

# 碳电市场环境下火电厂市场竞价策略 及交易技术

李建华<sup>1,2</sup>, 陈雪<sup>1</sup>, 付浩<sup>1</sup>, 武云霞<sup>1</sup>, 白智丹<sup>1</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 电力现货市场与碳排放权市场建设的不断推进, 为火电厂的生产运营带来了新的机遇与挑战。文中提出了一种碳电市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术。首先, 分析了火电机组碳排放权交易及管理方法, 研究了碳电市场的关联关系与关键影响因素; 然后, 基于火电机组出力特性模型与成本模型, 计入碳电市场价格分别建立了电力市场、电力市场+免费配额、电力市场+有偿配额3种模式下的机组竞价模型, 并进一步提出了以火电机组效益最大化为目标的出力优化模型及求解方法; 最后, 通过算例仿真验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 电力市场; 碳市场; 边际电价成本; 竞价策略

中图分类号: TM 715 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0046-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230308

## Bidding Strategy and Trading Technology of Thermal Power Plant in the Environment of Carbon and Electricity Market

LI Jianhua<sup>1,2</sup>, CHEN Xue<sup>1</sup>, FU Hao<sup>1</sup>, WU Yunxia<sup>1</sup>, BAI Zhidan<sup>1</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University,

Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** The construction of electricity spot market and carbon emission rights market has been continuously promoted, which brings new opportunities and challenges to the production and operation of thermal power plants. A bidding strategy and trading technology are proposed for thermal power plants in carbon and electricity market. Firstly, the carbon emission trading and management methods of thermal power units are analyzed, and the association and key influencing factors of carbon and electricity market are studied. Then, based on the output characteristic model and cost model of thermal power units, the price of carbon and electricity market is taken into account, and the unit bidding models in three modes are established respectively, that is, electricity market, electricity market with free allocation, electricity marker with paid allocation. And furthermore, the output optimization model and solution method aiming at maximizing the benefit of thermal power units are proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by an example simulation.

**Key words:** electricity market; carbon market; marginal electricity price cost; bidding strategy

## 0 引言

2015年中国开启了新一轮深化电力体制改革, 管住中间, 放开两头<sup>[1]</sup>, 实现市场在电力资源配置中的决定性作用。火电厂作为电力市场的重要市场主体, 其市场竞价策略受到成本和现货电价的

较大影响。此外, 碳排放权概念的提出, 使火电企业需要拥有相应的碳配额才可以进行电力生产。火电企业作为中国发电行业减排的重点行业, 其运营将会受到电力市场与碳市场的双重影响, 因此研究火电企业碳电市场下的交易技术具有重要意义。

现在已有许多文献开展了相关研究。如文献[2]利用最优基准值确定方法, 分析了不同工况下火电机组的碳排放量, 并利用机器学习算法求得

更准确的排放权最优基准值,为碳配额的统筹和划分提供了较好的价值基础。文献[3]建立了碳交易机制下的火电机组经济调度模型,在满足系统运行需求的前提下,实现了低碳性与经济性的协调优化。文献[4]计及火电机组碳减排约束,建立了以碳排放成本最低的碳电优化协调模型,实现了火电机组在碳市场中的有力竞争。文献[5]考虑火电机组深度调峰下的成本损耗,建立了满足系统调峰需求的阶梯型碳交易成本模型,并证明了该方法的合理性。上述文献主要研究了火电机组在碳排放权、碳减排和低碳调度等方面内容,基于火电机组的碳排放边界约束,综合考虑环境价值效益与经济效益,进一步优化火电机组出力。文献[6]基于 Copula 函数建立了现货电价与碳价的联合概率分布模型,构建了发电机组的风险竞价策略。文献[7]分析了电力市场与碳市场关联,通过引入市场机制下的碳排放因子,提升低碳电力的竞争力,推动火电机组的低碳化改造。文献[8]在考虑电力市场竞价效益与碳排放成本的基础上,提出了基于机组有效容量的补偿机制,实现了容量电价与机组容量的协调性。以上文献研究了碳价和电价的关联关系,分析了碳排放成本对火电机组运行生产效益的影响,协调了碳电生产之间耦合因素。

