

基于P2P的碳市场交易模型及电碳联合出清方法

曾 慧¹, 王美艳², 李 涛¹, 段丽娟², 孙开元¹, 夏 天²

(1. 广东电网有限责任公司 广州供电局, 广州 510620; 2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 围绕电力行业的低碳发展需求, 针对目前电力市场和碳市场存在未能协调运行的问题, 设计一种电碳联合P2P交易机制, 通过引入电力P2P交易, 给予用户和发电商调动自身灵活性的空间, 为火电企业提供碳减排服务的同时, 促进新能源消纳, 提高各参与主体的效益。同时, 分析了传统电力市场以及在引入P2P交易和碳市场机制的交易模式下参与主体的效益变化情况。根据设计机制的需求, 建立电碳联合市场出清模型, 并通过设计算例进行模拟, 分析该交易机制的可行性和有效性。

关键词: P2P; 碳交易; 电力市场; 电碳联合

P2P-based carbon market trading model and electric carbon joint clearing method

ZENG Hui¹, WANG Meiyang², LI Tao¹, DUAN Lijuan², SUN Kaiyuan¹, XIA Tian²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Focusing on the low-carbon development needs of the power industry and aiming at the problem that the current power market and carbon market can't coordinate operation, an electricity carbon joint P2P trading mechanism-by introducing electricity P2P trading is designed, it gives users and power generators room to mobilize their flexibility, and provides carbon emission reduction services for thermal power enterprises. At the same time, it helps to promote the consumption of new energy and improve the benefits of all participants. The changes of the benefits of participants in the traditional power market and the trading mode after the introduction of P2P trading and carbon market mechanism is analyzed. According to the demand of the design mechanism, the clearing model of the electricity carbon joint market is established, and the feasibility and effectiveness of the trading mechanism are analyzed through the simulation of a design example.

Key words: P2P; carbon trading; electricity market; electric carbon combination

0 引言

全国碳交易市场的建立是实现“双碳”目标的一项重要举措, 电力行业是最先被纳入碳减排管理的行业。国内的试点碳交易市场运行多年, 证明了碳交易机制对碳减排的积极作用。研究碳市场与电市场之间的关系, 如何实现两个市场的联合对电力行业碳减排的推进具有重大意义。

当前对碳交易的研究有些只集中在碳市场本身, 包括碳配额的初始分配方式、碳配额定价、交易机制、碳交易的减排效率等方面^[1-2]。有些文献分析了碳交易可能对电力行业产生的影响, 文献[3-4]研究了考虑碳交易成本情况下电力系统优化调度策略。在碳权交易与电力市场结合方面, 文献[5]研究碳交易方案设计、配额分配方式对电力

行业发电投资、可再生能源和电价的影响。

虽然碳交易机制通过改变火电在发电时的成本影响电力市场的电价, 然后将一部分成本转移给用户, 但是电力用户在这一过程中只是被动地接受, 不会主动考虑碳减排。新能源同样只是因为电价变化而获得一定优势, 本身并没有发挥主动性, 造成参与主体主动性差, 配额使用无序, 使得碳市场的作用被削弱。因此推进电力市场化和碳市场建设及两者之间的协调是未来发展的需求^[6]。国内外已有一些研究者将电市场和碳市场进行联合, 建立联合市场机制或模型。文献[7-8]设计了一种耦合电力交易的碳权交易市场机制, 并在此基础上设计了一种基于联盟链、区块链技术的碳权交易应用。文献[9]提出了一个完全去中心化的基于区块链的P2P交易方案, 文献[10]研究了分布式光伏市场和碳市场联合运行机制。文献[11]提出了电碳联合市场模型, 研究电价、碳价与发电量之间的关系。文献[12]考虑了产消者参与的未来能源系统,

制定相应的低碳定价激励方案。

对于如何使用者和新能源这两个不产碳的主体参与到低碳中来,目前的碳市场和电力市场都不具备这样的功能,需要考虑建立一个新的市场机制,即在传统电力市场的基础上引入电力点对点(point to point, P2P)交易, P2P交易是指允许生产者与消费者不通过中介,直接交易过剩能源的方式,让用户和可再生能源发电商可以直接交易互动,同时也可以和电网进行交易,通过收益激励用户和可再生能源发电商主动参与碳交易,增加生产者和消费者参与能源市场的积极性和灵活性。再建立一个交易碳减排服务的市场,考虑设计电-碳联合市场,能够帮助火电厂实现碳实时平衡,同时也兼顾电平衡。

