

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240253

# 计及多主体全生命周期碳计量的能量与调频市场运行策略

沈赋<sup>1</sup>, 付玉<sup>1</sup>, 徐潇源<sup>2</sup>, 王健<sup>1</sup>, 杨光兵<sup>1</sup>, 张微<sup>1</sup>, 翟苏巍<sup>3</sup>

(1. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;  
3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

**摘要:** 全生命周期碳排放计量和碳交易机制充分体现了绿色、协调的发展理念, 对于引导市场低碳化建设具有重要意义。面对提升市场经济-环境效益需求, 提出了一种考虑多主体全生命周期碳计量的能量与调频市场运行策略。首先, 基于全生命周期评价方法, 对市场中能源设备主体各环节的碳排放进行量化分析, 计算碳排放系数, 并构建碳交易成本模型。其次, 考虑全生命周期碳排放计量与碳交易机制, 以市场各主体申报成本和总碳排放量最小为目标函数, 构建能量与调频市场出清模型。最后, 采用 IEEE 39 节点系统进行算例验证, 结果表明所建立的模型可以均衡各机组在经济效益和环境效益方面的利益最大化。

**关键词:** 全生命周期碳计量; 能量与调频市场; 出清模型; 碳交易机制

## Energy and regulation market operation strategy considering multi-stakeholder full lifecycle carbon accounting

SHEN Fu<sup>1</sup>, FU Yu<sup>1</sup>, XU Xiaoyuan<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, YANG Guangbing<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHAI Suwei<sup>3</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
3. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

**Abstract:** Full life cycle carbon emission accounting and the carbon trading mechanism fully reflect the green and coordinated development concept. This of great significance for guiding the low-carbon construction of the market. In response to the demand for enhancing market economic and environmental benefits, an operational strategy for energy and frequency regulation markets considering multi-stakeholder lifecycle carbon accounting is proposed. First, based on the full lifecycle assessment method, the carbon emissions of each stage of energy equipment in the market are quantitatively analyzed, the carbon emission coefficients are calculated, and a carbon trading cost model is established. Second, considering carbon emission accounting and carbon trading mechanisms throughout the entire lifecycle, with the objective function of minimizing the declared costs and total carbon emissions of each market entity, a clearing model for the energy and regulation market is constructed. Finally, the IEEE 39-bus system is used for case validation, and the results demonstrate that the proposed model effectively balances the maximization of economic and environmental benefits of market participants.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107097).

**Key words:** full lifecycle carbon accounting; energy and regulation market; clearing model; carbon trading mechanism

## 0 引言

电碳排放准确核算是厘清碳责任分摊及实现碳减排的关键, 碳计量在维护碳交易市场公平性、支

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52107097); 云南省兴滇英才支持计划项目资助(KKRD202204021); 云南省应用基础研究计划项目资助(202101BE070001-061, 202201AU070111); 昆明理工大学高层次人才平台建设项目资助(KKZ7202004004)

持碳核算与碳足迹评价, 以及助力政府落实碳达峰碳中和政策方面具有重要作用。同时, 在新型电力系统建设的背景下, 新能源并网规模的扩大和多元负荷的显著增加, 导致电力系统调频需求呈现持续增长的趋势, 储能系统在辅助调频服务中的作用日益凸显<sup>[1-2]</sup>。

储能作为市场主体参与能量及调频市场, 其出清模型和竞价模式均会影响储能收益规律。为充分发挥储能在辅助调频市场中的性能优势, 已有文献

围绕储能作为市场主体参与能量及调频市场的出清建模<sup>[3-4]</sup>和竞价策略<sup>[5-6]</sup>等方面展开研究。文献[7]构建复合储能同时参与能量市场、旋转备用市场及调频市场的多市场运行策略模型。文献[8]提出储能能日前和实时市场价格不确定环境下考虑循环损耗成本的最优竞价策略。实际上,在能量及调频市场中,储能系统出清模型和竞价模式之间是相互影响的。文献[9]基于云储能租赁辅助提出了风储参与能量-调频市场系统构架,以云储能最优组合出清建模以确保聚合商日前竞价策略最优。基于此,本文采用竞价出清模式,各市场主体分别报价,调度中心根据调频需求并结合各机组的报价完成市场出清。

近年来,随着我国电力市场和碳市场的逐步完善,如何实现电力现货市场和碳市场深度耦合,推进电碳市场向竞争市场发展已经成为一个新的研究重点。目前碳交易机制的模型主要为碳交易<sup>[10-12]</sup>和阶梯式碳交易模型<sup>[13-15]</sup>。文献[16-17]考虑碳交易模型,提出了基于点对点交易的最优调度策略,共同优化能源和碳排放许可交易;考虑用户的能源消费水平和低碳需求响应,文献[18]提出了一种需求侧的双层碳交易方案;文献[19]考虑阶梯式碳交易,提出了一种基于鲁棒优化的微电网低碳经济调度模型。以上研究虽然都是从碳视角出发,但未对低碳调度中能源的生产建设、输送和运行等过程进行碳轨迹追溯。因此,有必要对各市场主体在全生命周期内计算其总碳排放量,进一步提高各市场主体参与能量与调频市场运行交易的准确性。

综上所述,本文提出了一种考虑多主体全生命周期碳排放计量的能量与调频市场出清策略,协调各机组在联合市场中的中标电量。首先,考虑全生命周期内的碳排放计量,评估参与能量及调频市场的各主体的总碳排放量,并结合碳交易机制,建立碳交易成本模型。其次,构建考虑多主体全生命周期碳排放计量的能量与调频市场出清模型,以各主体市场申报成本和全生命周期碳排放量最小为目标函数。最后,基于能量与调频市场出清模型,均衡各机组在能量与调频市场中的经济性和环保性,优化机组的中标结果。

## 1 基于多主体全生命周期的碳排放系数计量模型

### 1.1 基于全生命周期的碳排放系数计量方法

采用全生命周期评价方法全面记录能源从生产、运输到消费各个阶段的碳排放轨迹,可有效量化原材料的来源、系统建设、系统运行和退役处置等环节对碳排放的影响。因此,本文采用全生命周

