

考虑碳市场与可再生能源配额制的 电能量市场交易机制优化

陈传彬

(福建电力交易中心有限公司, 福州 350108)

摘要 随着我国“双碳”目标的提出及新型电力系统的构建, 如何降低发电企业碳排放总值, 提高可再生能源发电份额, 是我国当下面临的重要问题。鉴于此, 本文对传统电能量市场交易机制进行改进, 提出一种考虑碳市场与可再生能源配额制的电力交易优化模型, 并以发电企业碳排放量最低与用户购电成本最低为目标, 使用 Cplex 求解器对该模型进行求解。将本文所提优化交易机制与传统电能量市场交易机制进行对比, 通过算例分析验证了本文优化模型对应的交易机制能够有效降低碳排放, 减少用户的购电总成本。

关键词: 碳市场交易; 配额制; 绿证交易; 电能量市场

Optimization of the trading mechanism of electric energy market considering carbon market and quota system

CHEN Chuanbin

(Fujian Power Trading Centre Co., Ltd, Fuzhou 350108)

Abstract With the proposal of China's "dual carbon" goal and the construction of a novel power system, how to reduce the total carbon emissions of power generation enterprises and increase the share of renewable energy generation is an important issue facing China at present. In this paper, the conventional electric energy market trading paradigm is improved, and an optimization model for electricity trading considering carbon markets and renewable energy quota system is proposed. The optimization model is constructed with the goal of minimum carbon emissions of power generation enterprises and minimum customer purchase cost of electricity, and the model is solved by using the Cplex solver. The optimized trading paradigm is compared with the conventional electric energy market trading paradigm, and the case analysis verifies that the optimization model corresponding to the trading paradigm in this article can well decline the carbon emission and customer purchase cost of electricity.

Keywords: carbon market trading; quota system; green certificates trading; electric energy market

0 引言

为了有效应对能源短缺和环境问题, 减少温室气体排放, 欧美发达国家将碳市场交易机制与电能量市场融合, 通过设定碳配额对企业碳排放进行约束, 从而推动节能减排, 同时实施可再生能源配额制, 融入绿色电力证书(简称“绿证”)市场交易机制, 以推动可再生能源的发展, 提高其在电力供应中的占比^[1]。

随着我国工业体系的不断完善与扩大, 温室气

体的排放量不断升高, 由此带来的经济消耗不断增大, 如何有效地制定减少碳排放的措施显得愈发迫切。从2013年起, 我国在北京、上海等7省市陆续开展了碳排放权地方交易试点工作; 2017年底, 《全国碳排放权交易市场建设方案(电力行业)》发布施行, 要求将碳排放权交易市场进行全国统一、标准化; 2021年1月, 《全国碳排放权交易管理办法(试行)》发布, 我国的碳交易体系得到初步完善, 同年7月, 我国的碳交易市场正式上线^[2]; 2024年2月, 国务院发布《碳排放权交易管理暂行条例》, 对碳市

场交易进行规范,为碳市场的运行提供了法律保护。为了能够尽快填补我国可再生能源财政补贴的缺口,刺激绿色能源消费市场的成长,2017年3月,《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》正式发布,同年7月,绿证自愿认购交易机制在我国正式上线。随后,我国又出台了一系列与可再生能源配额制相关的政策,致力于推动可再生能源的持续性发展^[3]。2024年1月,国家发改委、统计局和能源局联合发布《关于加强绿色电力证书与节能降碳政策衔接大力促进非化石能源消费的通知》,推动了绿证市场的发展,同年4月,国家能源局综合司发布《可再生能源绿色电力证书核发和交易规则(征求意见稿)》,规范了绿证市场交易规则,促进可再生能源消费。

目前,我国的碳市场、绿证市场与可再生能源消纳量交易市场仍处于初始发展阶段,机制耦合并不完善,仍面临许多挑战,如:电能市场、碳市场与绿证市场、消纳量市场的主体用户具有差别;碳市场与绿证市场机制相互独立,衔接关系较不明确,且互为认证体系仍未完善;可再生能源消纳责任权重考核较为宽松,绿证市场的价格体系仍需不断完善等^[4-5]。

