

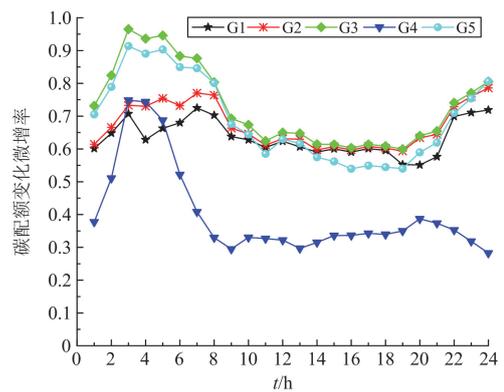


图 3 各火电机组碳配额变化微增率

Fig. 3 Incremental rate of carbon quota change of each thermal power unit

位电量获得碳配额的速度越快。0—8 时段负荷总需求量较低, 且风电出力较大, 各火电机组碳配额变

化微增率较大,增发单位电量时获得的碳配额较多。9—13 和 18—22 时段负荷总需求量增加,风电出力降低,碳配额变化微增率较低。

图 4 为两种碳配额分配方法各火电机组中标电量及碳市场交易量。由图 4 可知,采用本文所提的碳配额分配方法,低碳排火电机组 1 和 3 的中标电量增加,高碳排放火电机组 2、4 和 5 的中标电量减小。这是因为当负荷需求量较高时,各火电机组的碳配额微增率都较低,获得的碳配额较少,低碳排放的机组需更少的碳配额,高碳排放机组容易超出碳排放配额,导致需要支付额外的碳排放费用,低碳排放机组更具有竞争力。

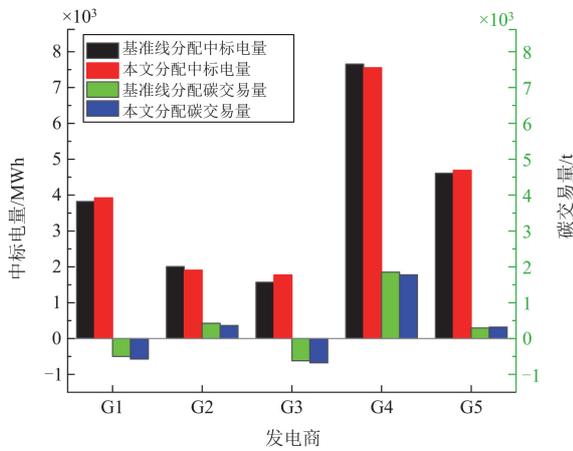


图 4 两种碳配额分配方法各火电机组中标电量及碳交易量
Fig. 4 Winning bid electricity and carbon trading volume of each thermal power unit of two carbon quota allocation methods

表 2 为两种碳配额分配方法优化结果,采用本文碳配额分配方法,风电利用率由 64.65%增加到 81.04%,碳排放总量降低了 801.2 t,这是因为各火电机组可以根据每时刻的中标电量获得相应的碳配额,更准确地反映不同时刻的碳排放情况,从而制定更精准的决策。本文所提的碳排放分配方法有利于火电机组合理分配碳配额,提高风电利用率,降低碳排放。

表 2 两种碳配额分配方法优化结果

Table 2 Optimization results of two carbon quota allocation methods

分配方法	碳排放总量/t	风电利用率/%	社会福利/元
基准线法	15 675.6	64.65	5 010 251.9
本文方法	14 874.4	81.04	4 794 692.7

4.2.2 绿证惩罚机制

表 3 为在电-绿证市场耦合场景下采用与不采用绿证阶梯惩罚机制的优化结果。由表 3 可知,采用绿证阶梯惩罚机制后,风电利用率由 83.52%增加到 86.53%,碳排放总量降低 828.5 t。这是因为绿证

需求商为避免绿证购买不足带来高额惩罚而积极购买绿证,火电商让出部分发电权给风电商,以增加绿证市场绿证的数量。风电商和火电商既存在竞争关系,又存在合作关系,但风电更具有竞争优势,证明了绿证惩罚机制的有效性。

表 3 采用与不采用绿证阶梯惩罚优化结果

Table 3 Optimal results with and without the green certificate ladder penalty

	碳排放总量/t	风电利用率/%	社会福利/元
不采用	15 473.4	83.52	5 126 174.9
采用	14 644.9	86.53	4 591 926.5

