

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240910

电-气-碳-绿证多市场下综合能源供应商联合均衡模型

王胜彩, 王 晔, 张少华

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 在能源低碳转型的背景下, 综合能源系统因其多能互补和有助于消纳新能源而得到了广泛的关注。为了体现综合能源系统的市场价值, 其参与电-气等多能源市场以及碳-绿证市场的竞争将是一种趋势。作为综合能源系统参与市场投标的竞争主体, 综合能源供应商的策略性行为将对这些市场产生重要的影响。为此, 建立了含新能源的综合能源供应商(integrated energy suppliers, IES)参与投标竞争的电-气-碳-绿证多市场的联合均衡模型。该模型考虑综合能源供应商和单一能源供应商在4个相互耦合的市场中的博弈行为, 同时考虑了新能源的不确定性, 并引入偏差惩罚机制对新能源的投标偏差进行处理。采用非线性互补方法求得该均衡模型的解。最后, 通过算例仿真验证了所提理论模型的合理性和有效性。结果表明, 与不引入碳市场和绿证市场情况相比, 综合能源供应商参与电-气-碳-绿证市场时利润增加了6.5%, 碳排放减少了7.2%。

关键词: 综合能源供应商; 新能源; 电-气-碳-绿证交易市场; 多市场均衡分析

Joint equilibrium model for integrated energy suppliers in coupled multi-markets of electricity-gas-carbon-green certificate

WANG Shengcai, WANG Xian, ZHANG Shaohua

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: With the ongoing low-carbon transition in the energy sector, integrated energy systems have received extensive attention for their multi-energy complementary and potential for facilitating renewable energy consumption. To reflect the market value of such systems, participation in electricity, gas, carbon, green certificate multi-markets competition has become an emerging trend. As the main competitive entities bidding in these markets, the strategic behaviors of integrated energy suppliers' (IES) can significantly impacts on market outcomes. Therefore, a joint equilibrium model of electricity-gas-carbon-green certificate markets with IES participation including renewable units is constructed. The model captures the game-theoretic interactions between IESs and single-energy suppliers across four interdependent markets. The uncertainty of renewable energy output is also taken into consideration, and a deviation penalty mechanism is introduced to deal with bidding deviations from renewable units. The nonlinear complementarity approach is applied to solve this joint equilibrium model. Finally, numerical examples are presented to validate the rationality and effectiveness of the proposed model. The results show that, compared to cases without the introduction of the carbon and green certificate markets, IESs' participation in the electricity-gas-carbon-green certificate markets can increase profits by 6.5% and decrease carbon emissions by 7.2%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61773252).

Key words: integrated energy suppliers; renewable energy; electricity-gas-carbon-green certificate trading markets; multi-markets equilibrium analysis

0 引言

当前, 过度依赖化石能源造成的环境问题日益凸显, 提高能源利用率和推动新能源的发展已迫在

眉睫。近年来, 在各国政府的目标激励和政策支持下, 新能源得到了长足的发展。为促进风光等新能源的消纳, 寻求安全、高效、低碳、清洁的能源运行模式, 将电力、天然气、冷热、交通等多种能源系统耦合起来, 实现不同能源的高效利用和互补的综合能源系统已然成为研究热点^[1-2]。为基于市场机

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61773252)

制发展综合能源系统, 综合能源系统参与电、气等多能源市场竞争成为趋势^[3]。另一方面, 为实现“双碳”目标, 碳交易(carbon emission trading, CET)市场正得到快速发展, 并推动综合能源系统低碳化运行^[4]。同时, 为体现清洁能源价值, 绿色证书交易(green certificate trading, GCT)市场也得到了快速发展, 新能源可以通过在绿证市场出售绿证获利, 有助于提高新能源的市场竞争力^[5]。因此, 综合能源系统参与电-气-碳-绿证市场竞争将是重要发展方向。作为综合能源系统参与市场投标的竞争主体, 综合能源供应商(integrated energy suppliers, IESs)的策略性行为将对电-气-碳-绿证多市场产生重要的影响。因此, 研究含新能源的综合能源供应商参与电-气-碳-绿证在多市场的竞争策略以及对多市场竞争结果产生的影响具有重要的理论和现实意义。

目前, 有不少研究聚焦于考虑 CET 和 GCT 的综合能源系统优化调度的相关问题。文献[6]探究了碳-绿证联合交易机制与需求响应协同对综合能源系统带来的影响。文献[7]构建了含氢综合能源系统总运行成本最小为目标的优化调度模型。文献[8]建立了一个多区域综合能源系统同时参与能源市场、旋转备用市场、天然气市场、CET 市场和 GCT 市场的优化模型。文献[9]提出了绿证-碳排等价交互机制。文献[10]建立了考虑条件风险价值的碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统优化调度模型。文献[11]研究了碳排放权交易和可再生能源组合标准对我国不同类型的风-光-火电综合能源调度系统的实际影响。文献[12-13]探究了 GCT 机制与阶梯式 CET 机制的“双机制”激励对综合能源系统低碳经济运行的影响。以上文献均采用优化模型研究引入 CET 和 GCT 对综合能源系统带来的影响。

由于能源市场具有寡头竞争特性, 市场参与者之间的策略会相互影响进而影响电-气-碳-绿证多个市场, 而采用优化模型无法充分考虑这些影响。寡头博弈理论可用于分析市场中存在利益关联的多个市场参与者的策略性行为, 并研究该策略性行为对市场运行结果造成的影响。在基于博弈模型研究综合能源系统参与多能源市场和碳、绿证市场竞争的研究中, 文献[14]建立了 CET 机制下综合能源市场多供能主体均衡竞价模型, 分析了 CET 机制的引入对市场运行和多供能主体的竞价策略的影响, 但其供能主体没有考虑新能源, 随着新能源的不断发展, 新能源参与市场投标竞争已成为必然趋势, 且该研究中碳价是固定价格, 不是通过市场竞争得出的, 无法精确反映碳排放权的真实市场价值。文献[15]在计入输电阻塞的影响下, 基于博弈模型研究

综合型能源发售电商参与日前电力市场和绿证市场的竞价策略, 但该研究中综合型能源发售电商只拥有火电和风电机组, 属于单一能源供应商, 而不是拥有多种能源的综合能源供应商。以上文献主要集中于单一 CET 或 GCT 的引入对 IESs 竞价策略带来的影响, 同时引入 CET 和 GCT 对 IESs 的影响方面的研究极少。文献[16]基于纳什谈判理论建立了综合能源系统内多主体合作博弈模型, 重点研究了多主体在多能源市场和 CET-TGC 市场中的最优运行策略, 其供能主体虽然考虑了新能源, 但没有计入新能源的不确定性带来的影响, 同时该研究中只有绿证价格是通过博弈得出的, 其他电、热、碳市场的价格是外生的固定价格, 无法反映各个市场价格之间的相互影响。

针对以上研究的不足, 本文基于寡头竞争的古诺均衡理论, 建立了一个含新能源的 IESs 参与的电-气-碳-绿证多市场投标竞争的博弈均衡模型, 考虑各个市场的价格均由市场参与者博弈得出。同时计入了新能源发电出力的不确定性, 并引入偏差惩罚机制处理新能源的投标偏差^[3,17], 最后采用非线性互补方法进行求解。本文的主要创新点包括: 1) 在研究对象方面, 考虑 IESs 参与电、气、碳、绿证多市场投标竞争, 并考虑 4 个市场之间的耦合关系; 2) 在理论模型方面, 应用博弈均衡模型, 考虑 IESs 和其他市场参与者之间的策略互动及其对市场的影响; 3) 在算例仿真方面, 验证 IESs 同时参与 4 个市场竞争的优越性, 并进行碳配额和绿证配额系数对结果影响的灵敏度分析, 可以为政策制定者提供参考。本文研究符合 IESs 参与多市场竞争的实际发展背景, 并考虑 IESs 参与多市场竞争的策略性行为, 可以为市场监管者提供决策支持, 有助于基于市场机制发展综合能源系统, 并有助于实现碳减排目标和能源结构清洁化转型。

1 IESs 参与电-气-碳-绿证多市场交易框架

图 1 给出了 IESs 参与电-气-碳-绿证多市场投标竞争的市场交易框架。其中, 多个传统电力供应商(coal-fired generator suppliers, CGSs)与多个 IESs 拥有的燃煤机组(coal-fired power units, CU)、燃气机组(gas turbine, GT)和新能源机组(renewable power units, RU)共同参与电能市场投标竞争; 多个天然气供应商(natural gas suppliers, NGSs)与多个 IESs 拥有的燃气机组和天然气井(natural gas wells, GW)共同参与天然气市场投标竞争; 同时, 传统电力供应商和 IESs 拥有的燃煤、燃气机组参与碳市场购售碳配额, 各 IES 的新能源机组通过在绿证市场出售绿证

获得额外收益, 可再生能源配额责任主体为了满足绿证配额要求需要到绿证市场购买绿证。

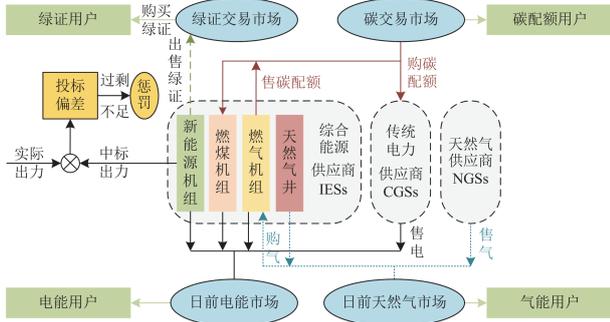


图1 IESs参与多市场竞争的市场交易框架

Fig. 1 Multi-market trading framework with IESs

电能市场的价格由传统电力供应商和 IESs 拥有的燃煤、燃气、新能源机组的投标量及电能市场需求曲线形成供需平衡得出。天然气市场、碳市场、绿证市场的价格也类似, 通过供需平衡得出各市场价格^[18-19]。新能源发电由于受气候等多方因素的影响具有不确定性的特征, 使得新能源的实际出力和投标出力往往会出现偏差, 本文通过引入线性连续型偏差惩罚机制来处理新能源的投标偏差, 即当 IESs 拥有的新能源机组的中标出力大于实际出力时, IESs 要以高于电能市场的价格对少发的电量缴纳罚金; 当 IESs 拥有的新能源机组的中标出力小于实际出力时, IESs 则要以低于电能市场的价格将多发的电量卖出。

