

电碳联动中大用户与分布式用户参与碳交易效益探究

郭昭艺, 吴 涛

(江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 随着清洁能源装机容量的快速增长, 对清洁能源的消纳问题日渐突出。电力用户用电过程面临着低碳化改造, 建立了电碳联动环境下考虑社会效益最优的用户碳交易模型, 根据电力客户碳减排需求, 按照用电行为以及基本信息对电力客户进行划分, 建立了大用户、分布式用户参与碳交易的效益模型。通过对现有直购电交易模式进行改进, 加入大用户与分布式用户参与碳交易的可行模式, 并对碳交易的效益进行了测算。在算例仿真中, 利用电动汽车大功率集中式充电站模拟用电大用户, 小功率交流社区充电桩模拟用电分布式用户, 计算得出了在电能替代条件下碳交易带来的能源效益。

关键词: 碳减排; 碳交易; 电碳联动; 分布式用电

Research on the benefits of large users and distributed users participating in carbon trading in electricity carbon linkage

GUO Zhaoyi, WU Tao

(Jiangsu Fangtian Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: With the rapid growth of clean energy installed capacity, the problem of clean energy consumption has become increasingly prominent. The power consumption process of power users is also facing low-carbon transformation. A user carbon trading model considering the optimal social benefits under the electricity carbon linkage environment is established. According to the carbon emission reduction needs of power customers, the power customers are divided according to the electricity consumption behavior and basic information, and the benefit model of large users and distributed users participating in carbon trading is established. This paper improves the existing direct power purchase transaction mode is improved, the feasible mode of large users and distributed users to participate in carbon trading is added, and the benefits of carbon trading is calculated. In the example simulation, the high-power centralized charging station of electric vehicles is used to simulate large users, and the low-power AC community charging pile is used to simulate distributed users. The energy benefits brought by carbon trading under the condition of electric energy substitution are calculated.

Key words: carbon emission reduction; carbon trading; electric carbon linkage; distributed power consumption

0 引言

过去几年的能源报告中展示出了无限制使用化石燃料的危害。对此, 能源转型受到持续关

注, 降低碳排放量成为了全球共识。而构建电碳融合体系是能源转型的重要途径之一, 作为电碳融合的一种具体形式, 电碳融合交易系统整合了

多种能源和分布式可再生能源，可以极大地提高系统效率，减少碳排放。然而，电力系统、供热系统和燃气系统之间固有的运行差异，以及分布式光伏等新型电源不可避免的间歇性、随机性的特性，严重阻碍了电碳融合交易系统技术的应用^[1]。文献[2-3]介绍了国外多个拥有新型电力系统的发达国家在新型电力系统的整体设计、电力建设中涉及的政策和技术标准以及电力线路及变电自动化管控等方面的风能、电能及其他新能源的消纳措施。文献[4]在讨论风能、电能及其他新能源的消纳问题时，将新能源消纳问题与新型电力系统设计相结合，规划总结出了一种基于风能、电能及其他新能源的消纳解决方案，并设计了一套与之匹配的新型电力系统规划方法，通过部分省电网的实际案例与仿真结果，验证了所提方法的合理性和有效性。但是，这些对碳排放权市场的研究没有考虑到用户行为和用电量的差异，比如大电力用户的直购机制、大电力用户的分布式住宅购买模式以及社区用电的集中电动汽车充电市场。这些在碳交易排放量方面存在显著差异。

随着电力市场规模的迅速扩大和微电网（MGs）等自治单位数量的不断增加，独立利益相关者不断涌现^[5]。这就要求隐私保护式的碳交易能源管理，以应对传统集中式运行模式中对于碳排放的不可把控性。文献[6]提出了一个碳交易的能量管理框架，并通过提出的分布式一致性交替方向乘子法（ADMM）解决了最优能量管理问题。为了调度具有分布式能源的多个智能家庭的能源消耗，在文献[7]中提出了一个两级分布式系统模型，并通过分布式家庭能源管理优化算法协调不同实体。然而，DRES输出的不确定性和CEI的复杂性仍然是障碍，需要进一步研究。

本文通过对上述问题的总结与研究，充分将电碳交易结合碳排放交易市场大电力用户差异，考虑电碳联动下不同用户间碳交易对整个能源系统产生的影响。在碳交易过程中，首先以环境最优作为判别碳交易效益条件，其次使用经济性来对模型进行评价，最终通过大用户与分布式用户的精准碳交易分析，达到更好地把握能量

