

考虑可再生能源电力消纳权重的市场交易决策研究

李明¹,林廷康¹,旷世芳¹,贺薪颖²,张凯琳²,曾鸣²

(1. 中国能源建设集团 广东省电力设计研究院有限公司,广州 510600;2. 华北电力大学
新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

Research on market transaction decision considering weight of renewable energy consumption

LI Ming¹, LIN Tingkang¹, KUANG Shifang¹, HE Xinying², ZHANG Kailin², ZENG Ming²

(1. Guangdong Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., China Energy Construction Group,
Guangzhou 510600, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy
Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:在“中国力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”目标的驱动下,碳市场和绿证市场正稳步快速发展。伴随着碳市场、绿证市场的推进,将产生碳-绿证-电力市场的交互耦合,形成涵盖多市场多主体的交易体系框架。研究考虑可再生能源电力消纳责任权重,结合发电商、售电商等各市场主体受碳市场、绿证市场的影响,通过多主体成本收益分析,建立以各市场主体利润最大为目标的最优交易决策模型。该模型在满足可再生能源消纳水平考核的同时,实现了各市场主体市场利益均衡。最后通过算例结果分析了可再生能源配额、碳配额的变化对多主体交易电量和利润的影响。

关键词:电力市场;多市场耦合;交易决策模型;可再生能源电力消纳权重

Abstract: Driven by the carbon goals of “carbon peak by 2030 and carbon neutral by 2060”, the carbon market and green certificate market are developing steadily and rapidly. With the rapid development of carbon market and green certificate market, the interaction and coupling of carbon, green certificate and electricity market will be generated, and a trading system framework covering multiple markets and multiple subjects will be formed. The weight of renewable energy consumption responsibility are studied and considered. The degree of influence of each market subject by carbon market and green certificate market are combined. Based on the cost-benefit analysis of multi-agent market, an optimal trading decision model is established to maximize the profit of each trading agent. While meeting the assessment of renewable energy consumption level, the balance of market interests of all market players has been realized. The influence of renewable energy quota and carbon quota on electricity and profit of multi-agent trade is analyzed by numerical example.

Key words: electricity market; multi-market coupling; trading decision model; weight of renewable energy consumption

0 引言

为了应对能源紧缺与化石燃料污染问题,国际社会积极开展能源资源优化配置和气候治理措施,制定了一系列碳减排组合机制。电力行业各主体参与碳交易与绿证交易是解决电力生产负外部性的有效市场化手段^[1]。美国、澳大利亚、英国等多个国家和地区均出台了可再生能源配额制(renewable portfolio standard, RPS)政策、碳配额制政策及相应的配套政策,对推动地区清洁低碳发展发挥了重要作用^[2]。2019年5月《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》的颁布,是我国开始对可再生能

源消纳的责任权重进行考核的标志,与之相配套的绿色证书交易机制(tradable green certification, TGC)^[3]为被考核主体完成责任考核提供了有效途径:可通过购买绿证的方式完成消纳权重指标,从而增加消费群体对绿证的交易意愿,使绿证市场和可再生能源消纳量市场两者达到动态平衡状态。此外,自2011年起,我国在北京、天津、上海、重庆、深圳、湖北、广东等7个省市开展碳市场建设的试点工作,2017年全国碳市场建设正式启动,并于2021年7月实现全国碳排放市场上线交易,地方试点市场与全国碳市场并存^[4]。

现阶段对于电力市场的研究以电力市场多主体交易决策和市场优化运行为主,包括容量市场和辅助服务市场机制及市场优化控制等方面^[3,5],对碳配额或可再生能源消纳权重考核政策下的各主体行为策略方面的研究相对较少,主要集中在碳市

收稿日期:2021-09-29;修回日期:2021-10-25

基金项目:中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司科技项目(CG-2021-K-004)

