

# 考虑阶梯式碳交易机制的多能互补系统运行优化研究

马瑞<sup>1</sup>, 郝晓光<sup>1</sup>, 李剑锋<sup>1</sup>, 陈衡<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

**摘要:**为增加能源效益、改善设备运营的弹性,进一步降低系统运行的碳排放水平,提出一种低碳经济运作策略。首先,将多能互补系统接入碳交易市场,引入分层碳交易机制以引导系统控制碳排放;然后,将新能源发电机组接入多能互补系统,并且引入抽水蓄能系统和火电机组发电系统以辅助系统电力调度,从而增加新能源消纳能力;最后,根据预测负荷和各项机组的运行约束,使用 cplex 求解器求解出低碳运行调度策略。结果表明:在碳交易机制的影响下,可以通过改进运行策略降低系统的碳排放;引入抽水蓄能系统可以改进多能互补系统,从而提高新能源的消纳能力。

**关键词:**抽水蓄能;风电;光伏;可再生能源消纳;碳交易机制

中图分类号:TM73 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2024.10.015

[引用本文格式]马瑞,郝晓光,李剑锋,等.考虑阶梯式碳交易机制的多能互补系统运行优化研究[J].热能动力工程,2024,39(10):132-139. MA Rui, HAO Xiaoguang, LI Jianfeng, et al. Research on the operation optimization of a multi-energy complementary system considering the staircase carbon trading mechanism [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(10): 132-139.

## Research on the Operation Optimization of a Multi-energy Complementary System Considering the Staircase Carbon Trading Mechanism

MA Rui<sup>1</sup>, HAO Xiaoguang<sup>1</sup>, LI Jianfeng<sup>1</sup>, CHEN Heng<sup>2</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang, China, Post Code: 050021;

2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206)

**Abstract:** To enhance energy efficiency, improve operational flexibility of equipment, and further reduce the carbon emissions of the system operation, a low-carbon economic operation strategy was proposed. First, the multi-energy complementary system was integrated into the carbon trading market, and a hierarchical carbon trading mechanism was introduced to guide the system in controlling carbon emissions. Then, renewable energy generating units were integrated into the multi-energy complementary system, and a pumped storage system and thermal power generation system were introduced to assist in power dispatching and increase the accommodation capacity for renewable energy. Finally, the cplex solver was used to derive a low-carbon operation scheduling strategy based on predicted loads and operational constraints of various units. The results indicate that under the influence of the carbon trading mechanism, system carbon emissions can be reduced by optimizing operational strategies. Additionally, the pumped storage system can be introduced to improve the multi-energy complementary system, and to enhance the capacity of renewable energy accommodation.

**Key words:** pumped storage energy, wind power, photovoltaics, renewable energy accommodation, carbon trading mechanism

收稿日期:2023-12-14; 修订日期:2024-01-08

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目资助(KJ2022-060)

**Fund-supported Project:** State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Science and Technology Project (KJ2022-060)

作者简介:马瑞(1982-),男,国网河北省电力有限公司电力科学研究院工程师。

## 引 言

多能互补系统是一种将不同能源形式(如电力、热能、冷能等)以及能源设备(如发电机、储能系统、热能转换装置等)整合在一起的系统<sup>[1]</sup>。其目标是通过协同运作和优化能源资源利用,提高能源效率、降低环境影响,满足多种能源需求。

在多能互补系统的优化调度方面,有很多学者做出了详细的研究。孙雯等人<sup>[2]</sup>提出了冷热电三联供多能互补系统的运行调度模型,使用动态规划算法进行调度方案的求解。崔杨等人<sup>[3]</sup>构建电力系统日前优化调度模型,在电力系统模型中引入了光热电站,并充分发挥光热发电可以灵活调节的特性,提高风光消纳水平。陈永龙等人<sup>[4]</sup>构建了园区级多能互补系统经济优化调度模型,提出了混合筛选策略,运用该方法可以提高新能源消纳比例和综合需求响应速度。文献<sup>[5]</sup>提出建立虚拟电厂系统,在系统中引入电动公交,并提出协调控制策略,从而大幅提高系统内新能源消纳率。

新能源主要以风电、太阳能发电为主,此类电源出力具有间歇性、随机性,供电保证率不高,大规模并网还将影响电网运行的安全稳定性;抽水蓄能电站具有快速响应能力和双倍调峰能力,可以有效配合区外来电和新能源运行,是未来电网电力供应的支撑电源。谭晶等人<sup>[6]</sup>提出了考虑水光蓄互补与直流外送的电力系统优化调度模型,证明了引入抽水储能模型能够进一步提高电力系统的调峰能力。黄文涛等人<sup>[7]</sup>提出一种基于灵活碳捕集电厂与抽水蓄能联合的广义经济调度策略。文献<sup>[8]</sup>引入基于 BP 神经网络的改进预同步控制策略,增强了风光储交直流混合微电网的运行稳定性。