上述文献主要从碳电市场对发电机组运行、规划与成本效益等方面进行了研究,但均未综合考虑碳排放权市场和电力市场对火电行业的定价和交易带来的影响和挑战,完善的碳排放权市场和电力市场体系能促进火电行业运营模式由传统计划体制向全面市场化竞价转变。基于对电力市场和碳市场交易价格的双重分析,下面建立了火电机组边际成本与碳电价格的强关联因素模型,从而进一步优化了火电机组出力,提出了全面考虑碳电市场下的运行风险与市场竞价策略,并根据碳电市场的动态变化实现对机组出力的实时调整,保障机组的最大化利润。此外,通过算例仿真分析了火电机组在电力市场、电力市场+免费配额市场、电力市场+有偿配额市场下的经济效益。

## 1 国内外碳电市场发展现状

### 1.1 国内碳电市场

自2015年新一轮电力市场改革开启以来,国内

相关机构、电力企业及科研单位均围绕电力现货市场开展了大量的政策、机制及理论技术等方面的研究。2017年开启了第一批电力现货市场8个试点省份,根据各个省份的电力系统现状、特点及省内实际情况,其市场建设模式如表1所示。2022年1月,发改委、能源局发布了《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》,要求加快建设全国统一电力市场体系,实现电力资源在更大范围内共享互济和优化配置,提升电力系统稳定性和灵活调节能力,推动形成适合中国国情、有更强新能源消纳能力的新型电力系统。电力现货市场进入改革发展新阶段,未来电力现货市场将会向着省内、省间、全国相互协调、相互衔接的立体化交易模式迈进。

表1 试点省份市场建设模式

试点省份	市场模式
广东	中长期+全电量日前+实时现货市场
内蒙古(西部)	中长期+日前+日内+实时交易
浙江	日前市场+实时市场(全电量)
山西	中长期+日前+日内交易、实时交易
山东	日前+日内+实时(全电量)
福建	中长期+现货市场
四川	中长期+日前+实时市场
甘肃	中长期市+日前+实时市场 富余新能源跨省区现货交易的区域

2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会上表示,中国将力争在2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和,双碳成为了能源结构转型的重要导向。中国在2011年开启碳配额交易试点,2013年逐渐形成了8个碳交易试点地区,并在2021年7月16日正式启动全国碳市场。碳市场主要有两种类型,分别为碳配额交易和自愿减排交易。碳配额交易市场是以控排企业获得的碳配额为交易对象,如火电、水泥等行业;自愿减排交易是通过实施项目削减温室气体排放而取得的减排凭证,如风电、光伏。

碳配额交易市场的运行机制总体分为碳配额核定与分配、市场交易、监测核查、清缴抵消等。碳配额总量由主管部门采用基准法、祖父法、拍卖法等进行核定,中国目前碳配额采用免费发放为主,各地预留碳配额采用有偿分配。交易供需方依托交易平台开展碳配额的交易,交易形式包括协议转让、竞价交易、拍卖交易等。在监测、报告与核查方面,企业对排放源进行监测,提交监测报告,主管部门委托第三方机构进行核查。在清缴抵消方面,重点排放单位在规定时间内向省级主管部门清缴上年度的碳配额。

自愿减排交易以自愿减排项目备案和自愿减排量备案为前提。自愿减排项目备案是对项目合理性的评判,自愿减排量备案是对已合格项目所产生的减排量的量化评估。中国碳交易市场作为市场化的减排机制,相比传统的财政补贴等政策,在节约成本、促进技术创新和调动企业积极性方面都具有更好的优势。

在双碳目标下,中国碳市场建设在相关立法支持、碳配额价格、CCER 审批等方面,存在积极的预期。

## 1.2 国外碳电市场

国外电力现货市场经过多年的建设与发展,已经相对较为成熟。美国 PJM 电力市场、英国电力市场和北欧电力市场是 3 种较为典型的市场模式。美国 PJM 市场的电力供需相对偏紧,强调现货市场的资源优化配置功能,日前市场采用“全电量优化”,同时考虑电能与备用、调频等辅助服务资源的统一优化,利用节点电价引导电网的阻塞管理。英国现货市场采用电力库的模式,提供一个集中的电能购买平台,并允许市场成员对已签订的交易计划进行偏差修正,交易量较小。北欧电力市场水电装机比例高达 50%,阻塞主要存在于一些重要断面上,功能在于协调各国的资源特性,提供一个高效的跨国资源优化配置平台。美国 PJM、英国和北欧电力市场的现货市场模式如表 2 所示。

表 2 国外典型市场模式

市场	模式	价格
美国 PJM	日前市场(电能+备用)	节点边际
	实时市场(电能+调频)	节点边际
英国	日前市场(电能)	系统边际
	平衡机制(电能+辅助服务)	按报价
北欧	日前市场(电能)	分区边际
	日内市场(电能)	撮合定价
	平衡机制(电能与辅助服务)	系统边际