期评价法对系统各主体的碳排放情况进行分析。其中,为积极响应“双碳”目标,本文除计及火电机组的碳排放外,还考虑了光伏机组和储能电站的碳排放。基于全生命周期能源链碳排放分析法,将各类能源设备主体的能源流动过程进行简化,对各个环节的能源消耗或转换过程的碳排放系数进行精准计量。考虑全生命周期碳计量的能量与调频市场交易框架如图1所示。

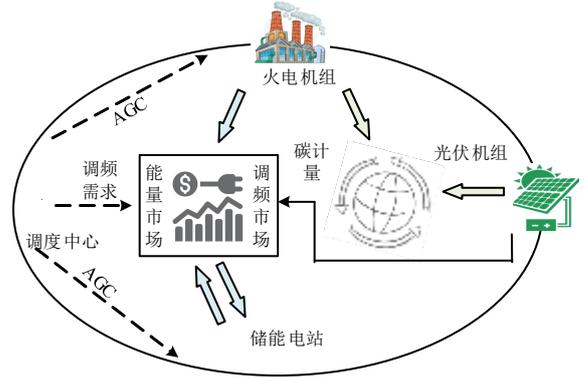


图1 考虑全生命周期碳计量的能量与调频市场交易图  
Fig. 1 Energy and regulation market trading chart considering full lifecycle carbon accounting

#### 1) 火电机组碳排放计量

基于全生命周期法的火电机组碳排放计量需考虑设备生产、建设、运输和运行过程,其不同阶段碳排放计量如式(1)所示。

$$\begin{cases} E_{gc} = E_{gpb} + E_{gt} + E_{gr} \\ E_{gpb} = \sum_{x=1}^M [(1 + v_x) e_{gp} m_{gp} + e_{gb} m_{gb}] \\ E_{gt} = \sum_x^F e_{gt} m_{gt} \\ E_{gr} = c_{fuel} U_g \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_{gc}$  为火电机组计及全生命周期的碳排放系数;  $E_{gpb}$  为火电机组在生产和建设环节的碳排放系数;  $E_{gt}$  为火电机组在运输环节的碳排放系数;  $E_{gr}$  为火电机组在运行环节的碳排放系数;  $M$  为生产火电机组需要的材料种类数;  $F$  为运输火电机组需要的燃料种类数;  $v_x$  为生产所用第  $x$  种材料的损耗系数;  $e_{gp}$ 、 $e_{gb}$  分别为火电机组在生产、建设环节所用的第  $x$  种材料的碳排放强度;  $m_{gp}$ 、 $m_{gb}$  分别为火电机组在生产、建设环节所用第  $x$  种材料的质量;  $e_{gt}$ 、 $m_{gt}$  分别为火电机组在运输环节所用的第  $x$  种燃料的碳排放强度和质量;  $c_{fuel}$  为火电机组发电每单位

标准煤当量的第  $c$  类温室气体的碳排放系数;  $U_g$  为火电机组发单位电量的供电标准煤耗。

### 2) 光伏机组碳排放计量

光伏发电作为清洁能源, 在运行阶段未直接排放  $\text{CO}_2$ , 此阶段的碳排放强度为 0, 但其在生产、建设和运输过程中会导致碳排放。基于全生命周期法的新能源机组碳排放计量应当考虑光伏机组生产、建设和运输 3 个阶段。因此, 光伏机组不同阶段碳排放特性计量模型为

$$\begin{cases} E_{\text{pvc}} = E_{\text{pvpb}} + E_{\text{pvt}} \\ E_{\text{pvpb}} = \sum_{a=1}^Q [(1 + v_a) e_{\text{pvpb}} m_{\text{pvpb}} + e_{\text{pvpb}} m_{\text{pvpb}}] \\ E_{\text{pvt}} = \sum_a^U e_{\text{pvt}} m_{\text{pvt}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E_{\text{pvc}}$  为光伏机组计及全生命周期的碳排放系数;  $E_{\text{pvpb}}$  为光伏机组在生产和建设环节的碳排放系数;  $E_{\text{pvt}}$  为光伏机组运输环节的碳排放系数;  $Q$  为生产光伏机组需要的材料种类数;  $U$  为运输光伏机组需要的燃料种类数;  $v_a$  为生产所用的第  $a$  种材料的损耗系数;  $e_{\text{pvpb}}$ 、 $e_{\text{pvpb}}$  分别为光伏机组在生产、建设环节所用的第  $a$  种材料的碳排放强度;  $m_{\text{pvpb}}$ 、 $m_{\text{pvpb}}$  分别为光伏机组在生产、建设环节所用第  $a$  种材料的质量;  $e_{\text{pvt}}$ 、 $m_{\text{pvt}}$  分别为光伏机组在运输环节所用的第  $a$  种燃料的碳排放强度和质量。

### 3) 储能电站碳排放计量

储能电站在使用和废弃回收阶段会产生较多的碳排放, 因此, 储能电站全生命周期下的碳排放主要包括生产建设、运输、运行以及回收环节。因此, 储能电站不同阶段碳排放计量模型为

$$\begin{cases} E_{\text{enc}} = E_{\text{enpb}} + E_{\text{ent}} + E_{\text{eno}} + E_{\text{enr}} \\ E_{\text{enpb}} = \sum_{h=1}^R [(1 + v_h) e_{\text{enpb}} m_{\text{enpb}} + e_{\text{enpb}} m_{\text{enpb}}] \\ E_{\text{ent}} = \sum_h^H e_{\text{ent}} m_{\text{ent}} \\ E_{\text{eno}} = 365 \frac{m_o}{n_o} (E_{\text{enpb}} + E_{\text{ent}}) \\ E_{\text{enr}} = c_e e_c l_c \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $E_{\text{enc}}$  为储能电站计及全生命周期的碳排放系数;  $E_{\text{enpb}}$  为储能电站在生产和建设环节的碳排放系数;  $E_{\text{ent}}$  为储能电站在运输环节的碳排放系数;  $E_{\text{eno}}$  为储能电站在运行环节的碳排放系数;  $E_{\text{enr}}$  为储能机组废弃回收环节的碳排放系数;  $R$  为生产储能装

