

# 碳市场背景下发电商竞价策略及电力市场均衡分析

段声志, 陈皓勇, 郑晓东, 黄剑平, 邓盛盛  
(华南理工大学, 广州 510640)

**摘要:**碳市场交易提高了传统化石能源机组的发电成本,进而影响其在电力市场的竞价行为,电力市场均衡也随之发生改变。文章针对碳市场背景下的电力市场均衡问题建立了双层均衡模型,上层模型为考虑碳成本的发电商最优竞价模型,下层模型为考虑碳配额总量约束的电力市场出清模型,通过最优性条件理论以及二进制展开法、大 M 法等线性化手段将双层模型转化为混合整数线性规划,基于 PJM 5 节点系统,求解了多市场环境下有无碳市场的电力市场均衡,分析了碳市场对电力市场均衡状态的影响;同时,基于碳配额总量对电力市场均衡的灵敏度分析发现碳配额总量需适度收紧才能最大程度实现电力低碳减排作用。

**关键词:**碳市场;电力市场;市场均衡;策略行为;机制设计

**DOI:**10.19753/j.issn1001-1390.2022.05.004

**中图分类号:**TM73

**文献标识码:**B

**文章编号:**1001-1390(2022)05-0033-09

## Bidding strategy of electricity generation and electricity market equilibrium analysis under the background of carbon market

Duan Shengzhi, Chen Haoyong, Zheng Xiaodong, Huang Jianping, Deng Shengsheng  
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Carbon market trading increases the cost of power generation of traditional fossil energy units, and then affects their bidding behavior in the electricity market, as well as the electricity market equilibrium. In this paper, a two-layer equilibrium model is established for the electricity market equilibrium problem under the background of carbon market. The upper model is the optimal bidding model of the electricity generator considering the carbon emission cost, and the lower model is the power market clearance model considering the total constraint of the carbon quota. The two-layer model is transformed into a mixed integer linear programming problem by using optimality condition theory and linearization methods such as binary expansion approach and big M method. Based on the PJM 5-node system, the equilibrium of electricity market with and without carbon market in multi-market environment are solved, and the influence of carbon market on electricity market equilibrium state is analyzed. Meanwhile, based on the sensitivity analysis of the total carbon quota to electricity market equilibrium, it is found that the total carbon quota needs to be appropriately tightened to achieve the maximum effect of electricity low-carbon emission reduction.

**Keywords:** carbon market, electricity market, market equilibrium, strategic behavior, mechanism design

### 0 引言

随着“碳达峰碳中和”目标的提出,碳市场建设步伐也开始加快。与此同时,电力行业是碳排放的大户,在全国统一碳市场构建进程中,电力行业首当其冲,碳市场将增加传统化石能源发电企业的成本<sup>[1]</sup>,新形

势下的电力市场面临着巨大冲击。在新一轮电力体制改革及双碳目标背景下,碳市场交易将会给电力市场均衡带来显著的影响。

电力市场均衡问题可通过建立双层模型进行求解<sup>[2-3]</sup>,本质为上层为发电商最优决策问题,下层为以社会福利最大化为目标的市场出清问题<sup>[4]</sup>。对于双层模型的求解,有两种经典解法,一种可以通过启发式算法(如协同进化算法)对市场均衡点迭代求解,文献[5]

**基金项目:**国家自然科学基金重点项目(51937005);广东省自然科学基金资助项目(2019A1515010689)

通过协同进化算法求解了统一出清机制与双侧等效 PAB 出清机制下的市场均衡,文献[6]通过多群体协同进化算法求解了电力批发市场和绿证交易市场协同作用机制下的市场均衡;另一种是将下层问题用最优性条件替代<sup>[7-8]</sup>,将双层模型转换为单层模型,构成带均衡约束的数学规划<sup>[9]</sup>(Mathematical Program with Equilibrium Constraints, MPEC)。若将单个市场主体推广到多个市场主体,即可形成多个市场主体最优决策的 MPEC 模型,从而构建均衡约束均衡规划(Equilibrium Program with Equilibrium Constraints, EPEC),求解整个电力市场的均衡<sup>[10-12]</sup>。文献[10]构建天然气和电能量耦合市场的市场均衡 EPEC 模型,探讨了其市场均衡情况。文献[11]通过构建 EPEC 模型研究了负荷不确定性对电力市场发电主体利润的影响。文献[12]通过 EPEC 模型研究了风电不确定性对日前市场和实时市场的影响。

碳市场的影响主要集中在两个方面,一是碳市场会增加传统发电企业的碳排放成本,二是碳配额总量约束将限制不同排放强度机组的出力。文献[13]在日前调度中考虑了发电企业的碳成本以及碳配额总量约束,文献[14]在电-气热综合能源系统协调调度中考虑了碳交易机制,侧重于分析碳成本对调度的影响,文献[15]研究了碳交易对综合能源规划与运行的影响,文献[16]在虚拟电厂经济调度问题考虑了碳交易机制。而对于考虑碳市场机制下的电力市场均衡问题,文献[17-18]分析了欧盟碳排放交易权对欧洲电力市场的影响,对其相互作用机理进行了分析,文献[19]建立了电碳联动环境下考虑社会效益最优的发电权交易模型,文献[20-21]则是通过古诺模型来分析碳排放成本对电力市场均衡的影响,但其未考虑碳配额总量约束与网络拓扑约束,不能完全反映碳市场对电力市场均衡的影响。

综上,目前碳市场背景下电力市场的市场均衡研究大多仅使用古诺模型来分析市场均衡情况,仅能代表双寡头市场环境的市场均衡,不能真实反映复杂市场环境的电力市场均衡情况。并且较多研究只考虑碳成本单一作用,未考虑碳配额总量这一关键影响因素。因此,文中综合考虑了碳成本、碳配额总量、网络拓扑约束等市场复杂出清条件,建立了碳市场背景下的电力市场双层均衡模型,相比传统的电力市场双层均衡模型,文中提出的模型充分考虑了碳市场的两大影响因素,在发电商利润中考虑了碳成本,在市场出清时考虑了碳配额总量约束,即上层模型为考虑碳成本的市场主体最优竞价模型,下层模型为考虑碳配额总量约束的电力市场出清模型。单市场主体的最优竞价模型

与下层模型转化的最优性条件共同构建了一个 MPEC 问题,考虑多市场主体时,即可构成一个 EPEC 问题。由于 EPEC 模型呈现高度非凸非线性特征,故文中通过多种线性化方法对模型进行转化求解。最后,文中基于 PJM 5 节点系统求解了完全竞争、单策略市场主体、多策略市场主体等多种市场环境下的电力市场均衡,通过有无碳市场的电力市场均衡对比分析,对碳配额总量、碳价对电力市场的影响等关键问题进行了分析,对后续碳市场背景下的电力市场发展路径以及发电商的最优报价决策具有一定参考价值。