为有效协调电、碳两个市场,进一步控制碳排放,本文设计了一种电碳联合P2P交易机制,该交易模式将电力用户和可再生能源发电商的碳配额聚集起来通过电力市场和碳市场销售给火电企业,给与电力用户和可再生能源发电商调动自身灵活性的空间,为火电提供碳减排服务,同时促进新能源消纳,提高参与主体的效益。分析传统电力市场,以及在引入P2P交易和碳市场机制后的不同交易模式下参与主体的效益变化,根据设计机制的需求,建立电碳联合市场的出清模型。

1 电碳联合P2P交易机制设计

1.1 电碳联合P2P交易模式

本文所提出的电碳联合P2P交易模式是一种传统电力交易+电力P2P交易+碳交易+碳减排服务的交易模式。碳交易下火电需要考虑碳排放成本,增加了火电的发电成本。P2P交易的引入使得参与者有了更多的灵活性和主动性,也使得挖掘用户和新能源的碳减排空间有了可能,碳减排服务交易市场就是建立在这样的基础上建立的。碳减排服务交易使得用户可以主动参与到碳减排中,主动调动自身灵活性进行响应。这进一步改变了参与者盈利模型,火电可以通过购买减排服务减少碳成本,新能源和用户可以通过提供服务获取更多收益,同时促进新能源消纳。

(1) 火电厂

$$F_{Ti} = F_{1,Ti} - F_{2,Ti} - F_{3,Ti} - F_{4,Ti} \quad (1)$$

$$F_{1,Ti} = \alpha_{gi} P_{Gi}^{\text{grid}} + \sum_k \alpha_{ik} P_{ik} \quad (2)$$

$$F_{2,Ti} = \pi_i \left(P_{Gi}^{\text{grid}} + \sum_k P_{ik} - \sum_k S_{ik} - \sum_j S_{ij} \right) \quad (3)$$

$$F_{3,Ti} = c \left(\mu_i \left(P_{Gi}^{\text{grid}} + \sum_k P_{ik} - \sum_k S_{ik} - \sum_j S_{ij} \right) - E_i \right) \quad (4)$$

$$F_{4,Ti} = \sum_k \lambda_{ik} S_{ik} + \sum_j \lambda_{ij} S_{ij} \quad (5)$$

式中: F_{Ti} 为火电机组总效益; $F_{1,Ti}$ 为售电收益; $F_{2,Ti}$ 为发电成本; $F_{3,Ti}$ 为购买配额成本或出售配额收益; $F_{4,Ti}$ 为服务购买成本; P_{Gi}^{grid} 为销售给电网的电量; α_{gi} 为成交价格; P_{ik} 为销售给用户的电量; α_{ik} 为成交价格; π_i 为火电机组单位发电成本; S_{ik} 为火电机组 i 与用户 k 的成交服务量; λ_{ik} 为成交价格; S_{ij} 为火电机组 i 与风光机组 j 的成交服务量; λ_{ij} 为成交价格; c 为碳市场上的碳配额价格; μ_i 为火电机组 i 的单位电量碳排放强度; E_i 为火电机组 i 计划使用的已持有的配额。

(2) 新能源(风电、光伏)

$$F_{Ri} = F_{1,Ri} + F_{2,Ri} \quad (6)$$

$$F_{1,Ri} = \alpha_{gj} P_{Gj}^{\text{grid}} + \sum_k \alpha_{jk} P_{jk} \quad (7)$$

$$F_{2,Ri} = \sum_j \lambda_{ij} S_{ij} \quad (8)$$

式中: F_{Ri} 为风光机组总效益; $F_{1,Ri}$ 为风光机组售电收益; $F_{2,Ri}$ 为风光机组提供服务的收益; P_{Gj}^{grid} 为风电机组销售给电网电量; α_{gj} 为成交价格; P_{jk} 为风电机组销售给用户电量; α_{jk} 为成交价格; S_{ij} 为火电机组 i 与风光机组 j 的成交服务量; λ_{ij} 为成交价格。