2 IESs参与多市场投标竞争的均衡模型假设

假设有 N 个综合能源供应商、 R 个传统电力供应商和 H 个天然气供应商以古诺模式共同参与电气-碳-绿证市场投标竞争。

2.1 电能市场

考虑 1 个单时段的电能市场, 某小时电能市场的市场需求可以用如式(1)所示的线性需求函数来表示。

$$D^e = a^e - b^e p^e \quad (1)$$

式中: D^e 为电能市场需求; p^e 表示电能市场的价格; a^e 、 b^e 为大于 0 的常数。

综合能源供应商 $i(i=1,2,\dots,N)$ 拥有的燃煤机组 $l(l=1,2,\dots,L_i)$ 具有如式(2)所示的二次发电成本。

$$C_{il}^c(Q_{il}^c) = \alpha_{il}^c Q_{il}^c + 0.5\beta_{il}^c (Q_{il}^c)^2 \quad (2)$$

式中: C_{il}^c 为综合能源供应商 i 拥有的燃煤机组 l 的二次发电成本函数; Q_{il}^c 为综合能源供应商 i 拥有的燃煤机组 l 的出力; α_{il}^c 、 β_{il}^c 为综合能源供应商 i 拥

有的燃煤机组 l 的发电成本系数, 均大于 0。

综合能源供应商 $i(i=1,2,\dots,N)$ 拥有的燃气机组 $m(m=1,2,\dots,M_i)$ 的发电成本包括运行成本和购气成本, 可以分别表示为式(3)和式(4)。

$$C_{im}^{cg}(Q_{im}^{cg}) = \alpha_{im}^{cg} Q_{im}^{cg} + 0.5\beta_{im}^{cg} (Q_{im}^{cg})^2 \quad (3)$$

$$C_{im}^{cg,b}(Q_{im}^{cg}) = p^g Q_{im}^{cg} / \eta_{im} \quad (4)$$

式中: C_{im}^{cg} 和 $C_{im}^{cg,b}$ 分别为综合能源供应商 i 拥有的燃气机组 m 的运行成本和购气成本; Q_{im}^{cg} 为综合能源供应商 i 拥有的燃气机组 m 的出力; α_{im}^{cg} 、 β_{im}^{cg} 为运行成本系数, 均大于 0; p^g 为天然气价格; η_{im} 为燃气转换效率; Q_{im}^{cg}/η_{im} 为综合能源供应商 i 拥有的燃气机组 m 发电所需的天然气量。

对于综合能源供应商 $i(i=1,2,\dots,N)$ 拥有的新能源机组 $g(g=1,2,\dots,G_i)$, 由于风光出力具有不确定性的特征, 本文采用场景分析法^[20]对新能源实际出力的不确定性进行建模。首先进行概率建模, 采用 Weibull 分布和 Beta 分布来模拟风速和光照强度的分布^[5,21]。同时采用蒙特卡洛随机取样得到 H_{ig} 个风速值或光强值, 之后采用后向场景削减技术得到 H'_{ig} 个风速或光强场景, 再根据风速和光强与实际风光出力的关系计算得到 H'_{ig} 个实际风光出力 $Q_{ig,k}^{ec/es}(k=1,2,\dots,H'_{ig})$ 。这里假设综合能源供应商在电能市场出清之后, 风光的均衡出力为 $Q_{ig}^{ec/es}$ 。

综合能源供应商 $i(i=1,2,\dots,N)$ 拥有的新能源机组 $g(g=1,2,\dots,G_i)$ 的实际出力与投标出力之间的偏差可以表示为

$$\Delta_{ig,k}^{ec/es} = \begin{cases} \Delta_{ig,k}^{ec/es+}, Q_{ig,k}^{ec/es} \geq Q_{ig}^{ec/es} \\ -\Delta_{ig,k}^{ec/es-}, Q_{ig,k}^{ec/es} \leq Q_{ig}^{ec/es} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta_{ig,k}^{ec/es+}$ 表示少投偏差; $\Delta_{ig,k}^{ec/es-}$ 表示多投偏差; 两者中至少有一个为 0, 且都是非负数。

本文采用投标偏差惩罚机制来处理新能源的投标偏差^[20,22], 则 IESs 拥有的新能源机组受到的偏差惩罚可表示为

$$I_{ig,k} = -p^e r^+ \Delta_{ig,k}^{ec/es+} + p^e r^- \Delta_{ig,k}^{ec/es-} \quad (6)$$

式中: $I_{ig,k}$ 表示 IESs 拥有的新能源机组受到的偏差惩罚; $-p^e r^+ \Delta_{ig,k}^{ec/es+}$ 表示实际出力过剩受到的惩罚; r^+ ($r^+ \leq 1$) 为少投惩罚系数; $p^e r^- \Delta_{ig,k}^{ec/es-}$ 表示实际出力不足受到的惩罚; r^- ($r^- \geq 1$) 为多投惩罚系数。

传统电力供应商 $r(r=1,2,\dots,R)$ 拥有的燃煤机组 $u(u=1,2,\dots,U_r)$ 的二次发电成本函数 C_{ru}^c 同 C_{il}^c 类

似, 如式(7)所示。

$$C_{ru}^c(Q_{ru}^c) = \alpha_{ru}^c Q_{ru}^c + 0.5\beta_{ru}^c (Q_{ru}^c)^2 \quad (7)$$

式中: Q_{ru}^c 为传统电力供应商 r 拥有的燃煤机组 u 的出力; α_{ru}^c 、 β_{ru}^c 为传统电力供应商 r 拥有的燃煤机组 u 的发电成本系数, 均大于 0。

考虑日前电能市场中各市场参与者的决策模型均需满足式(8)所示的供需平衡约束, 即市场出清条件为

$$\sum_{i=1}^N \left[\sum_{l=1}^{L_i} Q_{il}^c + \sum_{m=1}^{M_i} Q_{im}^{eg} + \sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{cc/es} \right] + \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^{U_r} Q_{ru}^c = a^c - b^c p^c \quad (8)$$

2.2 天然气市场

某小时天然气市场的市场需求用式(9)所示的线性需求函数表示。

$$D^g = a^g - b^g p^g \quad (9)$$

式中: D^g 为天然气市场需求; a^g 、 b^g 为大于 0 的常数。

综合能源供应商 $i(i=1,2,\dots,N)$ 拥有的天然气井 $j(j=1,2,\dots,J_i)$ 的生产成本可以表示为

$$C_{ij}^g(Q_{ij}^g) = \alpha_{ij}^g Q_{ij}^g + 0.5\beta_{ij}^g (Q_{ij}^g)^2 \quad (10)$$

式中: C_{ij}^g 为综合能源供应商 i 拥有的天然气井 j 的生产成本; Q_{ij}^g 为综合能源供应商 i 拥有的天然气井 j 的产气出力; α_{ij}^g 、 β_{ij}^g 为其生产成本系数, 均大于 0。

天然气供应商 $h(h=1,2,\dots,H)$ 拥有的天然气井 $v(v=1,2,\dots,V_h)$ 的生产成本函数 C_{hv}^g 与 C_{ij}^g 类似, 如式(11)所示。

$$C_{hv}^g(Q_{hv}^g) = \alpha_{hv}^g Q_{hv}^g + 0.5\beta_{hv}^g (Q_{hv}^g)^2 \quad (11)$$

式中: Q_{hv}^g 为天然气供应商 h 拥有的天然气井 v 的产气出力; α_{hv}^g 、 β_{hv}^g 为其生产成本系数, 均大于 0。

天然气市场的供需平衡约束, 即出清条件为

$$\sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{J_i} Q_{ij}^g - \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{eg} / \eta_{im}^g) \right] + \sum_{h=1}^H \sum_{v=1}^{V_h} Q_{hv}^g = a^g - b^g p^g \quad (12)$$

2.3 碳交易市场

碳交易可以通过市场手段对高排放发电商带来经济惩罚以实现碳减排目标。本文高排放的传统电力供应商和 IESs 的燃煤机组为了满足配额要求, 需要在碳市场中购买碳配额, 相比之下, IESs 的燃气机组为低排放机组, 其可以通过在碳市场出售多余的碳配额获利。本文采用基于发电量的免费初始碳排放配额分配方式^[23-24]。

综合能源供应商 i 拥有的燃煤机组 l 的碳交易成本为

$$f_{CET,il}^c = p^{CO_2} (\sigma_{il}^c Q_{il}^c - \eta_{il}^c Q_{il}^c) \quad (13)$$

式中: $f_{CET,il}^c$ 为综合能源供应商 i 拥有的燃煤机组 l 的碳交易成本; p^{CO_2} 为碳价; σ_{il}^c 为碳排放强度系数; η_{il}^c 为碳配额系数。

综合能源供应商 i 的燃气机组 m 与传统电力供应商 r 的碳交易成本 $f_{CET,im}^{eg}$ 、 $f_{CET,ru}^c$ 同 $f_{CET,il}^c$ 类似。

碳价由碳市场的供求关系决定^[25], 如式(14)所示。

$$\sum_{i=1}^N \left[\sum_{l=1}^{L_i} (\eta_{il}^c - \sigma_{il}^c) Q_{il}^c + \sum_{m=1}^{M_i} (\eta_{im}^{eg} - \sigma_{im}^{eg}) Q_{im}^{eg} \right] + \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^{U_r} (\eta_{ru}^c - \sigma_{ru}^c) Q_{ru}^c = a^{CO_2} - b^{CO_2} p^{CO_2} \quad (14)$$