碳交易被认为是减少碳排放量的有效措施之一。崔杨等人<sup>[9]</sup>建立了含电转气和燃气机组的电-气-热多能互补系统模型,并在模型中引入碳交易机制。陈锦鹏等人<sup>[10]</sup>构建以最小低碳经济运行目标的系统模型,实现了系统的低碳排放。任德军等人<sup>[11]</sup>构建以系统运行成本最小和能效水平最高为目标的双目标运行优化模型,并提出了基于改进差分进化算法的运行优化模型求解方法。

基于以上背景,本文考虑风、电、光伏出力不稳

定性,引入火电机组和抽水蓄能机组,建立多能互补系统。该系统以运行成本最低为优化目标,考虑将碳排放成本引入该系统,通过多目标优化算法对经济调度策略进行求解。对某区域典型日负荷进行逐小时的运行模拟,量化考虑了系统的低碳需求和运行约束,精确描述了系统在不同碳交易和不同储能容量下的系统运行状态。通过仿真试验验证了联合运行能够保证更好的新能源消纳能力、更优的碳排放特性和更低的运行成本。

## 1 多能互补系统结构及模型

多能互补系统结构如图 1 所示。该系统直接与配电网相连,可以从电网购电满足系统内电负荷,同时系统也可以通过配电网向电网公司售电。多能互补系统内还包括风力发电设备、光伏发电设备、火电机组和抽水蓄能设备。系统内主要通过光伏和风力设备利用可再生能源满足电负荷,在减少碳排放的同时也可以降低系统运行成本。通过火电机组灵活调峰的特性辅助可再生能源设备进行供电,提高系统运行稳定性。抽水蓄能装置是一种低碳排放的储能设备,相较于储能电池等设备具有容量大、运行成本低等优点。引入抽水蓄能设备,可以大大提高可再生能源的消纳能力,降低弃风弃光率。

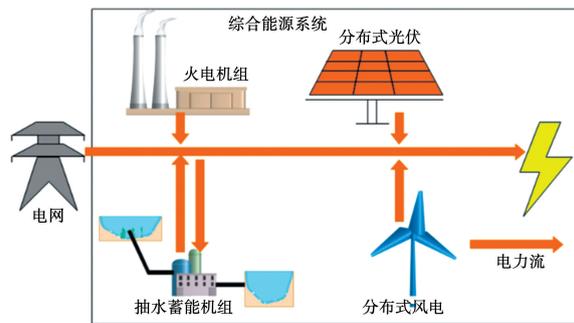


图 1 多能互补系统结构

Fig. 1 Multi-energy complementary system architecture

### 1.1 火电机组出力模型

火电机组是系统内重要的能源转换机组。火电机组燃煤量与输出功率之间满足如下运行约束:

$$V_{\text{gt}} = \frac{\sum P_e \Delta t}{\eta_e \times Q_{\text{LHV}}} \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{gt}}$ —火电机组单位时间燃煤的消耗量, kg;  $P_e$ —火电机组输出的电功率, kW;  $\eta_e$ —机组发电效

率, %;  $Q_{\text{LHV}}$ —燃煤的低位热值, kJ;  $\Delta t$ —每个调度周期的采样时间间隔, h。

## 1.2 风力发电机组出力模型

对于风力发电机组的发电能力,当风速低于切入风速时,风力发电机无法产生电力输出;当风速在切入风速和额定风速之间时,风力发电机的电力输出与风速之间呈线性增长的关系;当风速超过额定风速时,风力发电机将保持稳定的电力输出,输出功率为额定功率;当风速高于切出风速时,风力发电机将停止运行,此时输出功率为零。风机发电的出力可以表示为<sup>[12]</sup>:

$$P_w = \begin{cases} 0, & \nu < \nu_{\text{in}} \text{ 且 } \nu > \nu_{\text{out}} \\ P_E \frac{\nu - \nu_{\text{in}}}{\nu_e - \nu_{\text{in}}}, & \nu_{\text{in}} \leq \nu < \nu_e \\ P_E, & \nu_e \leq \nu < \nu_{\text{out}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_w$ —风电机组实际出力, kW;  $P_E$ —风电机组的额定功率, kW;  $\nu_{\text{in}}$ —切入速度, m/s;  $\nu_{\text{out}}$ —切出速度, m/s;  $\nu_e$ —额定速度, m/s;  $\nu$ —风速, m/s。

## 1.3 光伏发电模型

光伏发电系统采用光伏电池板进行电能转换,目前应用的光伏电池主要是一种半导体器件。光伏发电输出功率受到日照强度和气候条件的影响,具有一定的随机性、非线性,其功率输出模型可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$P_v = r_i \eta A \quad (3)$$

式中:  $P_v$ —光伏机组输出功率, kW;  $r_i$ —时段  $i$  内的光照强度, kW/m<sup>2</sup>;  $\eta$ —光电转化效率, %;  $A$ —太阳能电池阵列板的总面积, m<sup>2</sup>。

