

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.06.004

面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨

Discussion on convergent trading of the carbon and electricity market on the path to carbon peak and carbon neutrality

吉斌^{1,2}, 孙绘^{1,2*}, 梁肖³, 刘妍⁴, 李凡⁴
JI Bin^{1,2}, SUN Hui^{1,2*}, LIANG Xiao³, LIU Yan⁴, LI Fan⁴

(1.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司),南京 211106;2.国电南瑞科技股份有限公司,南京 211106;
3.国网安徽省电力调度中心,合肥 230000;4.国网渭南供电公司,陕西 渭南 714000)
(1.NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute Company Limited),Nanjing 211106,China;2.NARI
Technology Company Limited,Nanjing 211106,China;3.State Grid Anhui Electric Power Dispatching Center,
Hefei 230000,China;4.State Grid Weinan Electric Power Supply Company,Weinan 714000,China)

摘要:实现“双碳”目标,提高新能源接入和消纳比例,可通过碳电市场耦合运行,促进节能减排。首先从电力市场角度出发,以节能减排为目标,分析电力市场与碳权市场的关系,探讨了碳电市场关联方式;其次根据电力市场原则和碳权核发与配额的市场机制,设计了碳电联合运行流程和模式,根据市场运行模式开展碳电联合运行的市场机制设计;最后根据设计的碳电运行模式、市场机制,开展量化的碳电市场机制验证。通过算例分析可以看出,设计的市场机制通过引导负荷侧市场主体从碳电市场响应不平衡电量,获得碳权并参与碳权市场而获得收益,从而降低火电市场主体的“热备用”容量,降低CO₂的排放,促进“双碳”目标的实现。

关键词:电力交易;碳权交易;碳电耦合;机制设计;市场融合;“双碳”目标;碳中和;碳达峰

中图分类号:TM 732;TK 01*8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)06-0033-08

Abstract: To achieve the goal of "carbon peak and carbon neutrality" and increase the access and consumption proportion of new energy, carbon market and power market are coupled to simulate energy conservation and emission reduction. From the perspective of electricity market, the relationship between electricity market and carbon emission right market and their coupling method are analyzed to meet the target of energy conservation and emission reduction. Then, according to the principles of electricity market and the allocating and issuing mechanism of carbon emission rights, a joint operation mode for carbon and power market is designed. And the correspondent market mechanism for the joint operation of carbon and electricity market is developed. Finally, according to the designed operation mode and market mechanism, a quantitative verification for carbon and electricity market is carried out. It can be seen from the examples that the market mechanism guides the load-side market entities to respond to the unbalanced electricity from electricity and carbon market, profiting from earning carbon emission rights and participating in carbon emission rights market. Thereby, the mechanism can reduce the thermal reserve capacity of power system which is dominated by thermal power units, restrict CO₂ emissions, and promote the realization of the "carbon peak and carbon neutrality".

Keywords: electricity transaction; carbon emission rights transaction; carbon and electricity coupling; mechanism design; market integration; carbon peak and carbon neutrality; carbon neutrality; carbon peak

0 引言

全球能源行业碳排放量再次刷新记录,使气候不断恶化和自然灾害频发,人类可持续发展面临新的挑战^[1-3]。我国积极履行《巴黎协定》,提出“3060双碳目标”,并针对高耗能行业和企业开展“碳达峰、碳中和”行动方案的研究和部署,其中电力行业是全国碳市场首批碳交易面向对象,需要开展碳电联合交易的市场机制探讨。

我国碳排放权交易(以下简称碳权交易)市场的研究尚处于起步阶段,主要集中在碳权交易影响因素、价格预测以及交易机制的研究^[4-9],缺少与碳权交易市场上下游业务场景的关联交易研究,很难推动“双碳”目标的实现。文献[4]以中国为案例在市场信息不对称的情况下,分析了石油对碳权配额

收稿日期:2021-04-26;修回日期:2021-05-17
基金项目:国家电网有限公司科技项目(SCTYHT/16-JS-198)

峰、碳中和”行动方案的研究和部署,其中电力行业是全国碳市场首批碳交易面向对象,需要开展碳电联合交易的市场机制探讨。

价格的影响。文献[5-6]从碳权配额机制和政策等因素对碳权市场和持续发展的影响做出分析,提出了碳权市场初期的政策影响作用较大的观点。文献[7]研究了影响碳权交易的主要因素,并以广州碳权交易试点为例进行分析。文献[8]利用最小二乘法并引入环境保护因素,对碳权交易的价格进行预测,给出了一种碳权交易价格预测方法。文献[9]研究了基于碳交易机制,权衡碳信用额的成本和生物质预处理过程的成本权衡方法,指出碳权机制对市场成本的影响。所以,需要结合当前碳权交易市场研究成果,开展碳权市场与相关业务(包括电力、钢铁、碳捕集等)市场的联合研究,满足碳权市场发展的需求,发挥市场效力。

