

电力改革背景下可再生能源侧的竞价策略

张林楠, 王 宁

聊城大学东昌学院, 山东 聊城

收稿日期: 2022年11月22日; 录用日期: 2022年12月6日; 发布日期: 2022年12月29日

摘 要

随着我国电力市场改革的不断深入, 发电侧市场竞争日趋激烈。可再生能源发电商作为发电企业参与市场竞价的交易主体之一, 想要在激烈的市场竞争中取得优势, 需要不断调整其竞价策略, 才能使企业自身获得最大收益。本文在了解我国电力市场竞价特点及可再生能源出力特性的基础上, 对开放电力市场背景下发电侧多群体的竞价策略进行比较分析。基于政府提出的碳排放配额与可再生能源证书(REC)交易机制, 建立电力市场交易双层模型, 在考虑寡头电力市场条件下, 传统燃煤企业通过购买可再生能源证书并将其转化为碳排放配额, 同时可再生能源出力与典型的电转气(power-to-gas, P2G)合作, 以求进一步提高利润。

关键词

可再生能源, 出力特性, 合作博弈

Bidding Strategy of Renewable Energy under the Background of New Electricity Market Reform

Linnan Zhang, Ning Wang

Dongchang College, Liaocheng University, Liaocheng Shandong

Received: Nov. 22nd, 2022; accepted: Dec. 6th, 2022; published: Dec. 29th, 2022

Abstract

With the continuous deepening of power market reforms, competition in the power generation market has become increasingly fierce. Renewable energy generators, as one of the trading subjects of power generation enterprises participating in market bidding, need to constantly adjust their bidding strategies to obtain the advantage in the fierce market competition, in order to max-

imize their own profits. In this paper, based on understanding the bidding characteristics of electric power market and the output characteristics of renewable energy, comparative analysis of multi-group bidding strategies in the background of open electric power market is made. Based on the carbon emission quota and renewable energy certificate trading mechanism proposed by the government, a two-tier power market transaction model is established. Taking into account the oligopoly power market conditions, traditional coal-fired generation companies purchase renewable energy certificates and convert them into carbon emissions. At the same time, renewable energy output cooperates with typical power-to-gas (P2G) in order to increase more profits.

Keywords

Renewable Energy, Force Characteristic, Game of Cooperation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 可再生能源发电参与电力市场调度现况

现阶段我国新能源发展势头迅猛, 新能源渗透率远超前于同期部分发达国家。2020年, 我国新增风电装机 7167 万千瓦、太阳能发电 4820 万千瓦, 风光新增装机之和约为 1.2 亿千瓦[1], 远超市场预期。然而受一次能源限制, 风电、太阳能发电具有显著的季节特性和随机、波动特征, 对电力电量的跨季节分配、日内调整和实时平衡等不同时间尺度的灵活资源提出了更高要求。

我国政府实行电力改革, 电力市场调度由发电侧传统能源发出电能的多少, 这样一组可控变量控制用电侧用户消耗电能, 这样一组随机变量的过程转变为发电侧传统能源、可再生能源发出电能与用电侧用户消耗电能, 这样两组随机变量动态平衡的过程[2]。那么在电力市场中, 电价的高低, 不仅依据市场环境, 还取决于竞争对手的定价策略。通过纳什均衡的求解, 来确定在电力市场中, 各发电商应如何进行定价才能实现利润最大化。是个复杂的自适应的过程, 更是多方博弈的一个问题[3]。结合国内外运行范例通过数据分析, 预测负荷曲线, 以储能电站、火电调峰为基本手段, 建立风火联合、光火联合模型对负荷波动进行调节[4] [5]。为此在新能源出力过大的情况下, 亟需在高比例新能源接入的电网中引入新的调峰电源以保证系统动态平衡性[6]。文献[7]对国内储能现状进行研究, 分析储能电站的调峰成本。文献[8]采取根据电能申报属于对日前市场预出清, 计算深度调峰需求量, 然后根据深度调峰需求量计算各机组发电计划及火电机组的深度调峰量。类似的, 文献[3]提出一种光热发电 - 火电联合调峰的优化控制方法。论述光热发电的可调节特性以及光热发电 - 火电联合调峰的可行性, 并通过实例仿真验证优化控制方法的有效性。