4.3 不同市场下优化结果分析

本文设置以下场景分析不同市场耦合:

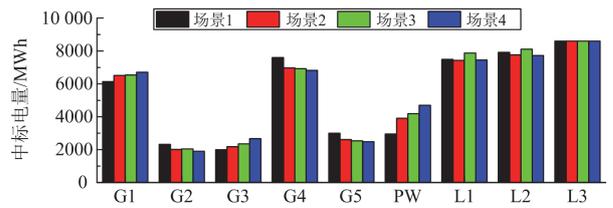
- 1) 单一电力市场(场景 1);
- 2) 电-碳市场耦合(场景 2);
- 3) 电-绿证市场耦合(场景 3);
- 4) 电-碳-绿证市场耦合(场景 4)。

表 4 为不同场景优化结果,图 5 为不同场景下主体运营商中标电量和火电机组碳交易量,图 6 为不同场景下主体运营商在各市场的成本分量,图 7 为不同场景下节点 4 的电价。由图 6 和图 7 可知,相

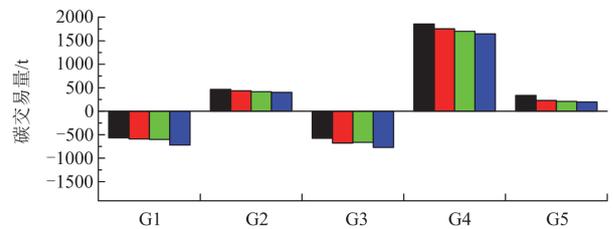
表 4 不同场景优化结果

Table 4 Optimal results in different scenarios

	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
碳排放总量/t	15 745.9	14 874.4	14 644.9	13 865.2
风电利用率/%	62.80	81.04	86.53	100
社会福利/元	5 793 515.4	5 394 692.7	6 091 926.5	5 910 251.9



(a) 主体运营商中标电量



(b) 火电机组碳交易量

图 5 不同场景下主体运营商中标电量和火电机组碳交易量
Fig. 5 Winning bid electricity of the main operator and the carbon trading volume of thermal power units in different scenarios

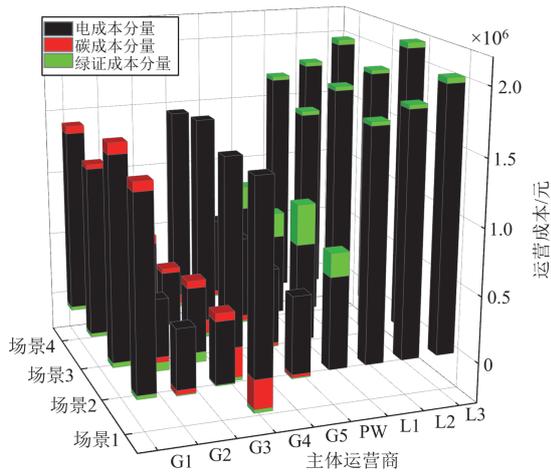


图 6 不同场景下主体运营商各市场成本分量
Fig. 6 Cost component of each market of the main operator in different scenarios

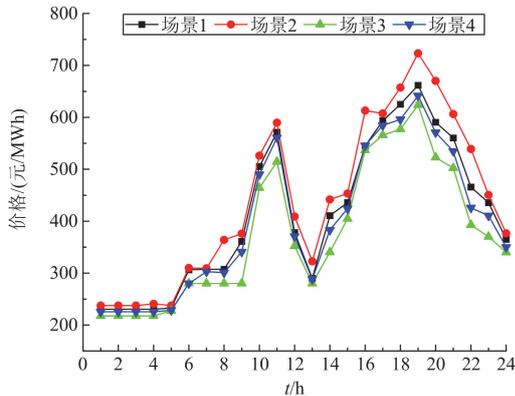


图 7 不同场景下节点 4 的电价

Fig. 7 Electricity price of node 4 in different scenarios

比单一电力市场, 考虑碳市场的节点电价增加, 火电机组收益增加, 负荷聚合商运营成本增加; 考虑绿证市场的节点电价降低, 火电机组收益减小, 负荷聚合商的运营成本减小, 但风电商的收益增加。这是因为主体运营商需要综合考虑多市场的影响, 其策略行为会改变电价。负荷聚合商因电价升高而降低用电, 反之, 增加用电。风电商因出售绿证增加收益, 碳市场和绿证市场都减小了碳排放, 增加了风电利用率。