当前,国际碳市场发展相对较为迅速。截至

2021 年 4 月,全球运行的国家和地区碳市场有 30 个,涵盖 CO<sub>2</sub> 年排放量为 43 亿 t,约占全球排放量的 9%,覆盖地区的 GDP 之和占全球 GDP 的 37% 左右。目前,全球相对成熟的碳市场有欧盟、瑞士、韩国、美国区域温室气体倡议、美国加利福尼亚州和加拿大魁北克省等 6 个。欧盟碳市场启动于 2005 年,是最早的碳市场,涵盖了欧盟 28 个成员国、挪威、冰岛和列支敦士登,覆盖电力、工业和航空,以 4 年为一个履约周期。加利福尼亚州政府于 2013 年实施碳交易制度,是北美最大的区域性强制市场。自该市场运行以来,加州 GDP 平均每年增长 6.5%,而美国全国 GDP 每年增长 4.5%,碳交易市场的建立为经济的发展起到了一定的促进作用。

电力行业作为碳排放领域的主力军,碳排放市场中的配额机制、交易规则、碳交易价格将会对电力企业的生产运行造成较大的影响,两者之间存在相互影响、相互制约、相互促进的关系。未来随着双碳建设的不断推进与能源结构低碳转型,碳电市场的协同发展将会成为未来的趋势,也能更好地促进碳电技术提升和经济发展。

## 2 火电机组碳电市场关系联动

### 2.1 火电机组碳排放权分配机制

碳排放权是单位或企业根据相关法律规定取得的温室气体排放权利。火电厂碳配额分配一般为无偿碳配额、免费碳配额或两者结合的方式,如图 1 所示。无偿配额目前是通过基准线法进行分配,公式为

$$E_q = \delta \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi,t} \quad (1)$$

式中: $E_q$  为初始碳配额分配量; $\delta$  为分配因子; $N_G$  为机组数量; $P_{Gi,t}$  为机组  $i$  在  $t$  时段的计划电量; $T$  为调度周期。

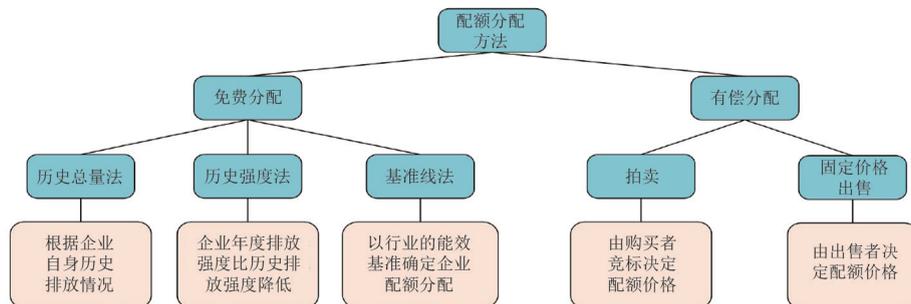


图 1 碳配额分配方法

电厂根据获得的初始无偿碳配额量安排生产计划,当碳配额量不足时,则需要通过碳市场交易购买所需的新增碳排放权额度,即初始获得量与市场购买所得碳排放权的总额不得高于其总排放量。当总碳排放量低于免费碳配额量,则可以通过市场交易将多余的碳配额进行出售,获得利润。

火电企业通过改进碳排放权碳配额的管理,实现经济发展和环境治理的双重效益目标。在碳达峰、碳中和的背景下,火电企业低碳化发展更有助于实现经济利益和社会效益的双赢。

## 2.2 碳排放权对电力市场的影响分析

电力行业是碳排放权交易市场的主要参与者,碳排放权交易市场的建立有助于促进火电机组低碳技术发展,减少碳排放,助力新型电力系统建设。同时根据《国家发展改革委关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知》(发改价格〔2021〕1439号),规定有序放开全部燃煤发电电量上网电价,即所有燃煤发电机组原则上均需要进入市场进行竞价。碳排放市场将会影响火电机组在电力市场中的竞价交易,为火电机组带来了新的市场和技术挑战。火电机组需要在以往的运行成本和市场电价的基础上,将碳排放交易纳入火电机组运营综合考虑。

火电机组利用煤炭、天然气等化石燃料进行电力生产的过程会产生碳排放,需要具有相应的碳排放额度才可以生产,同时碳排放权市场的建立能够促进火电机组和清洁能源机组之间的发电权交易,从而更好地促进清洁能源的消纳<sup>[9]</sup>。