## 1 碳市场模型

当前我国碳市场处于初期阶段,发电行业率先参与全国碳排放权交易系统。对于碳排放配额,目前以“无偿分配为主,有偿分配为辅”的原则进行分配,配额分配的目的是为了初期平衡发电商利润,减小碳市场对其造成的影响。但后续将逐步提高碳配额有偿分配的比例,即获得碳配额需要付出相应的碳成本。因此文中默认发电商需要有偿获得碳配额,并在其市场报价策略和利润优化决策中考虑碳成本。

对于发电商来说,碳排放总量可以通过机组出力及碳排放强度来计算,由此,发电商的碳成本可以定义为碳价乘以碳排放总量的乘积。

$$C_r^{\text{co}_2} = \lambda_{\text{co}_2} \sum_{i \in \Omega_r} p_i^G \varphi_i \Delta t \quad (1)$$

式中  $p_i^G$  为机组出力;  $\varphi_i$  为碳排放强度;  $\lambda_{\text{co}_2}$  为碳市场上碳排放权成交价格;  $C_r^{\text{co}_2}$  为发电商  $r$  所需要支付的碳成本。

同时,为达到减排作用,碳市场中实际可用于交易的碳配额是存在总量限制的,若将碳配额总量分解到每日各时段,则需在市场出清时需考虑碳配额总量约束:

$$\sum_r \sum_{i \in \Omega_r} p_i^G \varphi_i \Delta t \leq Q_{\text{co}_2} \quad (2)$$

式中  $Q_{\text{co}_2}$  为碳市场设立的分解到每日各时段的碳配额总量。

## 2 碳市场背景下电力市场均衡模型

### 2.1 市场假设与建模框架

文中,机组分布在整个电力网络的各个节点上,通过在电力交易中心竞价申报来参与集中式的电力日前现货市场。在日前市场中,机组采用报价报量的形式申报次日的意愿成交容量和价格,并且可分三段申报以降低电量不成交的风险。同时,为避免机组持有剩余发电容量以操纵市场,各报价段容量之和为机组竞价容量上限。

对于电力用户而言,为保证电力足量供应,申报电能边际效用的同时申报电量需求,消费者提交其真实的需求和效用。

电力调度机构接收到各市场主体的申报信息后,进行市场出清。市场出清以直流潮流模型来构建网络安全约束,出清的目标函数为综合考虑供给侧和需求侧申报的社会福利最大化模型,出清的结果为市场主体每小时买入或卖出的电量以及系统边际价格。

碳市场为完全竞争市场,各发电商作为碳价的接受者,不具备干预碳价的能力。碳配额总量计划依据相关规则分解到每日各时段,从而与电力市场形成联动。

为简单起见,只考虑单个时间段,但可以扩展到多个时间段。通过构建双层均衡模型来求解碳市场背景下发电商最优决策和电力市场均衡问题,其可以转化为 MPEC 模型求解,而多个 MPEC 模型又可转化为 EPEC 模型求解,转化示意图如图 1 所示。

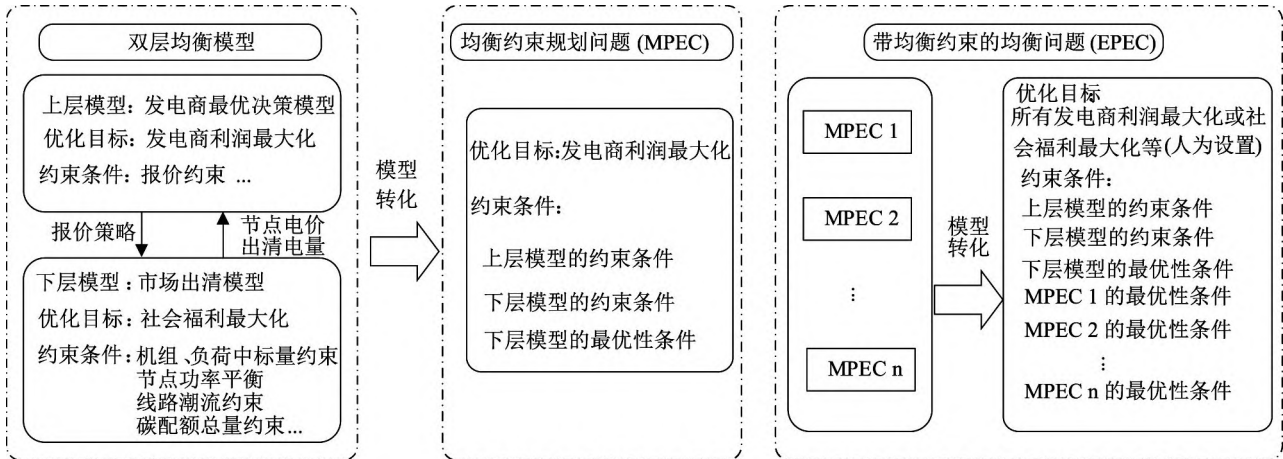


图 1 双层模型、MPEC 模型、EPEC 模型转化示意图

Fig. 1 Conversion schematic diagram of two-layer model, MPEC model and EPEC model

## 2.2 双层模型

电力现货市场中,发电商通过制定竞价策略来影响其中标电量及节点电价,而 ISO (Independent System Operator) 则根据社会福利最大化目标来优化出清结果,出清所得到的机组中标量及节点电价反过来又会影响发电商利润,两者相互耦合与制约。因此通过构建双层模型来描述市场主体的竞价行为及 ISO 出清过程,通过求解双层模型来分析市场主体获利及市场均衡情况。上层模型即为考虑碳成本的发电商的利润最大化模型,以竞价策略为优化变量,电力市场竞价相关规则作为其竞价策略的约束条件;下层模型即为考虑碳配额总量约束的 ISO 出清模型,以各发电商中标量及节点电价作为优化变量,除考虑电力市场运行规则约束、机组运行约束等约束条件外,同时考虑网络拓扑约束。

$$\min_{\alpha_{ij} \in \Omega_r, P_{ij}^{Gmax}} \sum_{i \in \Omega_r} \sum_j (-\lambda_{c_n; i \in \Psi_n} + \lambda_{ij}^G + \lambda_{CO2} \varphi_i) P_{ij}^G \Delta t \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \alpha_{ij}^{\min} \leq \alpha_{ij} \leq \alpha_{ij}^{\max}, \quad \forall i \in \Omega_r, \forall j \quad (4)$$

$$\alpha_{i(j-1)} \leq \alpha_{ij}, \quad \forall i \in \Omega_r, \quad \forall j \geq 2 \quad (5)$$

$$\min \sum_i \sum_j \alpha_{ij} P_{ij}^G \Delta t - \sum_d \sum_k \lambda_{dk} P_{dk}^D \Delta t \quad (6)$$