我国电力市场的实际运行相对比较保守,但针对新挑战的电力市场研究已经由发电侧向负荷侧转移,集中式电力交易机制向分布式电力交易转变^[10-14]。文献[10-11]结合当前我国电力市场的建设情况、试点进展以及存在的问题进行了探讨和分析,为我国后续电力市场化发展和改革提供支撑。文献[12-13]结合新技术对面向负荷侧市场主体的分布式电力零售交易机制进行了研究,为纳入负荷侧市场主体的电力交易市场应用提供参考。文献[14]以维护电力市场稳定为前提,开展面向负荷侧市场主体参与电力交易的电力碳权联合交易应用的研究,但未深入研究碳权的交易机制和方式,从而指导工程实践意义不足。能源电力行业的市场化发展,为碳电市场化应用融合发展提供了市场基础和政策指导,但目前电力市场与碳权市场的交易融合运行方式尚不清晰,需要针对碳电市场的联合交易运行方式进行研究。

从以上研究可以看出,电力市场和碳权交易均处于转型的关键阶段,将两者联合共建,实现“1+1>2”的市场效益。所以,针对电力市场与碳权市场的联合方式、市场机制、市场运行模式进行探讨有一定必要性。本文围绕碳电市场联合方式、机制以及运行模式进行研究,以节能减排为前提,提出电力市场与碳权市场耦合方式;根据电力市场与碳权市场特征,提出电力市场与碳权市场的联合运行模式;结合电力交易与碳权交易的市场需求和运行模式设计了联合出清的市场机制;最后通过算例对本文所提运行模式下的交易市场机制进行验证,并进行经济性和节能减排效果的讨论。

1 碳电市场联合方式

1.1 电力市场与碳权市场的关系分析

近年来,我国电力市场快速发展,目前已经建

立中长期电力市场,正在试点运行现货市场以及调峰辅助服务市场,为更好地满足“双碳”目标的要求,未来电力市场将体现如下特点:(1)电源侧新能源发电接入比例不断提高的波动平抑任务;(2)电网侧发挥枢纽功能,提供可再生能源并网消纳的安全传输通道;(3)负荷侧改变电力负荷“刚性”特征,引导电力负荷具备“弹性”。

根据“双碳”目标的约束要求,电力系统的安全与经济调度将面临更多挑战,首先碳电市场存在不协调,主要表现在部分参与碳权市场的可再生能源无法参与电力市场,“不对称”的碳电市场的协调程度和运行效率难以满足“双碳”目标的发展;其次,针对不同类型电力市场的电力主体市场行为与碳权市场对应主体的碳权配额量缺少对应关系。而不对称的碳电市场将影响电力行业对“双碳”目标实现的进度和质量。

“双碳”目标下的电力市场与碳权市场可以通过市场耦合的方式,以碳权市场为基础,核算和交易碳权,设置电力市场的准入门槛和定价模式,将碳权价值通过电力市场形式表现出来,引导新能源装机、负荷用电以及传统发电低碳改造。

1.2 碳电市场的关联方式

碳电市场的关联方式主要有3种:直接单向关联、直接双向关联以及间接关联,如图1所示。

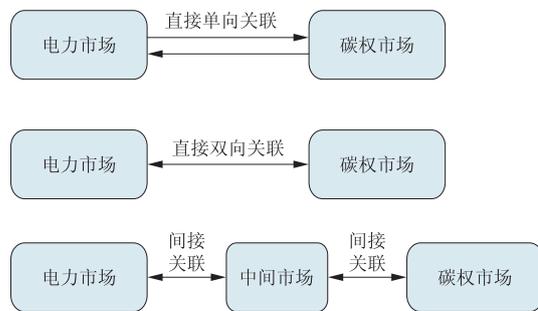


图1 碳电市场的关联方式

Fig. 1 Joint operation mode of carbon and power market

直接单向关联是指电力市场与碳权市场分别独立运行,但各自市场进行交易的过程中会接入对方市场的运行业务数据,作为本市场的交易决策数据源。例如电力交易出清匹配时,电力市场主体通过碳排放权修改电力交易出清的电价。

直接双向关联是在电力市场与碳权市场深入融合的背景下,市场主体根据碳电交易的市场机制,参与电力市场与碳权市场并进行市场业务数据的交互,满足电力市场与碳权市场联合运营的需求。

间接关联是指参与电力市场或碳权市场的市场主体在单一市场交易后,通过中间市场数据的转

换和交互权限设置,获得电力市场或碳权市场的交易参与权限。例如火电市场主体通过碳权市场交易获得火电开机的碳排放权后,才可参与下一个电力交易周期的交易电量申报。

电力市场与碳权市场的关联方式各具适用范围和特征,直接单向关联方式主要保持各市场独立运行,确保各自业务数据的安全和扩散,部署实施较为简单,但很难深入融合电力交易和碳权交易的市场;直接双向关联方式彼此开放数据交互权限,提高了电力交易与碳权交易的市场融合程度,能够丰富各自市场交易类型和交易内容,但需要做好数据权限管理和市场机制设计;间接关联方式通过中间环节(例如利用区块链的平行链方式隔离电力市场和碳权市场的敏感数据直接交互,通过跨链服务实现碳电市场融合的关键数据交互)隔离了电力市场与碳权市场之间的直接数据交互,能够解决数据安全和权限管理问题,但随着市场深入融合,数据交互效率和资源消耗都将制约市场的进一步融合。所以,电力市场与碳权市场关联的方式需要根据市场发展情况和实际数据交互需要,选择最佳的关联方式。