2. 可再生能源证书(REC)定价模型

2.1. REC 价格变化与市场需求的关系

REC 的价格由政府决定, 政府采用直接或间接补贴形式, 但这种方式往往难以掌握可再生能源的发电成本变化[10], 补贴金额不随市场交易变化波动大, 费时费力。为此研究 REC 的价格与市场需求的关系, 以市场的手段确定 REC 的价格曲线。如图 1, 通过对电力市场耗能曲线的分析得出可再生能源证书的交易量与需求量的关系, 其需求曲线和边际利润曲线近似一条折线, 对于不同的交易量其折线的斜率不同, 而成本曲线近似于抛物线。

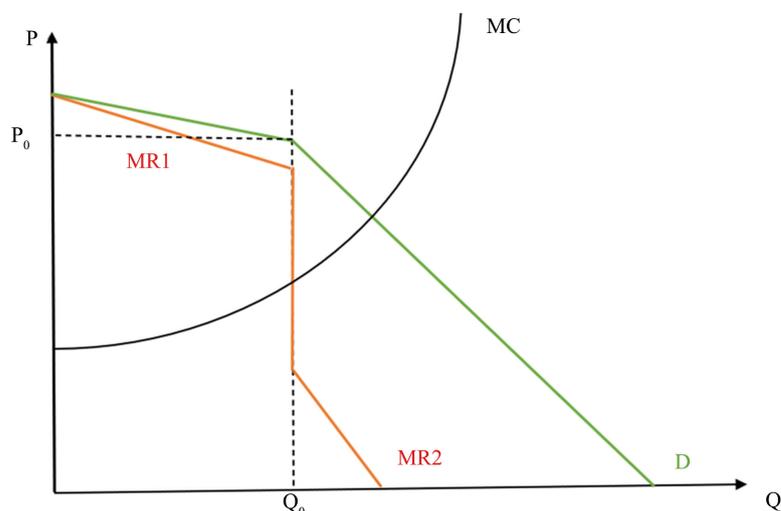


Figure 1. Relation between REC pricing curve and market demand
图 1. REC 定价曲线与市场需求的关

如图 1 所示, 图中横坐标代表交易电量 Q , 纵坐标代表成本价格 P , 折线 D 代表需求电量, 根据利润最大化原则, $MR = MC$ 时, 寡头能实现其利润的最大化, 即在拐点 Q_0 时存在最大利润, 其对应的 Q_0 就是该产品的最优价格。

2.2. 曲线平移对 REC 的影响

由政府制定 REC 价格, 考虑到光伏的 REC 高于风力发电, 长此以往, 将导致市场向风力发电倾斜 [11]。为此, REC 的价格应该由市场决定, 通过供给 - 需求曲线求得。在寡头市场中, 当市场边际成本等于市场边际收益时, 利润最大。总收入可以表示

$$R_T = P * Q \quad (1)$$

假设需求曲线函数为:

$$P = mQ + n \quad (2)$$

边际收益曲线函数为:

$$\begin{cases} R_T = P * Q = mQ^2 + nQ \\ R_M = 2mQ + n \end{cases} \quad (3)$$

如图 2 所示, 当需求曲线固定为 D_0 时, 交易量为 Q_0 , 市场价格为 Q_0 , 当成本价格升高时, 若升至曲线 $MC1$, 交易价格不变, 仍为 Q_0 。只有当成本价格发生明显变化时, 例如升至曲线 $MC3$ 或降至曲线 $MC2$, 交易价格才变为 Q_3 或 Q_2 。

其需求曲线和边际收益曲线可以表示为

$$Q = \begin{cases} mQ + n, Q \leq Q_0 \\ uQ + v, Q > Q_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$R_M = \begin{cases} 2mQ + n, Q \leq Q_0 \\ 2uQ + v, Q > Q_0 \end{cases} \quad (5)$$

供给曲线表示为

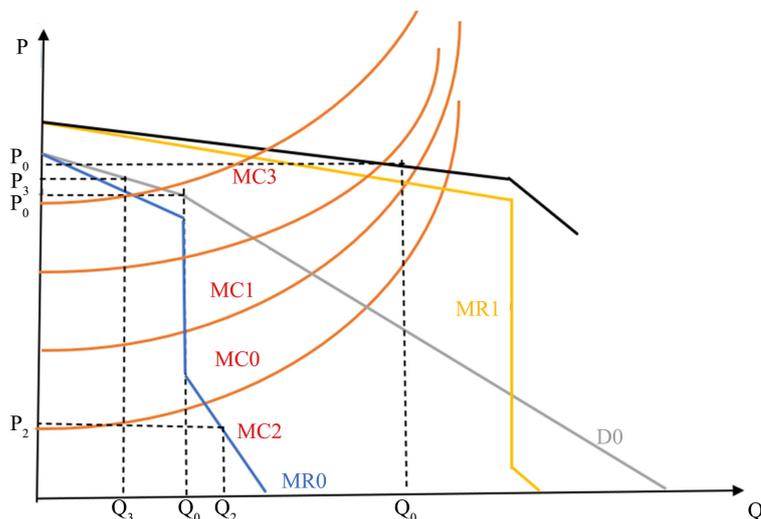


Figure 2. Influence of demand curve changes on REC pricing
图 2. 需求曲线变动对 REC 定价的影响