$$\text{s. t. } P_{ij}^{Gmin} \leq P_{ij}^G \leq P_{ij}^{Gmax} : \mu_{ij}^{Gmin}, \mu_{ij}^{Gmax}, \quad \forall i \forall j \quad (7)$$

$$P_{dk}^{Dmin} \leq P_{dk}^D \leq P_{dk}^{Dmax} : \mu_{dk}^{Dmin}, \mu_{dk}^{Dmax}, \quad \forall d \forall k \quad (8)$$

$$\sum_{d \in \Psi_n} \sum_k P_{dk}^D - \sum_{i \in \Psi_n} \sum_j P_{ij}^G + \sum_{m \in \Theta_n} B_{nm} (\delta_n - \delta_m) = 0; \quad \lambda_n, \forall n \quad (9)$$

$$B_{nm} (\delta_n - \delta_m) \leq P_{nm}^{Lmax} : \mu_{nm}^{Lmax}, \quad \forall n \forall m \in \Theta_n \quad (10)$$

$$\delta_n = 0, n = 1; \mu^{\delta 1} \quad (11)$$

$$\sum_i \sum_j P_{ij}^G \varphi_i \Delta t \leq Q_{CO2} : \mu_{CO2} \quad (12)$$

式中  $i$  为发电机组的索引;  $j$  为发电机组的报价段的索引;  $d$  为需求的索引;  $k$  为需求报价段的索引;  $n$  和  $m$  为节点的索引。  $\lambda_n$  为节点  $n$  的节点边际价格 (Locational Marginal Price);  $P_{ij}^G$  为机组  $i$  在第  $j$  段的中标发电功率;  $\lambda_{ij}^G$  为除碳成本外的机组  $i$  第  $j$  段边际发电成本 (Marginal Cost);  $\alpha_{ij}$  为机组  $i$  第  $j$  段的报价 (Price Offer);  $\alpha_{ij}^{\min}$  为机组  $i$  第  $j$  段报价下限;  $\alpha_{ij}^{\max}$  为机组  $i$  第  $j$  段报价上限;  $i \in \Psi_n$  表示机组  $i$  位于节点  $n$  上;  $P_{ij}^{Gmin}$  为机组  $i$  第  $j$  段的中标量下限;  $P_{ij}^{Gmax}$  为机组  $i$  第  $j$  段的中标量上限;  $P_{dk}^D$  为用户  $d$  第  $k$  段中标电量;  $P_{dk}^{Dmin}$  为用户  $d$



第  $k$  段最小中标量;  $P_{dk}^{Dmax}$  为用户  $d$  第  $k$  段电量需求;  $B_{nm}$  为节点  $n$  到  $m$  的线路电纳;  $\delta_n$  为节点  $n$  的电压相角;  $P_{nm}^{Lmax}$  为节点  $n$  到  $m$  的线路传输功率极限; 约束条件后的变量为该约束对应的对偶变量。

式(3)为机组的收益函数; 式(4)、式(5)为机组报价约束。式(6)为社会福利最大化的出清目标函数; 式(7)为机组中标量约束; 式(8)为负荷中标量约束; 式(9)为节点功率平衡约束; 式(10)为支路潮流上下限约束; 式(11)表示网络节点编号为 1 的节点设置为参考节点, 式(12)为碳配额总量约束。

### 2.3 MPEC 模型

下层模型是一个凸规划问题, 因此我们可以将下层模型转化为等价的最优性条件, 并作为上层模型的约束条件, 从而将双层模型转化为单层模型进行求解, 这样就构成了 MPEC 模型。

$$\min_{\alpha_{i \in \Omega_r}, \beta_{ij}^{Gmax}, i \in \Omega_r, j} (-\lambda_{(n,i \in \Psi_n)} + \lambda_{ij}^G + \lambda_{CO2} \varphi_i) P_{ij}^G \Delta t \quad (13)$$

结合式(4)、式(5)、式(7) ~ 式(12), 有:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_j \alpha_{ij} P_{ij}^G - \sum_i \sum_j (\mu_{ij}^{Gmin} P_{ij}^{Gmin} - \mu_{ij}^{Gmax} P_{ij}^{Gmax}) - \\ & \sum_d \sum_k (\mu_{dk}^{Dmin} P_{dk}^{Dmin} - \mu_{dk}^{Dmax} P_{dk}^{Dmax}) - \sum_d \sum_k \lambda_{dk} P_{dk}^D + \\ & \sum_n \sum_{m \in \Psi_n} \mu_{nm}^{Lmax} P_{nm}^{Lmax} + Q_{CO2} \mu_{CO2} = 0; \eta_r^D \end{aligned} \quad (14)$$

$$\alpha_{ij} - \lambda_{(n,i \in \Psi_n)} + \mu_{ij}^{Gmax} - \mu_{ij}^{Gmin} + \mu_{CO2} \varphi_i \Delta t = 0; \eta_{rij}^G, \quad \forall r \forall i \forall j \quad (15)$$

$$-\lambda_{dk} + \lambda_{(n,d \in \Psi_n)} + \mu_{dk}^{Dmax} - \mu_{dk}^{Dmin} = 0; \eta_{rdk}^D, \quad \forall r \forall d \forall k \quad (16)$$

$$\sum_{m \in \Theta_n} B_{nm} (\lambda_n - \lambda_m) + \sum_{m \in \Theta_n} B_{nm} (\mu_{nm}^{Lmax} - \mu_{nm}^{Lmin}) + (\mu^{\delta 1})_{n=1} = 0; \eta_{rn}^{\delta}, \quad \forall r \forall n \quad (17)$$

$$\mu_{ij}^{Gmax}, \mu_{ij}^{Gmin} \geq 0; \tau_{rij}^{Gmax}, \tau_{rij}^{Gmin}, \quad \forall r \forall i \forall j \quad (18)$$

$$\mu_{dk}^{Dmax}, \mu_{dk}^{Dmin} \geq 0; \tau_{rdk}^{Dmax}, \tau_{rdk}^{Dmin}, \quad \forall r \forall d \forall k \quad (19)$$

$$\mu_{CO2} \geq 0; \tau_r^{CO2}, \quad \forall r \quad (20)$$

$$\mu_{nm}^{Lmax} \geq 0; \tau_{nm}^{Lmax}, \quad \forall r \forall n \forall m \in \varphi_n \quad (21)$$

其中, 式(14)为强对偶性定理公式; 式(15) ~ 式(17)为下层模型的最优性条件; 式(18) ~ 式(21)为对偶变量非负约束。

强对偶性定理公式与互补松弛条件是等价的, 相较于互补松弛条件, 强对偶性定理公式的优势在于可避免求解 EPEC 问题时对互补约束条件求导产生更多的非线性项。

### 2.4 EPEC 模型

对于单市场主体而言, 其最优竞价策略问题即为一个 MPEC 模型。若同时对  $r$  个市场主体的最优竞价策略问题进行求解, 即  $r$  个 MPEC 模型, 将这  $r$  个 MPEC 模型转化为其等价的最优性条件, 从而构成均衡约束均衡规划 EPEC 模型, 即可求解电力市场均衡。