2 碳电市场联合运行模式设计

为深化电力市场与碳权市场的融合运行,本文以直接双向关联方式为基础开展碳电市场联合运行模式设计,交易流程如图 2 所示。

按照电力交易流程将碳电市场联合交易运行流程分为:碳电系统构建、交易发布申报、交易出清、交易执行、交易结算以及价值转移 6 个过程。

碳权系统构建主要是对电力交易系统和碳权交易系统的用户模型和系统参数更新配置,碳电交易系统的交互数据为电力交易系统提供碳权约束条件并设置参与电力交易市场主体的准入门槛;电力市场为碳权交易市场提供了发、用电用户模型,为碳权核发和配额提供依据。

在电力市场不断深化的背景下,开展电力双边市场交易有助于市场深化,即碳电交易的前提是买方发布交易需求,卖方针对需求开展交易申报。电力交易系统开放市场,准入交易的电力市场主体发布、申报电力交易,发布申报截止后将市场数据发送给碳权市场。碳权市场根据电力发布申报的信息预核发和配额对应碳权,反馈给电力市场主体。电力交易发布申报截止后,电力交易进入出清阶段,按照电力交易出清机制,分别出清电力交易成交的买卖双方的中标量价。电力交易的出清信息传输给碳权市场,碳权市场根据各市场主体的电力

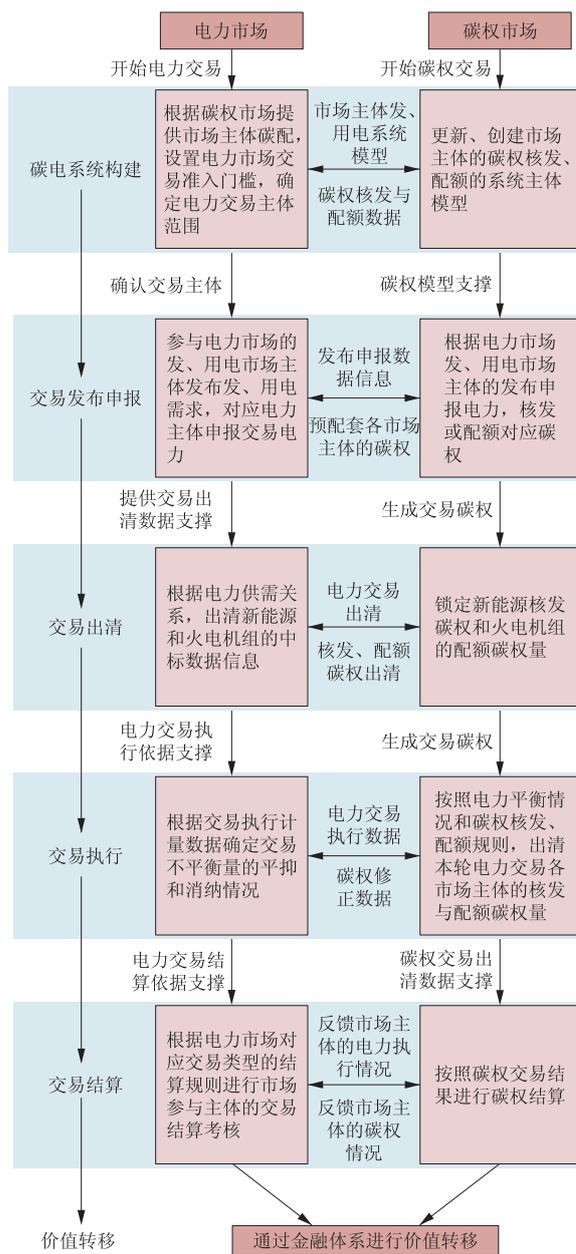


图 2 碳电市场交易流程设计

Fig. 2 Designed transaction process of carbon and power market

中标数据,按照新能源碳权核发和火电配额碳权机制锁定各市场主体的碳权量并反馈给电力交易系统对应电力出清的碳权锁定量。

电力交易的出清数据信息作为交易执行的依据,依次按照中长期、短期、日前、日内、辅助服务以及备用等市场调用规则,分别执行出清交易内容。但实际交易过程中由于发、用电偏差导致临时不平衡电量,通过备用市场或弹性负荷调度消除发、用电的实际不平衡量,并将实际执行的不平衡量及其涉及的市场主体信息传送到碳权市场。

碳权市场按照碳权核发和配额机制修正并出清本轮电力交易的各市场主体的碳权量,将出清的碳权量反馈给电力市场并开展市场主体间的碳权

交易,碳权交易结果作为结算依据分别确定各市场主体的交易费用。

电力交易执行信息按照交易结算规则确定电力市场主体的市场费用,并按照碳权市场规则反馈电力市场主体的核发与配额碳权量,为电力市场的交易准入门槛提供评估和完善的依据。接着,通过金融途径进行电力交易和碳权交易的价值转移,完成碳电联合运行。