式中: σ_{im}^{eg} 、 σ_{ru}^c 和 η_{im}^{eg} 、 η_{ru}^c 分别为综合能源供应商 i 的燃气机组 m 与传统电力供应商 r 的碳排放强度系数和碳配额系数; a^{CO_2} 、 b^{CO_2} 为碳市场需求函数系数, 均为大于 0 的常数。

2.4 绿色证书交易市场

本文考虑 IESs 拥有的新能源机组作为绿证供应方, 用户作为绿证需求方共同参与绿证市场。假设新能源机组每生产 1 MWh 的绿色电力即可获得 1 单位的绿色证书。

绿价由绿证市场的供求关系决定^[18]:

$$\sum_{i=1}^N \left(\sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{cc/es} \right) = a^c - b^c p^c \quad (15)$$

$$a^c = \delta D^c / (1 - \theta_0^{TGC}) \quad (16)$$

$$b^c = a^c / \alpha_0^{TGC} \quad (17)$$

式(15)等号左边表示 IESs 拥有的新能源机组出售的绿证数量, 右边表示绿证市场的市场需求, a^c 、 b^c 为正值参数, p^c 为绿价; 式(16)中 δ 为绿证配额系数; θ_0^{TGC} 为基于历史数据得出的绿证交易价格比率; 式(17)中 α_0^{TGC} 为绿证基础交易价格。

为了方便研究, 本文假设已经将年度或月度的初始碳配额和绿证配额分解到每个小时时段^[16,19], 电能市场、天然气市场、碳市场和绿证市场均按照 1 h 时段进行交易和出清。

3 联合均衡模型的建立和求解

3.1 模型建立

根据模型假设, 可以建立多个综合能源供应商和多个单一能源供应商共同参与电-气-碳-绿证多市场投标竞争的均衡模型, 本文以各供应商的收益最大为目标, 通过市场竞争确定各机组的均衡出力, 从而得到各市场的出清价格, 相关目标函数与约束条件如下所述。

1) 综合能源供应商 $i(i=1,2,\dots,N)$ 的决策模型

$$\begin{aligned} \max_{Q_{il}^e, Q_{im}^{\text{eg}}, Q_{ij}^g, Q_{ig}^{\text{ec/es}}} \pi_i = & \sum_{l=1}^{L_i} \left[p^e Q_{il}^e - C_{il}^e(Q_{il}^e) - \right. \\ & \left. p^{\text{co}_2} (\sigma_{il}^e Q_{il}^e - \eta_{il}^e Q_{il}^e) \right] + \\ & \sum_{m=1}^{M_i} \left[p^e Q_{im}^{\text{eg}} - C_{im}^{\text{eg}}(Q_{im}^{\text{eg}}) - p^g Q_{im}^{\text{eg}} / \eta_{im} \right] + \\ & \sum_{g=1}^{G_i} \left[p^e Q_{ig}^{\text{ec/es}} + r^+ p^e \sum_{k=1}^{H'_{ig}} (s_{ig,k}^{\text{ec/es}} \Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}+}) - \right. \\ & \left. r^- p^e \sum_{k=1}^{H'_{ig}} (s_{ig,k}^{\text{ec/es}} \Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}-}) + p^c Q_{ig}^{\text{ec/es}} \right] + \\ & \sum_{j=1}^{J_i} \left[p^g Q_{ij}^g - C_{ij}^g(Q_{ij}^g) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{l=1}^{L_i} Q_{il}^e + \sum_{m=1}^{M_i} Q_{im}^{\text{eg}} + \sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{\text{ec/es}} \right) + \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^{U_r} Q_{ru}^e = a^e - b^e p^e \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{J_i} Q_{ij}^g - \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{\text{eg}} / \eta_{im}) \right] + \sum_{h=1}^H \sum_{v=1}^{V_h} Q_{hv}^g = a^g - b^g p^g \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^N \left[\sum_{l=1}^{L_i} (\eta_{il}^e - \sigma_{il}^e) Q_{il}^e + \sum_{m=1}^{M_i} (\eta_{im}^{\text{eg}} - \sigma_{im}^{\text{eg}}) Q_{im}^{\text{eg}} \right] + \quad (21)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^{U_r} (\eta_{ru}^e - \sigma_{ru}^e) Q_{ru}^e = a^{\text{co}_2} - b^{\text{co}_2} p^{\text{co}_2}$$

$$\sum_{i=1}^N \left(\sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{\text{ec/es}} \right) = a^c - b^c p^c \quad (22)$$

$$Q_{il}^{\text{e min}} \leq Q_{il}^e \leq Q_{il}^{\text{e max}} \quad (23)$$

$$Q_{im}^{\text{eg min}} \leq Q_{im}^{\text{eg}} \leq Q_{im}^{\text{eg max}} \quad (24)$$

$$Q_{ij}^{\text{g min}} \leq Q_{ij}^g \leq Q_{ij}^{\text{g max}} \quad (25)$$

$$Q_{ig}^{\text{ec/es min}} \leq Q_{ig}^{\text{ec/es}} \leq Q_{ig}^{\text{ec/es max}} \quad (26)$$

$$Q_{ig,k}^{\text{ec/es}} - Q_{ig}^{\text{ec/es}} = \Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}+} - \Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}-} \quad (27)$$

$$\Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}+} \geq 0 \quad (28)$$

$$\Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}-} \geq 0 \quad (29)$$

式(18)为综合能源供应商 i 的最大利润, 包括其拥有的 L_i 个燃煤机组、 M_i 个燃气机组、 G_i 个新能源机组和 J_i 个天然气井的利润; 燃煤机组的利润包括售电收入、发电成本和碳交易成本; 燃气机组的利润包括售电收入、运行成本、购气成本和碳交易成本; 新能源机组的利润包括售电收入、投标偏差惩罚成本和绿证交易收益; H'_{ig} 为新能源出力场景总数, $s_{ig,k}^{\text{ec/es}}$ 为新能源出力场景 k 发生的概率; 天然气井的利润包括售电收入和生产成本。式(19)一式(22)分别为电能、天然气、碳和绿证市场的出清条件。式

(23)一式(26)为各类型机组的出力上下限约束。式(27)表示了新能源实际出力 $Q_{ig,k}^{\text{ec/es}}$ 、投标出力 $Q_{ig}^{\text{ec/es}}$ 、少投偏差 $\Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}+}$ 和多投偏差 $\Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}-}$ 之间的等式关系。

式(28)和式(29)保证了 $\Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}+}$ 和 $\Delta_{ig,k}^{\text{ec/es}-}$ 的非负性。

2) 传统电力供应商 $r(r=1,2,\dots,R)$ 的决策模型

$$\max_{Q_{ru}^e} \pi_r = \sum_{u=1}^{U_r} \left[p^e Q_{ru}^e - C_{ru}^e(Q_{ru}^e) - p^{\text{co}_2} (\sigma_{ru}^e Q_{ru}^e - \eta_{ru}^e Q_{ru}^e) \right] \quad (30)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{l=1}^{L_i} Q_{il}^e + \sum_{m=1}^{M_i} Q_{im}^{\text{eg}} + \sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{\text{ec/es}} \right) + \sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^{U_r} Q_{ru}^e = a^e - b^e p^e \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^N \left[\sum_{l=1}^{L_i} (\eta_{il}^e - \sigma_{il}^e) Q_{il}^e + \sum_{m=1}^{M_i} (\eta_{im}^{\text{eg}} - \sigma_{im}^{\text{eg}}) Q_{im}^{\text{eg}} \right] + \quad (32)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{u=1}^{U_r} (\eta_{ru}^e - \sigma_{ru}^e) Q_{ru}^e = a^{\text{co}_2} - b^{\text{co}_2} p^{\text{co}_2}$$

$$Q_{ru}^{\text{e min}} \leq Q_{ru}^e \leq Q_{ru}^{\text{e max}} \quad (33)$$

式(30)为传统电力供应商 r 的最大利润, 包括售电收入、发电成本和碳交易成本。式(31)一式(32)分别为电能与碳市场的出清条件。式(33)为传统电力供应商 r 拥有的燃煤机组 u 的出力上下限约束。

3) 天然气供应商 $h(h=1,2,\dots,H)$ 的决策模型

$$\max_{Q_{hv}^g} \pi_h = \sum_{v=1}^{V_h} \left[p^g Q_{hv}^g - C_{hv}^g(Q_{hv}^g) \right] \quad (34)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{k=1}^{K_i} Q_{ik}^g - \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{\text{eg}} / \eta_{im}) \right] + \sum_{h=1}^H \sum_{v=1}^{V_h} Q_{hv}^g = a^g - b^g p^g \quad (35)$$

$$Q_{hv}^{\text{g min}} \leq Q_{hv}^g \leq Q_{hv}^{\text{g max}} \quad (36)$$

式(34)为天然气供应商 h 的最大利润, 等于售气收入和天然气生产成本之差。式(35)为天然气市场的出清条件。式(36)为天然气供应商 h 拥有的天然气井 v 的出力上下限约束。

3.2 模型求解

联合求解上述电-气-碳-绿证市场中所有市场参与者的投标策略决策问题, 即可得到博弈问题的均衡解, 本文采用非线性互补方法进行求解^[3,5]。各供应商决策模型的KKT条件详见附录A式(A1)一式(A17)。联立所有供应商决策问题的KKT条件, 在MATLAB软件中运用Levenberg-Marquardt算法^[26]求解, 即可得到该博弈问题的均衡解。