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial \lambda_n} = & - \sum_j P_{(i \in \Omega_r \cap \Psi_n)j}^G \Delta t - \sum_i \sum_j \eta_{r(i \in \Psi_n)j}^G + \\ & \sum_d \sum_k \eta_{r(d \in \Psi_n)k}^D + \sum_{m \in \Theta_n} B_{nm} (\eta_{rn}^{\delta} - \eta_{rm}^{\delta}) = 0, \quad \forall r \forall n \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial P_{ij}^G} = & - (\lambda_{(n,i \in \Psi_n)} - \lambda_{ij}^G - \lambda_{CO2} \varphi_i) \Delta t + \beta_{rij}^{Gmax} - \\ & \beta_{rij}^{Gmin} - \beta_{rn} + \eta_r^D \alpha_{ij} + \beta_{CO2} \varphi_i \Delta t = 0, \quad \forall r \forall i \in \Omega_r \forall j \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial P_{ij}^G} = & \beta_{rij}^{Gmax} - \beta_{rij}^{Gmin} - \beta_{rn} + \eta_r^D \alpha_{ij} + \beta_{CO2} \varphi_i \Delta t = 0, \\ & \forall r \forall i \notin \Omega_r \forall j \quad (24) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial P_{dk}^D} = & \beta_{rdk}^{Dmax} - \beta_{rdk}^{Dmin} + \beta_{r(n,d \in \Psi_n)} - \eta_r^D \lambda_{dk} = 0, \\ & \forall r \forall d \forall k \quad (25) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial \alpha_{ij}} = & v_{rij}^{Gmax} - v_{rij}^{Gmin} + v_{ri(j+1)}^G - v_{rij}^G + \eta_r^D P_{ij}^G + \\ & \eta_{rij}^G = 0, \quad \forall r \forall i \in \Omega_r \forall j < K \quad (26) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial \alpha_{ij}} = & v_{rij}^{Gmax} - v_{rij}^{Gmin} - v_{rij}^G + \eta_r^D P_{ij}^G + \eta_{rij}^G = 0, \\ & \forall r \forall i \in \Omega_r, \forall j = K \quad (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial \delta_n} = & \sum_{m \in \Theta_n} B_{nm} (\beta_{rn} - \beta_{rm}) + (\beta_r^{\delta 1})_{n=1} + \sum_{m \in \Theta_n} B_{nm} \cdot \\ & (\beta_{rm}^{Lmax} - \beta_{rm}^{Lmin}) = 0, \quad \forall r \forall n \quad (28) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \mu_{ij}^{Gmin}} = -\eta_r^D P_{ij}^{Gmin} - \eta_{rij}^G - \tau_{rij}^{Gmin} = 0, \quad \forall r \forall i \forall j \quad (29)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \mu_{ij}^{Gmax}} = \eta_r^D P_{ij}^{Gmax} + \eta_{rij}^G - \tau_{rij}^{Gmax} = 0, \quad \forall r \forall i \forall j \quad (30)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \mu_{dk}^{Dmin}} = -\eta_r^D P_{dk}^{Dmin} - \eta_{rdk}^D - \tau_{rdk}^{Dmin} = 0, \quad \forall r \forall d \forall k \quad (31)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \mu_{dk}^{Dmax}} = \eta_r^D P_{dk}^{Dmax} + \eta_{rdk}^D - \tau_{rdk}^{Dmax} = 0, \quad \forall r \forall d \forall k \quad (32)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \mu_{CO2}} = \eta_r^D Q_{CO2} + \sum_i \sum_j \eta_{rij}^G \varphi_i \Delta t - \tau_r^{CO2} = 0, \quad \forall r \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_r}{\partial \mu_{nm}^{Lmax}} = & \eta_r^D P_{nm}^{Lmax} + B_{nm} (\eta_{rn}^{\delta} - \eta_{rm}^{\delta}) - \tau_{nm}^{Lmax} = 0, \\ & \forall r \forall n \forall m \in \Phi_n \quad (34) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \mu^{\delta 1}} = \eta_r^{\delta} = 0, \quad \forall r \quad (35)$$

互补松弛条件为:

$$0 \leq \alpha_{ij} - \alpha_{ij}^{\min} \perp v_{rij}^{G_{\min}} \geq 0, \forall r \forall i \in \Omega_r \forall j \quad (36)$$

$$0 \leq \alpha_{ij}^{\max} - \alpha_{ij} \perp v_{ri}^{G_{\max}} \geq 0, \forall r \forall i \in \Omega_r \forall j \quad (37)$$

$$0 \leq \alpha_{ij} - \alpha_{i(j-1)} \perp v_{rij}^G \geq 0, \forall r \forall i \in \Omega_r, \forall j \geq 2 \quad (38)$$

$$0 \leq P_{ij}^G - P_{ij}^{\min} \perp \beta_{rij}^{G_{\min}} \geq 0, \forall r \forall i \forall j \quad (39)$$

$$0 \leq P_{ij}^{G_{\max}} - P_{ij}^G \perp \beta_{rij}^{G_{\max}} \geq 0, \forall r \forall i \forall j \quad (40)$$

$$0 \leq P_{dk}^D - P_{dk}^{\min} \perp \beta_{rdk}^{D_{\min}} \geq 0, \forall r \forall d \forall k \quad (41)$$

$$0 \leq P_{dk}^{D_{\max}} - P_{dk}^D \perp \beta_{rdk}^{D_{\max}} \geq 0, \forall r \forall d \forall k \quad (42)$$

$$0 \leq P_{nm}^{L_{\max}} - B_{nm}(\delta_n - \delta_m) \perp \beta_{nm}^{L_{\max}} \geq 0, \forall r \forall n \forall m \in \Phi_n \quad (43)$$

$$0 \leq Q_{\text{co2}} - \sum_i \sum_j P_{ij}^G \varphi_i \Delta t \perp \beta_{\text{co2}} \geq 0 \quad (44)$$

$$0 \leq \mu_{ij}^{G_{\max}} \perp \tau_{rij}^{G_{\max}} \geq 0, \forall r \forall i \forall j \quad (45)$$

$$0 \leq \mu_{ij}^{G_{\min}} \perp \tau_{rij}^{G_{\min}} \geq 0, \forall r \forall i \forall j \quad (46)$$

$$0 \leq \mu_{dk}^{D_{\max}} \perp \tau_{rdk}^{D_{\max}} \geq 0, \forall r \forall d \forall k \quad (47)$$

$$0 \leq \mu_{dk}^{D_{\min}} \perp \tau_{rdk}^{D_{\min}} \geq 0, \forall r \forall d \forall k \quad (48)$$

$$0 \leq \mu_{nm}^{L_{\max}} \perp \tau_{nm}^{L_{\max}} \geq 0, \forall r \forall n \forall m \in \varphi_n \quad (49)$$

$$0 \leq \mu_{\text{co2}} \perp \tau_r^{\text{co2}} \geq 0, \quad \forall r \quad (50)$$