开展碳电联合运行是将电力市场和碳权市场关联,通过交易各环节的数据交互,确保电力市场主体同时履行电力交易和碳权交易的市场义务,提高碳电市场融合度。

3 碳电市场交易机制设计

3.1 碳权市场主体交易碳权配置机制

碳电交易市场的光伏电站和火电厂的碳权配额和核发机制参考已有文件与“双碳”目标进行碳电市场联合运行的碳权配置。碳电联合运行的申报、发布、出清阶段的碳权核发与配额按照交易中标的出清电量,分别以全量核发新能源中标电量对应的碳权和按比例配额火电中标电量对应的碳权的原则执行。

当碳电交易执行与交易出清存在差异时,引入负荷侧市场主体响应新能源出力和负荷用电波动的碳权核发与配额原则为:(1)对于响应新能源出力波动,核销新能源波动电量的碳权并核发响应新能源波动电量的碳权给响应市场主体;(2)对于负荷侧电力负荷用电波动时,按照火电出力平抑负荷用电波动电量所对应的碳权量;(3)当新能源电厂过发电量时,通过售电权转让或负荷侧市场主体消纳,对应市场主体获得新能源过发电量的碳权量核发。

3.2 碳电市场交易机制

为实现“双碳”目标,新能源装机容量将进一步增加,传统火电辅助服务市场难以适应新能源出力波动和电力负荷用电波动的双重挑战。同时,传统火电市场主体的“热备用”对“双碳”目标的作用有限,需要通过更加环保的备用容量平抑新能源发电和负荷用电的波动。

随着电力市场不断深入和新技术(如区块链技术)的引入^[15-18],电力双边交易方式和弹性负荷调度越来越受到关注。本文采用双边交易方式开展市场主体之间的碳电交易,将负荷侧的电力用户纳入市场范畴。

首先,根据碳权市场的碳权核发和配额机制锁定电力出清阶段的电力市场主体预核发与配额的

碳权量;其次,结合实际电力交易的执行情况,分别修正电力市场交易的执行电量和核发与配额的碳权量。

碳电交易出清阶段锁定电力交易电量和各市场主体的碳权量,根据出清的电力交易中标信息可以确定交易市场主体的电力交易量价,同时根据锁定的碳权量和历史碳权交易供需情况可以确定碳权市场价值。

本文在基于高比例新能源接入的前提下,向负荷侧电力用户开放市场,引导电力用户参与不平衡电量的消纳,碳权市场根据参与市场不平衡电量消纳的量分别核减新能源核发量并将对应碳权核发给响应不平衡电量的市场主体。获得碳电的市场主体通过参与碳权市场将碳权销售给火电机组。获得碳权的火电市场主体按碳排放量申报发电许可并参与电力交易。碳电联合市场交易机制如图3所示。

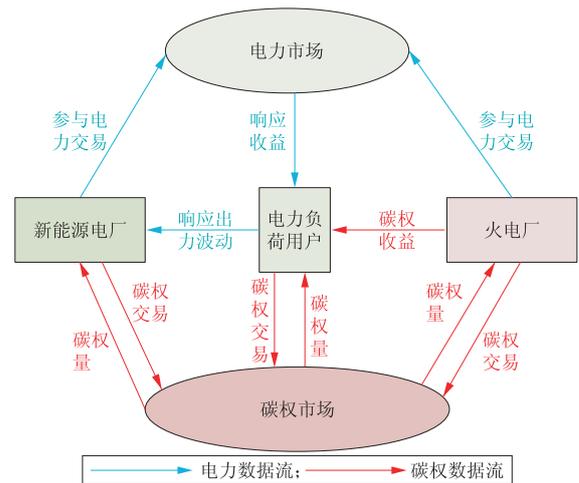


图3 碳电联合市场交易机制

Fig. 3 Trading mechanism of carbon and power market

3.3 碳电市场交易出清模型

随着电力负荷智能化水平的提升,可调控的负荷弹性功率随电力新能源装机和负荷容量呈正相关,可以为平抑新能源出力波动提供途径。响应新能源出力波动的负荷功率调节不会产生多余CO₂,是实现“双碳”目标的优质可调资源。因此本文以负荷侧电力用户响应电力供需不平衡量,参与电力市场并获得碳权量进而参与碳权市场进行市场机制设计。

响应电力不平衡量的负荷侧市场主体响应能力有限,响应调控功率约束条件如式(1)所示。市场主体该时段下调和上调的交易电量如式(2)所示。

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_{i,\text{down}}^t = \int_0^t (P_i^t - P_{i,\text{min}}) dt \\ Q_{i,\text{up}}^t = \int_0^t (P_{i,\text{max}} - P_i^t) dt \end{cases}, \quad (2)$$