4 算例分析

考虑有3个综合能源供应商(IES1—IES3)、2个传统电力供应商(CGS1、CGS2)和2个天然气供应商

(NGS1、NGS2)共同参与电-气-碳-绿证多市场投标竞争。表 1 给出了各能源供应商的相关系数^[27-28]和各市场需求函数系数, 其中各机组出力下限均为 0 MW。每个 IES 拥有一个燃煤机组(CU)、一个燃气机组(GT)、一个天然气井(GW)和一个新能源机组。假设 IES1 和 IES2 的新能源是风电(WT), 风电机组的风速期望均值分别为 13 m/s、12 m/s, 标准差分别为 1 m/s、2 m/s; IES3 的新能源是光电(PV), 光电的光照强度期望均值和标准差分别为 0.45 kW/m²、0.30 kW/m²。新能源的投标偏差惩罚系数分别为 $r^+ = 0.5$, $r^- = 1.2$ 。所有 IESs 燃气机组的燃气转换率均为 80%。为方便分析比较, 所有的能源出力单位均通过热值转换方式统一为功率单位。

表 1 能源供应商的相关参数

Table 1 Related parameters of energy suppliers

	$\alpha/$	$\beta/$	$\sigma/$	$\eta/$	出力上	
	(美元/MWh)	(美元/MW ² h)	(t/MWh)	(t/MWh)	限/MW	
IES1	CU	10	0.5	1.00	0.87	100
	GT	6	0.3	0.36	0.4	40
	WT	—	—	—	—	100
	GW	8	0.06	—	—	150
IES2	CU	11	0.45	0.98	0.87	100
	GT	7	0.25	0.35	0.4	40
	WT	—	—	—	—	100
	GW	9	0.05	—	—	150
IES3	CU	12	0.4	0.98	0.87	100
	GT	8	0.2	0.35	0.4	40
	PV	—	—	—	—	100
	GW	10	0.04	—	—	150
CGS1	12	0.5	1.02	0.85	100	
CGS2	12	0.4	1.00	0.85	100	
NGS1	10	0.055	—	—	150	
NGS2	10	0.045	—	—	150	
$a^c = 700$ $b^c = 5.5$ $a^g = 200^{[3]}$ $b^g = 3.6$ $a^{co_2} = 50^{[5]}$ $b^{co_2} = 5.5$ $\alpha_0^{TGC} = 40^{[18]}$ $\theta_0^{TGC} = 0.3$ $\delta = 18.5\%$						

4.1 碳市场和绿证市场的影响

为了探究参与碳市场和绿证市场竞争对综合能源供应商带来的影响, 本节设置了 4 种不同的情况以进行比较: (1) BASE: IESs 参与电-气市场竞争; (2) CET: IESs 参与电-气-碳市场竞争; (3) GCT: IESs 参与电-气-绿证市场竞争; (4) CET + GCT: IESs 参与电-气-碳-绿证市场竞争。

对各 IESs 来说, 碳市场和绿证市场的引入对其均衡投标出力的影响是相似的, 故本节选取 IES1 的均衡结果来进行分析。图 2—图 6 和表 2 显示了 4

种不同情况下的均衡结果。

1) IESs 参与电-气-碳市场竞争

从图 2—图 6 和表 2 中可知, 与 BASE 情况相比, 考虑 IESs 参与电-气-碳市场竞争(CET)时, IES1 拥有的高排放燃煤机组的投标出力和利润都降低, 低排放的燃气机组、新能源和天然气井的投标出力和利润都增大, 其中燃气出力增大并达到上限 40 MW。IES1 的电能利润、天然气利润和总利润均上升。

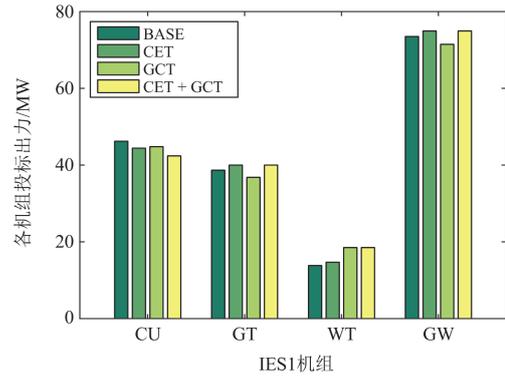


图 2 不同情况下 IES1 各机组投标出力

Fig. 2 Each unit's outputs of IES1 in different cases

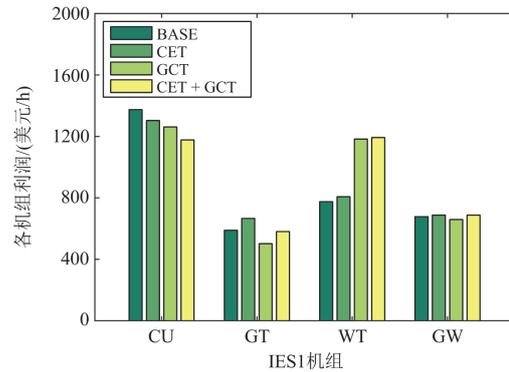


图 3 不同情况下 IES1 各机组利润

Fig. 3 Each unit's profits of IES1 in different cases

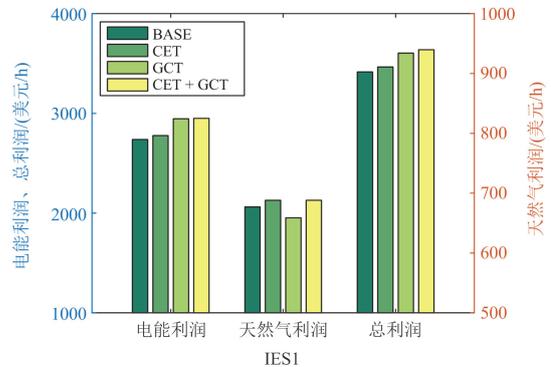


图 4 不同情况下 IES1 的利润

Fig. 4 IES1's profits in different cases

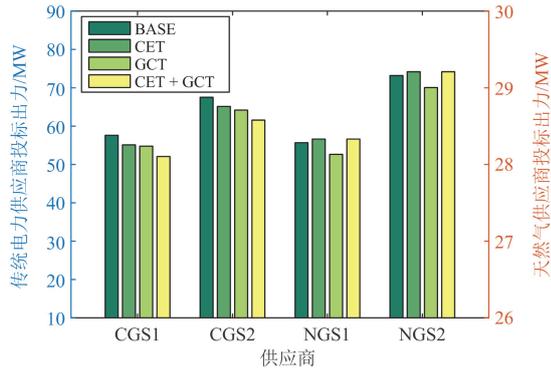


图 5 不同情况下各单一能源供应商投标出力

Fig. 5 Outputs of each single energy supplier in different cases

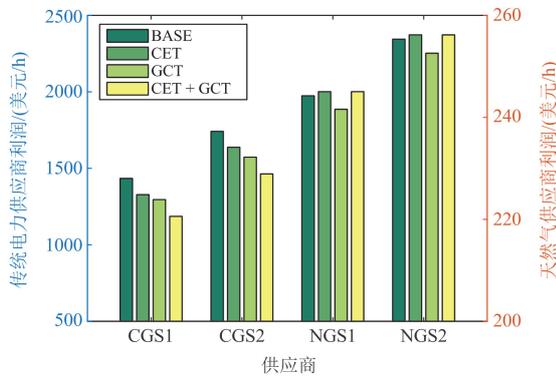


图 6 不同情况下各单一能源供应商利润

Fig. 6 Profits of each single energy supplier in different cases

表 2 不同情况下的市场均衡结果

Table 2 Market equilibrium results in different cases

情况	BASE	CET	GCT	CET+GCT
电价/(美元/MWh)	51.30	52.36	49.35	50.22
气价/(美元/MWh)	19.41	19.43	19.36	19.43
碳价/(美元/t)	—	14.59	—	14.24
绿价/(美元/MWh)	—	—	20.87	20.65
碳排放总量/t	313.66	305.31	300.01	291.19

CGSs 的投标出力 and 利润均下降, NGSs 的投标出力 and 利润都增加。同时从表 2 中可看出, 电价和气价分别上升了 2.1%、0.1%; 碳排放总量减少到 305.31 t, 下降了 2.7%。原因是引入碳市场后, IES1 拥有的燃煤机组和传统电力供应商属于高排放机组, 都需额外承担碳交易成本, 而 IES1 拥有的燃气机组可通过出售额外的碳配额获得碳交易收益, 所以 IES1 趋向于减少燃煤机组的出力, 增加燃气和新能源的出力, 传统电力供应商也趋向于减少投标出力, 使得碳排放量降低。同时, 所有燃煤机组电能的减少量大于其他电能机组的增加量, 电能市场总供应量降低, 所以电价上升。由于 IES1 的燃气机组出力增

加, 对天然气的需求量也随之增加, IES1 拥有的天然气井和天然气供应商会增大投标出力, 天然气市场需求量和供应量都增加, 但前者增加量大于后者, 故气价上升。对于 IES1 和 CGSs 拥有的燃煤机组来说, 电价上升带来的收益小于其投标出力减小带来的损失, 因此其利润有不同程度的下降; 对于 IES1 的燃气、新能源机组来说, 其投标出力和电价都同时上升使得其利润增加; 对于 IES1 和 NGSs 拥有的天然气井来说, 其投标出力和气价都同时上升也使得其利润增加。相较于 BASE 情况, IES1 的电能利润和天然气利润均增加使得其总利润上升。