$$R_c = aQ^2 + bQ + c \tag{6}$$

为此, 在满足在 Q_0 处满足 $R_c < 2mQ + n$ 且 $R_c > 2uQ + v$ 时, Q_0 可以确定

$$Q_0 = mQ_0 + n = uQ_0 + v \tag{7}$$

当成本升高, 即 $aQ_0^2 + bQ_0 + c > 2mQ + n$ 时, 求边际成本及边际收益两曲线的交点

$$aQ^2 + bQ + c = 2mQ + n \tag{8}$$

可以得到

$$Q = \frac{2m - b + \sqrt{(2m - b)^2 - 4a(c - n)}}{2a} \tag{9}$$

代入求得可再生能源证书价格 Q 为 $m \frac{2m - b + \sqrt{(2m - b)^2 - 4a(c - n)}}{2a} + n$; 同理可以得到当成本大幅

下降时, 可再生能源证书价格 Q 为 $u \frac{2u - b + \sqrt{(2u - b)^2 - 4a(c - v)}}{2a} + v$ 。

若把碳排放配额考虑进来, 经 ETS 与 REC 综合考虑研究可再生能源证书定价, 当 REC 价格低于碳排放价格, 市场投机者可能会大量购买 REC, 作为碳排放额排放。针对这种情况下, 如图 2 所示, 我们将供应曲线固定为 MC_0 , 当需求急剧增加时, 需求曲线与边际收益曲线分别调整为 D_1 与 MR_1 , 此时, REC 交易价格升高至 Q_0' , 为此可有效遏制这种投机行为。此时, 需求曲线及边际收益曲线可表示为

$$Q = \begin{cases} m(Q + q) + n, & Q \leq Q_0 \\ u(Q + q) + v, & Q > Q_0 \end{cases} \tag{10}$$

$$R_M = \begin{cases} 2m(Q + q) + n, & Q \leq Q_0 \\ 2u(Q + q) + v, & Q > Q_0 \end{cases} \tag{11}$$

可再生能源证书 REC 价格最终确定为 $m \frac{2m - b + \sqrt{(2m - b)^2 - 4a(c - n)}}{2a} - mq + n$ 。

2.3. 可再生能源证书交易模型

基于博弈论来构建可再生能源证书的交易模型, 该模型利用相对成熟的碳市场带动发展可再生能源证书的交易市场。对于电力市场竞争中的三个主要参与者, 即 P2G 设备、可再生能源发电厂和火力发电厂[12][13]。

2.3.1. 每个参与者的利益模型

在发电侧竞价策略中将 ETS 与 REC 统筹考虑, 将碳排放配额与可再生能源证书的交易纳入发电成本计算。

1) P2G 设备收益

P2G 设备收益包括销售天然气及氢气的收益及碳排放配额的收益减去购电支出

$$P^{P2G} = \sum_{P \in \Omega^P} \pi^{gas} g^{P2G, gas} + \pi^{eP} e^{P2G, Pur} \alpha^{P2G} - \pi^C e^{P2G, Pur} \quad (12)$$

式中, Ω^P 为 P2G 的集合, π^{gas} 为售出气体的价格, $g^{P2G, gas}$ 为售出气体量, π^C 为购入电量的节点电价, $e^{P2G, Pur}$ 为购入电量, π^{eP} 为碳价, α^{P2G} 为 P2G 的减排因子。

约束条件为:

$$E_{P,t+1}^{P2G} = E_{P,t}^{P2G} + e_{P,t}^{P2G, Pur} \eta - g_{P,t}^{P2G, gas} \quad (13)$$

$$0 \leq e_{P,t}^{P2G, Pur} \leq e_P^{P2G, rate} \quad (14)$$

$$0 \leq g_{P,t}^{P2G, gas} \leq g_P^{P2G, SG} \quad (15)$$

$$0 \leq E_{P,t}^{P2G} \leq E_P^{P2G} \quad (16)$$

上式分别是单位时间内购电和售气量的能量平衡及各出力边界限制, 其中 η 表示转化效率。

2) 可再生能源发电厂收益

$$R^{RNB} = \sum_{P \in \Omega^{RNB}} \pi^{LMP} \left(e_r^{R, NGC} + \sum_{g \in \Omega^G} e_{rg}^{R, GCG} + \sum_{j \in \Omega^J} e_{rj}^{R, GCC} \right) + \pi^{GC} \left(\sum_{g \in \Omega^G} e_{rg}^{R, GCG} + \sum_{j \in \Omega^J} e_{rj}^{R, GCC} \right) \quad (17)$$