置需要的材料种类数;  $H$  为运输储能装置需要的燃料种类数;  $v_h$  为生产所用的第  $h$  种材料的损耗系数;  $e_{\text{enpb}}$ 、 $e_{\text{enb}}$  分别为储能装置在生产、建设环节所用的第  $h$  种材料的碳排放强度;  $m_{\text{enpb}}$ 、 $m_{\text{enb}}$  分别为储能装置在生产、建设环节所用第  $h$  种材料的质量;  $e_{\text{ent}}$ 、 $m_{\text{ent}}$  分别为储能装置在运输环节所用的第  $h$  种燃料的碳排放强度和质量;  $m_o$  为日充放电次数;  $n_o$  为运行环节的替换系数;  $c_e$  为电池电量与电能损耗之间的折算系数;  $e_c$  为电池材料运往废弃回收工厂单位距离消耗能源的碳排放强度;  $l_c$  为电池材料组件运往工厂的运输距离。

## 1.2 碳排放模型

在我国碳交易机制下, 相关部门会按照碳排放强度基准值为各火电机组分配相应的碳排放配额<sup>[20]</sup>。通常可以认为: 当实际的碳排放强度高于基准值, 则实际的碳排放量高于碳排放配额, 火电机组需要购买缺额, 反之机组可以出售余额。

### 1) 碳排放权配额模型

目前, 国内电力行业一般采用无偿分配的原则对初始碳排放配额进行划分, 该原则将各发电设备的实际产能与政府规定的基准值相乘, 即可得到系统总体的碳排放配额<sup>[21]</sup>。本文采用无偿配额的方式对火电机组进行配额, 其中光伏机组的配额数值  $E_c$  参考文献<sup>[22]</sup>, 具体计算公式如式(4)。

$$\begin{cases} E_c = E_g + E_{\text{pv}} \\ E_g = \varphi_g \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} P_{t,i}^g \\ E_{\text{pv}} = \varphi_{\text{pv}} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{pv}}} P_{t,k}^{\text{rc}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $E_g$ 、 $E_{\text{pv}}$  分别为火电机组、光伏机组的碳排放配额;  $T$  为日前调度周期;  $N_g$  为火电机组的数量;  $N_{\text{pv}}$  为光伏机组的数量;  $\varphi_g$ 、 $\varphi_{\text{pv}}$  分别为火电机组、光伏机组的单位碳配额;  $P_{t,i}^g$  为  $t$  时段火电机组  $i$  的中标出力;  $P_{t,k}^{\text{rc}}$  为  $t$  时段光伏机组  $k$  的实时出力。

### 2) 实际碳排放模型

本文考虑了光伏机组和储能电站的全生命周期碳排放, 光伏机组和储能电站均有碳排放系数。根据 1.1 节对能源链的传递环节进行归纳简化, 再对各机组在全生命周期内的碳排放系数进行计量, 得到全生命周期碳计量的各机组碳排放总量  $F_{\text{CO}_2}$ , 如式(5)所示。

$$\begin{cases} F_{\text{CO}_2} = E_G + E_{\text{PV}} + E_{\text{EN}} \\ E_G = E_{\text{gc}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} P_{t,i}^g \\ E_{\text{PV}} = E_{\text{pvc}} \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{pv}}} P_{t,k}^{\text{re}} \\ E_{\text{EN}} = E_{\text{enc}} \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{\text{es}}} P_{t,m}^{\text{escap}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $N_{\text{es}}$  为储能电站的数量;  $E_G$ 、 $E_{\text{PV}}$ 、 $E_{\text{EN}}$  分别为火电机组、光伏机组、储能电站在全生命周期内的碳排放量;  $P_{t,m}^{\text{escap}}$  为  $t$  时段储能电站  $m$  在能量与调频市场中标的调频容量。

### 3) 碳交易成本模型

根据各机组的碳排放配额及实际碳排放量, 可求得实际参与到碳交易市场中的碳排放权交易额。基于全生命周期碳排放计量下各机组的碳交易成本如式(6)所示。

$$F_{\text{CO}_2}^{\text{price}} = \gamma_c (F_{\text{CO}_2} - E_c) \quad (6)$$

式中:  $F_{\text{CO}_2}^{\text{price}}$  为碳交易成本;  $\gamma_c$  为碳交易价格。

## 2 考虑多主体碳计量的能量与调频市场出清模型

对于本文中的市场出清过程, 可描述为给定期望申报成本, 构建机组参与能量与调频市场的模型, 从而确定各机组在市場中的中标出力情况, 生成出清价格。具体能量与调频市场出清的流程如图2所示, 步骤如下所述。

首先, 市场主体为火电、光伏和储能机组, 各机组在市场的每个时段上申报价格。

其次, 构建考虑多主体碳计量的能量与调频市场出清模型, 以市场中机组申报成本和总碳排放量最小为优化目标。

最后, 电力市场独立系统运营商接收到供需两侧的申报信息后按照申报价格的高低进行出清, 得到市场的节点边际电价, 以及火电、储能、光伏机组在能量与调频市场中的中标出力。

碳交易机制的引入会使火电机组产生额外的能源成本与收入。当火电机组的实际碳排放量高于所分配的碳排放配额时, 火电机组需要购买缺额, 此时, 火电机组则会提高电力市场报价以弥补碳成本。反之则出售余额, 相应机组则会降低市场报价以提高中标量。因此, 本文基于各机组的碳排放特性, 将各机组在全生命周期内所产生的碳交易成本与收益考虑到申报成本的目标函数中, 构建考虑碳交易成本影响的能量与调频市场出清模型。

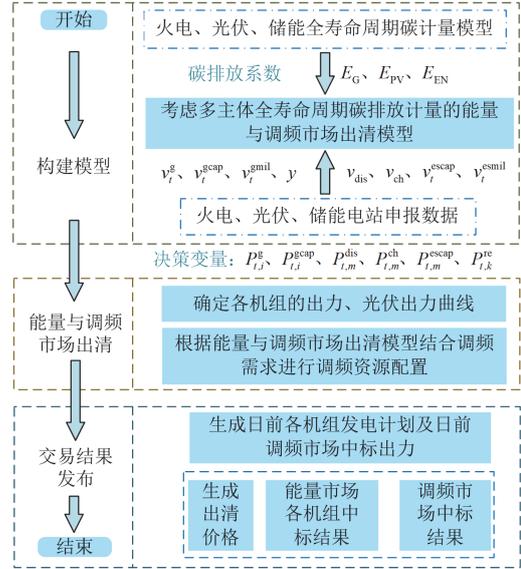


图2 能量与调频市场出清流程

Fig. 2 Clearing process in the energy and regulation market

### 2.1 目标函数

当机组碳排放量越小时, 各机组在市場中的中标出力就会减小, 会降低机组的收益。因此, 本文以各机组在市場总申报成本和全生命周期碳排放总量最小为优化目标, 对系统各类资源进行优化配置。实现各机组在经济效益和环境效益方面的最优化, 目标函数如式(7)所示。

$$\begin{cases} \min F_1 = C_t^G + C_t^{\text{PV}} + C_t^{\text{ES}} + F_{\text{CO}_2}^{\text{price}} \\ \min F_2 = F_{\text{CO}_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $C_t^G$ 、 $C_t^{\text{ES}}$  分别为  $t$  时段火电机组、储能电站在能量与调频市場中的总申报成本;  $C_t^{\text{PV}}$  为  $t$  时段因光伏出力偏差而导致的惩罚成本。