为了实现可持续发展目标,推动经济结构绿色转型,我国提出了“碳达峰”与“碳中和”战略目标。对此,我国致力于适合当下现状的新型电力系统的构建,为降低二氧化碳及其他温室气体的排放量,促进电力系统脱碳,推动清洁碳能源为主导^[6-7],将碳市场、可再生能源配额制与电能量市场机制进行耦合,是有效手段之一。当前,国内外学者主要研究电能量市场与单一碳市场或绿证市场相结合的市场机制。文献[8]在电力行业买卖双方的竞价中考虑碳交易,构建二者的策略竞价双层优化模型,并通过算例分析了碳交易对电能量市场的影响。文献[9]考虑可再生能源配额制,对电能市场的交易体系进行适应性设计,以解决可再生能源配额制在我国推行时存在的问题,促进可再生能源消纳。文献[10]考虑可再生能源配额制与固定电价制,构建了一套电力市场均衡模型,通过算例分析验证了模型能够提升绿电上网效益,平衡利润和电价波动产生的风险。文献[11]以古诺竞争模型为基础,在考虑碳成本的基础上,分析电力市场均衡状态,构建模型,并通过算例分析碳排放价格对电力市场的影响。文献[12]以地方碳交易市场和阶梯碳交易机制为基础,

构建优化模型,推动多能源微电网低碳运行,降低其在电力市场所承担的经济风险。文献[13]考虑阶梯式碳交易机制,为响应综合能源需求,构建优化模型,以算例验证了该模型能有效降碳并提高运行经济性。

本文在已有研究的基础上,以碳排放与购电总成本最低为目标,将碳-绿证市场机制与电能量市场进行结合,构建一种考虑碳配额与可再生能源配额的电能量市场交易优化模型,该模型在电能量交易中考虑碳、绿证交易所带来的成本变化,各发电商以边际成本作为电价进行市场交易,使用 Cplex 求解器对本文所构建模型进行求解,引入各发电商经济技术参数,再通过算例分析,将本文模型与传统电能量市场进行对比,以验证模型减少碳排放与购电总成本的有效性。

1 碳市场-可再生能源配额制的作用机理分析

1.1 碳市场-电能量市场耦合

在碳市场中,碳配额是主要用来进行交易的产品,是指经政府有关部门核定,企业在一定时期内能够向大气中排放的温室气体总量,即企业所拥有的碳排放权利^[2]。火力发电的过程伴随着温室气体(主要为 CO₂)的排放,因此碳市场与电能量市场存在着紧密的耦合关系,将碳市场的交易机制引进电力交易中,以碳交易(购入或售出碳配额)产生的经济成本来反映各火电机组进行碳排放所付出的成本。在电力生产中考虑碳排放成本,会使各类型机组的发电份额与在市场竞争中的竞争力产生变化,如:正常情况下,传统燃煤发电的边际成本大多低于燃气发电或碳捕集机组发电,这使其在电能量市场的交易中更具优势,因而选择燃煤发电的用户更多;在考虑碳排放成本之后,传统燃煤发电相对于燃气发电或碳捕集机组发电需要付出更多碳排放成本,以致其边际成本升高,竞争力减弱,而后两者的碳排放量较少,可以将多余的碳配额于碳市场售出,从而获取利益,使边际成本降低,竞争力增强。因此,碳配额及其所对应的碳排放成本能够影响电能量市场中各发电商的竞争强度。

碳市场与电能量市场之间相互影响,使发电商的生产决策发生动态变化。碳市场-电能量市场耦合机理如图1所示,以火力发电为例,当用户电力需求增加时,电能量市场中的电价上涨,火力发电商

收益增加，机组投建加快，发电量升高，从而使电价下降，亦会使碳排放量升高，需要购入更多的碳配额，碳配额供需比降低，碳交易价格升高，从而使发电商收益减少，发电量下降，碳排放量下降，碳配额供需比升高，碳交易价格降低，进而实现动态平衡^[14]。