火电机组需要有相应的碳排放额度方可以进行生产,当碳排放额度无法满足部分高耗能火电机组的生产需求时,则需要进行碳配额交易或者低碳技术改造,才可以保证火电机组的上网电量。当碳配额的价格高于碳减排边际成本时,火电机组需要利用碳捕集、封存与利用等低碳技术降低火电机组的碳排放,从而控制履约期内的碳排放总量不超过额定配额数量。此外,当配额价格较低,火电机组可以通过配额购买的方式来进行履约。

火电机组需根据生产边际成本在现货市场中进行竞价出清。引入碳排放权市场之后,火电机组在报价的时候需要考虑碳排放成本对火电机组造成的影响,其碳排放权交易市场出清价格将会影响火电机组的竞价。火电机组会根据碳排放成本调整报

价,可能会导致机组中标电量减少,若不考虑碳排放成本,火电机组的度电收益将会降低。因此,综合考量火电机组在碳市场和电力市场的成本与效益是目前火电机组运营亟待解决的问题。

## 3 火电机组碳电市场模型

电力现货市场中,发电机组通过单调递增的竞价方式进行电价和电量的申报,用户侧则采取报量和报价或者报量不报价两种方式。目前的四川电力现货规则中规定,发电侧报价、用户侧不报价的市场,发电侧和用户侧均按照市场统一出清价格进行结算,即现货市场电价。火电机组则需要根据成本特性与现货价格参与市场竞价,提高其市场利润。同时,由于火电机组在电力生产过程中会产生CO<sub>2</sub>排放,火电机组的碳配额分配及交易将会对火电机组的效益造成影响。

### 3.1 火电机组出力模型

火电机组具有良好的调节性能,运行成本函数是与出力相关的二次函数,在市场中竞价需要基于其出力特性和约束条件。

#### 1) 火电机组出力成本

$$F_{i,t} = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (2)$$

式中: $F_{i,t}$ 为火电机组*i*在*t*时段的出力成本; $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ 分别为火电机组*i*出力成本系数; $P_{i,t}$ 为火电机组*i*在*t*时段的出力。

#### 2) 火电机组出力约束

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

式中, $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 分别为火电机组*i*出力上、下限。

#### 3) 机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta t U_i \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta t D_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t-1}$ 为火电机组*i*在*t-1*时段的出力; $\Delta t$ 为计划周期内的时间间隔; $U_i$ 和 $D_i$ 分别为火电机组*i*的爬坡速率和降坡速率。

### 3.2 火电机组碳电市场竞价模型

电力市场与碳市场环境下,火电机组需要考虑电力与碳排放权的综合成本与收益进行出力优化,现货市场电价、碳市场价格与火电机组成本的关联关系是调整火电出力、保证其经济性的重要依据。

#### 3.2.1 电力市场竞价模型

电力市场环境下,火电机组需要尽可能大的利

润,即市场售电收入减去机组发电成本,可表示为

$$R_{i,t} = \lambda_{e,t} P_{i,t} - (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \quad (5)$$

式中: $R_{i,t}$ 为火电机组  $i$  在  $t$  时段的利润; $\lambda_{e,t}$ 为  $t$  时段的现货电价。

利用极值法求解火电机组的最大化利润为

$$\frac{dR_i}{dP_{i,t}} = \frac{d(\lambda_{e,t} P_{i,t})}{dP_{i,t}} - \frac{d(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i)}{dP_{i,t}} = 0 \quad (6)$$

$$f(P_{i,t}) = \frac{dF_{i,t}}{dP_{i,t}} = 2a_i P_{i,t} + b_i \quad (7)$$

式中, $f(P_{i,t})$ 为火电机组的边际成本函数,表示当前机组生产 1 MW 电能所需要的成本。

根据上述模型式(6)一式(7)求解,通过调整机组出力,使得机组生产的边际成本等于现货电价,可以满足机组的最大化利润,如式(8)所示。

$$\lambda_{e,t} = 2a_i P_{i,t} + b_i \quad (8)$$

通过式(8),可以求得与现货电价对应的机组边际成本,继而调整其机组当前时段出力。上面仅从电力市场角度考虑,未考虑碳市场。

### 3.2.2 计入免费碳配额市场竞价模型

电力市场和碳市场环境下,一方面要考虑火电机组的售电效益;另一方面需要考虑碳配额带来的影响。考虑到目前火电机组的碳配额是由国家免费发放,且剩余部分碳配额可以进行再出售,火电机组碳电成本可表示为

$$F_{ci,t}^{(0)} = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i - Q_{ex,t} \lambda_{c,t} \quad (9)$$

$$Q_{i,t} = q_i P_{i,t} \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I Q_{ex,i,t} = W \quad (11)$$