式中: P_i 为市场主体 i 的负荷功率; $P_{i,\text{min}}, P_{i,\text{max}}$ 分别表示市场主体负荷正常用电的最小和最大负荷功率限制; $Q_{i,\text{down}}^t, Q_{i,\text{up}}^t$ 分别为市场主体 i 在时段 t 可下调和上调的电量; P_i^t 为市场主体 i 在时段 t 的申报负荷用电量。

弹性负荷电力响应不平衡电量的交易申报价格约束为

$$C_{\text{min}} \leq C \leq C_{\text{max}}, \quad (3)$$

式中: C 为市场主体的申报价格; $C_{\text{min}}, C_{\text{max}}$ 为市场交易申报的最低价和最高价的限制。

面向负荷侧的市场主体调控响应需要根据市场供需情况动态调整交易的结算价格,引入弹性价格,在市场主体申报价格的基础上进行出清价格的调整。电力市场和碳权市场均通过弹性价格实现市场价格的动态调整以确保市场活力,引导市场积极性。电力弹性价格和碳权弹性价格分别为

$$C_{p,T} = \frac{\left| \sum_{j=1}^n Q_{j,\text{real}} - \sum_{j=1}^n Q_{j,\text{need}} \right| \cdot C_{t-1}^p}{\varepsilon_{x1} \cdot \sum_{j=1}^n Q_{j,\text{real}}} = \frac{|\Delta Q_j| \cdot C_{t-1}^p}{\varepsilon_{x1} \cdot \sum_{j=1}^n Q_{j,\text{real}}}, \quad (4)$$

$$C_{c,T} = \frac{|\Delta T_j| \cdot C_{t-1}^c}{\varepsilon_{x2} \cdot \sum_{j=1}^n T_{j,\text{real}}}, \quad (5)$$

式中: $C_{p,T}, C_{c,T}$ 分别为弹性电价和弹性碳权价格; $\sum_{j=1}^n Q_{j,\text{real}}, \sum_{j=1}^n Q_{j,\text{need}}$ 分别为实际供电量和实际需求电量; C_{t-1}^p, C_{t-1}^c 分别为上一时段市场均衡电价和均衡碳权价格; $\sum_{j=1}^n T_{j,\text{real}}$ 为实际发电需要配套的碳权量; $\Delta Q_j, \Delta T_j$ 分别为需要负荷侧市场主体响应的电量和碳权量; $\varepsilon_{x1}, \varepsilon_{x2}$ 分别为电力市场和碳权市场的弹性因子。

实际交易动态价格等于用户申报价格与弹性价格组合,分为供过于求和供不应求2种情况,分别如式(6)、(7)所示。

$$C_{t,\text{real}} = C_s - C_T, C_T = \begin{cases} C_{p,T} \\ C_{c,T} \end{cases}, \quad (6)$$

$$C_{t,\text{real}} = C_s + C_T, C_T = \begin{cases} C_{p,T} \\ C_{c,T} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $C_{t,\text{real}}$ 为碳电实际交易出清价格; C_s, C_T 分别为市场主体参与交易的申报价格和弹性价格。

电力交易和碳权交易的双边交易费用出清模型如式(8)、(9)所示。

$$f_{p,t} = \begin{cases} \Delta Q_{i,t} \cdot C_{t,\text{real}}^i = \Delta Q_{i,t} \cdot (C_{s,i} - C_T), C_T = \begin{cases} C_{p,t} \\ C_{T,t} \end{cases} \\ \Delta Q_{i,t} \cdot C_{t,\text{real}}^i = \Delta Q_{i,t} \cdot (C_{s,i} + C_T), C_T = \begin{cases} C_{p,t} \\ C_{T,t} \end{cases} \end{cases}, \quad (8)$$

$$f_{c,t} = \begin{cases} \Delta T_{i,t} \cdot C_{t,\text{real}}^i = \Delta T_{i,t} \cdot (C_{s,i} - C_T), C_T = \begin{cases} C_{p,t} \\ C_{T,t} \end{cases} \\ \Delta T_{i,t} \cdot C_{t,\text{real}}^i = \Delta T_{i,t} \cdot (C_{s,i} + C_T), C_T = \begin{cases} C_{p,t} \\ C_{T,t} \end{cases} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $f_{p,t}$ 为市场主体 i 参与双边交易供过于求时的交易费用; $\Delta Q_{i,t}$ 为供过于求时,市场主体 i 参与交易的电量; $C_{t,\text{real}}^i$ 为市场主体 i 参与 t 时段交易的出清实际价格; $C_{s,i}$ 为市场主体 i 交易申报电价; $f_{c,t}$ 为市场主体 i 参与双边交易供不应求时的交易费用; $\Delta T_{i,t}$ 为供不应求时,市场主体 i 参与交易电量。