火电机组在能量与调频市場中的总申报成本为

$$C_t^G = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{i=1}^{N_g} [v_t^g P_{t,i}^g + (v_t^{\text{gcap}} + v_t^{\text{gmil}}) P_{t,i}^{\text{gcap}}] \quad (8)$$

式中:  $v_t^g$  为  $t$  时段机组在能量市場中所申报的价格;  $v_t^{\text{gcap}}$ 、 $v_t^{\text{gmil}}$  分别为  $t$  时段机组  $i$  在调频市場中的容量报价和里程报价;  $P_{t,i}^{\text{gcap}}$  为  $t$  时段机组  $i$  在调频市場中标的调频容量。

储能电站在能量与调频市場中的总申报成本为

$$C_t^{\text{ES}} = \sum_{m=1}^{N_{\text{es}}} \sum_{m=1}^{N_{\text{es}}} [(v_{\text{dis}} P_{t,m}^{\text{dis}} - v_{\text{ch}} P_{t,m}^{\text{ch}}) + (v_t^{\text{escap}} + v_t^{\text{smil}}) P_{t,m}^{\text{escap}}] \quad (9)$$

式中:  $v_{\text{ch}}$ 、 $v_{\text{dis}}$  分别为  $t$  时段储能电站  $m$  在电能量市場中标的充、放电价;  $P_{t,m}^{\text{ch}}$ 、 $P_{t,m}^{\text{dis}}$  分别为  $t$  时段储能电站  $m$  在电能量市場中标的充、放电功率;  $v_t^{\text{escap}}$ 、

$v_t^{\text{esmil}}$  分别为  $t$  时段储能电站  $m$  在调频市场中的容量报价和里程报价。

光伏功率出力偏差而导致的惩罚成本  $C_t^{\text{PV}}$  如式 (10) 所示。

$$C_t^{\text{PV}} = \sum_{i=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{pv}}} [(P_{t,k}^{\text{pr}} - P_{t,k}^{\text{re}})y] \quad (10)$$

式中:  $P_{t,k}^{\text{pr}}$  为  $t$  时段光伏机组  $k$  的预测出力;  $y$  为由于光伏出力的不确定性所造成的惩罚系数。

## 2.2 约束条件

### 1) 系统负荷平衡约束

对于每个  $t$  时段, 负荷平衡约束可以描述为

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{t,i}^{\text{g}} + \sum_{k=1}^{N_{\text{pv}}} P_{t,k}^{\text{re}} + \sum_{m=1}^{N_{\text{es}}} (P_{t,m}^{\text{dis}} - P_{t,m}^{\text{ch}}) = D_t \quad (11)$$

式中,  $D_t$  为  $t$  时段的系统负荷。

### 2) 支路潮流约束

支路潮流约束可表述为

$$\begin{aligned} -P_{l,\min} &\leq \sum_{i=1}^{N_g} G_{l,i} P_{t,i}^{\text{g}} + \sum_{k=1}^{N_{\text{pv}}} G_{l,k} P_{t,k}^{\text{re}} - s_+ + s_- + \\ &\sum_{m=1}^{N_{\text{es}}} G_{l,m} (P_{t,m}^{\text{dis}} - P_{t,m}^{\text{ch}}) + \sum_{j=1}^J G_{l,j} P_{t,\text{load}} \leq P_{l,\max} \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $P_{l,\max}$ 、 $P_{l,\min}$  分别为支路  $l$  的潮流传输上、下限;  $G_{l,i}$  为火电机组  $i$  所在节点对支路  $l$  的发电机输出功率转移分布因子;  $G_{l,k}$  为光伏机组  $k$  所在节点对支路  $l$  的发电机输出功率转移分布因子;  $G_{l,m}$  为储能电站  $m$  所在节点对支路  $l$  的发电机输出功率转移分布因子;  $G_{l,j}$  为节点  $j$  对支路  $l$  的发电机输出功率转移分布因子;  $s_+$ 、 $s_-$  分别为支路  $l$  的正、反向潮流松弛变量;  $J$  为系统的节点数量;  $P_{t,\text{load}}$  为  $t$  时段节点  $j$  的母线负荷值。

### 3) 火电机组出力约束

$$\begin{cases} P_{t,i}^{\min} + P_{t,i}^{\text{gcap}} \leq P_{t,i}^{\text{g}} \leq P_{t,i}^{\max} - P_{t,i}^{\text{gcap}} \\ \alpha_{t,i} P_{t,i}^{\min} \leq P_{t,i}^{\text{g}} \leq \alpha_{t,i} P_{t,i}^{\max} \\ 0 \leq P_{t,i}^{\text{gcap}} \leq \beta_{t,i} P_{t,i}^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{t,i}^{\max}$ 、 $P_{t,i}^{\min}$  分别为  $t$  时段机组  $i$  的最大、最小功率;  $\alpha_{t,i}$  为对应约束条件的对偶变量;  $\beta_{t,i}$  为调频容量占比。

### 4) 光伏机组出力约束

$$0 \leq P_{t,k}^{\text{re}} \leq P_{t,k}^{\text{pr}} \quad (14)$$

光伏机组日前市场出力应小于光伏机组出力预测值。

### 5) 储能调频申报容量约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,m}^{\text{ch}} + P_{t,m}^{\text{escap}} \leq P_{t,m}^{\max} \\ 0 \leq P_{t,m}^{\text{dis}} + P_{t,m}^{\text{escap}} \leq P_{t,m}^{\max} \\ 0 \leq P_{t,m}^{\text{escap}} \leq P_{t,m}^{\max} \cdot \delta_{t,m} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\delta_{t,m}$  为调频里程容量比;  $P_{t,m}^{\max}$  为  $t$  时段储能电站  $m$  的最大充放电功率。