4.3.1 碳市场对电能量市场的影响

由表 4 可知, 场景 2 相比于场景 1, 在考虑碳市场之后, 风电利用率由 62.80% 增加到 81.04%, 碳排放总量降低了 871.5 t, 由图 5 可知, 低碳排放火电机组 1 和 3 可在碳市场售出多余的碳配额获取收益, 中标电量增加。高碳排放火电机组 2、4 和 5 需要购买碳配额, 以弥补其碳排放量超过分配的部

分, 通过降低中标电量来减少购买碳配额。由图 6 可知, 高碳排放火电机组 2、4 和 5 的运营成本增加, 低碳排放火电机组 1 和 3 的运营成本减少。由图 7 可知, 考虑碳市场的节点电价升高, 这是因为考虑碳市场后, 高碳排放火电机组中标电量减少的损失大于电价上升带来的收益, 低碳排放火电机组则相反, 风电因其具有清洁优势, 中标电量增加, 收益增加。

以节点 4 的电价分析不同碳排放因子对节点电价的影响, 图 8 为基于场景 4 的不同碳排放因子时节点 4 的电价和火电机组的碳交易量。由图 8 可知, 随着碳排放因子的降低, 节点电价增加, 低碳排放火电机组 1 和 3 在碳市场减少出售碳配额, 高碳排放火电机组 2、4 和 5 在碳市场减少购买碳配额, 这是因为碳排放因子降低, 火电机组的碳配额总量减小, 火电商的碳交易边际成本增加, 中标电量降低, 相反, 风电商中标电量增加。

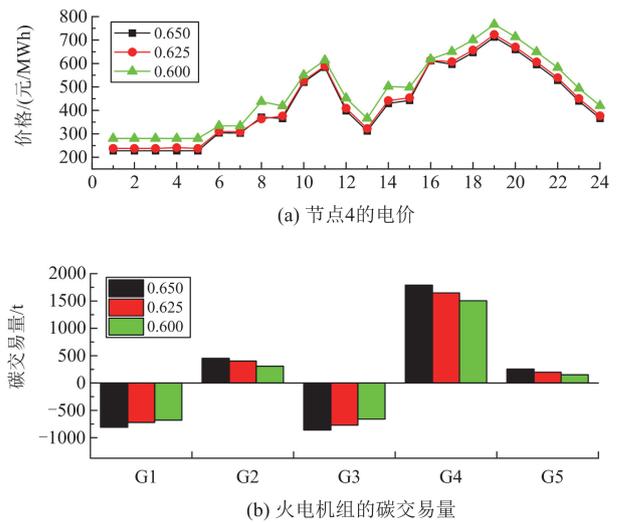


图 8 不同碳排放因子时节点 4 电价和火电机组的碳交易量
Fig. 8 Electricity price of node 4 and the carbon trading volume of thermal power units at different carbon emission factors

4.3.2 绿证市场对电能量市场的影响

由图 5 和表 4 可知, 场景 3 相比场景 1, 在考虑到绿证市场之后, 低碳排的火电机组 1 和 3 中标电量增加, 高碳排的火电机组 2、4 和 5 的中标电量减少, 风电利用率由 62.80% 增加到 86.53%, 碳排放总量降低了 1101 t。由图 6 和图 7 可知, 考虑绿证交易后, 火电商的运营成本增加, 风电商在绿证市场的收益增加, 节点电价降低, 负荷聚合商中标电量增加。这是因为火电商需要考虑绿证支出, 火电商中标电量越多需要购买的绿证量也就越多, 进而增加了运营成本, 绿证需求商为避免绿证购买量

不足带来的惩罚，中标电量降低；但负荷聚合商因购买绿证的支出小于电价降低后购电成本的支出，故负荷聚合商的运营成本降低；而风电商中标电量越多，可出售的绿证量也就越多，收益也就增加，因而风电更具有竞争优势，碳排放总量降低。可见绿证交易促进了新能源的发展，减少了碳排放。