可再生能源的收益分为两部分, 一部分为售出电量与节点电价的乘积, 另一部分为销售 REC 获得的收益。式中, π^{LMP} 为节点电价, π^{GC} 为 REC 的价格。约束条件为:

$$e_r^{R, NGC} + \sum_{g \in \Omega^G} e_{rg}^{R, GCG} + \sum_{j \in \Omega^J} e_{rj}^{R, GCC} = e_r^{PV} + e_r^W \quad (18)$$

$$e_r^{R, NGC} + \sum_{g \in \Omega^G} e_{rg}^{R, GCG} + \sum_{j \in \Omega^J} e_{rj}^{R, GCC} \leq e_r^{PV} + e_r^W \quad (19)$$

可再生能源发电主要受能量平衡及调度电量的制约, 并存在弃风弃光现象。

3) 传统火力发电厂收益

火电厂的收益等于售电收入与购买 REC 及碳排放配额的差值。

$$R^{TG} = \sum_{g \in \Omega^G} \left(\pi_g^{LMP} e_g^G \right) - \pi^{GC} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \sum_{r \in \Omega^{RNB}} e_{gr}^{G, GCG} \right) - \pi^{CAR} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \mathcal{E}_g^{PT, Pur} \right) \quad (20)$$

约束条件为

$$\mathcal{E}_g^{QT, pur} = e_g^g \zeta_g - \sum_{r \in \Omega^{RNB}} \left(e_{gr}^{G, GCG} \alpha^{GC} \right) - C_{APg} : \gamma_g \quad (21)$$

若发电厂的碳排放量减去 REC 转化的配额以及政府分配的配额即为发电厂需要购买的配额数量。

2.3.2. 基于碳交易和 REC 交易的发电侧竞价策略

在得到各个电力市场参与者的收益模型之后, 建立可在再生能源与 P2G 合作模型, P2G 设备的购电量可以从再生能源发电机组处获得, 既促进了可再生能源的消纳, 又节约了 P2G 设备的购电成本[14]。这样使得基于碳排放和可再生能源政策限制的交易, 是在火力发电厂与可再生能源与 P2G 两者组成的整体之间进行的。

其模型可以表示为:

$$\min \sum_{t=1}^T \left[\sum_{g \in \Omega^G} (a_g^G e_g^G) + \pi^{GC} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \sum_{r \in \Omega^{RNB}} e_{gr}^{G,GCG} \right) + \pi^{CAR} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \mathcal{E}_g^{PT,Pur} \right) + \sum_{r \in \Omega^{RNB}} (a_r^{PV} e_r^{PV}) + \sum_{r \in \Omega^{RNB}} (a_r^W e_r^W) \right] \quad (22)$$

式中, a_g^G , a_r^{PV} , a_r^W 分别代表火电, 光伏和风电的竞标价。

约束条件:

$$\sum_{r \in \Omega^{RNB}} e_r^{PV} + \sum_{r \in \Omega^{RNB}} e_r^W + \sum_{g \in \Omega^G} e_r^G - \sum_{p \in \Omega^P} e_p^{P2G} - \sum_{j \in \Omega^J} L = 0 \quad (23)$$

$$c_l < \sum_{m \in \Omega} G_m (e_m^G + e_m^{PV} + e_m^W - e_m^{P2G} - L) < c_h \quad (24)$$

此竞价模型又可以作为约束条件补充至各收益模型在得到三个参与者的单层收益数学模型后, 例如 P2G 设备的收益可以重新表述为

$$(S_G^*, S_R^*) = \arg \max R(S_G, S_R, S_T^*) \quad (25)$$

根据演化博弈理论, P2G 与可再生能源发电企业采取合作博弈与火力发电厂参与市场竞争, 根据迭代过程, 可以找到系统纳什均衡点 (S_G, S_R, S_T^*) 。

3. 算例及分析

3.1. 参数设定

为验证可再生能源发电企业与 P2G 合作博弈在电力市场竞争中的竞争优势, 本文构建了一个火电企业、可再生能源发电企业、P2G 三者参与电力市场竞争的竞价模型, 仿真使用的主要参数如表 1, 其数据取自南方电网调度运行网站。