(3) 用户

$$F_{dk} = -F_{1,Dk} + F_{2,Dk} \quad (9)$$

$$F_{1,Dk} = \beta_{gk} P_{Dk}^{\text{grid}} + \sum_i \alpha_{ik} P_{ik} + \sum_j \alpha_{jk} P_{jk} \quad (10)$$

$$F_{2,Dk} = \sum_i \lambda_{ik} S_{ik} \quad (11)$$

式中: F_{Dk} 为用户总效益; $F_{1,Dk}$ 为用户购电成本; $F_{2,Dk}$ 为用户提供服务的收益; P_{Dk}^{grid} 、 P_{ik} 、 P_{jk} 分别为用户从电网、火电机组、风光机组购买的电量; β_{gk} 、 α_{ik} 、 α_{jk} 为成交价格; S_{ik} 为火电机组 i 与用户 k 的成交服务量; λ_{ik} 为成交价格。

碳减排服务使得火电厂需要发的电量减少,配额价格过高造成的效益损失也就减少。用户在传统电力市场下自身的灵活性只能用于被动地根据电价调节以减少购电成本,自身灵活性不能充分发挥作用。电力P2P交易和碳减排服务交易市场的建立使得用户可以主动提供服务,和火电进行互动,辅助减碳并增加自身收益。用户灵活性也就具备了更多的功能,用户可以选择投入成本更多以获取

更高的灵活性来提供服务,进一步促进碳减排。新能源弃风弃光问题也能得到更好改善,对新能源的发展也更加有利。

1.2 电碳联合出清模型

根据前面设计的机制需求,交易以P2P的方式进行,交易双方都报量报价,模型参考文献[13]中的P2P交易出清模型。同时出清电和碳减排服务,得到对应的成交量和成交价格。目标函数是整体效益最大。因为火电、新能源(风电、光伏)和用户在电市场和碳减排服务市场上的角色不同,在电市场中火电和新能源是供给方,用户是需求方,在碳减排服务市场上火电是需求方,新能源和用户是供给方。所以交易模型中对这3个群体作了区分,目标函数为3个群体的效益相加。其中 i 为火电机组, j 为新能源, k 为电力用户。模型如下

$$\begin{aligned} \max f = & \sum_i^I \left(-\alpha_i \sum_k^K P_{ik} - \gamma_i \left(\sum_j^J S_{ij} + \sum_k^K S_{ik} \right) \right) + \\ & \sum_j^J \left(-\alpha_j \sum_k^K P_{jk} - \lambda_j \sum_i^I S_{ji} \right) + \\ & \sum_k^K \left(-\beta_k \left(\sum_i^I P_{ki} + \sum_j^J P_{kj} \right) - \lambda_k \sum_i^I S_{ki} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: f 为整体效益; I 为参与交易的火电机组的数目; J 为新能源机组的数目; K 为用户数目; α_i 为火电机组 i 售电报价; γ_i 为火电机组 i 购买成交的服务报价; α_j 为新能源机组 j 售电报价; λ_j 为新能源机组 j 出售服务的报价; β_k 为用户 k 的购电报价; λ_k 为用户 k 出售服务的报价。

P_{ik} 为火电机组 i 向用户 k 的出售成交的电量, P_{ki} 为用户 k 向火电机组 i 购买成交的电量; P_{jk} 为新能源机组 j 向用户 k 的出售成交的电量, P_{kj} 为用户 k 向新能源机组 j 购买成交的电量; S_{ik} 为火电机组 i 向用户 k 的购买成交的服务量, S_{ki} 为用户 k 向火电机组 i 的出售成交服务量; S_{ij} 为火电机组 i 向新能源机组 j 的购买成交的服务量, S_{ji} 为新能源机组 j 向火电机组 i 的出售成交的服务量。以上出售和购买的成交量大小应该相等,一个为正,一个为负(这一点将在取值约束中体现),两者之和为0,构成互易约束,互易约束的拉格朗日乘子即为对应的成交价格。相当于传统出清模型中的平衡约束。