以节点 4 的电价分析不同可再生能源配额比例对电价的影响，图 9 为基于场景 4 不同绿证比例时节点 4 的电价和火电机组的碳交易量。由图 9 可知，随着绿证比例的增加，节点电价降低。这是因为随着绿证比例增加，火电商需要购买更多的绿证以履行责任，中标电量越多，购买绿证的支出也就越多；还有可能因绿证购买量不足受到高额惩罚，所以火电机组中标电量降低。低碳排放火电机组 1 和 3 在碳市场减少出售碳配额，高碳排放火电机组 2、4 和 5 在碳市场也减少购买碳配额。风电的竞争优势远大于火电，风电商的中标电量越多，可出售的绿证数量越多，收益增加。火电机组减小的中标电量小于风电商增加的中标电量，进而节点电价减少。综上，绿证比例的增加能够有效地提高风电消纳量，降低碳排放，有利于促进新能源的发展。

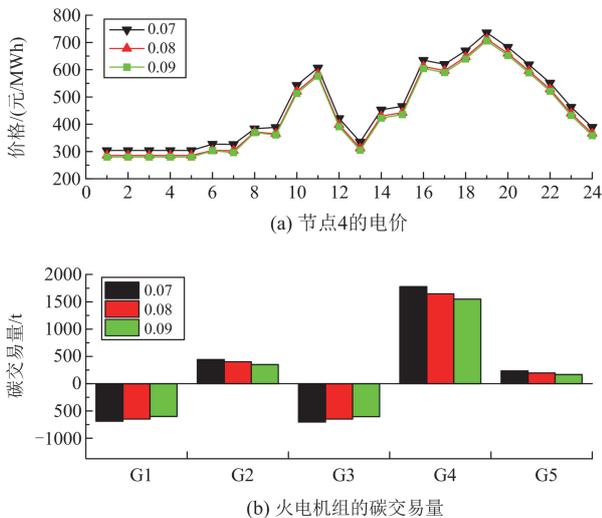


图 9 不同绿证比例时节点 4 电价和火电机组的碳交易量
Fig. 9 Electricity price of node 4 and the carbon trading volume of thermal power units at different green certificate ratios

4.3.3 碳-绿证市场对电能量市场的影响

由表 4 可知，场景 2、3、4 相比场景 1 碳排放总量降低，减碳效果依次递增，场景 4 减排效果最好，总碳排放量低至 13 865.2 t，风电利用率也不断增加，从场景 1 的 62.80% 增加到场景 4 的 100%，由图 6 可知，在电-碳-绿证市场耦合下，风电商在场景 4 中收益最大，这是碳交易和绿证交易双重作

用下的结果。火电商的运营成本因包含碳市场和绿证市场成分，运营成本增加。风电商因出售绿证，收益增加。在电-碳-绿证市场中，风电商相比火电商极具竞争优势。火电商和负荷聚合商因需要履行可再生能源消纳责任，为避免高额的惩罚而积极购买绿证，提高了绿证市场的活跃度，进而风电利用率在 4 个场景中最高。将碳和绿证纳入电力市场交易，验证了碳市场和绿证市场在降低碳排放、增加风电利用率方面具有较好的促进作用，购买绿证不足时的惩罚模型能够推动可再生能源的发展和利用，降低碳排放。

4.4 风险系数灵敏度分析

图 10 为不同风险系数时风电商的收益与 CVaR，由图 10 可知，随着风险系数 β 的增大，风电商的收益与 CVaR 均逐渐增加，这是因为 β 值代表了决策者的风险偏好程度， β 越大，代表决策者越厌恶风险，制定的策略面临的的风险越高，风电商通过出售电量和绿证获取收益，更偏向风险。

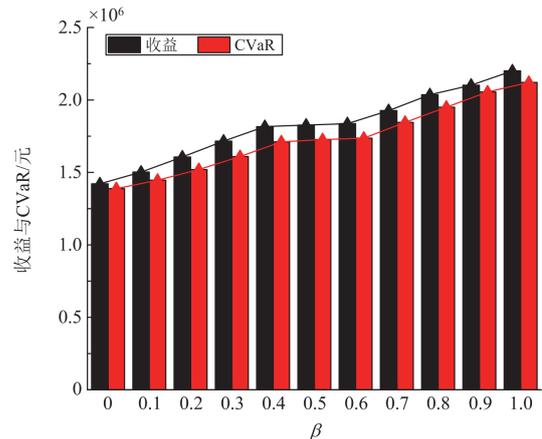


图 10 不同风险系数时风电商的收益与 CVaR
Fig. 10 Income and CVaR of wind power suppliers with different risk coefficients