式中  $L_r$  对应第  $r$  个 MPEC 模型的拉格朗日函数。

## 2.5 EPEC 模型目标函数

上述得到了一系列最优性条件,将其线性化后可得到线性最优性条件集合,其本质是市场均衡的可行域,为了找到可行域中有意义的解,需要在此基础上加入目标函数,即可建立混合整数线性规划模型进行求解。目标函数在 EPEC 模型中的数学表达式为:

$$\min \sum_{r \in I_s} \sum_{i \in \Omega_r} \sum_j (-\lambda_{\langle n; i \in \Psi_n \rangle} + \lambda_{ij}^G + \lambda_{\text{co2}} \varphi_i) P_{ij}^G \Delta t \quad (51)$$

式中  $I_s$  为所有发电商  $r$  的集合。

## 3 模型线性化方法

上述模型中存在很多非线性项,它们可以被划分为四种类型。

### (1) 互补松弛条件

互补松弛条件可以通过大  $M$  法线性化,类似于  $0 \leq \mu \perp p \geq 0$  的互补松弛条件都可以线性化为:

$$0 \leq \mu \leq \theta M^u \quad (52)$$

$$0 \leq P \leq (1 - \theta) M^p \quad (53)$$

$$u \geq 0, P \geq 0, \theta \in \{0, 1\} \quad (54)$$

式中  $M^u$  和  $M^p$  均是足够大的常数。

### (2) 形如 $\alpha_{ij} P_{ij}^G$ 的非线性项

非线性项  $\alpha_{ij} P_{ij}^G$  出现在强对偶性定理公式(14)中,可以用互补松弛条件和强对偶性定理公式之间的等价性进行线性化,同样可用大  $M$  法对互补松弛条件式(55)~式(60)线性化。

$$0 \leq P_{ij}^{G_{\max}} - P_{ij}^G \perp \mu_{ij}^{G_{\max}} \geq 0, \quad \forall i \forall j \quad (55)$$

$$0 \leq P_{ij}^{G_{\max}} - P_{ij}^G \perp \mu_{ij}^{G_{\max}} \geq 0, \quad \forall i \forall j \quad (56)$$

$$0 \leq P_{dk}^{D_{\max}} - P_{dk}^D \perp \mu_{dk}^{D_{\max}} \geq 0, \quad \forall d \forall k \quad (57)$$

$$0 \leq P_{dk}^D - P_{dk}^{D_{\min}} \perp \mu_{dk}^{D_{\min}} \geq 0, \quad \forall d \forall k \quad (58)$$

$$0 \leq P_{nm}^{L_{\max}} - B_{nm}(\delta_n - \delta_m) \perp \mu_{nm}^{L_{\max}} \geq 0, \forall n \forall m \in \Phi_n \quad (59)$$

$$0 \leq Q_{\text{co2}} - \sum_i \sum_j P_{ij}^G \varphi_i \Delta t \perp \mu_{\text{co2}} \geq 0 \quad (60)$$

(3) 目标函数中的非线性项  $\lambda_{\langle n; i \in \Psi_n \rangle} P_{ij}^G$

运用强对偶性定理公式(14)、下层模型的最优性条件(15)以及互补松弛条件式(55)~式(60)进行替换可以得到:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \Omega_r} \sum_j \lambda_{\langle n; i \in \Psi_n \rangle} P_{ij}^G = & - \sum_{i \in \Omega_r} \sum_j \alpha_{ij} P_{ij}^G - \sum_d \sum_k \lambda_{dk} P_{dk}^D + \\ & \sum_{i \in \Omega_r} \sum_j (\mu_{ij}^{G_{\min}} P_{ij}^{G_{\min}} - \mu_{ij}^{G_{\max}} P_{ij}^{G_{\max}}) + \sum_d \sum_k (\mu_{dk}^{D_{\min}} P_{dk}^{D_{\min}} - \\ & \mu_{dk}^{D_{\max}} P_{dk}^{D_{\max}}) - \sum_{n(m \in \Theta_n)} v_{nm}^{L_{\max}} P_{nm}^{L_{\max}} - \sum_{i \in \Omega_r} \sum_j \mu_{\text{co2}} \varphi_i P_{ij}^G \quad (61) \end{aligned}$$

因此,式(61)中只含有  $\mu_{\text{co2}} \varphi_i P_{ij}^G$  这一个非线性项,在此采用二进制展开法(Binary Expansion Approach)对其进行线性化<sup>[22-23]</sup>,首先将  $P_{ij}^G$  分成  $Q$  个离散的数值,再结合式(62)~式(65)的约束条件,这样  $\mu_{\text{co2}} \varphi_i P_{ij}^G$  即可等效于  $\sum_q P_{ijq}^{\text{ref}} \varphi_i \xi_{ijq}^{\text{co2}}$ 。

$$P_{ij}^G - \frac{\Delta P_{ij}^{\text{ref}}}{2} \leq \sum_q P_{ijq}^{\text{ref}} z_{ijq}^G \leq P_{ij}^G + \frac{\Delta P_{ij}^{\text{ref}}}{2}, \quad \forall i \in \Omega_r \forall j \quad (62)$$

$$0 \leq \mu_{\text{co2}} - \xi_{ijq}^{\text{co2}} \leq M(1 - z_{ijq}^G), \quad \forall i \in \Omega_r \forall j \forall q \quad (63)$$

$$0 \leq \xi_{ijq}^{\text{co2}} \leq M z_{ijq}^G, \quad \forall i \in \Omega_r \forall j \forall q \quad (64)$$

$$\sum_q z_{ijq}^G = 1, \quad \forall i \in \Omega_r \forall j \quad (65)$$

其中,  $q$  为  $P_{ij}^G$  参数化的索引;  $P_{ijq}^{\text{ref}}$  为功率参考值;  $z_{ijq}^G$  为二进制变量,用于表示与决策变量最接近的参考值;  $\xi_{ijq}^{\text{co2}}$  用于表示与功率参考值最接近的对偶变量  $\mu_{\text{co2}}$ 。

### (4) 形如 $\eta_r^D P_{rij}^G, \eta_r^D \mu_{ij}^{G_{\max}}, \eta_r^D \alpha_{ij}$ 的非线性项

由于  $\eta_r^D$  有一定的自由度,并且每个发电商都对应着一个参数,因此可以将强对偶性定理等式所对应的对偶变量  $\eta_r^D$  参数化,从而将模型线性化求解。