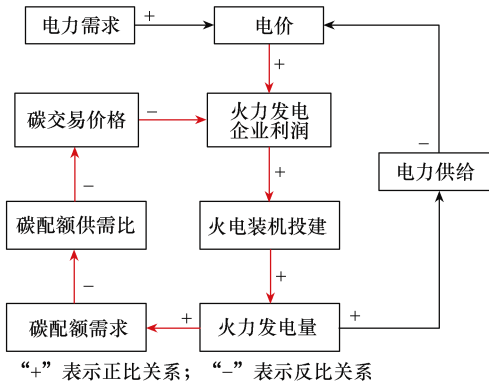


图 1 碳市场-电能量市场耦合机理

1.2 可再生能源配额制-电能量市场耦合

可再生能源配额制是指国家或地区政府以法律手段，对可再生能源应占据的市场发电份额做出硬性规定，并对无法遵循规定的发电企业予以罚款等惩罚，由此来推动可再生能源消纳的一种能源政策。售电方作为履行配额制义务的责任主体，向用电方售出电量，以完成配额制考核，再规范自身用电行为，推动可再生能源的消纳，以实现能源结构优化与可持续发展。

绿证是认定可再生能源生产、消费电量的唯一凭证，一般来说，1 本绿证表示 1MW·h 的可再生能源电力。绿证交易是与可再生能源配额制相对应的一种交易制度，其通常在绿证交易平台（绿证市场）进行，各配额制的履约主体需持有与自身应消纳的可再生能源对应的绿证数量，即通过绿证市场从新能源发电商购入，以完成配额制考核^[15]。将绿证交易所产生的经济成本考虑进发电边际成本，使发电商对生产决策做出动态调整，因此绿证市场与电能量市场存在相互影响关系。绿证市场-电能量市场耦合机理如图 2 所示，当用户的电力需求上升时，市场电价相应增加，新能源发电企业的收益增加，推动其机组投建，使发电量升高，电价相应降低，能够供给的绿证数量增加，供应逐渐过剩，导致绿证价格下降。电力需求的上升代表用户所消纳的可再生能源相应增多，导致用户需购入更多的绿证作为消纳凭证，绿证的需求量增高，绿证价格升高，进而达到价格上的动态稳定^[14]。

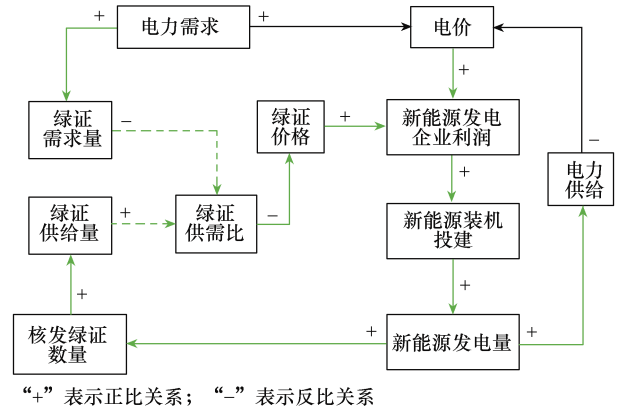


图 2 绿证市场-电能量市场耦合机理

1.3 碳市场-绿证市场耦合

通过碳市场与电能量市场、绿证市场与电能量市场之间的相关性，也可以分析出碳市场与绿证市场之间的相互影响。

碳市场-绿证市场耦合机理如图 3 所示，根据图 3 进行说明：不考虑用户用电需求变化的情况下，设定碳配额供不应求，其供需比下降，导致碳交易价格上升，火力发电商获益减少，故减少出力，用户需求不变的情况下，新能源发电商出力增加，绿证供给也相应增加，供应逐渐过剩，绿证价格下降；相对地，设定绿证供不应求，需求量增大，新能源发电商售出绿证获益增大，故增加出力以获取更多绿证，用户需求不变的情况下，火力发电商出力减少，碳排放强度相应降低，碳配额购入需求降低，导致碳交易价格下降。