Table 1. Simulation parameter settings

表 1. 仿真参数设定

| 参数 | 火电机组 竞标价 | 光伏发电 竞标价 | 风电厂 竞标价 | 碳排放系数 | 碳配额 | 最低可再生 能源出力率 | P2G 减 排因子 | 碳配额 转换比 |
|----|---------------|----------------|---------------|-------------|-----------------------|----------------|--------------|------------|
| 值 | 351 元 /MWh | 1050 元 /MWh | 754 元 /MWh | 0.875~0.985 | 1.2×10^7 t/a | 15% | 0.80 | 0.7 |

本次竞价模拟算例设计如表 2 所示。

Table 2. Calculation example design

表 2. 算例设计

| 算例 | 是否考虑 REC | 市场竞争方式 |
|------|----------|------------------------------|
| 算例 1 | 不考虑 | 假设市场完全竞争 |
| 算例 2 | 考虑 | 寡头市场下, 采用非合作博弈 |
| 算例 3 | 考虑 | 寡头市场下, 可再生能源发电企业与 P2G 设备合作博弈 |

3.2. 计算结果

本文通过图 3 的三个算例, 验证本文构建的双层模型与传统调度模型, 对促进可再生能源消纳以及火力发电调度两方面的影响。在算例设计中, 主要是引入两个变量: REC 证书交易与合作博弈, 以市场是否为寡头市场探究 REC 交易对新能源消纳的促进作用, 以采用 P2G 与可再生能源发电厂合作与各发电企业独立竞价探究合作博弈对电力市场竞价方收益的影响。

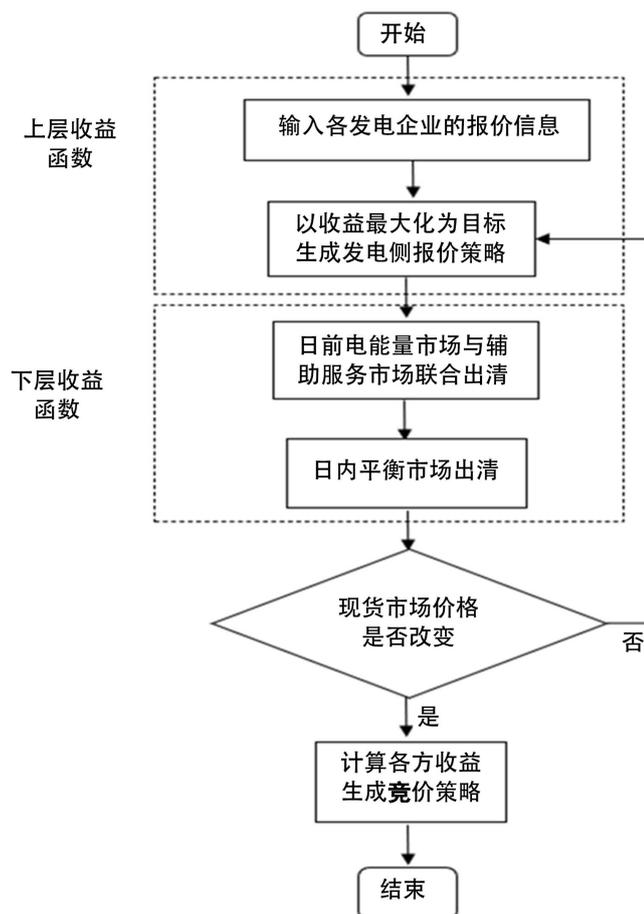


Figure 3. Model solving process

图 3. 模型求解流程

本章提出的发电侧报价策略模型属于非线性, 混合整数优化问题, 对上层模型进行线性化处理并使用粒子群算法进行优化求解[15], 生成当前市场价格下各发电企业报价策略。上层优化结果传递至下层使用 CPLEX 求解器进行现货市场出清, 得到各类型交易市场出清价格。若现货市场出清价格发生改变, 则将下层出清得到的现货市场价格返回至上层生成新的储能报价, 然后继续传递至下层进行现货市场出清。上下层间重复进行迭代直至现货市场出清价格趋于稳定, 输出当前电力市场报价中标情况计算其获得的最大收益, 并输出发电侧的最优报价策略。具体的求解流程如图 3 所示。