### 6) 储能充放电约束

储能系统所发出的实际功率和容量不得超过储能的额定功率和额定容量。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,m}^{\text{ch}} \leq \varepsilon_t^{\text{ch}} P_{t,m}^{\max} \\ 0 \leq P_{t,m}^{\text{dis}} \leq \varepsilon_t^{\text{dis}} P_{t,m}^{\max} \\ \varepsilon_t^{\text{ch}} + \varepsilon_t^{\text{dis}} \leq 1 \\ \varepsilon_t^{\text{ch}}, \varepsilon_t^{\text{dis}} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\varepsilon_t^{\text{ch}}$ 、 $\varepsilon_t^{\text{dis}}$  为 0-1 变量。

### 7) 储能荷电状态约束

$$\begin{cases} S_{t+1,m} = S_{t,m} + \eta_{\text{ch}} P_{t,m}^{\text{ch}} - P_{t,m}^{\text{dis}} / \eta_{\text{dis}} \\ S_{t,m}^{\min} \leq S_{t,m} \leq S_{t,m}^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $S_{t,m}$ 、 $S_{t+1,m}$  分别为  $t$  时段、 $t+1$  时段储能电站  $m$  的荷电状态;  $S_{t,m}^{\max}$ 、 $S_{t,m}^{\min}$  分别为  $t$  时段储能电站  $m$  允许荷电状态的上、下限;  $\eta_{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}$  分别为储能电站  $m$  的充、放电效率。

## 3 算例分析

### 3.1 算例参数设置

本文基于 IEEE 39 节点系统对所提能量与调频市场出清模型的有效性进行验证。在节点 10、13、19、22 处分别增设 4 台 20 MW/60 MWh 的储能电站, 其充放电效率、最大和最小储能容量、调频性能等详细参数参照表 1。各火电机组发电报价、里程报价、容量报价等信息如表 2 所示, 各火电机组调频性能和里程容量比分别为 0.5、7。

表 1 储能电站信息

储能电站	1	2	3	4
放电报价/(元/MWh)	400	400	500	500
充电报价/(元/MWh)	200	200	260	260
最大储能容量	0.90	0.92	0.85	0.95
最小储能容量	0.10	0.05	0.10	0.05
里程报价/(元/MW)	12	16	18	16
容量报价/(元/ $\Delta$ MW)	15	13	20	24
调频性能	1	1.2	1.2	1
里程容量比	12	8	8	12

表 2 火电机组信息

Table 2 Thermal power plant information

机组节点	发电报价/ (元/MWh)	里程报价/ (元/ΔMWh)	容量报价/ (元/MW)
30	200	16	10
31	200	18	12
32	250	14	8
33	250	16	10
34	250	18	12
35	300	14	8
36	300	16	10
37	500	18	12
38	500	16	10
39	500	18	12

引入碳交易机制将碳排放量转化为经济性指标进行研究, 本文关于各能源设备碳排放配额的设置参考国家生态环境部出台的相关政策, 选取单位有功碳排放配额系数, 当前碳交易市场没有对储能设置碳排放配额, 所以该值取 0 g/MWh, 如表 3 所示。根据各能源设备碳排放计量方法, 计算得到火电机组、储能电站、光伏机组在各环节的碳排放系数和单位碳排放系数<sup>[23]</sup>, 如表 4 所示。在仿真分析中, 本文所构建的考虑全生命周期碳排放计量的能量与调频市场出清模型, 采用 Matlab2021b 软件, 通过 YALMIP 工具包调用 CPLEX 求解器对算例进行求解。

表 3 碳排放系数及配额系数

Table 3 Carbon emission and quota coefficients

机组类型	排放系数	配额系数
火电	0.968	0.424
光伏	0.101	0.078
储能	0.192	0

表 4 机组各环节的碳排放系数

Table 4 Carbon emission coefficients of each link in the unit

g/MWh			
机组类型及环节	碳排放系数	机组类型及环节	碳排放系数
火电-生产和建设	0.082	储能-建设	0.068
火电-运输	0.050	储能-运输	0.032
火电-运行	0.836	储能-运行	0.023
光伏-建设和运输	0.101	储能-回收	0.069

本文建立的能量与调频市场出清模型以各主体市场申报成本最小和全生命周期碳排放量最小为目标函数。根据线性加权法为各目标函数赋予权重, 将多目标函数转换为单目标函数  $F'_i$  进行求解。

$$F'_i = \sum_{i=1}^2 f_i F_i \quad (18)$$

式中,  $f_i$  为目标函数  $F_i$  的权重系数。

### 3.2 能量与调频辅助服务市场中标情况

各火电机组、光伏机组、储能电站在能量市场中的 96 时段中标情况如图 3 所示。

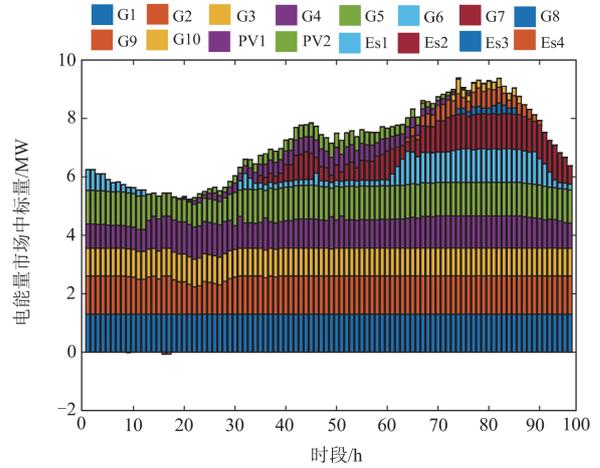


图 3 能量市场中标情况

Fig. 3 Winning bids in the energy market

图 3 中, 由于储能电站的里程容量比大于火电机组, 在能量市场中的参与度较低, 所以 10 台火电机组在每个时段的累计出力约占总发电量的 98%; 储能电站在能量市场中标的电量仅占 1%。此外, 光伏机组在能量市场中满发, 其总发电量约占市场中标电量的 1%。