出售和购买的成交量受上下限约束,如式(13)一式(18)

$$P_i^{\min} \leq \sum_k^K P_{ik} \leq P_i^{\max} \quad (13)$$

$$P_j^{\min} \leq \sum_k^K P_{jk} \leq P_j^{\max} \quad (14)$$

$$0 \leq \sum_i^I P_{ki} + \sum_j^J P_{kj} \leq P_k^{\max} \quad (15)$$

$$0 \leq \sum_k^K S_{ik} + \sum_j^J S_{ij} \leq S_i^{\max} \quad (16)$$

$$0 \leq \sum_i^I S_{ji} \leq S_j^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq \sum_i^I S_{ki} \leq S_k^{\max} \quad (18)$$

式中: $P_i^{\max}$ 、 $P_i^{\min}$ 分别为火电发电机组的出力上、下限; $P_j^{\max}$ 、 $P_j^{\min}$ 分别为新能源机组出力上、下限,因为成交量需要小于等于申报电量,所以这里取值为申报电量。用户成交量也要小于等于申报电量, $P_k^{\max}$ 取值为用户的申报电量; $S_i^{\max}$ 为火电机组向新能源机组购买服务量的上限; $S_j^{\max}$ 为新能源机组向火电机组出售服务量的上限; $S_k^{\max}$ 为用户向火电机组出售服务量的上限。

火电机组受爬坡速率约束,如下式

$$-D_i \leq P_{i,t-1} - \left(P_i^B - \left(\sum_k^K S_{ik} + \sum_j^J S_{ij} \right) \right) \leq R_i \quad (19)$$

式中, R_i 和 D_i 分别为火电机组 i 的上爬坡速率和下爬坡速率; P_i^B 为火电的申报电量。

提供服务的用户只能是购买了火电的用户,能提供的服务量取决于用户和火电成交了多少电量,取值约束中除了正负取值约束还有成交量与服务量的取值约束,如式(20)一式(24)

$$S_{ik} \leq 0, S_{ij} \leq 0 \quad (20)$$

$$S_{ji} \geq 0, S_{ki} \geq 0 \quad (21)$$

$$P_{ik} \geq 0, P_{jk} \geq 0 \quad (22)$$

$$P_{ki} \leq 0, P_{kj} \leq 0 \quad (23)$$

$$P_{ik} \geq S_{ki} \quad (24)$$

联合出清模型兼顾两个市场的整体效益,同时电和碳减排服务的成交量之间存在耦合约束,这使得成交结果可能出现卖价高于买价的匹配结果,这不符合卖家的利益,需要通过价格约束来限制,如式(25)一式(28)

$$(\beta_k - \alpha_i) P_{ik} \geq 0 \quad (25)$$

$$(\beta_k - \alpha_j) P_{jk} \geq 0 \quad (26)$$

$$(\gamma_i - \lambda_k) W_{ki} \geq 0 \quad (27)$$

$$(\gamma_i - \lambda_j) W_{ji} \geq 0 \quad (28)$$

电碳联合出清模型将电力和服务的供求双方一一匹配,火电能够表达自己的碳减排需求,用户和新能源能够表达自己的灵活性以及自己期望的收益。兼顾了整体的效益和个体的意愿。不同于传统电力交易中用户只能被动接受价格。

2 算例分析

2.1 基础数据

本算例模拟设计的电碳联合 P2P 交易,通过出清模型得到交易结果,再计算各参与主体的效益、碳排放量以及新能源消纳量,并与无服务市场的交易机制进行对比。算例包含 2 个火电、1 个风电、1 个光伏、4 个电力用户,各节点设备的网络结构如图 1 所示,其中机组参数如表 1 所示。