本模型设计要使可再生能源、传统燃煤企业及 P2G 设备各发电商的受益最大, 且系统总消耗最小[16]。为此需求出目标函数式(2-16)的拉格朗日函数, 如式 26, 利用其拉格朗日函数, 研究系统收益受到的来自市场竞争环境各方面的制约。

$$\begin{aligned}
 & \sum \left[\sum_{g \in \Omega^G} a_g^G e_g^G + \pi_t^{GC} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \sum_{r \in \Omega^{RNB}} e_{gr}^{G,GCG} \right) + \pi_t^{CAR} \left(\sum_{g \in \Omega^G} \varepsilon_g^{QT,pur} \right) + \sum_{r \in \Omega^{RNB}} a_r^{PV} e_r^{PV} \right. \\
 & \left. + \sum_{r \in \Omega^{RNB}} a_r^W e_r^W \right] + \sum_{g \in \Omega^G} -\chi_g \left[\varepsilon_g^{QT,pur} - \sum_{t=1}^T e_{gt}^G \zeta_g^G + \sum_{r \in \Omega^{RNB}} e_{gt}^{G,GCG} \alpha^{GC} + C_{APg} \right] \\
 & -k_g \left[\sum_{p \in \Omega^P} e^{P2G,pur} \alpha^{P2G} - \varepsilon^{QT,pur} + Q^{pool} \right] - \zeta_g \left[\sum_{r \in \Omega^{RNB}} e_{gt}^{G,GCG} E_{ror\%} \right] \\
 & + \left[\sum_{g \in \Omega^G} e_g^G + \sum_{r \in \Omega^{RNB}} (e_r^{PV} + e_r^W) - \sum_{p \in \Omega^P} e_p^{P2G,pur} - \sum_{j \in \Omega^J} L_j \right]
 \end{aligned} \tag{26}$$

各机组的出力共分为三个部分：传统燃煤、光伏及风电的出力限制，碳排放配额及REC交易的额度输出与买入，机组出力上下限的限制。如图4所示。

由图4可以看出，1) 算例1未出售的REC证书曲线明显高于算例2，这表明，在电力市场中优先考虑发电的绿色属性，有利于REC的消纳。2) 从火电机组的出力曲线来看，算例2的火电机组出力曲线更平滑，REC交易可以有效地促进可再生能源的消纳，从而使火电机组紧急调峰的现象明显减少，调峰曲线更加平滑。

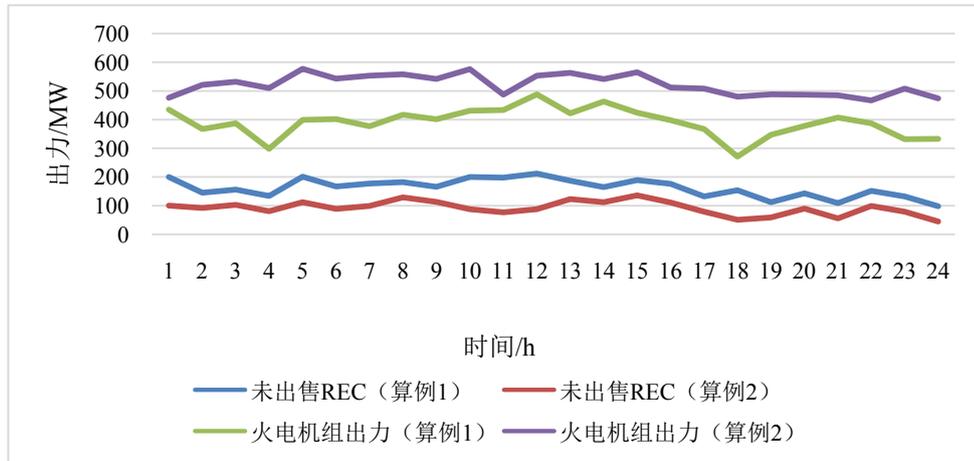


Figure 4. Output of thermal power units and REC certificate transactions
图4. 火电机组出力及REC证书交易情况

在考虑传统燃煤企业碳排放系数、可再生能源出力率、P2G减排因子、碳配额转换比等多种因素后，以表1相关数据为依据，各发电机组的收益可以表示为

目标函数：式(26)。

约束条件：式(16)——(25)。

由图5，在电力市场环境中引入REC交易，极大的促进了可再生能源的消耗，提高了系统总收益。对比算例2与算例3同等市场竞争环境下，P2G参与市场竞价与可再生能源或火力发电相比，收益方面差距明显。

3.3. 结果分析

通过上一节对三个算例的分析可以看出，1) 相比市场完全竞争，将REC交易引入市场竞争，优先考虑政府制定的绿证政策，使可再生能源发电商的收益不仅来源于售电收益，还有一部分来源于绿证收