场、绿证市场及可再生能源配额的引入所带来的市场风险、发电商市场策略以及对电力市场能源结构的影响等方面。文献[6]建立了主导企业竞争边缘模型,通过RPS实施中的市场力问题,分析了可再生能源证书的价格和用户上网电价受不同主导企业市场力影响的程度问题。文献[7]分析了碳市场影响可再生能源发电行业的机制,并以北京、广东和湖北碳市场建设试点为例,量化分析碳价对电价成本的影响。文献[8]在考虑碳成本的基础上,采用发电机组经济性影响模型,定量分析了碳市场不同发展阶段对发电机组发电成本的影响,定量评价不同能源结构投资收益经济性。文献[9]将碳交易和绿色证书交易机制引入到发电权交易模型中,构建了基于区域净利润最大化的发电权交易模型。文献[10]在分析绿色证书市场和电力批发市场的基础上,建立联合均衡模型,但没有考虑到发电厂商策略受现行固定电价制体系约束的影响。

综上所述可知,在综合考虑碳市场、绿证市场和可再生能源消纳权重下,对不同责任主体的交易策略方面的研究还较少。基于此,本文将碳市场、绿证市场和可再生能源消纳责任权重共同引入不同考核主体的决策因素中,以各市场主体利益最优为目标,建立市场均衡模型,研究碳市场、绿证市场引入对各主体利益的影响程度。

1 碳市场、绿证市场和电力市场耦合下多主体交易体系架构

常规火电机组、新能源发电机组和售电商等多主体将共同参与碳市场、绿证市场和电力市场的交易,并在不同市场间形成交互影响,形成多市场多主体的交易体系和架构,如图1所示。

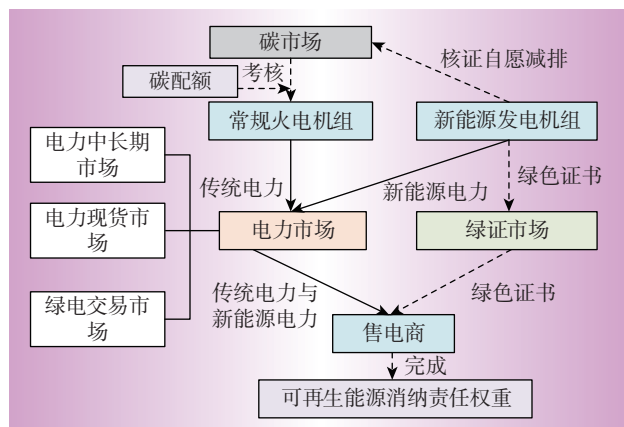


图1 多主体多市场交易体系架构

Fig. 1 Multi-agent and multi-market trading system framework

碳市场、绿证市场和电力市场的耦合,重点在于可再生能源消纳责任权重和碳配额。可再生能源消纳责任权重联通了电力市场和绿证市场,在满足消纳责任权重要求的情况下,售电商需要从电力市场购买绿电或者从绿证市场购买绿证,这就要求售电商均衡两个市场优化决策购电量,进而影响新能源机组的市场交易量。碳配额联通了电力市场和碳市场,在满足碳排放要求的情况下,常规火电机组需要衡量市场交易电量和碳市场购售碳排放权的成本效益,影响了常规火电和绿电的市场份额。就电力商品而言,新能源生产的绿电和常规能源发电机组生产的火电属于无差别商品,在电力市场上获取市场份额,需要进行市场竞价,其中常规火电机组的交易电量所占份额将会影响到碳市场碳价,新能源发电机组的交易电量份额将会影响到绿证市场的绿证价格。根据可再生能源消纳考核办法,售电商必须完成可再生能源消纳责任要求。

2 多市场耦合下各主体的交易决策模型

2.1 多市场耦合下各主体成本收益分析

2.1.1 发电商成本收益分析

(1) 常规火电机组成本收益

常规火电机组 i ($i=1,2,\dots,m$)的成本包括发电成本、碳排放成本和收益。收益为市场交易电量收益。

常规火电机组的发电成本 $C_{e,i}$ 是其市场成交量 $q_{e,i}$ 的函数,选取二次成本函数形式如下

$$C_{e,i} = a_i(q_{e,i})^2 + b_i q_{e,i} + c_i \quad (1)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为常规火电机组发电成本系数。