各火电机组和储能电站在调频市场中的 96 时段中标情况如图 4 所示。

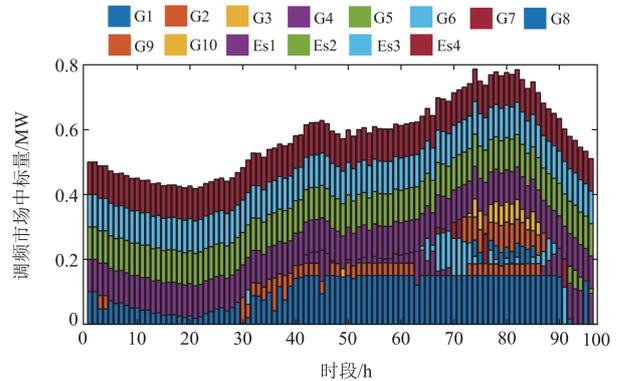


图 4 辅助调频市场中标情况

Fig. 4 Bid winning situation in the auxiliary frequency modulation market

由图 4 可以看出, 在调频市场中, 各储能机组在 96 时段满发, 其发电量占总发电量的 80%。储能电站承担了系统主要的调频里程任务, 相较于火电机组的调节输出, 提供相同调节容量时, 储能对调节信号能快速作出反应, 因此, 储能比火电机组

提供更多的调频里程, 在调频市场上会被系统优先调用。

### 3.3 碳交易机制和碳排放计量的影响分析

能量市场中不同时间段的节点价格即为出清价格, 本文所有节点的电价与节点负荷变化趋势相近, 选取节点 22 的节点电价为代表, 在碳交易机制与全生命周期碳排放计量下能量市场出清价格的对比如图 5 所示。

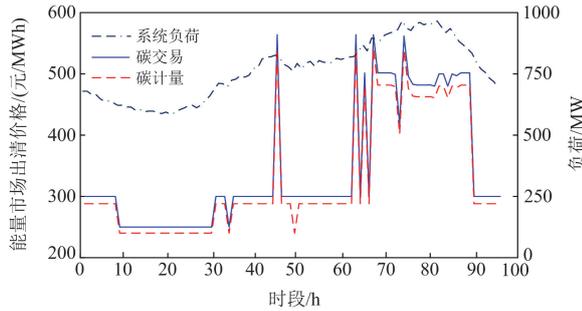


图 5 能量市场出清电价

Fig. 5 Clearing electricity prices in the energy market

由图 5 的能量市场出清电价可得出以下结论:

1) 在不同时段, 能量市场出清价格与节点负荷的大小成正相关, 呈现夜间低、白天高的变化趋势。由于火电机组的发电报价和发电量线性相关, 报价趋势和负荷走势相近。在 60~82 时段, 系统处于用电高峰期, 由于负荷的突增, 所以节点价格出现大幅度的提升。

2) 由于受到碳交易成本的影响, 只考虑碳交易成本时能量市场出清价格会高于计及全生命周期碳排放计量下的能量市场出清价格, 这表明在全生命周期碳排放计量下, 系统运行的整体碳足迹得到更全面的考虑, 促使系统采用更低碳的发电策略, 导致出清价格下降。

在碳交易机制与全生命周期碳排放计量下调频市场出清价格的对比关系如图 6 所示, 调频市场的出清电价包括调频里程价格和调频容量价格。

分析图 6 的能量市场出清电价可得出:

1) 在负荷高峰期, 由于在调频市场中火电机组中标电量减少, 导致调频容量增加, 调频市场的出清价格在负荷高峰期出现降低且呈现波动状态。

2) 与只考虑碳交易成本相比, 在全生命周期碳排放计量下, 电力系统和市场参与者更加关注碳排放的整体影响和长期成本, 促使系统采用更低碳的发电策略, 因此考虑全生命周期碳排放计量的调频市场出清价格低于考虑碳交易成本时的出清价格。

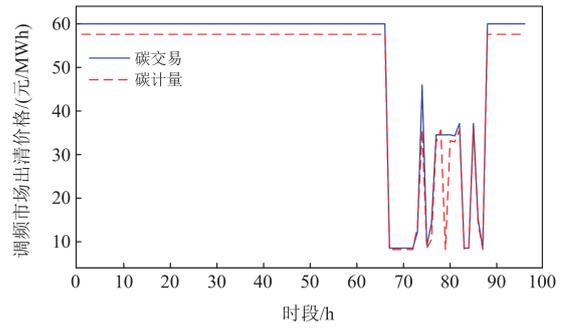


图 6 辅助调频市场出清电价

Fig. 6 Clearing electricity prices in the frequency regulation market

图 7 分别给出了碳交易价格为 0.1、1、2、20、40 元/g 时能量与调频市场的总出清价格变化趋势, 其中, 总出清价格包括能量市场出清价格、调频市场出清价格。

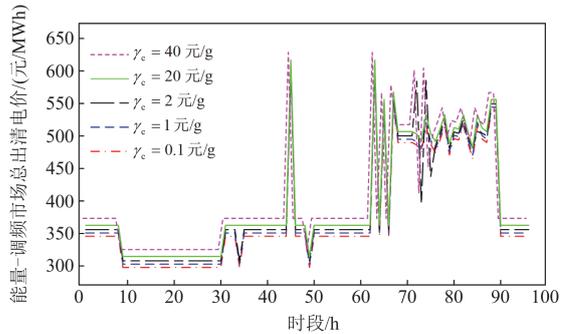


图 7 不同碳单价下能量与调频市场出清电价

Fig. 7 Clearing electricity prices in the energy and regulation market with different carbon unit prices

由图 7 可以看出, 当碳交易单价不断升高时, 传统机组报价响应增强, 市场出清价格升高。这表明碳交易成本在能量与调频市场中起到重要的定价作用, 当碳交易单价增加时, 传统机组的运行成本增加, 导致其报价上升, 从而影响市场的出清价格。

### 3.4 考虑全生命周期碳排放计量的效益分析

为验证全生命周期碳排放计量对能量与调频市场中各机组中标结果的影响, 各火电机组、光伏机组、储能电站在能量与调频市场中不同碳交易单价下的总收益如表 5 所示。设置  $f_1$  为 0.96 和 0.95 情景下, 分别分析火电机组、储能电站和光伏机组在不同碳交易单价下的收益情况, 分别如图 8—图 10 所示。