2) IESs 参与电-气-绿证市场竞争

从图 2—图 6 和表 2 中可知, 与 BASE 情况相比, 考虑 IESs 参与电-气-绿证市场竞争(GCT)时, IES1 拥有的新能源的投标出力和利润都增大, IES1 拥有的燃煤机组、燃气机组和天然气井的投标出力和利润都降低。IES1 的电能利润、总利润上升, 天然气利润下降。CGSs 和 NGSs 的投标出力和利润均下降。同时从表 2 中可看出, 电价和气价分别下降了 3.8%、0.3%; 碳排放总量减少到 300.01 t, 下降了 4.4%。原因是引入绿证市场后, IES1 拥有的新能源机组可以通过出售绿证获得额外的绿证收益, 所以 IES1 趋向于增加新能源的投标出力, 减少燃煤、燃气机组的出力, CGSs 也趋向于减少投标出力, 使得碳排放量降低。同时, 新能源出力增加量大于其他机组出力的减少量, 电能市场总供应量增加, 所以电价下降。由于 IES1 的燃气机组出力降低, 对天然气的需求量也随之下降, IES1 和 NGSs 拥有的天然气井会减少投标出力, 天然气市场需求量和供应量都降低, 但前者减少量大于后者, 所以气价下降。对于 IES1 拥有的燃煤、燃气机组和传统电力供应商来说, 电价和出力都同时下降使得其利润有不同程度的降低; 对于 IES1 的新能源机组来说, 电价下降带来的损失小于其投标出力增加带来的收益, 因此其利润增加; 对于 IES1 的天然气井和天然气供应商来说, 其投标出力和气价都同时下降使得其利润均降低。相较于 BASE 情况, IES1 的电能利润增加, 天然气利润下降, 且前者增加量大于后者减少量, 所以 IES1 的总利润上升。

3) IESs 参与电-气-碳-绿证市场竞争

从图 2—图 6 和表 2 中可知, 相较于另外 3 种情况, 考虑 IESs 参与电-气-碳-绿证市场竞争(CET+GCT)时, IES1 的总利润最大, 且碳排放量最低, 与 BASE 情况相比, IES1 总利润上涨了 6.5%, 碳排放减少了 7.2%。同时, IES1 拥有的高排放燃煤机组利润降低的幅度及新能源利润增大的幅度均大

于另外 3 种情况。与 CET 或 GCT 情况相比, CET + GCT 情况下碳价和绿价都降低了; 电价相较于 BASE 和 CET 情况均下降了, 但高于 GCT 情况。这是因为, 相较于 GCT 情况, CET + GCT 情况相当于额外引入了 CET 市场, 由于 IES1 和 CGSs 拥有的燃煤机组都需要额外支付碳交易成本, 使两种供应商的发电成本均上升, 因而 IES1 和 CGSs 会策略性减少燃煤机组的出力, 以降低碳交易成本, 减少出力的策略行为会同时降低电能市场供给和绿证需求量, 从而抬高市场电价的同时降低绿价; 相较于 CET 情况, CET + GCT 情况相当于额外引入了 GCT 市场, IES1 拥有的新能源出力增加, IES1 和 CGSs 拥有的燃煤机组出力减小, 燃煤机组出力的减小使得碳配额需求下降, 碳价降低。同时, 电能市场的总供给量增大, 电价降低。

综上, 碳市场的引入会给 IESs 的燃煤机组带来额外的碳成本, 使 IESs 倾向于降低高排放燃煤的出力, 从而降低碳排放。绿证市场的引入会给 IESs 的新能源机组带来额外的绿证收益, 以激励 IESs 增加新能源的出力。同时引入碳市场和绿证市场情况下, IESs 燃煤机组利润的降幅和新能源利润的增幅最大, 更有利于激励 IESs 实现能源低碳化转型。从对市场价格的影响来看, 引入碳市场会抬高电价和气价; 引入绿证市场会降低电价和气价。与 CET 或 GCT 情况相比, 同时引入碳市场和绿证市场的

CET + GCT 情况下碳价和绿价都相对较低。

4.2 配额系数的灵敏度分析

碳配额系数和绿证配额系数的变化会直接影响碳市场和绿证市场, 进而影响电能和天然气市场。本节为了探究配额系数对市场均衡结果的影响, 取综合能源供应商拥有的燃煤机组的碳配额系数为 0.25~0.95 t/MWh, 步长为 0.05 t/MWh; 取绿证配额系数为 10%~40%, 步长为 5%。图 7—图 10 为不同配额系数下的市场均衡结果。

图 7 和图 8 给出了配额系数分别对 IESs 不同类型机组总投标出力和单一能源供应商的影响。由图可知, 随着碳配额系数变小, IESs 拥有的燃煤机组总投标出力降低, 拥有的燃气、天然气井、新能源各机组的总投标出力都增大, CGSs 和 NGs 的总投标出力也都增大; 随着绿证配额系数增大, IESs 拥有的燃煤、燃气和天然气井各机组的总投标出力降低, 拥有的新能源机组总投标出力增大, CGSs 和 NGs 的总投标出力都降低。原因是随着碳配额系数降低, IESs 拥有的燃煤机组所得的免费碳排放配额减少, 即其需要额外购买更多的碳配额, 导致燃煤机组的发电成本增加, 而 IESs 拥有的低排放燃气机组能够出售多余的碳配额获益, 所以 IESs 倾向于减少燃煤的出力, 增加燃气的投标出力, 同时新能源机组出力小幅增加。且由于燃气机组出力增加, 使得天然气市场的需求增加, 所以 IESs 拥有的天然

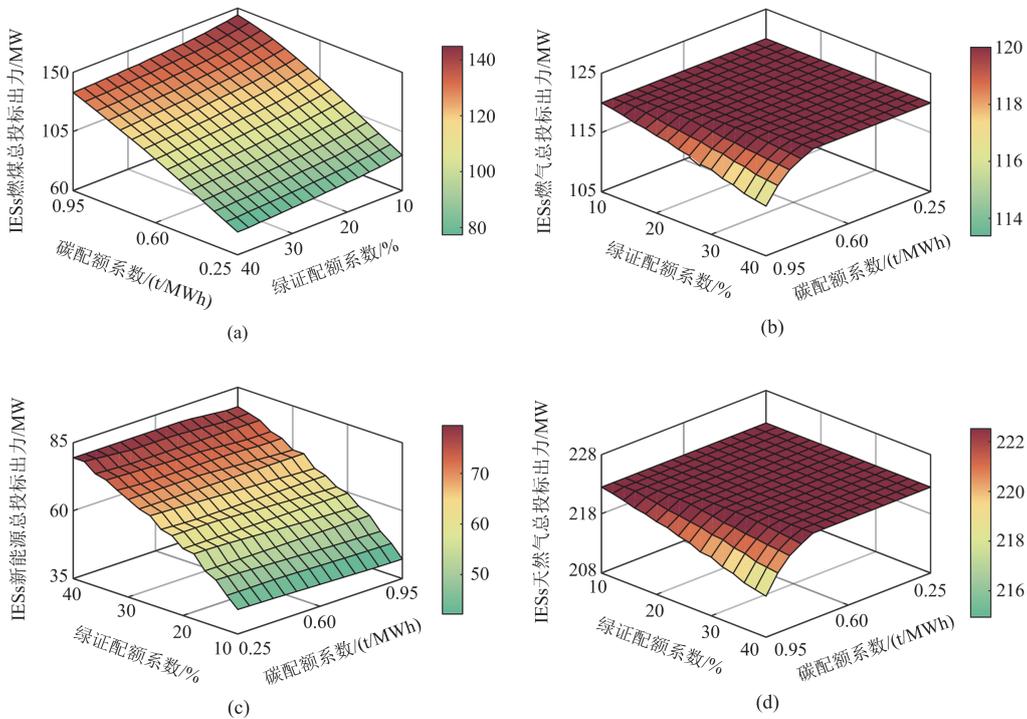


图 7 配额系数对 IESs 各类机组总投标出力的影响

Fig. 7 Impacts of quota coefficients on each type unit's total outputs of all IESs

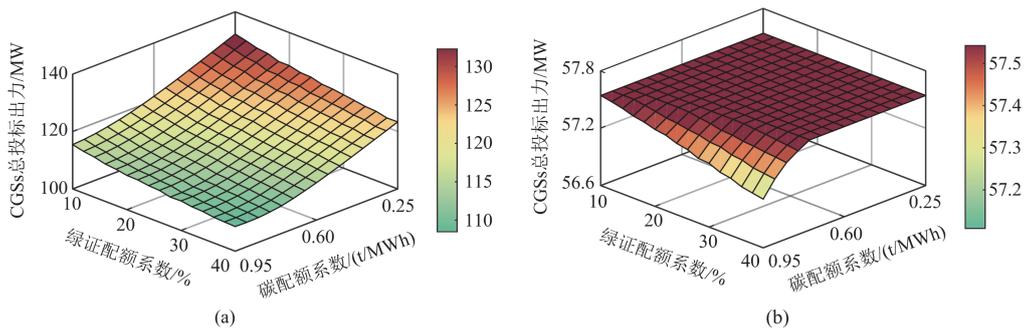


图 8 配额系数对单一能源供应商总投标出力的影响

Fig. 8 Impacts of quota coefficients on total outputs of all single energy suppliers

气井和 NGSs 的投标出力都上升，直到燃气出力达到上限后稳定不变。同时，IESs 在电能市场的总供应量随着碳配额系数的减小而下降，为了最大化个人利润，CGSs 会选择增加投标出力。随着绿证配额系数增大，用户所需购买的绿证数量增加，IESs 拥有的新能源机组能够通过出售绿证获得绿证收益，相比于其他机组，新能源机组竞争力增强，所以 IESs 倾向于增加新能源机组的投标出力，减小燃煤、燃气机组的投标出力，且由于燃气机组出力减小，使得天然气市场的需求下降，所以 IESs 和 NGSs 拥有的天然气井的投标出力都降低。由于 IESs 拥有的新能源机组竞争力的增强，使得 IESs 在电能市场的总供应量增加，相比之下，CGSs 竞争力下降，

其会策略性地降低投标出力。

图 9 给出了配额系数对各类市场价格的影响。图 9(a)是配额系数对电价的影响。由图可知：随着碳配额系数的减小，电价上升；随着绿证配额系数的增大，电价下降。原因是随着碳配额系数的降低，IESs 拥有的燃煤机组投标出力降低，IESs 拥有的燃气、新能源机组和 CGSs 的总投标出力增大，但前者减少量大于后者增加量，电能市场总供应量降低，使得电价升高；随着绿证配额系数的增大，需求侧所需购买的绿证数量增加，IESs 拥有的新能源机组的投标出力增加，而 IESs 拥有的燃煤、燃气机组和 CGSs 的总投标出力减小，且前者增加量大于后者减少量，电能市场总供应量增加，电价下降。