5 结论

本文考虑电-碳-绿证耦合下源-荷交互优化双层迭代模型。通过多场景优化结果对比分析，得到主要结论如下。

- 1) 本文所提的碳配额分配方法能够加强碳市场与其他市场的耦合关系，有利于火电商做出更优的决策，降低碳排放，促进火电机组节能改造。
- 2) 本文提出了绿证购买不足时的阶梯绿证惩罚机制，绿证需求者为避免高额的惩罚积极购买绿证，提高了绿证市场的活跃度和新能源消纳，减少了对传统化石能源的依赖。
- 3) 本文所建立的源-荷双层优化模型增强了

电-碳-绿证耦合, 电力系统可以更好地整合和利用可再生能源, 优化资源配置, 提高能源利用效率, 降低能源生产成本。

4) 绿证比例的增加或碳排放因子的降低, 都可以使风电上网量增加, 减少系统总的碳排放量。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. [2020-09-22]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.
- [2] 国家能源局. 关于试行可再生能源绿色电力证书核发及自愿认购交易制度的通知[EB/OL]. [2017-02-06]. http://www.nea.gov.cn/201702/06/c_136035626.
- [3] PIGOU A C. 福利经济学[M]. 朱泱, 张胜纪, 吴良健, 译. 北京: 商务印书馆, 1920.
- [4] 徐慧慧, 田云飞, 赵宇洋, 等. 考虑绿证-碳交易的多虚拟电厂混合博弈优化调度[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 1-7, 16.
XU Huihui, TIAN Yunfei, ZHAO Yuyang, et al. Optimal scheduling of multiple virtual power plants mixed game considering green certificate and carbon trading[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 1-7, 16.
- [5] 孟宇翔, 马刚, 李豪, 等. 基于绿证-阶梯式碳交易交互的源荷互补调度优化[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 149-156.
MENG Yuxiang, MA Gang, LI Hao, et al. Optimal scheduling of source-load complementation based on green certificate-step carbon trading interaction[J]. Electric Power, 2023, 56(9): 149-156.
- [6] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. A scheduling model of a multi-microgrid system based on bi-layer optimization with consideration of PCC power control and bilateral bidding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.
- [7] 张钧钊, 姜欣, 段世杰, 等. 虚拟电厂参与电-碳联合市场运行的竞价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 108-118.
ZHANG Junzhao, JIANG Xin, DUAN Shijie, et al. Bidding strategy for a virtual power plant to participate in the power-carbon joint market[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 108-118.
- [8] 成润婷, 张勇军, 李立涅, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 89-99.
CHENG Runtong, ZHANG Yongjun, LI Licheng, et al. Construction and research progress of electricity market for high-proportion renewable energy consumption[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 89-99.
- [9] 包铭磊, 丁一, 邵常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4881-4892, 5207.
BAO Minglei, DING Yi, SHAO Changzheng, et al. Review of nordic electricity market and its suggestions for China[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4881-4892, 5207.
- [10] LU Siyu, WU Yaowu, LOU Suhua, et al. A model for optimizing spinning reserve requirement of power system under low-carbon economy[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1048-1055.
- [11] 刘天蔚, 边晓燕, 吴珊, 等. 电力系统碳排放核算综述与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 176-187.
LIU Tianwei, BIAN Xiaoyan, WU Shan, et al. Overview and prospect of carbon emission accounting in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 176-187.
- [12] 刘铠诚, 孙嘉赣, 周任军, 等. 碳市场下火电统一碳排放基准与减排效应分析[J]. 电力建设, 2018, 39(1): 113-118.
LIU Kaicheng, SUN Jiagan, ZHOU Renjun, et al. A unified carbon emission benchmark for fossil-fueled units and its effect on carbon emission reduction in carbon market[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(1): 113-118.
- [13] 叶泽, 何姣, 周鑫, 等. 发电行业碳排放权初始配额分配的双层规划模型[J]. 系统工程, 2018, 36(11): 140-146.
YE Ze, HE Jiao, ZHOU Xin, et al. Bi-level programming model for initial quota allocation of carbon emission rights in power generation industry[J]. Systems Engineering, 2018, 36(11): 140-146.
- [14] 胡志刚. 考虑绿证交易的含风电的系统电源优化规划研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
HU Zhigang. Research on power optimization planning of system with wind power considering green certificate transaction[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [15] 李根柱. 可再生能源配额与电力协调交易研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
LI Genzhu. Research on renewable energy quota and electricity coordinated transaction[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [16] 张虹, 孟庆尧, 王明晨, 等. 考虑火电机组参与绿证购买交易的含氢综合能源系统经济低碳调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 26-35.
ZHANG Hong, MENG Qingyao, WANG Mingchen, et al.