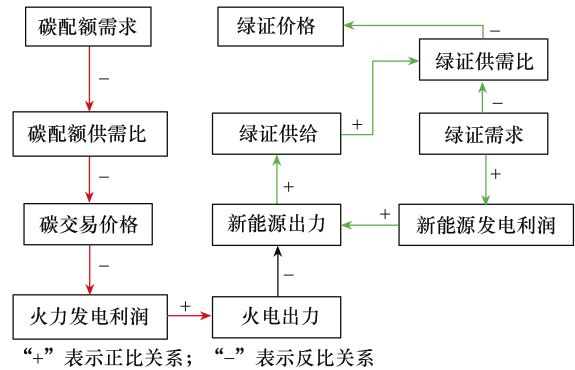


图 3 碳市场-绿证市场耦合机理

2 优化模型设计

2.1 目标函数

本文假设某地区的 K 个发电企业中，有 m 个为火力发电企业，在不考虑碳市场与可再生能源配额制的情况下，发电成本函数可近似由式(1)和式(2)表示^[16]。

$$C(P_{f,i,t}) = a_{f,i}P_{f,i,t}^2 + b_{f,i}P_{f,i,t} + c_{f,i} \quad (1)$$

式中： $C(P_{f,i,t})$ 为火力发电企业的发电成本； $a_{f,i}$ 、 $b_{f,i}$ 、 $c_{f,i}$ 为第*i*个火力发电企业产电的成本系数； $P_{f,i,t}$ 为第*i*个火力发电企业在*t*时段内的机组输出功率。

$$C(P_{w,j,t}) = a_{w,j}P_{w,j,t}^2 + b_{w,j}P_{w,j,t} + c_{w,j} \quad (2)$$

式中： $C(P_{w,j,t})$ 为可再生能源发电企业的发电成本； $a_{w,j}$ 、 $b_{w,j}$ 、 $c_{w,j}$ 为第*j*个可再生能源发电企业产电的成本系数； $P_{w,j,t}$ 为第*j*个可再生能源发电企业在*t*时段内的机组输出功率。

本文将各发电企业的边际成本作为其在电能市场中的报价，以其中的最高报价进行出清。在考虑碳市场与可再生能源配额制的情况下，将碳交易成本与绿证交易所带来的收益计入发电成本之中，得到的发电成本如式(3)和式(4)所示。

$$M_{f,i} = a_{f,i}P_{f,i,t}^2 + b_{f,i}P_{f,i,t} + c_{f,i} + p_{CO_2}q_{f,i} \quad (3)$$

式中： $M_{f,i}$ 为考虑碳排放成本的火力发电成本； p_{CO_2} 为在碳市场中购入或售出1t碳排放配额对应的价格； $q_{f,i}$ 为第*i*个火力发电企业需要购入或售出的碳排放配额（购入为+，售出为-）。

$$M_{w,j} = a_{w,j}P_{w,j,t}^2 + b_{w,j}P_{w,j,t} + c_{w,j} - p_Gq_{w,j} \quad (4)$$

式中： $M_{w,j}$ 为考虑绿证交易收益的可再生能源发电成本； p_G 为1本绿证的价格； $q_{w,j}$ 为可再生能源发电企业售出的绿证数量。

对发电成本函数进行一阶求导，得到火力发电企业边际成本（市场报价）为

$$Q_{f,i}(P_{f,i,t}) = 2a_{f,i}P_{f,i,t} + b_{f,i} + p_{CO_2} \frac{\partial q_{f,i}}{\partial P_{f,i,t}} \quad (5)$$

可再生能源发电企业边际成本（市场报价）为

$$Q_{w,j}(P_{w,j,t}) = 2a_{w,j}P_{w,j,t} + b_{w,j} - p_G \frac{\partial q_{w,j}}{\partial P_{w,j,t}} - q_{w,j} \frac{\partial p_G}{\partial P_{w,j,t}} \quad (6)$$

以碳排放量最小、购电总成本最低构建目标函数，即

$$\min F_1 = \min \left(\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T P_{f,i,t} \delta_{f,i} \right) \quad (7)$$

$$\min F_2 = \min \left\{ \sum_{t=1}^T \max_{\substack{1 \leq i \leq m \\ m+1 \leq j \leq K}} \{Q_{f,i}(P_{f,i,t}), Q_{w,j}(P_{w,j,t})\} P_{L,t} \right\} \quad (8)$$

$$Z_t = \max_{\substack{1 \leq i \leq m \\ m+1 \leq j \leq K}} \{Q_{f,i}(P_{f,i,t}), Q_{w,j}(P_{w,j,t})\} \quad (9)$$