4 算例分析

以新能源示范园区为例,碳电市场融合交易场景的碳电市场主体包括20个负荷侧市场主体、2个光伏电站、1个火力发电直供线路,园区具备孤岛运行能力。光伏电站出力为40 MW,该时段负荷预计需求电量为80 MW。供需不平衡量为-3.12 MW,各负荷侧市场主体响应电量见表1,不足电量由火电机组提供备用服务。火电市场主体单位发电量的CO₂排放量为0.8 kg/(kW·h),电力交易的趸售价格为0.600元/(kW·h),即:分布式电力双边交易的报价范围为[0, 0.600)元/(kW·h);同理,碳权交易初始价格为0.255元/kg,分布式碳权双边交易的报价范围为[0, 0.255)元/kg。参与市场响应交易的市场主体碳权核发量和碳权交易申报价格见表2。表1、表2的用户申报价格分别以0.3960元/(kW·h), 0.18元/kg为基准值通过Python程序按照正态分布模拟交易随机报价^[3,18]。

当前市场为光伏电站发电出力不足,市场处于供不应求时,市场初期需要通过明显的价格信号引导市场主体参与响应交易,电力弹性因子取0.25,根据式(4)可得弹性电价为0.0936元/(kW·h)。按照国家碳权配额机制和碳电市场算例数据,对交易火力发电电量的95%进行碳权配额^[19],则火电需要通过碳权市场购买5.600 t碳权量,光伏电站出力波动核退2.096 t碳权量,用户实际需要核发2.496 t碳权量,所以碳权交易弹性价格根据式(5)可得0.068元/kg。结合表1、表2中的交易数据和火电备用电能转换的碳排放率,本文的发电碳排放系数为0.8 kg/(kW·h),可以得到图4所示的各响应市场主体的响应电量与减排CO₂的量的关系。

表 1 负荷侧市场主体响应电量及申报价格

Tab. 1 Load-side market entities' respond to electric power and its bidding price

序号	市场主体	响应电量/(kW·h)	申报价格/(元·kg ⁻¹)
1	f ₁	0.125	0.396
2	f ₂	0.213	0.389
3	f ₃	0.330	0.390
4	f ₄	0.101	0.389
5	f ₅	0.090	0.399
6	f ₆	0.180	0.401
7	f ₇	0.241	0.397
8	f ₈	0.030	0.394
9	f ₉	0.510	0.389
10	f ₁₀	0.020	0.388
11	f ₁₁	-0.160	—
12	f ₁₂	0.345	0.421
13	f ₁₃	0.110	0.419
14	f ₁₄	-0.140	—
15	f ₁₅	-0.200	—
16	f ₁₆	0.280	0.409
17	f ₁₇	0.223	0.385
18	f ₁₈	0.179	0.394
19	f ₁₉	0.030	0.387
20	f ₂₀	0.113	0.379

表 2 负荷侧市场主体碳权核发量及碳权交易申报价格

Tab. 2 Issuance of carbon emission rights made by load-side market entities and its bidding price

序号	市场主体	碳权核发量/kg	碳权交易申报价格/(元·kg ⁻¹)
1	f ₁	100.0	0.249
2	f ₂	170.4	0.249
3	f ₃	264.0	0.251
4	f ₄	80.8	0.255
5	f ₅	72.0	0.255
6	f ₆	144.0	0.251
7	f ₇	192.8	0.259
8	f ₈	24.0	0.260
9	f ₉	408.0	0.257
10	f ₁₀	16.0	0.256
11	f ₁₁	—	—
12	f ₁₂	276.0	0.259
13	f ₁₃	88.0	0.256
14	f ₁₄	—	—
15	f ₁₅	—	—
16	f ₁₆	224.0	0.257
17	f ₁₇	178.4	0.258
18	f ₁₈	143.2	0.254
19	f ₁₉	24.0	0.252
20	f ₂₀	90.4	0.253

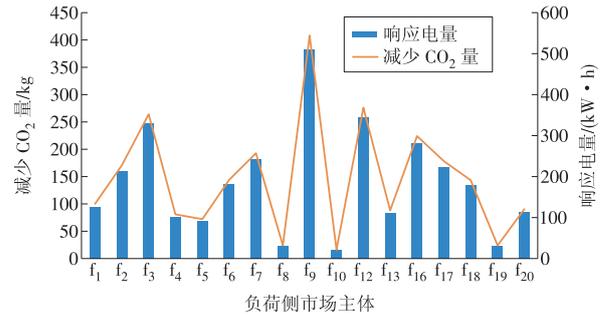


图 4 负荷侧市场主体的响应电量与减排 CO₂ 的关系

Fig. 4 Relationship between load-side market entities' response electricity and reduced carbon emission

由图 4 可以看出,在光伏电站高比例接入时,引入负荷侧市场主体参与不平衡电量的响应,通过市场交易锁定弹性负荷的可调负荷容量,降低火电市场主体的“热备用”比例,可减少 CO₂ 的排放量。

根据负荷侧市场主体响应不平衡电量的情况,按照 3.3 节的交易出清模型,可以得出各市场主体参与交易的响应电量与电力交易收益、碳权交易收益以及总收益的关系,如图 5 所示。