- Economic and low-carbon dispatch strategy of a hydrogen-containing integrated energy system considering thermal power units participating in green certificate purchase trading[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 26-35.
- [17] 魏世哲. 配额制度下绿证交易发展方向浅析[J]. *中国电机*, 2020(5): 30-33.
WEI Shizhe. Analysis of the development direction of green certificate trading under the quota system[J]. *China Electric Power*, 2020(5): 30-33.
- [18] 刘敦楠, 汪伟业, 李鹏飞, 等. 绿电消纳责任权重下火电厂商市场行为的演化博弈[J]. *电力建设*, 2020, 41(10): 20-29.
LIU Dunnan, WANG Weiye, LI Pengfei, et al. Evolutionary game theory study on the commercial market behavior of thermal power plants under renewable portfolio standard policy[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(10): 20-29.
- [19] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 69-81.
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 69-81.
- [20] 索瑞鸿, 宋依群. 计及负荷规模效应的售电公司决策研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(11): 95-110.
SUO Ruihong, SONG Yiqun. Decision-making study of electricity retailers considering the economies of scale[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(11): 95-110.
- [21] 叶晨, 牟玉亭, 王蓓蓓, 等. 考虑动态碳交易曲线的电-碳市场出清模型及节点边际电价构成机理分析[J]. *电网技术*, 2023, 47(2): 613-624.
YE Chen, MOU Yuting, WANG Beibei, et al. Mechanism of locational marginal prices and clearing model of electricity and carbon market considering dynamic carbon trading curve[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 613-624.
- [22] 杨波, 汤文成, 吴福保, 等. 考虑 CVaR 的“新能源+储能”电厂日前市场投标策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(9): 93-100.
YANG Bo, TANG Wencheng, WU Fubao, et al. Day-ahead market bidding strategy for “renewable energy+energy storage” power plants considering conditional value-at-risk[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(9): 93-100.
- [23] 吴静, 刘轩宇, 李响, 等. 碳市场价格不确定性对电网调度影响机理分析[J/OL]. *上海交通大学学报*: 1-21 [2024-06-08]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.313>.
WU Jing, LIU Xuanyu, LI Xiang, et al. Impact mechanism analysis of carbon price uncertainty on power system dispatch[J/OL]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*: 1-21 [2024-06-08]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.313>.
- [24] 陈荃, 郇嘉嘉, 郑淇源, 等. 基于值函数近似的发电商报价与市场出清双层优化算法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(11): 4875-4885.
CHEN Quan, XUN Jiajia, ZHENG Qiyuan, et al. Value function approximation-based bi-level optimization algorithm for strategic biddings of power suppliers and clearing of markets[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(11): 4875-4885.
- [25] 禩宗衡, 荆朝霞, 叶文圣, 等. 考虑储能灵活能量状态的新型电能市场机制[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3810-3823.
XUAN Zongheng, JING Zhaoxia, YE Wensheng, et al. New energy market mechanism considering flexible state of energy in energy storage[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 3810-3823.
- [26] 董福贵, 郗来昊, 孟子航. 考虑碳交易的电力现货市场出清多阶段优化模型研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(1): 79-96.
DONG Fugui, XI Laihao, MENG Zihang. Multi-stage optimization model for electricity spot market clearing considering carbon trading[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1): 79-96.

收稿日期: 2024-06-08; 修回日期: 2024-09-02

作者简介:

张国良(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与电力市场; E-mail: 2407459643@qq.com

简红(1969—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定运行控制及新能源并网发电技术; E-mail: xjluh69@163.com

田易之(1983—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为风力发电及并网技术。E-mail: ttarsenal@163.com

(编辑 周金梅)