益, 从而增加了可再生能源的消纳。2) 将 P2G 引入市场竞争, 可再生能源发电企业与 P2G 合作参与市场竞争, 以碳排放政策带动 REC 的交易, 使可再生能源发电企业更具市场竞争力。

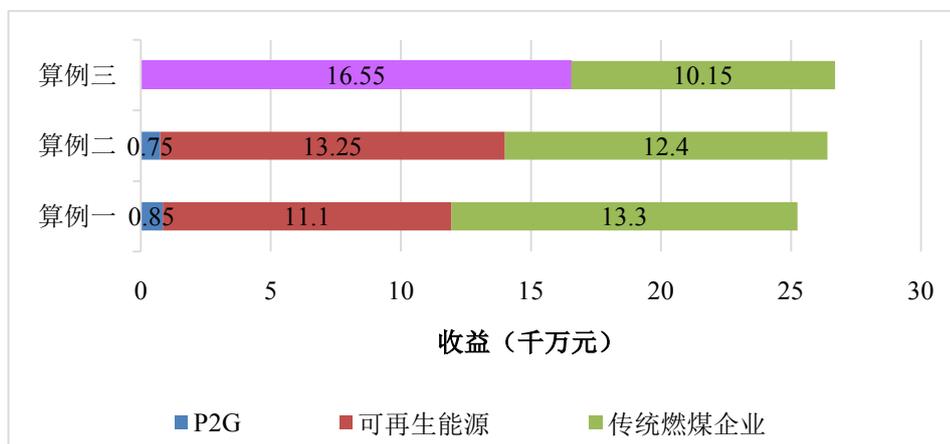


Figure 5. Earnings of each participant in the market competition

图 5. 参与市场竞争各参与者的收益

如图 6 所示, 在同一坐标轴下, 随着可再生能源证书的价格不断升高, 可再生能源的利用率反而进一步提高, 并且碳排放量逐步下降。这说明, 电力市场中引入 REC 交易, 有效遏制了发电企业的碳排放总额, 间接提高了火电厂的发电成本, 增加了可再生能源发电企业的市场竞争力。

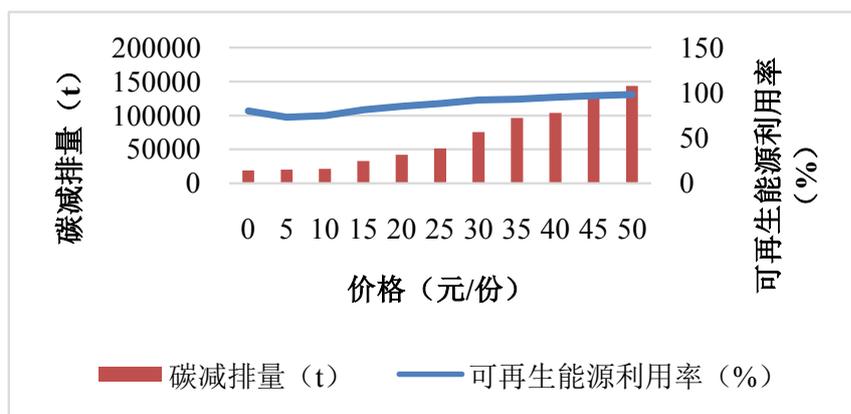


Figure 6. Relationship between REC trading and renewable energy consumption and carbon emissions

图 6. REC 交易与可再生能源消纳及碳排放量的关系

为此, 要真正的促进可再生能源的消纳, 则需要选择合适的可再生能源证书定价, 如图 7 所示, 对于不同的市场碳排放配额比例下, REC 定价对可再生能源利用率和碳排放总量与的影响。

在同一坐标轴下, 以折线图表示 REC 定价与可再生能源利用率的关系, 以柱状图代表 REC 定价与系统碳减排量的关系。1) 可再生能源配额比例一定, 随 REC 定价价格的升高, 可再生能源消纳比例上升, 碳排放总量下降, 并在一定价格时趋于饱和。可再生能源配额比例越大, 趋势变化越快。2) 对于较高比例的可再生能源配额, 在同一 REC 定价的前提下, 其碳减排总量及新能源利用效率反而不如低比例的可再生能源配额机制高。