$$\min F_3 = \alpha F_1 + \beta F_2 \quad (10)$$

式中： F_1 为碳排放量最小目标函数； $\delta_{f,i}$ 为第*i*个火力发电企业的碳排放系数； T 为电能交易总时段； F_2 为购电总成本最小目标函数； $P_{L,t}$ 为*t*时段内用户总负荷； Z_t 为*t*时段的市场出清电价； F_3 为本文模型目标函数，将上述两种目标函数进行综合考虑； α 与 β 分别为两种目标的比例系数，且 $\alpha + \beta = 1$ ，本文设定 $\alpha = 0.5$ ， $\beta = 0.5$ 。

2.2 约束条件

1) 发电企业生产的电力总值与用户总负荷相等，即

$$\sum_{i=1}^m P_{f,i,t} + \sum_{j=m+1}^K P_{w,j,t} = P_{L,t} \quad (11)$$

2) 机组输出功率约束为

$$\begin{cases} P_{f,i,\min} \leq P_{f,i,t} \leq P_{f,i,\max} \\ P_{w,j,\min} \leq P_{w,j,t} \leq P_{w,j,\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_{f,i,\min}$ 与 $P_{f,i,\max}$ 分别为火力发电机组最小、最大输出功率； $P_{w,j,\min}$ 与 $P_{w,j,\max}$ 分别为可再生能源发电机组最小、最大输出功率。

3) 对于火力发电机组，需设置一定的备用容量，以保证发电过程中的安全、稳定，相应约束^[17]为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m (P_{f,i,t} - P_{f,i,\min}) \geq P_s(t) \\ \sum_{i=1}^m (P_{f,i,\max} - P_{f,i,t}) \geq P_s(t) \end{cases} \quad (13)$$

$$P_s(t) = \lambda_{\text{Load}} P_{L,t} + \lambda_{\text{new}} \sum_{j=m+1}^K P_{w,j,t} \quad (14)$$

式中： P_s 为机组备用容量； λ_{Load} 为用户负荷的备用系数； λ_{new} 为可再生能源的备用系数。

4) 火力发电企业碳排放量的约束^[18]为

$$\begin{cases} \sum_{r=1}^D \sum_{i \in r} P_{f,i,t} \delta_{f,i} \Delta t \leq \sum_{r=1}^D \delta_r^* \sum_{i \in r} P_{f,i,t} \Delta t \\ \sum_{r=1}^D \delta_r^* \sum_{i \in r} P_{f,i,t} \Delta t \leq L_{CO_2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: δ_r^* 为区域 D 中机组类型 r 的碳配额基准系数;
 L_{CO_2} 为碳配额总量的上限值; $\sum_{r=1}^D \sum_{i \in r} P_{f,i,t} \delta_{f,i} \Delta t$ 为区域 D 的火电企业发电产生的实际总碳排放量;
 $\sum_{r=1}^D \delta_r^* \sum_{i \in r} P_{f,i,t} \Delta t$ 为区域 D 碳排放配额总量; Δt 为某个电能量交易时段。

5) 能够出售的绿证数量约束为

$$\begin{cases} 0 \leq q_{w,j} \leq \sum_{t=1}^T \gamma_G P_{w,j,t} \\ q_L \geq r_G \sum_{t=1}^T P_{L,t} \\ \sum_{j=m+1}^K q_{w,j} = q_L \end{cases} \quad (16)$$

式中: γ_G 为可再生能源发电量换算为绿证的比例系数 (本/(MW·h)); q_L 为用户实际购入的绿证数量;
 r_G 为可再生能源消纳配额系数。

6) 为保证在电能量市场中, 各火力发电企业的竞争公平性, 对碳配额基准系数的约束^[4]为

$$\begin{cases} \delta_{rmin}^* \leq \delta_r^* \leq \delta_{rmax}^* \\ -\varepsilon \leq \delta_x^* - \delta_z^* \leq \varepsilon \end{cases} \quad (17)$$

式中: δ_{rmin}^* 与 δ_{rmax}^* 分别为碳配额基准系数的最小、最大值; δ_x^* 与 δ_z^* 为两类机组对应的碳配额基准系数; ε 为碳配额基准系数差值上限。