此外,在考虑碳市场情况下,常规火电机组的碳配额系数为 β ,碳市场价格为 P_c ,碳排放值与其交易量呈线性关系,碳排放因子为 c_e ,如果其碳排放量小于碳配额,则其可以通过碳市场出售碳配额获得收益,反之则要通过碳市场购买碳配额。因此,参与碳市场的收益为

$$C_{ce,i}(q_{e,i}) = P_c(\beta q_{e,i} - c_e q_{e,i}) \quad (2)$$

常规能源发电机组的收益为机组参与电力市场交易电量所获得的收益,设电力市场交易均衡价格为 P_e ,常规火电机组成交量为 $q_{e,i}$,则其收益为

$$B_{e,i} = P_e \cdot q_{e,i} \quad (3)$$

(2) 新能源发电机组成本收益

新能源发电机组 j ($j=1,2,\dots,n$)的成本为发电成本,收益包括市场交易电量收益和出售绿证收益。由于新能源机组的发电成本主要体现在运维成本和备用成本,利用二次成本函数表征新能源发电机组的发电成本如下

$$C_{g,j} = a_j(q_{g,j})^2 + b_j q_{g,j} + c_j \quad (4)$$

式中: a_j 、 b_j 和 c_j 为新能源发电成本系数; $q_{g,j}$ 满足机组的安全出力区间。

新能源发电机组的收益包括在电力市场上的交易收益以及在绿证交易市场上出售绿证获得的收益,设定绿证市场的交易价格为 P_g ,新能源机组绿证市场绿证成交量为 $q'_{g,j}$,则新能源发电机组参与电力市场和绿证市场的收益为

$$B_j = P_e \cdot q_{g,j} + P_g \cdot q'_{g,j} \quad (5)$$

2.1.2 售电商成本收益分析

售电商的成本主要包括购电成本、绿证成本,收益为售电收益。售电商从电力市场购电再进行售电,其购电量 q_s 为从常规火电机组购电量和从新能源机组购电量之和。此外,售电商在绿证市场上购买绿证保证其完成新能源电力消纳权重,使得总购电量中绿电占比达到要求。

因此其成本为

$$C_s = P_e \left(\sum_i q_{c,i} + \sum_j q_{g,i} \right) + P_g q'_{g,j} \quad (6)$$

其总购电量售电商的收益 B_s 为

$$B_s = P_s \cdot q'_s \quad (7)$$

式中: P_s 为售电电价; q'_s 为售电量。

2.2 多市场耦合下多主体交易决策模型

2.2.1 各主体交易决策目标

(1) 常规火电机组决策目标

常规火电机组的决策原则是实现自身利润最大化,根据2.1.1节常规火电机组的成本和收益分析,得到其决策目标为

$$\begin{aligned} \max W_{c,i} &= B_{c,i} - C_{c,i} - C_{ce,i} \\ &= P_e \cdot q_{c,i} - [a_i(q_{c,i})^2 + b_i q_{c,i} + c_i] - P_e(\beta - c_e)q_{c,i} \end{aligned} \quad (8)$$

(2) 新能源发电机组决策目标

新能源发电机组 j ($j=1,2,\dots,n$) 的决策目标同样为利润最大化,根据2.1.1节的成本收益分析,得其决策目标为

$$\begin{aligned} \max W_{g,j} &= B_j - C_{g,j} \\ &= P_e \cdot q_{g,j} + P_g \cdot q'_{g,j} - [a_j(q_{g,j})^2 + b_j q_{g,j} + c_j] \end{aligned} \quad (9)$$

(3) 售电商决策目标

售电商的决策目标为自身利润最大化,根据2.1.1节成本收益分析,其决策目标描述为

$$\begin{aligned} \max W_s &= B_s - C_s \\ &= P_s \cdot q'_s - P_e \left(\sum_i q_{c,i} + \sum_j q_{g,i} \right) - P_g q'_{g,j} \end{aligned} \quad (10)$$

(4) 约束条件

在可再生能源电力消纳责任权重 α 的约束下,

售电商可以通过购买新能源电力或通过购买绿证来完成权重考核,则

$$\sum_{j=1}^n q_{g,j} + \sum_{j=1}^n q'_{g,j} \geq \alpha \left(\sum_{i=1}^m q_{c,i} + \sum_{j=1}^n q_{g,j} \right) \quad (11)$$