式中: $F_{ci,t}^{(0)}$ 为免费碳配额条件下的火电机组生产成本; $Q_{ex,i,t}$ 为  $t$  时段的碳配额交易量; $Q_{i,t}$ 为机组  $i$  在  $t$  时段生产电力所需求的碳配额; $q_i$ 为机组  $i$  的碳排放强度基准值; $W$ 为火电厂生产计划划分至当天的碳配额量。

碳电市场环境下火电机组的利润可表示为

$$R_{i,t}^{(0)} = \lambda_{e,t} P_{i,t} - [(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) - Q_{ex,t} \lambda_{c,t}] \quad (12)$$

式中: $R_{i,t}^{(0)}$ 为碳电市场环境下火电机组  $i$  在  $t$  时段的利润; $\lambda_{c,t}$ 为  $t$  时段碳交易市场的碳价。

利用极值方法求解最大化利润为

$$\frac{dR_i}{dP_{i,t}} = \frac{d\lambda_{e,t} P_{i,t}}{dP_{i,t}} - \frac{d(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i - Q_{ex,t} \lambda_{c,t})}{dP_{i,t}} = 0 \quad (13)$$

$$f(P_{i,t}^{(0)}) = \frac{dF_{ci,t}^{(0)}}{dP_{i,t}} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (14)$$

式中, $f(P_{i,t}^{(0)})$ 为当前火电机组的边际成本函数。

同样通过调整机组出力,使得机组生产的边际成本等于现货电价,可以满足机组的最大化利润。

$$\lambda_{e,t} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (15)$$

通过式(15),求得与现货电价对应的机组边际成本,同时可以看出,火电机组的出力与电价和碳排放权价格均有关联。

### 3.2.3 计入有偿碳成本竞价模型

考虑到未来碳市场的不断完善,碳配额的免费发放将逐步转为有偿碳配额,故火电机组的生产成本需要计入碳配额购买成本,可表示为:

$$F_{ci,t}^{(1)} = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i + Q_{i,t} \lambda_{c,t} \quad (16)$$

$$Q_{i,t} = q_i P_{i,t} \quad (17)$$

式中, $F_{ci,t}^{(1)}$ 为火电机组生产成本。火电机组的利润可表示为

$$\max R_{i,t}^{(1)} = \lambda_{e,t} P_{i,t} - [(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + Q_{i,t} \lambda_{c,t}] \quad (18)$$

式中, $R_{i,t}^{(1)}$ 为碳电市场环境下火电机组  $i$  在  $t$  时段的利润。

利用极值方法求解最大化利润为

$$\frac{dR_i}{dP_{i,t}} = \frac{d\lambda_{e,t} P_{i,t}}{dP_{i,t}} - \frac{d(a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i + Q_{i,t} \lambda_{c,t})}{dP_{i,t}} = 0 \quad (19)$$

$$f(P_{i,t}^{(1)}) = \frac{dF_{ci,t}^{(1)}}{dP_{i,t}} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (20)$$

式中, $f(P_{i,t}^{(1)})$ 为当前火电机组的边际成本函数。

同样通过调整机组出力,使得机组生产的边际成本等于现货电价,可以满足机组的最大化利润。

$$\lambda_{e,t} = 2a_i P_{i,t} + b_i + \lambda_{c,t} q_i \quad (21)$$

通过式(21),求得与现货电价对应的机组边际成本。同时可以看出,电价较高时可以增加火电机组的出力,碳排放权价格较高时可以下调机组出力。

## 3.3 现货价格预测

现货电价是一个时间序列,采用自回归积分滑动平均模型电价进行预测:

$$\lambda'_{e,t} = e_t + \varphi_1 \lambda_{e,t-1} + \theta_1 \lambda_{e,t-1} + \varepsilon_t \quad (22)$$

$$\varepsilon_t \sim N(0, \delta_t^2) \quad (23)$$

式中: $\lambda'_{e,t}$ 为  $t$  时段预测现货电价; $e_t$ 为随时间变化而变化的电价均值; $\varphi_1$ 为电价序列的自回归系数; $\theta_1$ 为滑动平均系数; $\delta_t^2$ 为电价序列方差。