7) 可再生能源消纳配额系数约束为

$$r_{Gmin} \leq r_G \leq r_{Gmax} \quad (18)$$

式中, r_{Gmax} 和 r_{Gmin} 分别为可再生能源消纳配额系数的最大值与最小值。

2.3 模型线性化

在目标函数式 (8) 中存在最大值变量, 对该最大值进行等效处理, 得到式 (9) 中的 Z_t 变量, 该变量满足的约束为

$$\begin{cases} Z_t - Y(1 - h_f(i)) \leq Q_{f,i,t}(P_{f,i,t}) \leq Z_t \\ Z_t - Y(1 - h_w(j)) \leq Q_{w,j,t}(P_{w,j,t}) \leq Z_t \end{cases} \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^m h_f(i) + \sum_{j=m+1}^K h_w(j) \geq 1 \quad (20)$$

式中: Y 为一个很大的常量; $h_f(i)$ 与 $h_w(j)$ 均为 0-1 变量。

式 (15) 中存在非线性项, 由于 Cplex 求解器用于求解线性模型, 故需对其进行线性化处理。以 $P_{f,i,t} \delta_r^*$ 为例, 有

$$\begin{cases} \delta_r^* = \delta_{rmin}^* + \frac{\delta_{rmax}^* - \delta_{rmin}^*}{N} \sum_{n=0}^N n y_{r,n} \\ \sum_{n=0}^N y_{r,n} = 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $y_{r,n}$ 为 0-1 变量, 用于将 δ_r^* 进行二进制展开; N 为碳配额基准系数二进制分段展开的段数。

因此, $P_{f,i,t} \delta_r^*$ 可线性化为

$$\begin{cases} P_{f,i,t} \delta_r^* = P_{f,i,t} \delta_{rmin}^* + \frac{\delta_{rmax}^* - \delta_{rmin}^*}{N} \sum_{n=0}^N n t_{r,n} \\ P_{f,i,min} y_{r,n} \leq t_{r,n} \leq P_{f,i,min} y_{r,n} \end{cases} \quad (22)$$

式中, $t_{r,n}$ 为火电机组出力与 0-1 变量的乘积, 用于将两个变量相乘的非线性项转换为满足约束的线性项。

3 算例分析

3.1 模型参数

本文模型主要考虑 5 个发电企业, 各个发电企业的技术经济参数见表 1。其中, 火电 1、2、3 为传统燃煤的火力发电企业, 火电 4 为装备了碳捕集机组的火力发电企业。 P_{min} 为机组最小功率, P_{max} 为机组最大功率, a_i 、 b_i 、 c_i 为对应发电企业的发电成本系数, δ_i 为各发电企业的碳排放系数。其他参数设置如下: 可再生能源消纳配额系数上、下限 $r_{Gmax}=1$ 、 $r_{Gmin}=5\%$, 碳配额总量上限 $L_{CO_2}=1100t$, 碳配额价格 $p_{CO_2}=60$ 元/t, 单本绿证对应价格 $p_G=50$ 元/本, 碳配额基准系数上、下限 $\delta_{rmax}^*=1.2$ 、 $\delta_{rmin}^*=0$, 备用系数 $\lambda_{Load}=0.2$ 、 $\lambda_{new}=0.05$, $\varepsilon=0.15t/(MW \cdot h)$ 。

表 1 各发电企业技术经济参数

发电企业	$P_{max}/$ MW	$P_{min}/$ MW	$a_i/$ [元/(MW·h) ²]	$b_i/$ [元/(MW·h)]	$c_i/$ 元	$\delta_i/$ [t/(MW·h)]
火电 1	700	350	0	37.00	2 765	0.850 0
火电 2	135	90	0.012 7	105.58	4 452	0.990 0
火电 3	600	300	0.017 0	225.12	9 177	0.860 0
碳捕集火电 4	350	200	0.038 1	229.15	6 111	0.087 5
风电 1	500	0	0.108 5	223.71	0	0