## 4 算例分析

算例中,电力网络模型采用 PJM 5 机 5 节点模型,机组参数、用户参数如表 1、表 2 所示。网络中共有 5 台发电机,3 个用户,总发电能力为 1 530 MW,用户总需求为 1 000 MW,占总发电量的 65.35%,供大于求为买方市场。一个发电商对应一台机组,发电商和用户

都采用三段式报价报量的方式,其中三段式报量按总容量/需求平均分配,碳价取 30 元/tco<sub>2</sub>。仿真是在一台 3.2 GHz,16 GB RAM,6 个双核处理器的个人 PC 电脑,使用 GAMS 35.0 编程实现求解的。

表 1 机组参数

Tab. 1 Unit parameters

机组 编号	节点 编号	容量 /MW	报价上下限 (元/MWh)	除碳成本外的 边际成本(元/MWh)	碳排放强度 (tco <sub>2</sub> /MWh)
G1	1	40	(0,800)	(280, 310, 360)	0.88
G2	1	170	(0,800)	(300, 320, 342)	0.64
G3	3	200	(0,800)	(305, 337, 380)	0.85
G4	4	520	(0,800)	(290, 315, 340)	0.81
G5	5	600	(0,800)	(260, 308, 343)	0.8

表 2 负荷参数

Tab. 2 Load parameters

负荷编号	节点编号	需求/MW	报价策略(元/MWh)
D1	2	300	(600, 500, 448)
D2	3	300	(550, 450, 440)
D3	4	400	(580, 460, 430)

为了分析碳市场在不同电力市场环境下对电力市场均衡的影响,基于边际成本报价(MC)、单策略性主体(MPEC)、多策略性主体(EPEC)三种场景,分析有无碳市场时电力市场均衡情况。边际成本报价即各机组均无策略性行为,按自身边际成本报价,代表完全竞争市场;单策略性主体即市场主体中存在一个策略性主体,假设 G5 为市场中唯一策略性主体,其余市场主体均为非策略性主体,按边际成本报价,即构建的 MPEC 模型;多策略性主体即市场存在多个策略性主体,即构建的 EPEC 模型,代表隐性垄断情况。为了直观体现碳市场对电力市场均衡的影响,暂将线路潮流约束全部松弛。

4.1 电力市场均衡分析

考虑碳市场时,主要研究碳价和碳配额总量对电力市场均衡的影响。碳价对发电商的影响最直观地体现在机组边际成本的增加上,对于不同碳排放强度的机组,边际成本增加有所不同。碳配额总量可设置宽松也可收紧,宽松时仅需考虑碳价对市场均衡的影响,而收紧时则需要考虑碳配额总量约束,不同碳配额总量对市场出清的影响并不一致。因此,分析了无碳市场的电力市场均衡情况,对有碳市场时碳配额宽松和收紧这两种情况都进行了电力市场均衡分析,碳配额

宽松时总量设为 900 tco<sub>2</sub>,碳配额收紧时总量设为 788 tco<sub>2</sub>。电力市场均衡情况如表 3 所示。

表 3 节点电价表

Tab. 3 Nodal electricity prices

场景	无碳市场 (元/MWh)	有碳市场(元/MWh)	
		碳价 + 碳配额宽松	碳价 + 碳配额收紧
MC	337	362.5	400.75
MPEC	380	405.5	430
EPEC	430	430	430

4.1.1 节点电价分析

在 MC 场景中,由于是完全竞争市场,节点电价最低。考虑碳市场后,碳价导致机组边际成本升高,节点电价上涨。当碳配额进一步收紧时,此时碳配额总量约束发挥作用,节点电价进一步升高。这是因为 G3 是高排放机组,由于碳配额总量约束导致成本更低的 G3 不能全部中标,一部分中标量被 G5 抢占。与线路潮流阻塞类似,此时节点电价为这两个机组报价的线性组合,不再由单一边际机组决定。这一价格体现了因碳配额总量约束而导致的电力紧缺,导致电价上涨,反映了碳市场机制下电能的稀缺性。

在 MPEC 场景中,相比 MC 场景,G5 作为唯一的策略性主体,通过抬高投标价格使节点电价上涨。考虑碳市场后,节点电价较无碳市场时升高,这是由于 G5 为应对机组边际成本升高,通过进一步提高报价策略以最大化利润,导致节点电价上涨。当碳配额进一步收紧时,策略性主体 G5 利用自身碳排放强度较低以及碳配额总量约束造成节点电价上升这两个特点,通过报低价成为决定节点电价的边际机组中的一个,不仅能起到提高节点电价的作用,同时还能获得更多的发电量以最大化利润。此时 G5 第三段的报价为 336.35 元/MWh,而其边际成本为 367 元/MWh,报价已低于其自身边际成本,严重扰乱了电力市场运营环境,应在机制设计中尤为注意。

在 EPEC 场景中,所有的发电商都愿意参与策略性投标,提高电力市场价格,相比 MC、MPEC 场景,此时节点电价最高,其本质为一种隐性垄断情况。考虑碳市场后,节点电价保持不变,这是因为节点电价已经达到负荷投标最低价格,再提高报价策略将导致一部分负荷无法中标,机组损失中标电量,无法达到利润最大化。此时碳市场的作用主要集中在机组中标电量的重新分配上,能够促进发电商低碳竞争。



4.1.2 机组利润及竞争力分析

MC、MPEC、EPEC 三种场景下的机组利润如图 2 ~ 图 4 所示,其中情景 1 代表无碳市场,情景 2 代表有碳市场但碳配额宽松,情景 3 代表有碳市场但碳配额收紧。

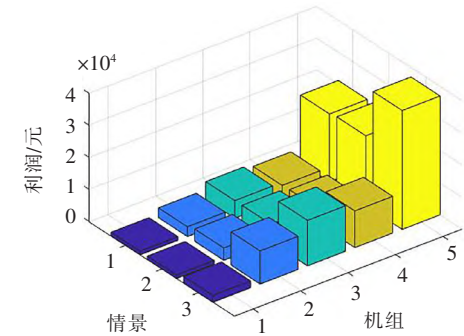


图 2 MC 场景机组利润图  
Fig. 2 Unit profit of MC scenario

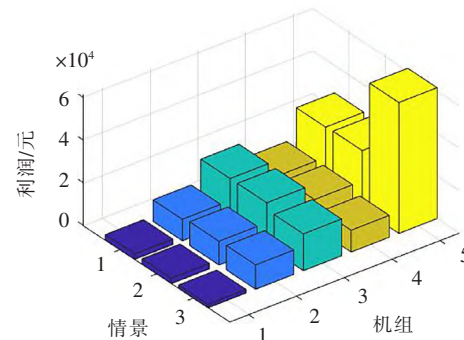


图 3 MPEC 场景机组利润图  
Fig. 3 Unit profit of MPEC scenario

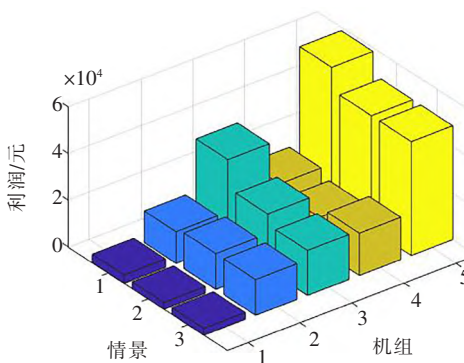


图 4 EPEC 场景机组利润图  
Fig. 4 Unit profit of EPEC scenario

在 MC 场景中,由于节点电价接近大多数机组的边际成本,因此机组的利润较低;在 MPEC 场景中,由于 G5 的策略性行为导致节点电价上涨,虽然其他机组没有策略性行为,但是它们都“搭便车”获取了更高的