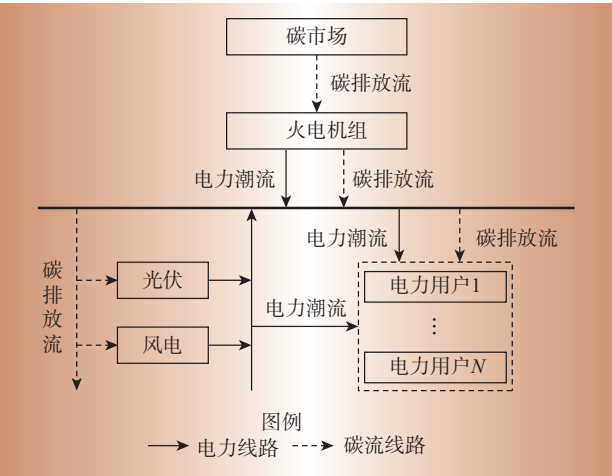


图1 节点设备网络结构

Fig. 1 Node equipment network structure

表1 机组参数

Table 1 Unit parameters

机组	出力 下限/ $P_{Gi}^{\min}$	出力 上限/ $P_{Gi}^{\max}$	发电成本/ ($t \cdot MW^{-1}$)	单位电量 碳排强度/ ($t(CO_2) \cdot MW^{-1}$)	机组 爬坡率/ ($MW \cdot h^{-1}$)
火电 1	20	80	170	1.1	15
火电 2	10	70	160	1.2	15
风电	0	80	0	0	
光伏	0	70	0	0	

机组和用户报价信息如表 2 所示。电网统购电价为 200 元/MW,统售电价为 350 元/MW。

表2 机组和用户报价信息

Table 2 Unit and user quotation information

研究 主体	申报电 量/MW	申报电价/ (元·MW ⁻¹)	申报 服务量/ MW	申报服 务价格/ (元·MW ⁻¹)	配额 数量/ t(CO ₂)
火电 1	60	220	17	290	48
火电 2	50	230	17	300	40
风电	40	220	5	220	
光伏	40	230	10	230	
用户 1	50	250	10	270	
用户 2	40	240	5	260	
用户 3	50	250	5	270	
用户 4	40	240	5	260	

2.2 电碳联合 P2P 交易结果分析

根据参数设置,对比电力 P2P 与服务 P2P 市场联合出清,无服务市场电力 P2P 交易出清。假设碳市场的配额价格为 130 元/t,按照各主体的效益模型计算效益,得到有无服务市场的情况下的效益如表 3 所示,火电机组的碳排如表 4 所示,以及新能源消纳量如表 5 所示。

表3 效益对比

Table 3 Benefit comparison

研究主体	无服务市场	联合市场
火电 1	1 960	2 355
火电 2	1 400	1 640
风电	9 700	11 150
光伏	10 000	13 000
用户 1	-12 500	-11 050
用户 2	-9 600	-8 150
用户 3	-12 500	-12 500
用户 4	-9 600	-8 150

表4 碳排放量对比

Table 4 Carbon emission comparison

研究主体	无服务市场	联合市场
火电 1	66	49.5
火电 2	60	42

表5 新能源消纳量对比

Table 5 Comparison of new energy consumption

研究主体	无服务市场	联合市场
风电	40	45
光伏	40	40

从模拟结果来看,整体效益、碳减排、新能源消纳 3 个方面,电碳联合机制都比无服务的纯电力交易机制要更好,所以新机制能够实现预期的功能,具备可行性。

2.3 电碳联合 P2P 交易对碳减排空间的影响

电碳联合交易调用电力用户和新能源发电商的灵活性,减少火电企业碳排放,从而增加碳减排空间,主要从用户的收益、新能源消纳量、碳排放量 3 方面分析电碳联合交易对碳减排空间的影响。本文将电碳联合 P2P 交易机制与中心化的点对网交易机制进行比较。所谓点对网交易机制,指的是所有的用户只与外电网进行交易,用户之间则不直接交易,与传统的电力交易机制类似,而 P2P 交易机制是点对点交易,实现交易的去中心化,可以有效增加用户直接交易量,在电碳联合交易中促进电力用户和新能源参与碳减排,增加碳减排空间。

(1) 电碳联合 P2P 交易对用户收益的影响

为了增加自身收益,在电碳联合 P2P 交易机制

中电力用户会优先选择以较低的价格与其他电力用户交易再以较高的价格与外电网交易,而中心化的点对网的交易机制中电力用户只能以较高的价格与电网进行交易,这样一来,电碳联合P2P交易机制的用户总收益就会高于中心化的交易机制。用户选择通过电碳联合P2P交易购电以减少电网供电,从而减少火电企业碳排放量,增加碳减排空间。电碳联合P2P交易对用户收益影响如图2所示。