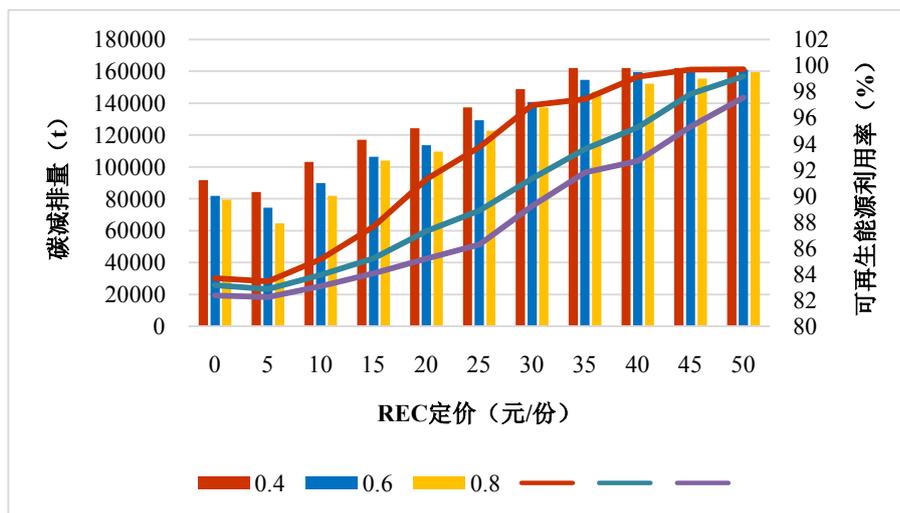


Figure 7. Coordination between REC price and carbon emission and renewable energy consumption

图 7. REC 价格与碳排放及可再生能源消纳的协调关系

4. 结论

本文结合电力市场交易中政府制定的 ETS 与 REC 两种政策, 并将 P2G 作为市场主体, 引入市场竞争。建立了 P2G 联合可再生能源发电与传统燃煤企业的双层博弈模型, 以发展较为成熟的 ETS 交易机制带动 REC 的购买力, 同时 P2G 与可再生能源发电相结合参与市场竞争, 增加了可再生能源的市场竞争力, 节约了发电成本, 提高了企业收益。

项目基金

山东省高等教育本科教学改革研究项目“基于互联网思维的层级式教学模式探究与实践”(编号: M2020145)

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报, 2020-12-22.
- [2] 钱锬. 智能电网中发电侧演化博弈竞价策略研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- [3] 王辉, 陈波波, 赵文会, 廖昆. 碳交易协同的跨省区清洁能源电力交易多主体竞价博弈[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 95-104.
- [4] 王轶辰. 新能源大发展要过好“消纳关”[N]. 经济日报, 2021-01-31.
- [5] 叶小宁, 李琼慧, 王彩霞. 完善市场化交易机制促进新能源消纳[N]. 国家电网报, 2021-02-09.
- [6] 司荣国, 贾艳刚, 曹东, 刘海洋. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 节能与环保, 2019(10): 86-87.
- [7] 张军, 张伟, 曹凌捷, 王伊晓, 马喜平, 沈涓程, 梁有珍. 国内储能市场发展现状及趋势分析[J]. 电力与能源, 2020, 41(6): 739-743.
- [8] 沈琛云, 王明俭, 李晓明. 基于风-光-蓄-火联合发电系统的多目标优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11): 74-82.
- [9] Liu, Q., Sun, Y. and Wu, M. (2021) Decision-Making Methodologies in Offshore Wind Power Investments: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **295**, Article ID: 126459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126459>
- [10] Goteti, N.S., Hittinger, E., Sergi, B. and Lima Azevedo, I. (2021) How Does New Energy Storage Affect the Operation and Revenue of Existing Generation? *Applied Energy*, **285**, Article ID: 116383. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116383>

-
- [11] 于超, 房芳. 基于目标优化的火电协助消纳风电的经济补偿模型[J]. 电力勘测设计, 2021(1): 67-71.
- [12] 蔡振华, 李立雄. 考虑弃风成本和深度调峰成本的弃风临界值计算[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2021, 30(1): 65-69. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7304.2021.01.0013>
- [13] 陶悦川, 孙荣峰, 姜建国, 等. 基于博弈论的可再生能源证书交易双层优化模型[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 64-76. <https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2021.01.009>
- [14] 任鹤. 基于电力市场的寡头动态博弈模型建立及其混沌控制研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2019.
- [15] 张尧翔, 刘文颖, 李潇, 杨美颖, 周强, 汪宁渤. 高比例新能源接入电网光热发电 - 火电联合调峰优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):1-7+32. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202102012>
- [16] 武昭原, 周明, 王剑晓, 夏清, 李庚银. 激励火电提供灵活性的容量补偿机制设计[J]. 电力系统自动化, 2021,45(6): 43-51.