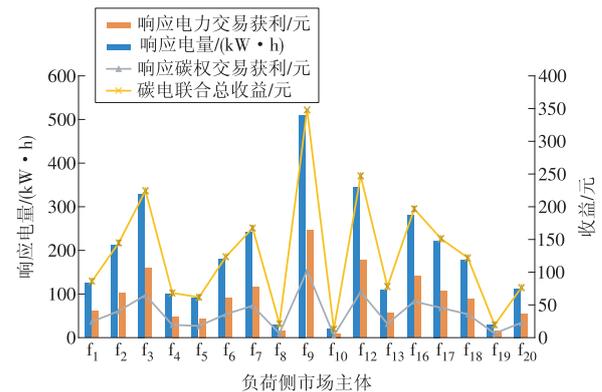


图 5 负荷侧市场主体参与交易的响应电量与电力交易收益、碳权交易收益以及总收益的关系

Fig. 5 Relationship between load-side market entities' response electricity, profit from carbon emission rights transaction and total revenue

从整体来看,市场机制满足负荷侧市场主体响应越多不平衡电量,就将获得越多碳电市场交易收益的市场规律。同时,引导负荷侧市场主体参与不平衡电量的响应,可以为负荷侧市场主体带来参与电力市场和碳权市场的收益,引导负荷侧市场主体有序、可控地负荷用电。

配电侧负荷侧市场主体的电力交易和碳权交易以双边交易的方式开展,市场主体按照自身情况报量报价,但需要承担交易匹配不成功导致的后果。市场交易的买、卖方收益情况如图 6 所示。

负荷侧市场主体的碳电收益与响应电量的比值相对于以 0.396 元/(kW·h) 的电力交易申报价格而言,通过本方案为负荷侧市场主体带来了市场供

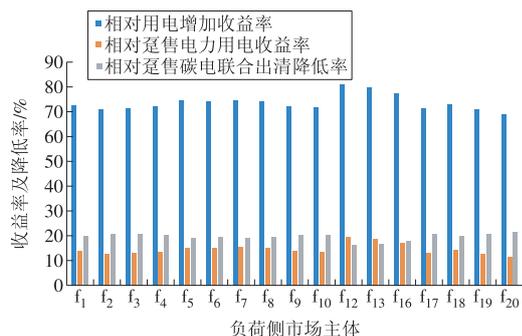


图6 市场交易的买、卖方收益情况

Fig. 6 Returns of the buyers and sellers

需不平衡的弹性价格收益、碳权市场收益等,为负荷侧市场主体相对用电增加了较高的收益。相对于趸售碳电联合交易 $0.855 \text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,通过设置交易申报限价,降低了碳电买方的费用,即通过双边市场的直接交易方式提高卖方收益和买方费用。

相对于卖方,负荷侧的买方有 f_{11}, f_{14}, f_{15} 3个市场主体。相比直接参与趸售市场,电力用户的费用均有一定降低,维护了电力用户的利益。负荷侧买方市场主体参与分布式交易的费用降低率如图7所示。

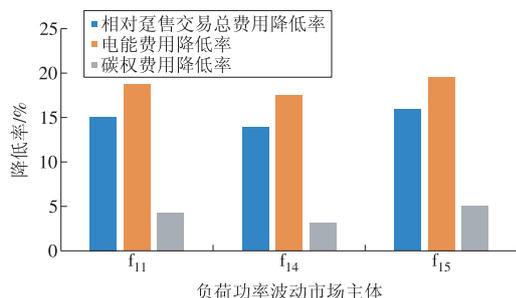


图7 负荷侧买方市场主体参与分布式交易的费用降低率

Fig. 7 Cost reduction of the market entities on load side for participating in distributed transactions

根据碳电联合交易出清市场机制,通过市场方式引导不平衡电量的消纳,消纳了不足的 3.12MW 电量及火电市场主体对应的 2.496t CO_2 排放,从而通过碳电联合市场的建设实现新能源高比例安全接入和减排目标。

5 结论

结合电力市场化与“双碳”目标的要求,分别将电力交易与碳权交易相耦合,论述了碳电交易的运行流程和方式,并提出面向负荷侧市场主体的分布式电力交易机制。通过算例量化分析,光伏电站大量接入以后,响应光伏电站发电出力波动的负荷侧市场主体将获得低价使用光伏电站发电的低成本红利,同时可以通过参与试产交易获得电力和碳权的交易补贴,从而进一步降低有序用电的市场主体

费用,引导负荷侧积极响应电力系统的不平衡电量,增加可调度的“绿色”弹性负荷资源。为电力市场与碳权市场的联合运行机制设计提供研究参考。

但目前电力市场和碳权市场还处于初级阶段,两者的市场联合运行方式和机制仍需要相关部门明确和支撑,包括:(1)负荷侧市场主体响应不平衡电量的市场机制设计;(2)碳权的核发与配额机制设计;(3)碳电市场联合运行的牵头单位或组织;(4)碳电联合运行市场交易各环节的价格区间确定和论证等问题。

参考文献:

- [1]何建坤.《巴黎协定》新机制及其影响[J].世界环境,2016(1):16-18.
HE Jiankun. New mechanism and influence of “Paris Agreement”[J].World Environment,2016(1):16-18.
- [2]邹骥,黄婷婷.履行《巴黎协定》要保持战略定力[N].中国环境报,2017-06-12(3).
- [3]吉斌,昌力,陈振寰,等.基于区块链技术的电力碳排放权交易应用与市场机制设计[J/OL].电力系统自动化:1-15 [2021-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210209.1701.010.html>.
- [4]JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading[J/OL].Automation of Electric Power Systems:1-15 [2021-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210209.1701.010.html>.
- [4]ZHENG Y, ZHOU M, WEN F H. Asymmetric effects of oil shocks on carbon allowance price: Evidence from China[J]. Energy Economics, 2021, 97. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105183.
- [5]LIU B L, SUN Z Q, LI H H. Can carbon trading policies promote regional green innovation efficiency? Empirical data from pilot regions in China[J].Sustainability, 2021, 13(5):2891.
- [6]LUO W, ZHANG Y R, GAO Y L, et al. Life cycle carbon cost of buildings under carbon trading and carbon tax system in China[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 66. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102509.
- [7]刘逸飞.我国碳排放权市场影响因素分析——以广州碳排放权交易所为例[J].中国林业经济,2021(1):79-82.
LIU Yifei. Analysis on the influencing factors of China's carbon emissions market——Taking Guangzhou carbon emissions exchange as an example [J]. China Forestry Economics, 2021(1):79-82.
- [8]MEMARI Y, MEMARI A, EBRAHIMNEJAD S, et al. A mathematical model for optimizing a biofuel supply chain

- with outsourcing decisions under the carbon trading mechanism [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021. DOI:10.1007/s13399-020-01264-1.
- [9] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 电力现货市场建设进展与关键问题[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 3-15.
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. The progress and key issues of electric power spot market construction [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 3-15.
- [10] 朱峰, 刘力涵. 电力现货市场首批试点地区建设情况分析[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(2): 74-78, 94.
ZHU Feng, LIU Lihan. Analysis of the construction of the first batch of pilot areas in the power spot market [J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(2): 74-78, 94.
- [11] 吉斌, 谭建成. 利用区块链技术的配电侧分布式微电能交易初探[J]. *现代电力*, 2019, 36(1): 29-36.
JI Bin, TAN Jiancheng. A preliminary study on distributed micro-electricity transactions on the distribution side using blockchain technology [J]. *Modern Electric Power*, 2019, 36(1): 29-36.
- [12] 吉斌. 基于区块链技术的产消用户电力零售交易机制与模式研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [13] 吉斌, 刘妍, 朱丽叶, 等. 基于联盟区块链的电力碳权交易机制设计[J]. *华电技术*, 2020, 42(8): 32-40.
JI Bin, LIU Yan, ZHU Liye, et al. Design of carbon emission permit trading mechanism in power industry based on consortium blockchain [J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(8): 32-40.
- [14] 吉斌, 莫峻, 谭建成. 高比例光伏电能产消群电力需求响应机制设计[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3315-3323.
JI Bin, MO Jun, TAN Jiancheng. Design of power demand response mechanism for high proportion of photovoltaic prosumer [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3315-3323.
- [15] 王胜寒, 郭创新, 冯斌, 等. 区块链技术在电力系统中的应用: 前景与思路[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(11): 10-24.
WANG Shenghan, GUO Chuangxin, FENG Bin, et al. Application of blockchain technology in power systems: Prospects and ideas [J]. *Automation of Electric Power System*, 2020, 44(11): 10-24.
- [16] 崔树银, 陆奕, 常啸. 考虑信用评分机制的电力碳排放交易区块链模型[J]. *电力建设*, 2019, 40(1): 104-111.
CUI Shuyin, LU Yi, CHANG Xiao. Research on model of blockchain - enabled power carbon emission trade considering credit scoring mechanism [J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(1): 104-111.
- [17] 曾诗钦, 霍如, 黄韬, 等. 区块链技术研究综述: 原理、进展与应用[J]. *通信学报*, 2020, 41(1): 134-151.
ZENG Shiqin, HUO Ru, HUANG Tao, et al. Survey of blockchain: Principle, progress and application [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(1): 134-151.
- [18] 碳排放为什么应该是 200 - 300 元每吨? [EB/OL]. (2017-05-26) [2021-05-15]. <http://www.tanpaifang.com/tanguwen/2017/0526/59500.html>.
- [19] 杜娟. 广东 2019 年碳排放配额 4.65 亿吨 电力企业的免费配额比例为 95% [EB/OL]. (2019-11-04) [2021-05-15]. <http://news.bjx.com.cn/html/20191104/1018158.shtml>.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

吉斌(1992—), 男, 安徽当涂人, 工程师, 工学硕士, 从事电力市场、电力自动化调度以及区块链应用融合技术方面的研究(E-mail: 1498206259@qq.com)。

孙绘*(1993—), 男, 江苏淮安人, 工学硕士, 从事区块链技术与应用以及软件研发方面的工作(E-mail: sunhui@88.com)。