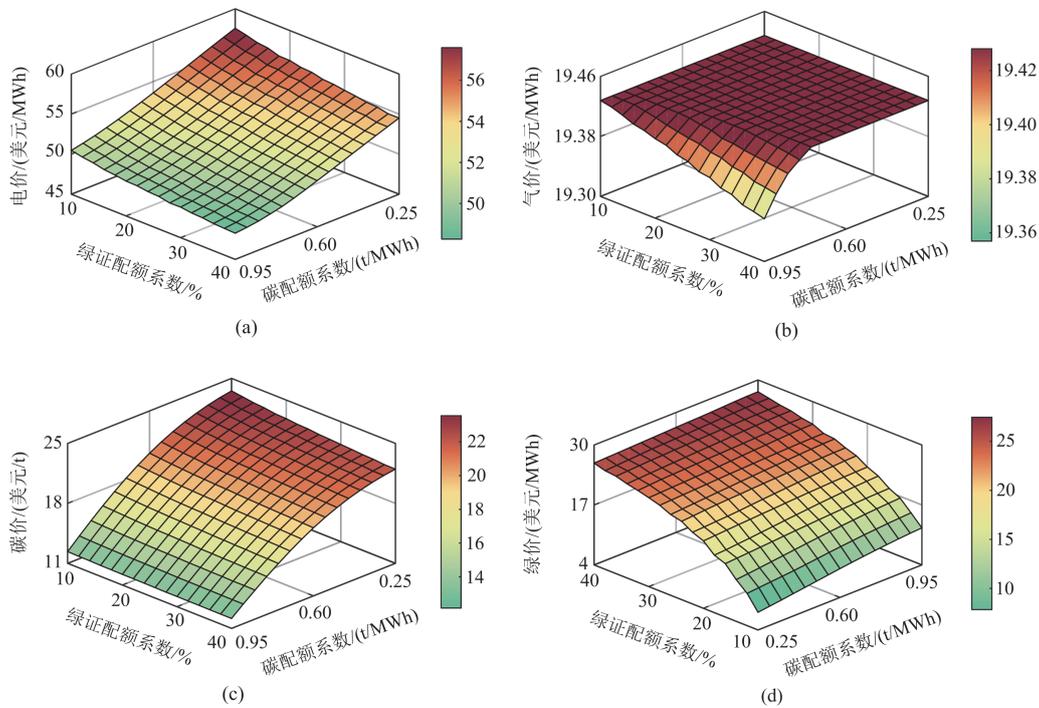


图 9 配额系数对各类市场价格的影响

Fig. 9 Impacts of quota coefficients on the four market prices

图 9(b)是配额系数对气价的影响。由图可知：随着碳配额系数的减小，气价上升；随着绿证配额系数的增大，气价下降。原因是随着碳配额系数的减小，IESs 会减少燃煤的出力，增加燃气和新能源总投标出力，由于燃气出力增加，天然气市场的需求量上升，所以天然气机组和 NGSs 会趋向于增加出力，天然气的的需求量和供应量都增加，但前者增加量大于后者，所以气价上升；随着绿证配额系数的增大，IESs 趋向于增大新能源的投标出力，降低燃煤、燃气的投标出力，由于燃气出力下降，天然气市场的需求量降低，所以 IESs 的天然气井和 NGSs 趋向于减少出力，天然气的的需求量和供应量都下降，且前者减少量大于后者，所以气价降低。

图 9(c)是配额系数对碳价的影响。由图可知：随着碳配额系数的减小，碳价上升；随着绿证配额系数的增大，碳价下降。原因是随着碳配额系数的减小，IESs 拥有的燃煤需要购买更多的碳配额，碳配额需求量增加，碳价上升。随着绿证配额系数的增大，IESs 的燃煤、燃气和 CGSs 的出力均下降，碳配额的需求量和供应量都下降，但需求量下降幅度大于供应量，所以碳价降低。

图 9(d)是配额系数对绿价的影响。由图可知：随着碳配额系数的减小，绿价下降；随着绿证配额系数的增大，绿价上升。原因是随着碳配额系数的

减小，IESs 的新能源机组出力增加，电能市场的总需求量降低，绿证的供应量增加而需求量减少，绿价下降；随着绿证配额系数的增加，绿证用户绿证需求量上升，同时 IESs 拥有的新能源投标出力增大，绿证需求量和供应量都增加，但前者增加量大于后者，所以绿价上升。

图 10(a)是配额系数对碳排放量的影响。由图可知：随着碳配额系数下降或绿证配额系数增大，碳排放总量减少。因为随着碳配额的降低，所有能源供应商的燃煤机组的总投标出力减少，虽然燃气机组的出力增加，但前者减少量高于后者增加量，所以碳排放量降低；随着绿证配额系数的增加，IESs 的燃煤、燃气机组和 CGSs 的投标出力都下降，所以碳排放量降低。图 10(b)是配额系数对 IESs 总利润的影响。由图可知：随着碳配额和绿证配额系数的减小，IESs 的总利润下降。原因是随着碳配额系数的减小，IESs 的燃煤机组需要支付更高的碳成本，其会策略性降低投标出力来抬高电价，但电价上升带来的收益小于其投标出力减小带来的损失，因此 IESs 总利润下降；随着绿证配额系数的增加，绿证用户的绿证需求量上升，IESs 会增大新能源机组的投标出力以提高绿证的供应量，同时电价下降，但电价下降带来的损失小于 IESs 投标出力增加带来的收益，因此 IESs 总利润增加。

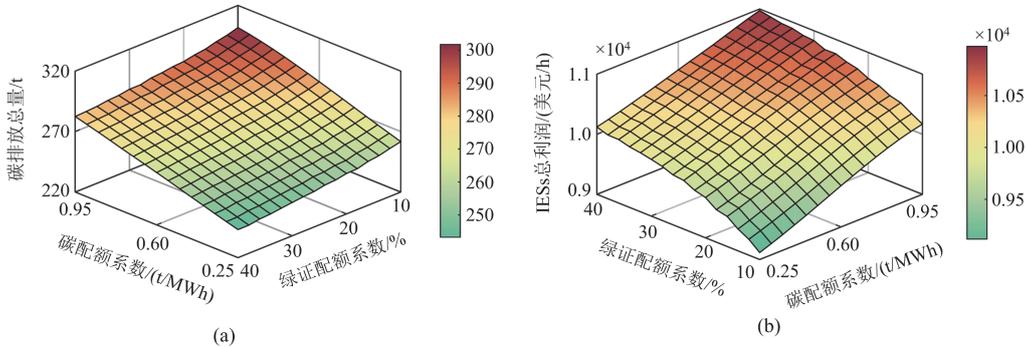


图 10 配额系数对碳排放量和 IESs 总利润的影响

Fig. 10 Impacts of quota coefficients on carbon emissions and IESs' total profit

配额系数变化对均衡结果的影响可以为市场监管者提供参考，通过对配额系数的灵敏度分析，可以得出：随着碳配额系数收紧，IESs 的策略明显偏向于采用低排放的燃气和新能源机组，IESs 拥有的燃煤机组的总投标出力降低，碳排放总量和 IESs 总利润均下降，电价、气价和碳价上升，绿价下降；随着绿证配额系数的增加，IESs 偏向于增加新能源机组的投标出力，IESs 拥有的燃煤、燃气机组和天然气井的投标出力均降低，碳排放总量下降，IESs 总利润上升，电价、气价和碳价降低，绿价上升。

4.3 新能源渗透率对均衡结果的影响

令 IESs 拥有的新能源 WT、PV 的风速标准差、光照强度标准差保持不变，风速均值和光照强度均值分别变为原来的 0.5 倍、1.0 倍和 2.0 倍。其中，风速、光照强度均值越大说明新能源的渗透率越大。表 3 和附录 B 表 B1 给出了当少投惩罚力度小于多投惩罚力度时 ($r^+ = 0.4$ 、 $r^- = 1.3$)，新能源风速和光照强度均值变化对市场均衡结果的影响。

由表 3 和附录 B 表 B1 分析可知，随着新能源渗透率的增大，除了 IESs 拥有的新能源机组投标出

力和利润均上升, IESs 拥有的其他机组和单一能源供应商 CGSs、NGSs 的投标出力及利润都下降, IESs 的总利润均增加, 同时各个市场的价格和碳排放总量均降低。

表 3 新能源渗透率对市场价格和碳排放量的影响

Table 3 Impacts of renewable energy penetration rate on market prices and carbon emissions

均值倍数	$r^+ = 0.4, r^- = 1.3$		
	0.5	1.0	2.0
电价/(美元/MWh)	51.08	49.57	48.02
气价/(美元/MWh)	19.43	19.42	19.31
碳价/(美元/t)	14.48	14.13	13.84
绿价/(美元/MWh)	31.33	26.16	18.89
碳排放总量/t	301.60	286.12	266.53

这是因为随着风速和光照强度均值的增加, 新能源机组的发电能力得到提升, IESs 倾向于增加新能源机组的投标出力, 降低燃煤、燃气机组和天然气井的出力, 同时 CGSs 和 NGSs 也会减少出力, 且新能源出力的增加量大于其他机组出力的减少量, 电能市场的总供应量增加, 电价和碳排放总量均降低。天然气市场和碳市场的需求量和供应量都下降, 但前者减少量大于后者, 所以气价和碳价均降低。绿证供应量随 IESs 新能源出力的增大而增加, 绿价也降低。对于 IESs 的新能源机组来说, 投标出力增加带来的利润增加效应大于电价下降带来的利润减小效应; 对于 IESs 的其他机组和单一能源供应商 CGSs、NGSs 来说, 投标出力和电价都同时下降使其利润有不同程度的降低, 且 IESs 的新能源机组利润增加幅度大于其他机组的利润减小幅度, 所以 IESs 总利润随着新能源渗透率的增加而增加。在少投惩罚力度大于多投惩罚力度情况下亦得到同样结论。