结合表 5、图 8—图 10, 可得出如下结论。

1) 由表 5 与图 8 可得, 在一定范围内碳交易单价的上升会提高火电机组的收益, 但由于火电机组的高碳特性, 考虑全生命周期碳排放计量的能量与调频

表 5 不同碳交易价格下各机组收益对比  
Table 5 Comparison of revenue for each unit with different carbon trading prices

碳交易单价/(元/g)	火电机组/元	储能电站/元	光伏机组/元
0.1	$13.78 \times 10^5$	$1.93 \times 10^5$	$10.58 \times 10^5$
1	$13.63 \times 10^5$	$1.94 \times 10^5$	$10.59 \times 10^5$
2	$15.03 \times 10^5$	$1.97 \times 10^5$	$10.61 \times 10^5$
20	$13.74 \times 10^5$	$1.94 \times 10^5$	$10.72 \times 10^5$
40	$14.20 \times 10^5$	$1.95 \times 10^5$	$10.77 \times 10^5$

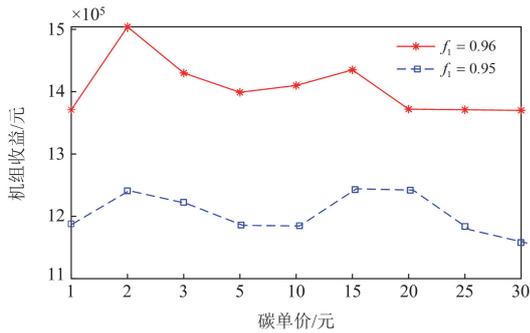


图 8 不同碳单价下火电机组收益

Fig. 8 Revenue of thermal power units with different carbon unit prices

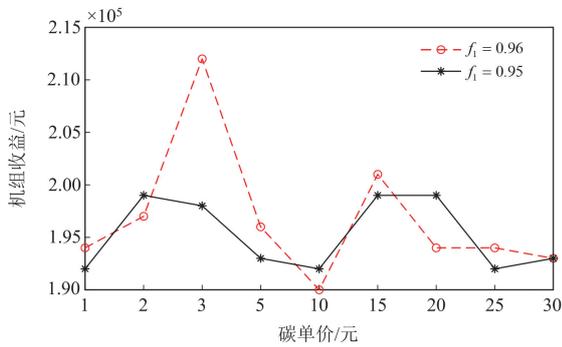


图 9 不同碳单价下储能机组收益

Fig. 9 Revenue of energy storage units with different carbon unit prices

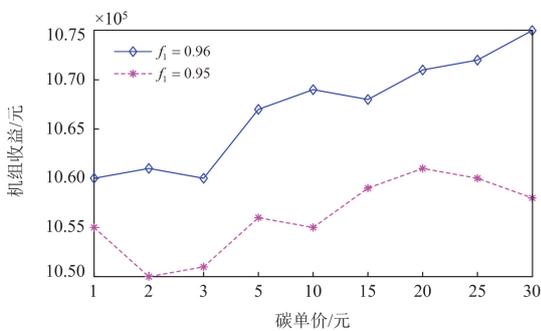


图 10 不同碳单价下光伏机组收益

Fig. 10 Revenue of PV units with different carbon unit prices

市场进行出清时会降低火电机组的中标量，导致火电机组在市场中的出力减小，因此，在  $\gamma_c = 2$  元/g 时，火电机组的收益最高，超过此值，收益开始减少。

2) 由图 9 可知，随着碳交易单价增加，能量市场出清电价升高，使得储能能在能量与调频市场的中标电价增加，随着碳交易单价的变化，导致储能电站的收益在一定的区间范围内波动。证明了碳交易价格的改变对于储能设备在能量与调频市场中的中标量会产生影响。

3) 由图 10 可知，当碳交易单价上升时，光伏机组的收益也随之增加，表明在高碳价格下，光伏机组的低碳特性使得其在市场出清过程中竞争力增强，光伏机组在市场中的出力增加，从而提高了光伏机组在市场中的收益。

综上所述，火电机组的高碳排放特性会使火电机组在能量与调频市场中的中标情况受到影响，进而影响其收益。光伏机组的低碳特性在碳交易单价上升时市场出力增加，提高了电网的收益。引入全生命周期碳排放计量修正了各机组和电站在生产建设、运输、运行和回收过程产生的碳排放，使得碳排放的计算体系更加完善。

### 3.5 不同优化目标的出清结果

为分析在不同目标函数下所对应的出清结果，本文计及全生命周期碳排放计量构建能量与调频市场出清模型，针对各目标函数最优角度设置了 3 个方案进行对比。

方案 1：以市场中各设备的申报成本最小为优化目标；

方案 2：以系统全生命周期内碳排放量最小为优化目标；

方案 3：以市场中各设备申报成本最小和碳排放量最小为优化目标。

机组收益和碳排放量优化结果如表 6 所示。

表 6 不同优化目标的对比分析

Table 6 Comparative analysis of different optimization objectives			
优化目标	申报成本/元	市场收益/元	碳排放量/g
方案 1	$168.56 \times 10^5$	$35.81 \times 10^5$	64 243
方案 2	$230.24 \times 10^5$	$0.04 \times 10^5$	63 422
方案 3	$161.71 \times 10^5$	$34.86 \times 10^5$	64 240

由表 6 可以看出，方案 1 以系统申报成本最小为目标函数，机组收益较优，但碳排放量较高，缺乏环保性；方案 2 以碳排放量最小为优化目标时，其市场申报成本较高，且市场收益仅为 0.4 万元，此方案下碳排放下降但经济效益较差。方案 3 以市

场中各设备申报成本最小和碳排放量最小为优化目标,较好地均衡了市场中火电机组、储能电站和光伏机组的收益最大与各设备在全生命周期内的碳排放量最小的需求,在确保经济效益的同时,减少了碳排放量。

#### 4 结论

本文计及多主体全生命周期碳计量与碳交易机制,以各机组市场申报成本及全生命周期碳排放量最小为优化目标,进行能量与调频市场的出清结算,得到主要结论如下所述。

1) 本文所提的多主体参与能量与调频市场出清模型充分考虑各机组全生命周期内碳排放量,以市场申报成本和总碳排放量最小为目标,可实现各机组在经济和环境方面利益最大化。