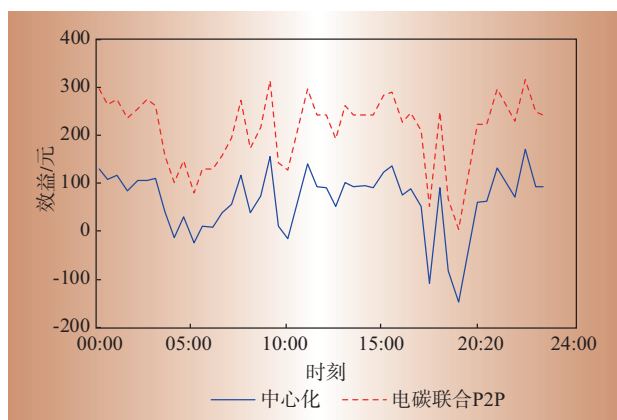


图2 用户总收益比较

Fig. 2 Comparison of total system revenue

由图2可知,电碳联合P2P交易机制用户总效益要比中心化交易机制平均高150元。这个结果主要与电网的购电和售电价格有关。通常情况下,电网购买电力的价格会更低,而电网销售电力时的价格会比用户售电的价格高。

(2) 电碳联合P2P交易对新能源消纳的影响

在电碳联合P2P交易机制中,新能源发电商响应碳市场需求,替代碳排放量较高的火电企业供电,从而增加碳减排空间。中心化的交易机制是将新能源装机发电量直接销售给电网,而P2P去中心化交易可以先销售给用户,再上网,因此去中心化P2P交易可以有效促进新能源消纳,电碳联合P2P交易对新能源消纳的影响如图3所示。

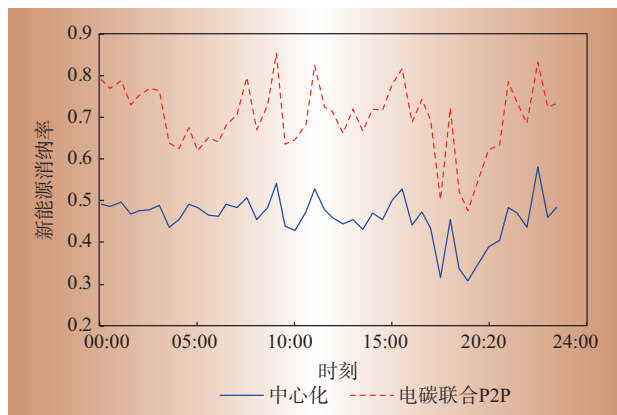


图3 新能源就地消纳率比较

Fig. 3 Comparison of local consumption rate of new energy

由图3可知,P2P交易机制的新能源就地消纳率要比中心化交易机制平均高54.73%。

(3) 电碳联合P2P交易对碳排放量的影响

电力用户和新能源发电商响应碳市场需求指令,与中心化的点对网的传统交易机制相比,电碳联合P2P交易机制会调用新能源和用户用电响应潜力,减少火电机组发电量,从而增加碳减排空间,所以电碳联合P2P交易机制的用能碳排放量要低于点对网的中心化交易机制,如图4所示。

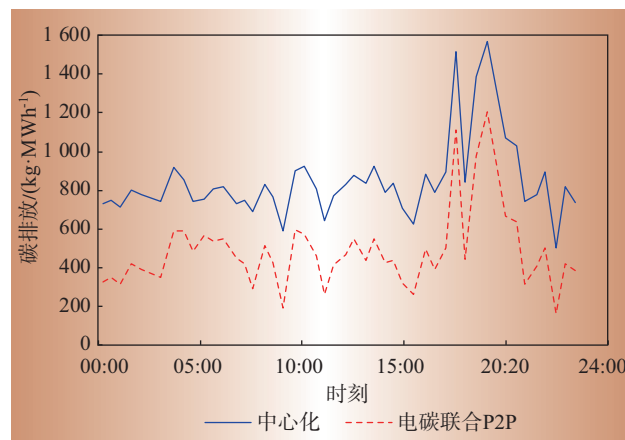


图4 用能碳排放量比较

Fig. 4 Comparison of carbon emissions of energy consumption

由图4可知,电碳联合P2P交易的用能碳排放量要比点对网的传统交易机制平均低46.13%。主要是因为新能源发电的碳排放量为0,而火电机组的碳排放量远远大于0。

3 结束语

(1) 本文同时考虑传统电力交易、碳交易,并引入了P2P交易,提出了电碳联合P2P交易机制方案,明确交易主体、场景和行为,建立了新的碳减排服务市场,多个市场兼顾,综合考虑各个主体在不同市场的效益。