## 4 火电机组市场出力优化模型

市场环境下,火电机组要转变传统的计划发电为市场竞价方式,根据市场价格调整机组生产的边际成本,从而优化机组出力,保障经济效益。

### 4.1 目标函数

基于火电机组出力特性和成本模型,计入现货电价和碳配额等关键因素,建立以火电机组利润最大化为目标的函数模型为

$$F(x) = \max \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{i,t} & \text{场景 1} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{i,t}^{(0)} & \text{场景 2} \\ \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I R_{i,t}^{(1)} & \text{场景 3} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $F(x)$ 为火电机组一天内利润目标函数;场景 1 表示仅考虑电力市场;场景 2 表示电力市场和免费碳配额市场;场景 3 表示电力市场和有偿碳配额市场。

### 4.2 优化求解

从以上 3 个不同的场景进行分析优化发电机组出力。基于现货价格预测和碳市场价格,求得不同场景下的边际成本模型,进一步优化调整发电机组出力,实现碳电综合效益最大化,具体求解流程如图 2 所示。

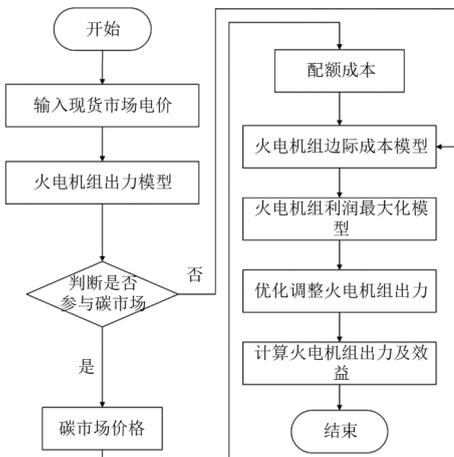


图 2 求解流程

求解步骤:

1)输入数据。输入电力市场现货电价和火电机组出力特性模型。

2)判断是否参与碳市场。若不参与碳市场,则转向步骤 3;若参与碳市场,则转向步骤 4。

3)成本与利润模型建立。建立该情景下的火电机组边际成本模型和利润最大化模型,继而转向步骤 5。

4)输入碳市场价格,按有偿碳配额或免费碳配额两种方式分别计入碳配额成本,按不同的场景分别转向步骤 3。

5)分析计算。调整该场景下的火电机组最优出力并计算相应的效益。

## 5 算例仿真

### 5.1 基础数据

算例以某发电厂为例,该发电厂有两台 1000 MW 火电机组,机组的成本系数及碳排放强度如表 3 所示。由于两台机组性能相同,算例仅针对单台进行分析。现货市场电价如图 3 所示,碳排放权交易价格按国内目前的碳市场行情基本在 30~70 元/t,简化采用正态分布的方式生成其价格如图 4 所示。

表 3 火电机组参数

参数	数值
$a/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-2})$	0.2
$b/(\text{元} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	120
$c$ 成本参数/元	1560
碳排放强度 $q/(\text{t} \cdot (\text{MWh})^{-1})$	0.88

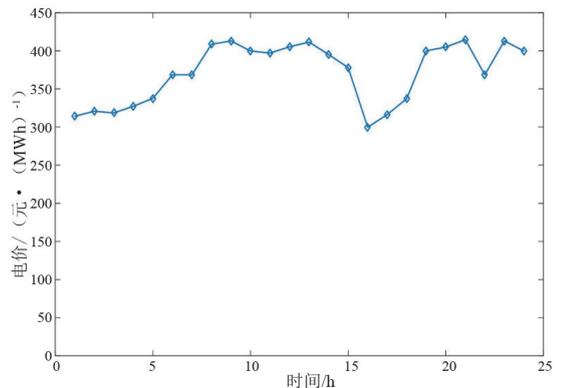


图 3 现货市场电价

### 5.2 仿真分析

基于上述机组参数与碳电市场生成价格,通过所建模型和求解方法分别分析和计算了电力市场、电力市场+免费碳配额、电力市场+有偿碳配额 3 种情况下的火电机组优化出力、运营情况及效益分析。