2.2.2 各主体交易决策策略

根据2.2.1节分析得到各主体进行市场决策的目标,分析不同类型能源机组和售电商的最优交易电量,以各发电机组和售电商的购售电量为决策变量进行市场交易平衡分析。

(1) 常规火电机组最优决策

常规火电机组以利润 $W_{c,i}$ 最大为目标,通过决定自身售电量 $q_{c,i}$ 参与市场交易

$$\frac{\partial W_{c,i}}{\partial q_{c,i}} = 0 \quad (12)$$

根据市场供给规律,当交易电量增多时,电力市场均衡价格将会下降,得到电力市场交易均衡价格和市场供给的函数关系为

$$P_e = r_e - k_e \left(\sum_{i=1}^m q_{c,i} + \sum_{j=1}^n q_{g,j} \right) \quad (13)$$

式中: r_e 和 k_e 为市场电价供应函数系数。

根据市场需求规律,当火电机组市场交易电量越多时,碳配额需求越大,碳市场价格越高,得到碳市场交易价格的函数关系为

$$P_c = r_c + k_c \sum_{i=1}^m q_{c,i} \quad (14)$$

式中: r_c 和 k_c 为碳市场价格需求函数系数。

结合式(12)一式(14)可求出常规火电机组的售电量决策值

$$q_{c,i} = \frac{(k_e - c_e k_c) \sum_{l \neq i} q_{c,l} + k_e \sum_{j=1}^n q_{g,j} + b_i + k_c \beta + c_e r_e - r_e}{2(c_e k_c - k_e - a_i)} \quad (15)$$

(2) 新能源发电机组最优决策

新能源发电机组 j 以利润 $W_{g,j}$ 最大为目标,通过决定自身售电量 $q_{g,j}$ 参与电力市场交易

$$\frac{\partial W_{g,j}}{\partial q_{g,j}} = 0 \quad (16)$$

根据市场供给曲线,得到绿证市场交易均衡价格和市场供给的函数关系为

$$P_g = r_g - k_g \sum_{j=1}^n q_{g,j} \quad (17)$$

式中: r_g 和 k_g 为绿证市场绿证供应函数系数。

结合式(13)、式(16)、式(17)可求出新能源发电机组最优售电量 $q_{g,j}$

$$q_{g,j} = \frac{r_e - k_e \left(\sum_{i=1}^m q_{c,i} + \sum_{l \neq j} q_{g,l} \right) - q'_{g,j} k_g - b_j}{2(c_e k_c - k_e - a_i)} \quad (18)$$

(3) 售电商最优决策

售电商以自身利润 W_s 最大为目标,通过决定自身购电量确定参与电力市场

$$\frac{\partial W_s}{\partial q_s} = 0 \tag{19}$$

可求出售电商对应的购电量 q_s 如下

$$q_s = \frac{r_e - k_g \sum_{j=1}^m q_{g,j}}{2k_e} \tag{20}$$

基于多主体交易决策模型,可以得到各主体购售电量的最优决策。各主体通过电力市场决定了购售电量目标后,常规火电机组在碳市场购售碳配额量和售电商在绿证市场上购售绿证数量也可以对应计算得出。

3 算例分析

本节就多市场耦合下的两个关键参数:可再生能源消纳责任权重 α 和碳配额系数 β ,开展算例分析,阐释两个参数对市场主体交易决策的影响。

3.1 数据选取及各发电机组参数

设定电力市场存在4家发电机组,全部参与市场竞争,其机组成本系数和容量的基本参数如表1所示^[4]。

表1 发电机组基本参数

Table 1 Basic generator parameters

发电机组编号	各机组成本系数			容量/MW	碳排放因子/(t·MWh ⁻¹)
	a	b	c		
1号	0.21	63	0	90	0.75
2号	0.26	81	0	90	0.82
3号	0.86	347	0	40	0
4号	0.87	363	0	40	0