流、合理调配区域能量流的效果。

1 新能源加入下的用户碳交易模型构建

当在某一区域中加入大规模新能源光伏电站或风电站时，由于区域能源生产占比发生较大变化，会导致跨省区直购电在交易过程中发生线路负载加大、安全性能降低的情况，严重时，还会对整体新型电力系统的安全性和稳定性产生冲击。这就严重影响了跨省市的新能源交易。为保证区域新产出的新能源能够有效参与跨省区大用户直购电，保证系统的安全性，而且能够充分利用风电、光电等新能源分布式发电成本低的优势，并促进新能源削峰填谷，发挥大用户直购电优势，同样针对分布式散户电力用户，也可以采取就近原则，优先使用就近的新能源，避免常规能源和新能源发电的交叉竞争，最终达到提高风电、光电等新能源发电上网比例的目的。

基于上述两种用户的新能源用能原则，本文设计了两阶段集中电碳交易模式：第一阶段，结合大用户使用需求和配置要求，将新型电力系统调峰与大用户使用需求进行匹配，优先结合大用户配额制，进行集中交易，根据双方需求，直接确定交易电量与交易电价；第二阶段，在大用户确定的基础交易电量与交易电价下，将分布式用户的用电需求作为分布式新能源用能的补充，优先就近使用新能源。最后，交易双方以当地经济效益均分的原则进行电价结算。

在上述的电碳交易模型中，以经济效益作为能够进行电碳交易的第一基础。当双方可以产生的总体经济效益大于单个电网运行效益时，电碳系统才会产生联动。这样的电碳交易系统的意义主要体现在以下两个方面。

1) 在电碳交易中，当电碳的交易两侧对同一种电力资源在成本上存在区别时，电碳交易会是在交易的过程中获取到增量利润。

2) 在电碳交易中，当发电侧的发电企业拥有碳排放权后，可以将本企业使用后剩余的碳排放权进行出售，并在自由化的交易市场进行公开交易，此时电碳交易会在交易过程中产生额外的

利润。

除此之外，电碳交易还可根据电碳交易参与者的历史排放水平为其分配固定的初始排放配额。作为最基本的分配方案，电碳交易通常在能源交互文献中用作最基本的能源交互情况。在实践中，电碳交易通常应用于能源交易的早期阶段，例如中国已经建设的一些电碳交易试点。在历史上，制造商在排放控制方面投入较多，却获得的补贴较少。由于初始补贴水平是产量的函数，因此它是影响生产者生产和减排决策的激励因素。出于同样的原因，电碳交易下的初始分配有时被称为“产出补贴”或“返利”，因为它补贴了生产行为。正如电碳交易所总结的电碳交易的核心作用是“有竞争力的公司需要收回必须为额外生产相关的排放购买补贴的额外成本。”电碳交易平台的设立减少了这一成本负担，因为额外生产获得了额外的回扣，抵消了额外的排放责任。因此，电碳交易必须转嫁给消费者或公司吸收的成本增加比分配机制，而不是以产出为条件。

2 电力用户碳交易算法设计

2.1 用户负荷计算

按照前文的两阶段集中电碳交易模式，将大用户集中购电确定为最高优先级。按照阶段性要求，将大用户的需求及可调节电力负荷表示为

$$P_x^i = \sum_{a=1}^3 p_a w_a \quad (1)$$

式中， P_x^i 为电网中大用户下的可调节负荷； p_1 、 p_2 和 p_3 为大用户在运行电网中起停调峰、转移调峰和增加负荷的电量； w_1 、 w_2 和 w_3 为对应的权重

$$\max R = \sum_{i=1}^L X_i R_i = X^T R \quad (2)$$

式中， R_i 为电力用户使用新能源 i 替代化石能源获得的经济补偿； X_i 为第 i 种新能源替代化石能源的比例。

在估算大用户用电额后，分布式小用户用电额可以按照用户以往用电额年增长10%进行直接计算得出，再将两者相加，得到总用电额，即

$$P_y^j = \frac{P_b^j}{\min p_b^s} w_b + \frac{P_c^j}{\min p_c^s} w_c - \frac{P_d^j}{\min p_d^s} w_d - \frac{P_e^j}{\min p_e^s} w_e \quad (3)$$