利润。在 EPEC 场景中,由于所有发电商共同参与战略投标,节点电价最高,此时机组利润也最大。

考虑碳市场后,一方面是碳价导致机组边际成本排序发生改变,另一方面是碳配额总量限制了高排放机组的出力,引起机组中标量的重新分配。

碳配额宽松时,在 MC 和 MPEC 场景下,G3 均是边际机组,其利润与无碳市场时保持不变,但 G2/G4/G5 利润相比无碳市场时有所增加,这是因为它们的碳排放强度比 G3 低,节点电价上升带来的收益已经超过了碳成本,这就产生了“超边际租金 (Infra-Marginal Rent)”现象,此时需要消费者为“超边际租金”买单。因此,在机制设计中应考虑减轻碳价对电价的影响,可通过有偿拍卖配额的形式使发电商付出相应碳成本,再将拍卖收入返还社会等方式。在 EPEC 场景下,碳成本导致发电商运营成本增加,所有机组的利润都呈现下降趋势。

碳配额收紧时,由于碳配额总量约束导致节点电价上升。在 MC 场景下,机组利润都有所增加。在 MPEC 场景下,由于 G5 在市场上报比真实成本还要低的价格去抢占电量,导致 G5 利润剧增。在 EPEC 场景下,相比无碳市场时,节点电价不变,G1、G5 中标量不变,收入一致,但其需要承担碳成本导致利润减少;由于 G3 是高排放机组,中标量明显减少,导致利润下降;同时,减少的中标量转移到 G2、G4,导致其利润增多。

为了研究碳市场对提升低排放机组竞争力的能力,分析了高排放机组的中标电量情况。虽然 G1 为高排放机组,但其边际成本较低,碳价较低时在中市场中仍具备一定竞争力。因此选取 G3 的中标电量情况进行分析,相比无碳市场时,高排放机组 G3 电量减少情况如表 4 所示。可以看出,碳市场背景下高排放机组的市场竞争力得到了有效削弱,低排放机组中标量有效增多,竞争力增强。同时,碳配额宽松时低排放机组竞争力不够凸显,只有碳配额适度“收紧”,才能有效促进电力行业竞争,真正发挥碳市场的节能减排作用。

表 4 碳市场前后 G3 减少的电量表

场景	有碳市场	
	碳价 + 碳配额宽松	碳价 + 碳配额收紧
MC	56.67 MWh	100.83 MWh
MPEC	0	173.33 MWh
EPEC	56.67 MWh	123.33 MWh

## 4.2 碳价的灵敏度分析

碳配额宽松和收紧时节点电价随碳价变化的关系曲线如图 5 所示,可以发现,无论是 MC、MPEC 还是 EPEC 场景中,碳价的上涨都会导致节点电价有进一步上涨的趋势。

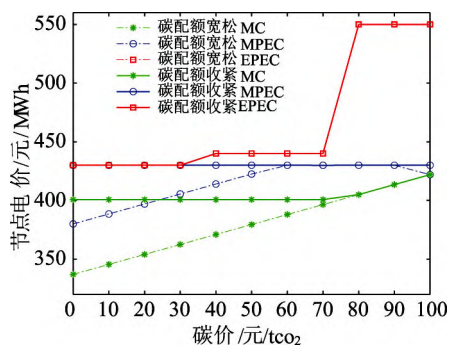


图 5 节点电价与碳价的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between nodal electricity price and carbon price

在 MC 场景中,碳配额宽松时,由于边际机组并未改变,因此节点电价与碳价之间呈现线性关系;碳配额收紧时,碳价在 0 ~ 70 元/tco<sub>2</sub> 范围内,碳配额总量约束导致节点电价上涨,碳价在 80 元/tco<sub>2</sub> ~ 100 元/tco<sub>2</sub> 范围内,机组中标量改变,此时系统碳配额总量小于 788 tco<sub>2</sub>,因此节点电价与碳配额宽松时保持一致。

在 MPEC 场景中,随着碳价逐步升高,碳配额宽松时节点电价出现了上升、保持不变、下降等情况,这是因为策略性主体为了最大化自身利润,有两种策略选择:(1)牺牲部分中标量报高价成为边际机组以抬高市场价格;(2)报比其他机组略低的成本价抢占电量,具体策略的选择取决于哪种策略下利润最大。碳配额收紧时,节点电价稳定在 430 元/MWh。此时节点电价的变化情况与碳价并不呈现一致性。

在 EPEC 场景中,无论碳配额是否宽松或收紧,节点电价随碳价变化的曲线是一致的,随着碳价逐步升高,节点电价整体呈现了上升趋势。

## 4.3 碳配额总量的灵敏度分析

节点电价随碳配额总量变化的趋势如图 6 所示。可以看出,三种场景中,随着碳配额总量逐渐收紧,节点电价都呈现上涨的趋势。碳配额总量设置过大时,低排放机组的竞争力未凸显,无法充分发挥减排作用,不利于实现低碳电力等目标。碳配额总量设置过紧时,节点电价急剧上涨,一部分负荷将无法中标,此时社会福利将显著减少,造成有发电容量剩余但却无法

供电的情况,从而出现“缺电”、“限电”等现象。因此,碳排放总量应当设置的较为合理,尽可能满足负荷的需求,同时又能约束到高排放机组的出力,促进市场主体进一步提升自身清洁效率,有效提升清洁机组竞争力,淘汰高污染机组。

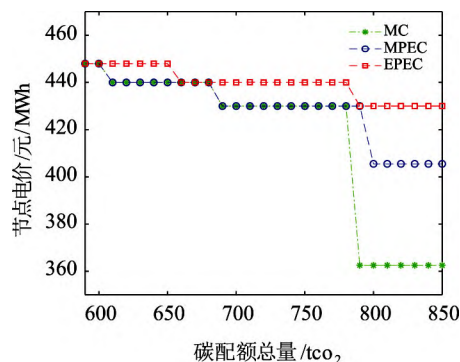


图 6 节点电价与碳配额总量的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between nodal electricity price and total carbon quota