其中,1号和2号为常规火电机组,3号和4号为新能源发电机组。在该电力市场的交易价格方面,采用当前市场平均价格475元/MWh进行计算。其它参数的选取及基准值的确定如表2所示。

表2 参数及基准值

Table 2 Parameters and reference value

参数	r_e	k_e	r_g	k_g	r_s	k_s
取值	700	0.148	40	0.050	180	0.036

假设 $q_{c,1}$ 、 $q_{c,2}$ 、 $W_{c,1}$ 、 $W_{c,2}$ 和 $q_{g,3}$ 、 $q_{g,4}$ 、 $W_{g,3}$ 、 $W_{g,4}$ 分别为常规火电机组1号、2号及新能源发电机组3号、4号的交易量和收益,以便分析新能源消纳权重对市场各个参与主体的影响情况。

3.2 结果分析

3.2.1 可再生能源配额制对各发电机组交易电量及利润的影响

可再生能源配额制对各发电机组交易量及利润的影响如图2所示。

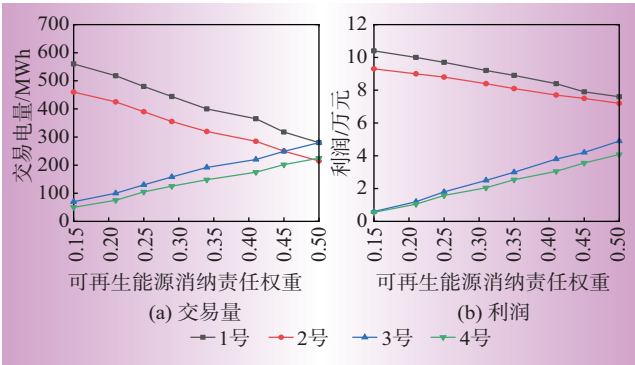


图2 可再生能源配额制对各发电机组交易量及利润的影响
Fig. 2 Impact of renewable energy quota on transaction quantity and profit of each generating unit

由图2可以看出,随着新能源配额比例的不断升高,常规火电机组的成交电量不断下降,而新能源发电机组的成交电量不断提升。这是由于新能源配额制及绿证制度的实施,使售电商成为被考核主体。当未完成配额指标时,售电商会受到联合惩罚,为避免其受到惩罚,售电商会购买足够的新能源电量,且购买数量随着配额比例的不断调高而增加,促使新能源电厂的成交电量不断提升。与此同时,售电商会减少常规能源的购电量。这说明新能源配额制的有效实施能够显著增加售电商对于新能源电力的需求,在市场机制下,促进新能源的并网和消纳,推动我国能源清洁化转型。

随着可再生能源配额比例的不断增加,新能源和常规火电机组的成交电量分别呈下降和上升趋势。通过机组交易决策最优模型可知,常规火电机组利润主要取决于成交电量,因此在成交电量不断下降的情况下,利润水平同样随着配额比例的提高而逐步降低;新能源的发电机组利润主要取决于成交电量和成交绿证数量,因此利润的增加包括电量和绿证两部分,且利润增长速度较快。由此可知,可再生能源配额制和绿证制度对新能源的发展产生有效激励。

3.2.2 碳配额对各发电机组交易电量及利润的影响

图3所示为碳配额对各发电机组交易电量及利润的影响。由图3可以看出,随着碳配额系数的减少,新能源机组的交易电量逐渐增加,利润也相应增加,常规火电机组的交易电量逐步减少,相应利润也有所减少,并且排放因子较小的1号常规火电

机组的交易电量相对减少较小,而排放因子较大的2号常规火电机组的交易电量减少较大。这是由于碳排放的限制,当碳排放政策收紧时,碳排放因子较大的机组成本提升,甚至通过碳市场购买碳配额,成本增加导致其交易电量减少,进而压缩了常规火电机组的利润。新能源机组则通过较多的交易电量获得更多利润。