5 结论

本文针对拥有新能源的综合能源供应商同时参与电-气-碳-绿证多市场的联合博弈问题, 建立了考虑多市场策略互动的古诺博弈均衡模型, 研究综合能源供应商的策略性投标行为及其对市场均衡结果的影响。通过算例仿真验证了该模型的合理性和有效性, 并得出如下结论。

1) 与不引入碳市场和绿证市场情况相比, 电-气-碳、电-气-绿证和电-气-碳-绿证交易耦合情况下 IESs 拥有的燃煤机组的投标出力下降、新能源机组的投标出力增加, 碳排放量均降低, 其中, 同时引入碳市场和绿证市场的电-气-碳-绿证交易耦合

情况下 IESs 总利润最大, 利润增加了 6.5%, 且减排效果最好, 碳排量下降了 7.2%。

2) 从对各个市场价格的影响来看, 碳市场的引入会抬高电价和气价; 绿证市场的引入则会降低电价和气价。与电-气-碳、电-气-绿证交易耦合情况相比, 同时引入碳市场和绿证市场的电-气-碳-绿证交易耦合情况下碳价和绿价都相对较低。

3) 随着碳配额系数从 0.95 下降到 0.25(即 IESs 拥有的燃煤机组所得的免费碳配额减少), IESs 的策略明显偏向于采用低排放的燃气和新能源, 碳排放降低了 13.5%; 随着绿证配额系数从 10% 增加到 40%(即绿证用户所需购入的绿证数量增加), IESs 偏向于增加新能源的出力, 碳排放降低了 7.1%。但过低的碳配额会抬高电价、气价和降低 IESs 的总利润, 因此, 应该合理兼顾新能源消纳和碳减排以及电价、气价来合理设置相关配额系数。

4) IESs 的新能源渗透率升高, 不仅有助于降低碳排放量, 而且电价、气价、碳价和绿价会随之降低, IESs 的利润也会随之增多。

在本文研究基础上进一步考虑综合能源供应商以报量报价的供应函数竞争方式参与市场投标竞争, 并考虑多个时段的多市场耦合问题将是后续的研究方向。

附录 A

综合能源供应商 $i(i=1,2,\dots,N)$ 决策模型的 KKT 条件为

$$\begin{aligned}
 (Q_{il}^c): & p^c - \alpha_{il}^c - \beta_{il}^c Q_{il}^c - \sum_{g=1}^{G_i} (Q_{ig}^{ec/es} / b^c) - \\
 & \sum_{g=1}^{G_i} \left[r^+ \sum_{k=1}^{H_{ig}'} (s_{ig,k}^{ec/es} \Delta_{ig,k}^{ec/es+}) / b^c \right] + \\
 & \sum_{g=1}^{G_i} \left[r^- \sum_{k=1}^{H_{ig}'} (s_{ig,k}^{ec/es} \Delta_{ig,k}^{ec/es-}) / b^c \right] - \\
 & \sum_{l=1}^{L_i} (Q_{il}^c / b^c) - \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{eg} / b^c) + \\
 & \sum_{l=1}^{L_i} [(\eta_{il}^c Q_{il}^c - \sigma_{il}^c Q_{il}^c)(\sigma_{il}^c - \eta_{il}^c) / b^{c^2}] + \\
 & \sum_{m=1}^{M_i} [(\eta_{im}^{eg} Q_{im}^{eg} - \sigma_{im}^{eg} Q_{im}^{eg})(\sigma_{im}^c - \eta_{im}^c) / b^{c^2}] + \\
 & \sum_{g=1}^{G_i} \left\{ \alpha_0^{TGC} Q_{ig}^{ec/es} (1 - \theta_0^{TGC}) \sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{ec/es} / [\delta(D^e)^2] \right\} - \\
 & p^{c^2} (\sigma_{il}^c - \eta_{il}^c) + \lambda_{il}^c - \lambda_{2il}^c = 0
 \end{aligned} \tag{A1}$$

$$(Q_{im}^{eg}): p^e - \sum_{l=1}^{L_i} (Q_{il}^e/b^e) - \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{eg}/b^e) - \alpha_{im}^{eg} - \beta_{im}^{eg} Q_{im}^{eg} - p^g/\eta_{im} - (1/\eta_{im}) \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{eg}/b^g \eta_{im}) + \sum_{l=1}^{L_i} (\eta_{il}^e Q_{il}^e - \sigma_{il}^e Q_{il}^e) (\sigma_{im}^{eg} - \eta_{im}^{eg}) / b^{co_2} + \sum_{m=1}^{M_i} (\eta_{im}^{eg} Q_{im}^{eg} - \sigma_{im}^{eg} Q_{im}^{eg}) (\sigma_{im}^{eg} - \eta_{im}^{eg}) / b^{co_2} - p^{co_2} (\sigma_{im}^{eg} - \eta_{im}^{eg}) + (1/\eta_{im} b^g) \sum_{j=1}^{J_i} Q_{ij}^g - \sum_{g=1}^{G_i} (Q_{ig}^{ec/es} / b^e) - \sum_{g=1}^{G_i} \left[r^+ \sum_{k=1}^{H'_{ig}} (s_{ig,k}^{ec/es} \Delta_{ig,k}^{ec/es+}) / b^e \right] + \sum_{g=1}^{G_i} \left[r^- \sum_{k=1}^{H'_{ig}} (s_{ig,k}^{ec/es} \Delta_{ig,k}^{ec/es-}) / b^e \right] + \lambda_{1im}^{eg} - \lambda_{2im}^{eg} + \sum_{g=1}^{G_i} \left\{ \alpha_0^{TGC} Q_{ig}^{ec/es} (1 - \theta_0^{TGC}) \sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{ec/es} / [\delta(D^e)^2] \right\} = 0 \quad (A2)$$

$$(Q_{ig}^{ec/es}): p^e + p^c - \sum_{l=1}^{L_i} (Q_{il}^e/b^e) - \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{eg}/b^e) - \sum_{g=1}^{G_i} (Q_{ig}^{ec} / b^e) - \sum_{g=1}^{G_i} \left[r^+ \sum_{k=1}^{H'_{ig}} (s_{ig,k}^{ec/es} \Delta_{ig,k}^{ec/es+}) / b^e \right] + \sum_{g=1}^{G_i} \left[r^- \sum_{k=1}^{H'_{ig}} (s_{ig,k}^{ec/es} \Delta_{ig,k}^{ec/es-}) / b^e \right] - \alpha_0^{TGC} \sum_{g=1}^{G_i} (Q_{ig}^{ec/es}) (1 - \theta_0^{TGC}) / (\delta D^e) + \alpha_0^{TGC} \sum_{g=1}^{G_i} (Q_{ig}^{ec/es}) (1 - \theta_0^{TGC}) \sum_{i=1}^N \sum_{g=1}^{G_i} Q_{ig}^{ec/es} / [\delta(D^e)^2] +$$

$$\lambda_{1ig}^{ec/es} - \lambda_{2ig}^{ec/es} - \sum_{k=1}^{H'_{ig}} \lambda_{3ig,k}^{ec/es} = 0 \quad (A3)$$

$$(Q_{ij}^g): p^g + \sum_{m=1}^{M_i} (Q_{im}^{eg} / b^g \eta_{im}) - \sum_{j=1}^{J_i} (Q_{ij}^g / b^g) - \alpha_{ij}^g - \beta_{ij}^g Q_{ij}^g + \lambda_{1ij}^g - \lambda_{2ij}^g = 0 \quad (A4)$$

$$(\Delta_{ig,k}^{ec/es+}): p^e r^+ s_{ig,k}^{ec/es} - \lambda_{3ig,k}^{ec/es} + \lambda_{4ig,k}^{ec/es} = 0 \quad (A5)$$

$$(\Delta_{ig,k}^{ec/es-}): -p^e r^- s_{ig,k}^{ec/es} + \lambda_{3ig,k}^{ec/es} + \lambda_{5ig,k}^{ec/es} = 0 \quad (A6)$$

$$(\lambda_{1il}^e): \phi(\lambda_{1il}^e, Q_{il}^e - Q_{il}^{e \min}) = 0 \quad (A7)$$

$$(\lambda_{2il}^e): \phi(\lambda_{2il}^e, Q_{il}^e - Q_{il}^{e \max}) = 0 \quad (A8)$$

$$(\lambda_{1im}^{eg}): \phi(\lambda_{1im}^{eg}, Q_{im}^{eg} - Q_{im}^{eg \min}) = 0 \quad (A9)$$

$$(\lambda_{2im}^{eg}): \phi(\lambda_{2im}^{eg}, Q_{im}^{eg \max} - Q_{im}^{eg}) = 0 \quad (A10)$$

$$(\lambda_{1ij}^g): \phi(\lambda_{1ij}^g, Q_{ij}^g - Q_{ij}^{g \min}) = 0 \quad (A11)$$

$$(\lambda_{2ij}^g): \phi(\lambda_{2ij}^g, Q_{ij}^{g \max} - Q_{ij}^g) = 0 \quad (A12)$$

$$(\lambda_{1ig}^{ec}): \phi(\lambda_{1ig}^{ec}, Q_{ig}^{ec} - Q_{ig}^{ec \min}) = 0 \quad (A13)$$

$$(\lambda_{2ig}^{ec}): \phi(\lambda_{2ig}^{ec}, Q_{ig}^{ec \max} - Q_{ig}^{ec}) = 0 \quad (A14)$$

$$(\lambda_{3ig,k}^{ec/es}): Q_{ig,k}^{ec/es} - Q_{ig}^{ec/es} - \Delta_{ig,k}^{ec/es+} + \Delta_{ig,k}^{ec/es-} = 0 \quad (A15)$$

$$(\lambda_{4ig,k}^{ec/es}): \phi(\lambda_{4ig,k}^{ec/es}, \Delta_{ig,k}^{ec/es+}) = 0 \quad (A16)$$

$$(\lambda_{5ig,k}^{ec/es}): \phi(\lambda_{5ig,k}^{ec/es}, \Delta_{ig,k}^{ec/es-}) = 0 \quad (A17)$$