## 5 结束语

为深入探讨碳市场对电力市场均衡状态的影响,建立了考虑碳成本、碳配额约束的电力市场双层均衡模型,本质是上层为考虑碳成本的市场主体最优决策模型,下层为考虑碳配额总量约束的电力市场出清模型的双层规划模型,并将模型线性化转为混合整数线性规划问题,有效求解了碳市场背景下的发电商最优决策与电力市场均衡状态。并基于 PJM 5 节点系统验证了模型的有效性。研究表明:

(1)考虑碳市场后,节点电价提高,用户需要承担更为昂贵的用电费用,部分机组获得超出碳成本外的额外收入,导致了“超边际租金”现象的出现,不利于市场健康发展,应在机制设计时考虑减轻碳价对电价的影响;

(2)碳配额总量灵敏度分析表明,碳配额“适度从紧”能有效提升低排放机组竞争力,促进市场竞争,实现低碳能源结构调整。但碳配额过紧将导致节点电价剧烈上涨,且造成“缺电”现象;

(3)提出的模型能有效求解碳市场背景下多种复杂市场环境下的电力市场均衡,有助于为碳市场及电力市场的协同机制设计提供有益参考。

## 参考文献

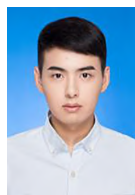
- [1] 陈皓勇. “双碳”目标下的电能价值分析与市场机制设计[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 141-150.

Chen Haoyong. Electricity Value Analysis and Market Mechanism Design



- Under Carbon-Neutral Goal[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 141-150.
- [2] Xiao D, AlAshery M and Qiao W. Optimal Price-Maker Trading Strategy of Wind Power Producer using Virtual Bidding[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021.
- [3] Guo H, Chen Q, Fang X, et al. Efficiency Loss for Variable Renewable Energy Incurred by Competition in Electricity Markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1951-1964.
- [4] Ruiz C. Equilibria in an Oligopolistic Electricity Pool With Stepwise Offer Curves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 752-761.
- [5] 石可, 陈皓勇, 李鹏, 等. 基于协同进化的两种电力市场出清机制分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 68-74.
- Shi Ke, Chen Haoyong, Li Peng, et al. Analysis on Two Kinds of Electricity Market Clearance Mechanism Based on Co-evolution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 68-74.
- [6] 刘雨梦, 陈皓勇, 黄龙, 等. 基于多群体协同进化的电力市场均衡模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 38-45.
- Liu Yumeng, Chen Haoyong, Huang Long, et al. Equilibrium model of electricity market based on multi-swarm co-evolution[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 38-45.
- [7] 王晔, 黄蒙涛, 张少华. 考虑风电投标偏差惩罚的电力市场均衡分析[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 602-607.
- [8] 张妍, 陈启鑫, 郭鸿业, 等. 引入投资决策的电力容量市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 11-18.
- [9] Li R, Wei W, Mei S, et al. Participation of an Energy Hub in Electricity and Heat Distribution Markets: An MPEC Approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3641-3653.
- [10] Wang C, Wei W, Wang J, et al. Strategic Offering and Equilibrium in Coupled Gas and Electricity Markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 290-306.
- [11] Guo H, Chen Q, Xia Q, et al. Electricity Wholesale Market Equilibrium Analysis Integrating Individual Risk-Averse Features of Generation Companies[J]. Applied Energy, 2019, 252.
- [12] Dai T, Qiao W. Finding Equilibria in the Pool-Based Electricity Market With Strategic Wind Power Producers and Network Constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 32(1): 389-399.
- [13] 张刚, 张峰, 张利, 等. 考虑碳排放交易的日前调度双阶段鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5490-5499.
- Zhang Gang, Zhang Feng, Zhang Li, et al. Two-stage Robust Optimization Model of Day-ahead Scheduling Considering Carbon Emissions Trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5490-5499.
- [14] 杨秀, 柴梓轩, 刘方, 等. 考虑热动态和碳交易的电-气-热综合能源系统协调调度[J/OL]. 电测与仪表, 1-10[2021-10-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20211014.2253.014.html>.
- Yang Xiu, Chai Zixuan, Liu Fang, et al. Coordinated scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering thermal dynamics and carbon trading[J]. Electrical Measurement & Instrumentation; 1-10[2021-10-17].
- [15] 万文轩, 冀亚男, 尹力, 等. 碳交易在综合能源系统规划与运行中的应用及展望[J/OL]. 电测与仪表; 1-12[2021-10-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210628.1605.006.html>.
- Wan Wenxuan, Ji Yannan, Yin Li, et al. Application and prospect of carbon trading in the planning and operation of integrated energy system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation; 1-12[2021-10-18].
- [16] 张立辉, 戴谷禹, 聂青云, 等. 碳交易机制下计及用电行为的虚拟电厂经济调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 154-163.
- [17] Weigt H, Ellerman D, Delarue E. CO2 Abatement from RES Injections in the German Electricity Sector: Does a CO2 Price Help[J]. Energy Economics, 2013, 40(dec. suppl. 1): S149-S158.
- [18] Anke C P, H Hobbie, Schreiber S, et al. Coal phase-outs and carbon prices: Interactions between EU emission trading and national carbon mitigation policies[J]. Energy Policy, 2020, 144: 111647.
- [19] 刘洋, 崔雪, 谢雄, 等. 电碳联动环境下考虑社会效益最优的发电权交易研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 112-117, 148.
- Liu Yang, Cui Xue, Xie Xiong, et al. Research on the trading of clean energy power generation right with the best social benefit under the electric-carbon linkage environment[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 112-117, 148.
- [20] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 等. 考虑碳排放成本的电力市场均衡分析[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1558-1563.
- [21] 张晓龙, 杜松怀, 苏娟, 等. 考虑碳排放价格的电力市场均衡分析[J]. 智能电网, 2015, 3(9): 818-822.
- Zhang Xiaolong, Du Songhuai, Su Juan, et al. Cournot Equilibrium Analysis of Electricity Markets Considering Carbon Emission Price[J]. Smart Grid, 2015, 3(9): 818-822.
- [22] Pereira M V, Granville S, Fampa M, et al. Strategic bidding under uncertainty: a binary expansion approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 180-188.
- [23] Kazempour S J, Conejo A J, Ruiz C. Strategic Generation Investment Considering Futures and Spot Markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1467-1476.

作者简介:



段声志(1996—),男,硕士研究生,从事电力市场、经济调度研究。Email:1175291880@qq.com

陈皓勇(1975—),男,教授,博士生导师,从事电力经济与电力市场、新能源发电与智能电网技术、综合能源系统与能源物联网研究。

郑晓东(1996—),男,硕士研究生,从事经济调度、电力市场研究。

收稿日期:2021-10-18;修回日期:2021-12-22

(杜景飞 编发)