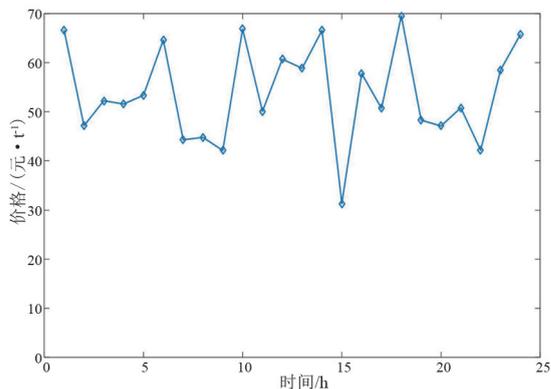


图 4 碳市场价格

### 1) 电力市场运行分析

电力市场环境下,根据火发电机组的出力特性与成本模型,考虑电力市场现货价格,依据现货市场价格调整火发电机组的出力,使得火发电机组的边际成本等于现货电价,求得火发电机组出力及相应的碳排放量,如图 5 所示。可以看出在机组出力与现货价格存在明显的正相关,价格越高,机组出力越大。

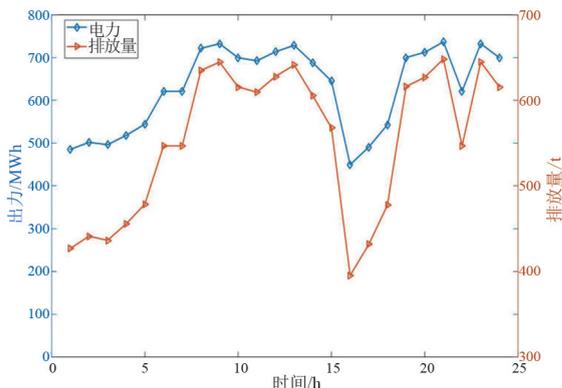


图 5 电力市场下火发电机组运行情况

### 2) 电力市场+免费配额运行分析

考虑电力市场与免费配额环境下,火电机组需要根据电力现货市场价格与碳市场交易价格调整火电机组的出力,使得该条件下的机组边际成本等于现货电价,即可求得当前条件下的机组出力与碳排放量,如图 6 所示。此处火电机组为免费发放配额,故剩余的配额可以在碳市场中交易售出,进一步获取利润。

### 3) 电力市场+有偿配额运行分析

考虑到未来碳配额将进行调整,火电机组需要购买相应的配额满足电力生产需求,将会提升机组的生产成本。考虑碳电市场的价格,火电机组将调整其出力至该条件下的边际成本等于现货电价,求得火电机组出力及相应的碳排放量,如图 7 所示。

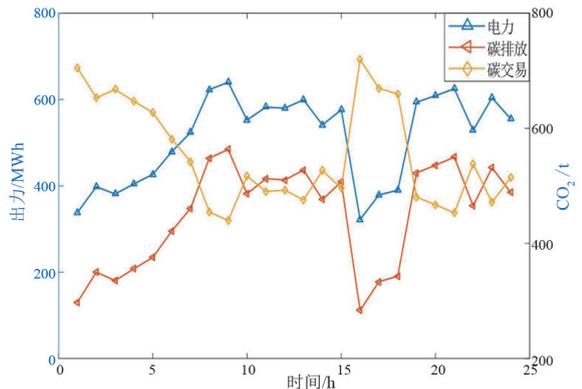


图 6 电力市场+免费配额下运行情况

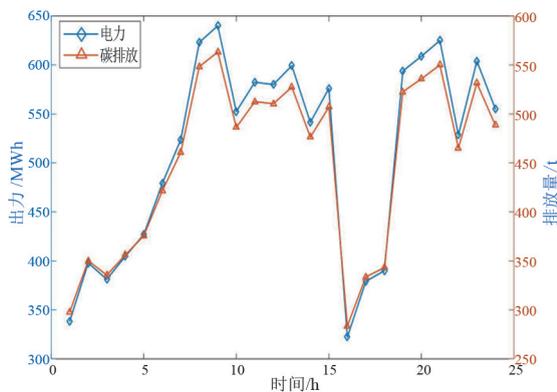


图 7 电力市场+有偿配额下运行情况

基于上述不同条件下的火电机组运营分析,根据机组出力、碳排放量及交易量,进一步求得火电机组市场收入和运行成本,求得各个模式下的收益,其中:电力市场为 369.49 万元;电力市场+免费配额为 255.76 万元;电力市场+有偿配额为 129.78 万元。

## 6 结 论

电力市场与碳市场环境下,火电机组需要面临电价与碳排放权价格的双重不确定性的考验,上面分析了电力市场、电力市场+免费配额、电力市场+有偿配额等模式下的火电机组边际成本模型与市场出力优化策略,建立了以火电机组效益最大化为目标的碳电市场竞价模型,并对其效益和运行结果进行了分析,建议火电机组需要根据碳电市场的运行情况适时调整其出力及市场交易策略。