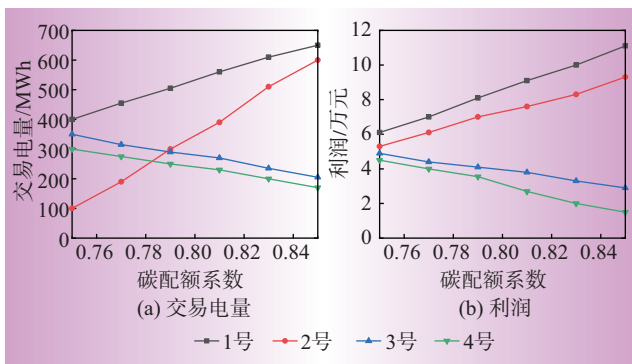


图3 碳配额对各发电机组交易电量及利润的影响

Fig. 3 Impact of carbon quota on transaction quantity and profit of each generating unit

综上,可再生能源配额制、绿证制度和碳配额能够实现对售电商和常规火电机组的有效考核,提高电力市场中的新能源交易占比,提升新能源成交量,促进新能源的并网消纳。碳配额可以有效激发新能源机组市场活力,抑制高排放常规火电机组的发展。绿证制度能够通过绿证市场降低新能源机组生产成本,减轻政府的补贴压力。

4 结束语

在碳市场、绿证市场和电力市场等多市场耦合环境下,结合可再生能源消纳责任权重要求和碳配额制,针对各主体市场行为开展研究,建立了多市场多主体交易决策模型,通过算例仿真进行验证分析,得到以下结论。

(1) 在可再生能源配额制的前提下,构建了碳市场、绿证市场和电力市场多市场耦合下多主体交易决策模型,研究了各电力市场主体的行为策略随新能源配额、碳配额变化时的变化,可用于分析适用于不同配额比例的新能源发电商、常规能源发电商和售电商的交易策略,对新能源电力消纳权重背景下的市场交易决策提供一定参考价值。

(2) 在碳配额、可再生能源配额制和绿证交易的促进下,售电商对新能源电力的需求得到了有效增长,电力市场中新能源的成交量增加,促进了新能源消纳。常规火电机组和售电商受利润减少的影响,会逐步向综合化、清洁化转型。D

参考文献:

- [1] 赵新刚,武晓霞. 绿色证书交易的国际比较及其对中国的启示[J]. 华北电力大学学报(社会科学版), 2019, 11(3):1-8.
ZHAO Xingang, WU Xiaoxia. International comparison of tradable green certificates and its enlightenment to China [J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2019, 11(3):1-8.
- [2] 高逸,吴耀武,宋新甫,等. 可再生能源配额政策对新能源发展影响分析及消纳策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1):56-61.
GAO Yi, WU Yaowu, SONG Xinfu, et al. Analysis on the effect of renewable portfolio standards on renewable energy development and accommodation strategies study [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1):56-61.
- [3] 李璐,谭忠富,张恩源. 可再生能源配额制实施中的市场力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12):106-112.
LI Lu, TAN Zhongfu, ZHANG Enyuan. Research on market power in the implementation of renewable portfolio standard [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12):106-112.
- [4] 刘敦楠,刘明光,王文,等. 充电负荷聚合商参与绿色证书交易的运营模式与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10):1-9.
LIU Dunnan, LIU Mingguang, WANG Wen, et al. Operation mode and key technology of charging load aggregator participating in green certificate trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):1-9.
- [5] 王辉,张芮丹,王军杰,等. 可再生能源配额制下电力市场多主体交易决策优化模型[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6):2 292-2 298.
WANG Hui, ZHANG Ruidan, WANG Junjie, et al. Optimization model of multi-body trading decision in power market under renewable portfolio standard [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(6):2 292-2 298.
- [6] 安学娜,张少华,李雪. 考虑绿色证书交易的寡头电力市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9):84-89.
AN Xuena, ZHANG Shaohua, LI Xue. Equilibrium analysis of oligopolistic electricity markets considering tradable green certificates [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9):84-89.
- [7] 冯升波,黄建,周伏秋,等. 碳市场对可再生能源发电行业的影响[J]. 宏观经济管理, 2019(11):55-62.
FENG Shengbo, HUANG Jian, ZHOU Fuqiu, et al. The impact of carbon markets on the renewable energy generation industry [J]. Macroeconomic Management, 2019(11):55-62.

(下转第36页)