功率使用过程中，要尽可能多地运用新能源，在碳交易过程中，构建如下功率消耗能源组合

$$\sum_{t \in T} \sum_{k \in \Omega_W} C_{cur,k} (P_{wf,k,t} - P_{W,k,t}) \quad (4)$$

式中， $P_{wf,k,t}$ 为新能源出力； $P_{W,k,t}$ 为新能源消耗； Ω_W 为新能源机组集合。

2.2 清洁能源替代函数计算

在得到总功率后，通过构建补偿机制，使得清洁能源使用呈现经济性，才可实现碳交易的可持续性。计算公式为

$$R_i = \sum_{i=1}^L C_i - L_i (p_i - p'_i) \quad (5)$$

式中， C_i 为使用新能源 i 替代掉化石能源后需要额外支付的替代费用； L_i 为使用新能源 i 替代化石能源后产生的电力能源总量； p_i 为使用新能源 i 替代化石能源后单位电量新能源发电上网电价； p'_i 为新能源 i 替代化石能源后政府可以给予新能源使用补贴。

(1) 污染物排放总量约束

污染物排放总量约束是进行电碳交易中一大限制性约束，即用户在进行电碳交易后，使用化石能源释放的碳不能够超过当地污染物排放总量，其中化石能源燃烧中产生的NO化合物、CO和SO₂等都属于污染物。具体表示为

$$\sum_{i=1}^L [X_i (E_{i,CO} + E_{i,SO_2} + E_{i,NO_2})] \leq CC \quad (6)$$

式中，CC为碳交易中规定的碳排放标准； E_{i,NO_2} 、 $E_{i,CO}$ 和 E_{i,SO_2} 分别表示第 i 种新能源替代措施后NO化合物、CO和SO₂的排放量。

(2) 可再生能源发电增长约束

通过多途径促进和发展风力发电与光伏发电的有效开发和利用，也是碳交易中的重要约束条件，具体表示为

$$\sum_{i=1}^L [X_i L_i (a_i + b_i)] \geq 0 \quad (7)$$

式中， a 为新能源 i 替代化石能源后用电量中风电

的比例; b 为新能源 i 替代化石能源后用电量中光电的比例。

2.3 碳效益计算

最后计算碳效益, 以环境效率最优作为优化条件, 在条件输入中给定的环境最优条件下, 寻求经济效益期望值最大。根据期望公式, 先计算最大期望为

$$\sigma^2 = X^T \sum X = C \quad (8)$$

式中, C 为常数值, 是大用户接受范围内选定的电价常数。

对于分布式用电, 用户有着使用原能源方式的惯性, 在号召使用新能源来作为用户能源使用形式中, 需要通过使用经济性补偿来提高用户使用期望。具体表示为

$$X^T R \geq C \quad (9)$$

3 实验分析

以电动汽车充电站作为案例进行分析, 将快充大功率集中式充电站看作大用户, 将社区慢充电桩看作分布式用户, 计算某城市市区碳交易效益分析, 充电汽车按照车辆平均值续航300 km, 百公里电耗为20 kW·h, 大用户按照大功率集中式充电站60个120 kW充电桩, 平均每日使用10 h计算, 分布式用户按照分布式40个7 kW交流充电桩计算, 平均每日使用5 h, 碳交易按照新能源充电汽车代替燃油汽车计算。

(1) 经济效益分析

上海市在电动汽车的充电站多执行的是工业峰谷分时电价, 通过上文构建的数据, 计算构建上海市峰谷电价价目具体价格见表1。燃油汽车与电动汽车在汽车整体的使用周期的经济效益详见表2。

使用文中计算方式, 从计算得到的表2数据结果可知, 如果设定电动汽车与燃油汽车均按照平均年使用里程3万km来计算, 由此可以计算出电动汽车在一年中的用电量为5 971 kW·h, 按照上文电价相加, 平均每辆电动汽车一年共需要5 123元的电费, 而燃油汽车需要花费近4倍的燃

油费用。从汽车整体的使用周期来看, 电动汽车在使用过程中花费的能源费用为8.7万元, 燃油汽车为25.9万元, 如果将汽车的购置成本算入, 在汽车整体的使用周期内, 电动汽车可以节约大约2.5万元成本。在同样的使用周期、使用频率与使用旅程下, 电动汽车相较于燃油汽车可以在运行中节约34%的能源消耗。