随着碳达峰、碳中和目标的不断推进,将会持续推动碳交易市场的建设,从而进一步加深对电力市场的影响。火电机组在碳电关系上的耦合度将会不断加深,影响其生产运行与经济效益。

(下转第 89 页)

## 4 结 论

拆解试验结果表明,该站直流电源蓄电池失效主要是由正极板栅腐蚀断裂与负极汇流排腐蚀断裂所致。

1) 正极板栅腐蚀断裂与蓄电池浮充电电压过高有关。过充电时会加速正极板栅腐蚀,使正极板活性物质与板栅脱离,导致蓄电池内阻增大、正极板失效、电池容量下降。

2) 负极汇流排腐蚀与其材质和工艺密切相关。该型蓄电池负极汇流排为 Pb-Sn-Sb 合金材质,会引起 Sb、Sn 在合金晶界处偏析,加速汇流排的晶间腐蚀。同时,负极汇流排的焊接工艺不良也会在一定程度上加速其腐蚀。负极汇流排腐蚀的危害较大,甚至会导致汇流排断裂、电池开路等严重后果。

### 参考文献

- [1] 汪毅,马小平,宋昭昭. 浅谈铅酸蓄电池在变电站中的应用与发展[J]. 蓄电池, 2012, 49(5): 204-208.
- [2] 刘敏,朱宇勋,伍廉奎. 某变电站用铅酸蓄电池失效分析[J]. 蓄电池, 2021, 58(2): 74-79.
- [3] 钟国彬,刘石,徐凯琪,等. 变电站用 VRLA 蓄电池典型失效模式及危险性分析[J]. 蓄电池, 2017, 54(4):

(上接第 52 页)

### 参考文献

- [1] 李健华,刘继春,付浩,等. 基于国外现货市场与四川实际的现货市场建设分析[J]. 四川电力技术, 2021, 44(2): 83-88.
- [2] 胡阳,杨泽,房方,等. 火电机组供电碳减排高维运行特征提取及其最优基准值确定[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 210-220.
- [3] 彭元,娄素华,范越,等. 考虑火电机组储热改造的电力系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3339-3345.
- [4] 刘铠诚,何桂雄,孙洪,等. 碳减排约束下风火发电商市场效益的协调优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 89-95.
- [5] 王淑云,娄素华,刘文霞,等. 考虑火电深度调峰的电力系统低碳发电优化研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 226-231.

160-169.

- [4] 季虎. 一起蓄电池引发的事故分析[J]. 电力安全技术, 2007(7): 32.
- [5] 吴章权. 阀控式铅酸蓄电池负极汇流排腐蚀的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] 朱华,李国民,赵光金,等. 阀控式铅酸蓄电池负极汇流排的腐蚀成因及防护对策[J]. 材料保护, 2015, 48(12): 61-63.
- [7] 唐明成,梁景志. 密封铅酸蓄电池负极汇流排腐蚀研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2007(4): 76-80.
- [8] 国家电网有限公司. 变电站蓄电池组采购标准 第 1 部分: 通用技术规范: Q/GDW 13183.1—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

### 作者简介:

王志高(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为输变电设备腐蚀与防护;

董汉彬(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为直流电源;

陈家慧(1991),女,博士,高级工程师,研究方向为金属技术监督;

王方强(1970),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网环境监测;

许光达(1987),男,硕士,高级工程师,从事变电站交直流电源运检。

(收稿日期:2022-08-26)

- [6] 闫园,林鸿基,文福拴,等. 考虑电价和碳价间 Copula 风险依赖的虚拟电厂竞标策略[J]. 电力建设, 2019, 40(11): 106-115.

- [7] 刘洋,崔雪,谢雄,等. 电碳联动环境下考虑社会效益最优的发电权交易研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 112-117.

- [8] 王斯娴,刘文霞,王丽娜,等. 容量电价与风光火配比相协调的电源规划[EB/OL]. [2022-07-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20220715.1818.004.html>.

### 作者简介:

李健华(1994),男,博士研究生,研究方向为电力市场、电力系统优化调度;

陈雪(1997),女,研究生,研究方向为电力系统经济性分析及电力市场;

付浩(1981),男,高级工程师,研究方向为电力优化调度。

(收稿日期:2022-08-05)