3.2 仿真结果分析

本文模型对单时段的电能市场交易进行分析,即交易时段设置为1h。设置碳配额基准系数为两类,火电1与3为一类,火电2与4对应另一类。

设置用户负荷 P_L 分别为2000MW、1600MW和1200MW三种情况,将在本文模型对应的优化交易机制下电能市场出清结果与传统交易机制(不考虑碳市场与配额制)下的结果进行对比分析。用户负荷为2000MW时,两种交易机制下各发电企业的边际成本如图4所示。

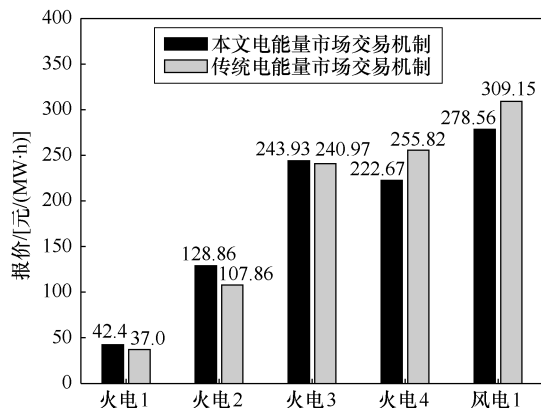


图4 两种交易机制下各发电企业的边际成本 (负荷2000MW)

从图4可以看出,在本文交易机制下,由于考虑了碳市场和配额制,火电1、2和3的边际成本(市场报价)相对于传统交易机制下分别提高了14.59%、19.47%、1.23%;带有碳捕集机组的火电4因其碳排放量较低,可以通过售出碳配额获取收益,所以边际成本降低了12.96%;风电企业可以通过售出绿证获得收益,所以风电1的边际成本降低了9.89%。火电1、2和3的报价升高,使其在相同的用户负荷需求下,在电能交易中的总出力减少,竞争能力减弱;相反,火电4与风电1的报价降低,使其在交易中的竞争能力增强。

不同交易机制下各发电企业出力、碳排放与购电总成本分别见表2、表3。对比表2和表3的结果可以看出,与传统交易机制相比,在本文交易机制下各发电企业的碳排放量及用户的购电总成本均降低。用户负荷需求分别为2000MW、1600MW和1200MW时,本文优化交易机制下的碳排放量相对于传统交易机制下的碳排放量分别减少了6.89%、11.29%和16.43%,购电总成本分别减少了9.90%、8.48%和10.09%。

表2 不同交易机制下各发电企业出力

交易机制	P_L /MW	火电1/MW	火电2/MW	火电3/MW	火电4/MW	风电1/MW
优化交易机制	2000	700.00	90	376.84	350.00	483.16
	1600	581.61	90	300.00	350.00	278.39
	1200	350.00	90	300.00	293.33	166.67
传统交易机制	2000	700.00	90	466.25	350.00	393.75
	1600	700.00	90	312.03	350.00	147.97
	1200	514.70	90	300.00	200.00	95.30

表3 不同交易机制下各发电企业碳排放与购电总成本

交易机制	P_L /MW	碳排放/t	购电总成本/万元
优化交易机制	2000	1038.8	55.71
	1600	872.1	37.46
	1200	670.3	26.37
传统交易机制	2000	1115.7	61.83
	1600	983.1	40.93
	1200	802.1	29.33

4 结论

本文通过将碳-绿证市场交易机制与电能市场交易机制结合,构建了考虑碳市场与配额制的电能市场交易机制优化模型,将本文模型的优化结果与传统电能市场交易机制进行对比,得到以下结论:

1) 在电能市场交易中考虑碳市场与配额制,可以激励碳排放量低的发电企业出力增加,约束碳排放量高的发电企业的出力,并推动常规火电企业创新,开发并应用新的减排技术,提高自身在电能市场中的竞争力。

2) 在碳市场和配额制与电能市场的耦合作用下,可再生能源的消纳量得到提高,降低了可再生能源发电企业对政府财政补助的需求,在满足用户负荷需求的前提下,有效降低了各发电企业的总碳排放量与用户的购电总成本。

本文通过算例分析验证了所提出的交易机制对减小碳排放与用户购电总成本的有效性。但是,本文所提优化模型仍存在以下不足:未考虑碳配额基准系数与可再生能源消纳配额系数变化对出清结果的影响、不同碳交易价格与绿证价格对出清结果的影响等。因此,在后续研究中将从参数的变化入手,分析参数的改变对出清结果的影响,使优化模型更加完善。