表1 上海市峰谷电价价目具体价格

Tab. 1 Shanghai peak valley electricity price specific price

	用户 种类	用电 季节	峰时段	谷时段	平时 时段
时间	大用户	夏季	8:00 ~ 11:00 13:00 ~ 15:00	22:00 ~ 6:00	其余 时间
		非夏季	8:00 ~ 11:00	22:00 ~ 6:00	其余 时间
	分布式	-	6:00 ~ 22:00	22:00 ~ 6:00	-
电价 /(元/ kw·h)	大用户	夏季	1.202	0.285	0.749
		非夏季	1.167	0.350	0.714
	分布式	-	0.977	0.487	-

表2 电动汽车与燃油汽车整体使用周期的经济效益

Tab. 2 Economic benefits of the overall service life of electric vehicles and fuel vehicles

(单位: 万元)

车辆类型	购置价格	运行成本	整体的使用周 期内支出	电力支出
燃油汽车	15	25.9	42.5	-
电动汽车	30	8.7	39	8.2

(2) 环境效益分析

按照上文设计的环境效益优先、经济效益次之的分析模型, 将大气污染物排放总量限制与相应的电动汽车、燃油汽车参数输入模型, 则可以得到环境效益数据, 见表3。

表3 电动汽车碳交易环境效益

Tab. 3 Environmental benefits of electric vehicle carbon trading

(单位: kg)

车辆类型	燃油汽车 不可再生能源消耗量	电动汽车 不可再生能源消耗量
能源消耗量	4.25	-
碳排放量	10.75	30.42
气体污染 排放	SO ₂	13
	NO _x	697
	CO	253
	TSP	7 036
	-	30.42

通过分析表3数据可以得出,在汽车整体的使用周期内,假设电动汽车与燃油汽车的行驶里程均为50万km,则燃油汽车耗油产生的SO₂排放量为13 kg,NO_x化合物排放量为907 kg,CO排放7 t;在分析过程中,假设电动汽车的电力资源全部使用煤炭来进行发电,并产生相应的碳排放量,则可得出电动汽车相当于排放了713 kg的SO₂、214 kg的NO_x和29.97 kg的粉尘。从数值来看,使用电能替代后,对电能进行碳交易可以有效降低污染物排放,起到保护环境的作用。

4 结束语

电碳交易是现在电力新能源市场改革中的重要章节,构建电碳交易体系对我国电力所进行的电力体制改革有着不可替代的实践意义。电碳交易制度对提高我国新能源使用效率、提升新能源使用率、降低化石能源消耗及促进我国节能减排有着显著影响。本文通过将大用户与分布式用户用电需求加入到电碳交易平台中,以促进新能源消纳为目标,对新能源交易市场构建、电能替代、电能跨领域消纳和能源多地区互补有着积极作用。本文通过对电动汽车与燃油汽车这一典型的电碳交易对比模型进行仿真,将上海电动汽车使用过程中产生的排放数据与现有的燃油汽车排放数据进行对比,同时验证了电动汽车使用周期内对新能源建设的积极作用,新能源利用下的电碳交易模式具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 邹迅勇,王聪,毛艳丽.智慧城市能源市场服务体系构建思路[J].电子技术与软件工程,2022(8):95-98.
- [2] WAN Yuanyuan, SHENG Ni. Clarifying the

relationship among green investment, clean energy consumption, carbon emissions, and economic growth: a provincial panel analysis of China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 29(6).

- [3] WEI Shuheng, XU Junjun, WU Zaijun, et al. False data injection attack method for state estimation of three-phase unbalanced distribution network[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(7): 2367-2377.
- [4] 安文,李希年,彭荣武,等.区块链技术在分布式可再生能源电力交易中的应用与展望[J].电工技术,2022(8):31-33,36.
- [5] 刘军,程海花,叶泽,等.省间发电权预挂牌交易价格形成机制研究[J].价格理论与实践,2021(9):86-91.
- [6] 刘闯,李凤婷,晁勤,等.风光水火发电权交易主体评估及置换电量优化研究[J].太阳能学报,2021,42(8):105-112.
- [7] 任景,薛晨,马晓伟,等.考虑能量存取的自备电厂去中心化交易机制探究[J].电力建设,2021,42(6):1-8.

作者简介

郭昭艺(1989—),女,硕士,工程师,主要从事新能源发电技术、电能质量方面研究和科技管理工作。

吴涛(1988—),男,硕士,高级工程师,主要从事电源调试技术、电力营销方面研究和科技管理工作。

(收稿日期:2022-06-12)