(2) 建立参与主体在传统电力交易+电力P2P交易+碳交易+碳减排服务交易模式下的效益模型。通过算例对交易机制进行模拟,电碳联合机制与无服务的纯电力交易机制相比,火电机组效益平均增加18.65%,碳排放量平均减少17.25 t,验证了机制的有效性和可行性。

(3) 设计的基于P2P的电碳联合市场机制,匹配了火电厂的碳减排需求以及用户和新能源的自身调节灵活性和期望收益,获得满意的效果,用户用电成本下降了13.93%,新能源消纳量增加了5 MWh。

(4) 从整体效益、新能源消纳、碳减排3个方面分析电碳联合交易对碳减排空间的影响,电碳联合P2P交易机制减排空间远大于中心化交易机制,经过实证分析,碳减排空间增加体现为用户总效益平均提高150元,新能源就地消纳率平均提高54.73%,用能碳排放量平均降低46.13%。

参考文献:

- [1] ZHANG W, LI J, LI G, et al. Emission reduction effect and carbon market efficiency of carbon emissions trading policy in China[J]. Energy, 2020(196):117.
- [2] 恽璞园,刘强,黄伟,等. 综合能源系统能效评估的终端低碳运行研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4): 54-59.
YUN Puyuan, LIU Qiang, HUANG Wei, et al. Terminal low-carbon operation strategy of energy efficiency evaluation in integrated energy system [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4): 54-59.
- [3] 苏宜强,刘盛松. 计及碳交易-绿证的“源-荷”互动优化调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(5): 35-39, 45.
SU Yiqiang, LIU Shengsong. Source-demand interactive optimal scheduling strategy considering carbon trading and green certificate [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5): 35-39, 45.
- [4] 谷万江,王飞,田小蕾,等. 考虑储能及碳交易成本的电热联合系统优化调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 109-118.
GU Wanjiang, WANG Fei, TIAN Xiaolei, et al. Optimal scheduling strategy for electric-thermal combined system considering en-ergy storage and carbon trading cost [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7): 109-118.
- [5] XUN B, WEN F, LIAN M. Impacts of emissions trading on power industries and electricity markets[J]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2009, 12(4): 4 527-4 534.
- [6] 王信智. 我国碳排放权交易机制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.
WANG Xinzhi. Research on China's carbon emission trading mechanism [D]. Tianjin: Tianjin Technology University, 2019.
- [7] 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.
- [8] 吉斌,昌力,陈振寰,等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 1-10.
JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 1-10.
- [9] HUA W, SUN H. A blockchain-based peer-to-peer trading scheme coupling energy and carbon markets [J]. International Conference on Smart Energy Systems and Technologies(SEST), 2019, 11(9): 1 148-1 155.
- [10] HE H, LOU Z, WANG Q, et al. Joint operation mechanism of distributed photovoltaic power generation market and carbon market based on cross-chain trading technology[J]. IEEE Access, 2020(8): 66 116-66 130.
- [11] DING T, LU R, XU Y, et al. Joint electricity and carbon market for Northeast Asia energy interconnection [J]. Global Energy Interconnection, 2020(3): 99-110.
- [12] HUA W, JIANG J, SUN H, et al. A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets[J]. Applied Energy, 2020(279): 1-10.
- [13] ETIENNE S, LUCIEN B, PIERRE P. Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation [J]. IEEE Trans Power System 2019, 34(2): 994-1 004.

作者简介:

曾慧(1994),女,广东广州人,学士,工程师,研究方向为综合能源;

王美艳(1990),女,内蒙古赤峰人,博士,工程师,研究方向为电力市场、能源互联网;

李涛(1979),男,广东广州人,硕士,研究方向为能源互联网、智能电网规划和建设管理。

(责任编辑 郝 逊)