式中: λ_{1il}^e 、 λ_{2il}^e 、 λ_{1im}^{eg} 、 λ_{2im}^{eg} 、 λ_{1ij}^g 、 λ_{2ij}^g 、 λ_{1ig}^{ec} 、 λ_{2ig}^{ec} 、 $\lambda_{3ig,k}^{ec/es}$ 、 $\lambda_{4ig,k}^{ec/es}$ 、 $\lambda_{5ig,k}^{ec/es}$ 分别为式(23)一式(29)的对偶变量。

传统电力供应商决策问题的 KKT 与 IESs 拥有的燃煤机组的 KKT 类似; 天然气供应商决策问题的 KKT 与 IESs 拥有的天然气井的 KKT 类似。

附录 B

表 B1 新能源渗透率对各发电商的影响

Table B1 Impacts of renewable energy penetration rate on different generators

		$r^+ = 0.4, r^- = 1.3$								
		0.5			1.0			2.0		
均值倍数		投标出力/ MW	机组利润/ (美元/h)	总利润/ (美元/h)	投标出力/ MW	机组利润/ (美元/h)	总利润/ (美元/h)	投标出力/ MW	机组利润/ (美元/h)	总利润/ (美元/h)
IES1	CU	44.98	1257.26		41.53	1136.07		37.98	1014.91	
	GT	40.00	614.98	3302.51	39.11	547.59	3668.63	34.32	456.17	4306.38
	WT	11.20	742.23		19.97	1304.26		36.11	2199.87	
	GW	74.95	688.04		74.01	680.71		68.75	635.44	
IES2	CU	48.16	1331.69		44.54	1202.59		41.03	1077.55	
	GT	40.00	620.77	3257.02	40.00	560.33	3487.43	36.50	475.04	3865.25
	WT	12.53	668.51		19.08	1089.44		30.05	1713.10	
	GW	74.19	636.06		74.16	635.07		70.10	599.56	

续表 B1

$r^+ = 0.4, r^- = 1.3$									
均值倍数	0.5			1.0			2.0		
	投标出力/ MW	机组利润/ (美元/h)	总利润/ (美元/h)	投标出力/ MW	机组利润/ (美元/h)	总利润/ (美元/h)	投标出力/ MW	机组利润/ (美元/h)	总利润/ (美元/h)
IES3	CU	50.69	1386.39	47.07	1252.36	3600.91	43.04	1114.13	3859.31
	GT	40.00	620.77	40.00	560.33		37.50	481.06	
	PV	15.21	747.64	24.32	1205.06		32.46	1709.08	
	GW	73.38	584.13	73.34	583.15		70.26	555.05	
CGS1	53.30	1241.57	—	51.19	1145.43	—	49.00	1049.26	—
CGS2	62.99	1531.40	—	60.51	1413.16	—	57.93	1295.01	—
NGS1	28.33	245.05	—	28.30	244.51	—	27.96	238.69	—
NGS2	29.21	256.20	—	29.18	255.64	—	28.83	249.56	—

参考文献

- [1] WANG Yongli, WANG Yudong, HUANG Yujing, et al. Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network[J]. Applied Energy, 2019, 251.
- [2] YU Jianshu, YANG Dechang, CAO Jinye, et al. Robust state estimation for an electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 65-80.
- [3] 王晔, 吴丙楠, 张少华. 含风电的综合能源供应商参与投标竞争的多能源市场博弈分析[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4647-4661.
WANG Xian, WU Bingnan, ZHANG Shaohua. Game analysis of multi-energy market with strategic bidding of integrated energy suppliers including wind power[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4647-4661.
- [4] 王利猛, 刘雪梦, 李扬, 等. 阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 102-114.
WANG Limeng, LIU Xueming, LI Yang, et al. Low-carbon optimal dispatch of integrated energy system considering demand response under the tiered carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 102-114.
- [5] 王晔, 王胜彩, 张少华. 电-碳-绿证交易耦合下新能源发电商参与投标竞争的多市场博弈分析[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4125-4138.
WANG Xian, WANG Shengcai, ZHANG Shaohua. Game analysis of coupled electricity-carbon-green certificate markets with strategic bidding of renewable generators[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4125-4138.
- [6] 李亚峰, 王维庆, 寇洋, 等. 考虑绿证-碳联合交易与需求响应综合能源系统经济运行[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 538-546.
LI Yafeng, WANG Weiqing, KOU Yang, et al. Considering green certificate-carbon joint trading and demand response integrated energy system economic operation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(11): 538-546.
- [7] 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.
- [8] TAN Jinjing, PAN Weiqi, LI Yang, et al. Energy-sharing operation strategy of multi-district integrated energy systems considering carbon and renewable energy certificate trading[J]. Applied Energy, 2023, 339.
- [9] 崔杨, 沈卓, 王铮, 等. 考虑绿证-碳排等价交互机制的区域综合能源系统绿色调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4508-4517.
CUI Yang, SHEN Zhuo, WANG Zheng, et al. Green dispatch of regional integrated energy system considering green certificate-carbon emission equivalent interaction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4508-4517.
- [10] 骆钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 248-255.
LUO Zhao, QIN Jinghui, LIANG Junyu, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system with carbon-green certificate coordinated trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 248-255.
- [11] TAN Qinliang, DING Yihong, ZHENG Jin, et al. The effects of carbon emissions trading and renewable portfolio standards on the integrated wind-photovoltaic-thermal power-dispatching system: real case studies in China[J]. Energy, 2021, 222.
- [12] 贡保记, 赵文, 王建华, 等. 低碳矿区综合能源系统经济运行优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 177-187.
YUN Baoji, ZHAO Wen, WANG Jianxue, et al. Economic operation optimization of an integrated energy system in low carbon mining area[J]. Power System Protection and

- Control, 2024, 52(6): 177-187.
- [13] 安江涛, 刘卫亮, 林永君, 等. 绿证-碳交易融合机制下含氢综合能源系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 104-114.
AN Jiangtao, LIU Weiliang, LIN Yongjun, et al. Optimization scheduling of hydrogen-containing integrated energy system under green certificate-carbon trading integration mechanism[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(8): 104-114.
- [14] 彭春华, 张海洋, 孙惠娟, 等. 碳交易机制下综合能源市场多供能主体均衡竞价策略[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 463-471.
PENG Chunhua, ZHANG Haiyang, SUN Huijuan, et al. Balanced bidding strategy for multiple energy suppliers in the integrated energy market under carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 463-471.
- [15] 周晓洁, 彭谦, 杨睿, 等. 绿色电力证书交易影响下计及输电阻塞影响的综合型能源发售电商竞价策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1317-1324.
ZHOU Xiaojie, PENG Qian, YANG Rui, et al. Power price marketing strategy of comprehensive energy-based electricity sales company participating in electricity market competition under ubiquitous environment of internet of things[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1317-1324.
- [16] MENG Yuxiang, MA Gang, YAO Yunting, et al. Nash bargaining based integrated energy agent optimal operation strategy considering negotiation pricing for tradable green certificate[J]. Applied Energy, 2024, 356.
- [17] ASENSIO M, CONTRERAS J. Risk-constrained optimal bidding strategy for pairing of wind and demand response resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 200-208.
- [18] GUO Hongye, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Modeling strategic behaviors of renewable energy with joint consideration on energy and tradable green certificate markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(3): 1898-1910.
- [19] 孙晓聪, 丁一, 包铭磊, 等. 考虑发电商多时间耦合决策的碳-电市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 1-11.
SUN Xiaocong, DING Yi, BAO Minglei, et al. Carbon-electricity market equilibrium analysis considering multi-time coupling decision of power producers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 1-11.
- [20] YAN Sizhe, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Stochastic optimal scheduling strategy of cross-regional carbon emissions trading and green certificate trading market based on Stackelberg game[J]. Renewable Energy, 2023, 219.
- [21] WAHBAH M, FENG S, EL-FOULY T H M, et al. Root-transformed local linear regression for solar irradiance probability density estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 652-661.
- [22] WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua, et al. Impacts of joint operation of wind power with electric vehicles and demand response in electricity market[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 201.
- [23] JIANG Kai, LIU Nian, YAN Xiaohe, et al. Modeling strategic behaviors for GenCo with joint consideration on electricity and carbon markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 38(5): 4724-4738.
- [24] 杨明杰, 胡扬宇, 千海霞, 等. 计及碳排放的综合能源配网日前与日内多时间尺度优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 96-106.
YANG Mingjie, HU Yangyu, QIAN Haixia, et al. Optimization of day-ahead and intra-day multi-time scale scheduling for integrated power-gas energy system considering carbon emission[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 96-106.
- [25] 姚军, 何姣, 吴永飞, 等. 考虑碳交易和绿证交易制度的电力批发市场能源优化[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 190-195.
YAO Jun, HE Jiao, WU Yongfei, et al. Energy optimization of electricity wholesale market considering carbon emissions trading and green power certificate trading mechanism[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 190-195.
- [26] WANG Xian, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1348-1355.
- [27] 生态环境部. 关于做好2021、2022年度全国碳排放权交易配额分配相关工作的通知[EB/OL]. [2023-03-15]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202303/t20230315_1019707.html
- [28] 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, 1858.
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, 1858.

收稿日期: 2024-07-12; 修回日期: 2024-12-12

作者简介:

王胜彩(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场均衡分析; E-mail: shengcailiang@shu.edu.cn

王 颀(1970—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场均衡分析; E-mail: xianwang@shu.edu.cn

张少华(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场风险管理、博弈分析等。E-mail: eeshzhang@shu.edu.cn

(编辑 魏小丽)