2) 本文所提模型在市场出清时均趋向于低碳的发电策略,且考虑碳交易成本时能量与调频市场出清价格高于考虑全生命周期碳计量下的出清价格,因此本文所提计及全生命周期碳排放计量的出清模型有利于系统低碳发电。

3) 碳交易单价的增加引起碳成本增长时,导致系统发电量由高碳机组向低碳机组转移,低碳机组在能量与调频市场的中标量上升,收益增加。

#### 参考文献

- [1] XU B, WANG Y, DVORKIN Y, et al. Scalable planning for energy storage in energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4515-4527.
- [2] 李孟阳, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 13-25.
- LI Mengyang, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Day-ahead bidding strategy for virtual power plant considering demand response and frequency regulation performance variation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 13-25.
- [3] 林阿竹, 柯清辉, 江岳文. 独立储能参与调频辅助服务市场机制设计[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 26-34.
- LIN Azhu, KE Qinghui, JIANG Yuewen. Mechanism design of independent energy storage participation in frequency regulation ancillary service market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 26-34.
- [4] 肖云鹏, 张兰, 张轩, 等. 包含独立储能的现货电能量与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 167-180.
- XIAO Yunpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, et al. The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 167-180.
- [5] NASROLAHPOUR E, KAZEMPOUR J, ZAREIPOUR H, et al. A bilevel model for participation of a storage system in energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 582-598.
- [6] 陈启鑫, 房曦晨, 郭鸿业, 等. 储能参与电力市场机制: 现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 14-28.
- CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Participation mechanism of energy storage in electricity market: status quo and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 14-28.
- [7] 朱宗耀, 王秀丽, 吴雄, 等. 复合储能参与电能量及辅助服务市场的运行策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 80-90.
- ZHU Zongyao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. The operational strategy of composite energy storage participating in the electric energy and ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 80-90.
- [8] 李柯江, 宋天昊, 韩肖清, 等. 计及电价不确定性和损耗成本的储能竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 52-59.
- LI Kejiang, SONG Tianhao, HAN Xiaoqing, et al. Energy storage bidding strategy considering electricity price uncertainty and loss costs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 52-59.
- [9] 张巍, 缪辉. 基于云储能租赁服务的风储参与能量-调频市场竞价策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3840-3852.
- ZHANG Wei, MIAO Hui. Research on bidding strategies for wind storage participation in energy frequency modulation market based on cloud energy rental services[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3840-3852.
- [10] 骆钊, 秦景辉, 梁俊宇, 等. 含碳-绿色证书联合交易机制的综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 248-255.
- LUO Zhao, QIN Jinghui, LIANG Junyu, et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated energy system with carbon-green certificate coordinated trading mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment. 2021, 41(9): 248-255.
- [11] 龚阁阳, 陈晓弢, 麻林瑞, 等. 计及碳交易机制和需求响应的生物质与光热耦合压缩空气储能系统优化策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2754-2763.
- GONG Geyang, CHEN Xiaotao, MA Linrui, et al.

- Optimization strategy of biomass and solar thermal coupled compressed air energy storage system considering carbon trading mechanism and demand response[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(7): 2754-2763.
- [12] 马云聪, 武传涛, 林湘宁, 等. 计及碳排放权交易的光热电站市场竞价策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(4): 82-92.  
MA Yuncong, WU Chuantao, LIN Xiangning, et al. Bidding strategy for a concentrated solar power plant participating in the electricity market with the background of carbon trading[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(4): 82-92.
- [13] 林卓然, 王守相, 王绍敏, 等. 考虑阶梯型碳交易机制的区域电-热综合能源系统分布协同调度方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 217-229.  
LIN Zhuoran, WANG Shouxiang, WANG Shaomin, et al. Distributed coordinated dispatching of district electric-thermal integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 217-229.
- [14] 郝婷, 樊小朝, 王维庆, 等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 101-112.  
HAO Ting, FAN Xiaochao, WANG Weiqing, et al. Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(1): 101-112.
- [15] 王利猛, 刘雪梦, 李扬, 等. 阶梯式碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统低碳优化调度[J]. *电力建设*, 2024, 45(2): 102-114.  
WANG Limeng, LIU Xuemeng, LI Yang, et al. Low-carbon optimal dispatch of integrated energy system considering demand response under the tiered carbon trading mechanism[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(2): 102-114.
- [16] WEI C, WANG Y, SHEN Z, et al. AUQ-ADMM algorithm-based peer-to-peer trading strategy in large-scale interconnected microgrid systems considering carbon trading[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(4): 6248-6259.
- [17] LU Z, BAI L, WANG J, et al. Peer-to-peer joint electricity and carbon trading based on carbon-aware distribution locational marginal pricing[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(1): 835-852.
- [18] YAN Z, LI C, YAO Y, et al. Bi-level carbon trading model on demand side for integrated electricity-gas system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(4): 2681-2696.
- [19] 马跃, 孟润泉, 魏斌, 等. 考虑阶梯式碳交易机制的电网两阶段鲁棒优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 22-33.  
MA Yue, MENG Runquan, WEI Bin, et al. Two-stage robust optimal scheduling of a microgrid with a stepped carbon trading mechanism[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 22-33.
- [20] 生态环境部. 碳排放权交易管理规则(试行)[EB/OL]. [2021-05-17]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202105/t20210519\\_833574.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202105/t20210519_833574.html).
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 《2019—2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)》[EB/OL]. (2020-12-30)[2022-03-14]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk03/202012/t20201230\\_815546.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk03/202012/t20201230_815546.html).
- [22] 王凯, 延肖何, 蒋凯, 等. 考虑碳交易的风光储场站参与电力现货市场报价策略与调控方法[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(18): 7091-7103.  
WANG Kai, YAN Xiaohe, JIANG Kai, et al. Bidding strategy and regulation method for the unified wind/photovoltaic/energy storage power stations in electricity spot market considering carbon trading[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(18): 7091-7103.
- [23] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑 LCA 能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.  
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-08-19

作者简介:

沈 赋(1988—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电力系统建模; E-mail: shenfu@kust.edu.cn

付 玉(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统建模; E-mail: fuyu18213812895@163.com

王 健(1994—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为综合能源系统建模及可靠性评估。E-mail: jianwangzx@163.com

(编辑 魏小丽)