参考文献

- [1] 姚晓芳, 陈菁. 欧美碳排放交易市场发展对我国的启示与借鉴[J]. 经济问题探索, 2011(4): 35-38.
- [2] 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.
- [3] 高丽萍, 宾雪. 碳市场、绿电市场和绿证市场的相互作用机制研究: 以福建省为例[J]. 能源与环境, 2024(1): 10-13.
- [4] 江岳文, 陈巍. 电-碳-配额制耦合交易综述与展望[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 1-13.
- [5] 刘莉. “双碳”背景下绿电消费能力提升路径研究[J]. 海峡科技与产业, 2023, 36(7): 89-92.
- [6] 丁俊, 王欣怡, 邵焯楠, 等. 新型电力系统的影响因素分析[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 42-45.
- [7] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [8] 陈丽霞, 周云, 方陈, 等. 考虑碳交易的发电商和电力用户竞价博弈[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(10): 66-72.
- [9] 张翔, 陈政, 马子明, 等. 适应可再生能源配额制的电力市场交易体系研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2682-2690.
- [10] 朱继忠, 冯禹清, 谢平平, 等. 考虑可再生能源配额制的中国电力市场均衡模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 168-175.
- [11] 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.
- [12] 董雷, 李扬, 陈盛, 等. 考虑多重不确定性与电碳耦合交易的多微网合作博弈优化调度[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2635-2651.
- [13] 袁坤龙, 张少康, 常冉, 等. 阶梯式碳交易机制下计及电-气-热综合能源系统需求响应优化运行[J]. 电气技术, 2024, 25(1): 8-16.
- [14] 尚楠, 陈政, 卢治霖, 等. 电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 142-154.
- [15] 李明, 林廷康, 旷世芳, 等. 考虑可再生能源电力消纳权重的市场交易决策研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(6): 21-25, 36.
- [16] 李军徽, 邵岩, 朱星旭, 等. 计及碳排放量约束的多区域互联电力系统分布式低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4715-4728.
- [17] 董晓宁, 杨国华, 王岳, 等. 基于碳交易的含风光发电的电力系统低碳经济调度[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 67-71.
- [18] 陈巍, 江岳文. 耦合碳-绿证-消纳量市场的日前电量市场交易交互式优化[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1967-1979.
- (上接第55页)
- 设计[J]. 电工技术, 2022(7): 103-104, 107.
- [8] 任明, 夏昌杰, 余家赫, 等. 绝缘子沿面放电多光谱脉冲演化特性及诊断方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 806-817.
- [9] 闫秀章, 段友涛, 李德阁. 12kV 空气绝缘环网柜隔离断口电场分析[J]. 电气技术, 2023, 24(8): 61-64, 69.
- [10] 张丽强. 两种布置方式的12kV环保型气体绝缘环网柜设计[J]. 电气技术, 2021, 22(12): 105-108.
- [11] 冯祥伟, 张永辉, 娄源通, 等. 一种12kV双隔离干燥空气绝缘环网柜的研发[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 153-158.
- [12] 高克利, 杨圆, 周文俊, 等. SF₆替代型环保绝缘气体: 研究、应用和展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7395-7412.
- [13] 杜丽, 陆军, 潘明, 等. 局部放电的静电场仿真定量分析[J]. 电气技术, 2023, 24(5): 41-45.
- [14] 程显, 王振伟, 吕彦鹏, 等. 基于多孔隙触发的三电极场畸变开关设计与实验研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6807-6816.
- [15] 陈加明. 三工位开关断口的空气击穿电压试验研究[J]. 电工电气, 2023(9): 43-46.

收稿日期: 2024-08-02

修回日期: 2024-08-27

作者简介

陈传彬(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事电力市场研究、电力交易品种设计、电碳衔接机制研究工作。

收稿日期: 2024-10-15

修回日期: 2024-11-05

作者简介

吴昊昊(2000—), 男, 山东省日照市人, 硕士, 工程师, 主要从事配电自动化技术研究工作。