## 1.4 抽水储能模型

抽水蓄能容量和功率需要满足以下运行约束<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} P_{j,\text{min}}^g \leq P_{j,t}^g \leq P_{j,\text{max}}^g \\ P_{j,\text{min}}^p \leq P_{j,t}^p \leq P_{j,\text{max}}^p \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{j,t}^g, P_{j,t}^p$ — $t$  时段抽蓄机组  $j$  的发电功率和抽水功率, kW;  $P_{j,\text{min}}^g, P_{j,\text{max}}^g$ —抽蓄机组  $j$  的最小、最大发电功率, kW;  $P_{j,\text{min}}^p, P_{j,\text{max}}^p$ —抽蓄机组  $j$  的最小、最大抽水功率, kW。

抽蓄电站水量约束:

$$\begin{cases} X_t = X_{t-1} + \Delta t \sum_{j=1}^J (\eta_j^{\text{pum}} P_{j,t}^p - \eta_j^{\text{gen}} P_{j,t}^g) \\ X_{\text{min}} \leq X_t \leq X_{\text{max}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $X_t$ — $t$  时段抽蓄电站上水库的库容量, kW·h;  $\eta_j^{\text{pum}}, \eta_j^{\text{gen}}$ —抽蓄机组  $j$  抽水时的平均电量和发电转换效率, %;  $X_{\text{min}}, X_{\text{max}}$ —抽蓄电站上水库的最小、最大库容量, kW·h。

## 2 多能互补系统的阶梯型碳交易机制模型

引入碳交易机制,系统设备运行产生 CO<sub>2</sub> 的吸收和排放都会通过碳交易市场进行交易。在碳交易机制中包括分配碳排放权配额、实际碳排放量以及阶梯型碳排放配额 3 个部分。

### 2.1 碳排放配额

在碳市场周期的初期会进行碳市场份额的划分,为每个碳排放源分配碳排放份额,每个碳排放源可以根据分配的碳排放配额制定自己的工作计划。如果在一个生产周期内,该碳排放源的碳排放量超过了最初分配的配额值,则需要进入碳市场中购买碳配额,反之可以将自己多余的碳排放配额投入碳市场中进行出售,初始配额与系统的发电量具有正相关的关系<sup>[15]</sup>。

多能互补系统的碳排放主要考虑火电机组运行时的碳排放,并且假设电网发电来源于火电机组,同时考虑该部分电能的碳排放,则有:

$$E = E_{\text{grid}} + E_e \quad (6)$$

$$E_{\text{grid}} = k \sum_{t=1}^T P_{b,t} \Delta t \quad (7)$$

$$E_e = k \sum_{t=1}^T P_{e,t} \Delta t \quad (8)$$

式中:  $E, E_{\text{grid}}$  和  $E_e$ —系统的碳排放权配额、购电的碳排放权配额和火电机组的碳排放权配额, t;  $P_{b,t}$ —单位时段  $t$  电网的购电功率, kW;  $T$ —整个调度周期时段, h;  $k$ —单位电量的碳排放权配额系数, t/(kW·h)。

### 2.2 实际碳排放模型

实际碳排放量计算公式为:

$$E_a = E_{\text{grid},a} + E_{e,a} \quad (9)$$

$$E_{\text{grid},a} = \sum_{t=1}^T a_1 P_{b,t} \Delta t \quad (10)$$

$$E_{e,a} = \sum_{t=1}^T a_2 P_{e,t} \Delta t \quad (11)$$

式中:  $E_a, E_{\text{grid},a}$  和  $E_{e,a}$ —多能互补系统、上级购电和火电机组的实际碳排放配额, t;  $a_1, a_2$ —火电机组的

碳排放配额系数,  $t/(kW \cdot h)$ 。

### 2.3 碳交易成本模型

通过无偿分配到的碳排放配额减去本身的碳排放配额得到可以到碳交易市场获得的配额。

$$E_b = E - E_a \quad (12)$$

式中:  $E_b$ —多能互补系统碳排放权交易配额,  $t$ 。

为了减少碳排放, 本文采用阶梯型碳交易计算模型<sup>[16]</sup>, 如下:

$$C_{CO_2} = \begin{cases} \lambda E_b, & E_b \leq l \\ \lambda(1 + \varepsilon)(E_b - l) + \lambda l, & l < E_b \leq 2l \\ \lambda(1 + 2\varepsilon)(E_b - 2l) + \lambda(2 + \varepsilon)l, & 2l < E_b \leq 3l \\ \lambda(1 + 3\varepsilon)(E_b - 3l) + \lambda(3 + 3\varepsilon)l, & 3l < E_b \leq 4l \\ \lambda(1 + 4\varepsilon)(E_b - 4l) + \lambda(4 + 6\varepsilon)l, & 4l \leq E_b \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $C_{CO_2}$ —阶梯型碳交易成本, 元;  $\lambda$ —交易基础价格, 元/ $t$ ;  $l$ —碳排放量的区间长度,  $t$ ;  $\varepsilon$ —价格增长率, %。

## 3 考虑碳交易机制的多能互补系统运行模型

### 3.1 目标函数

考虑多能互补系统的运行经济性, 构建目标函数。经济性目标为多能互补系统的运行总效益最高, 总效益等于总收益减去总成本, 总收益包括系统内用户用电收益和售电网售电收益, 总成本包括电网购电成本、燃料成本、碳交易成本和机组运维成本。经济性目标函数可表示为:

$$\begin{cases} C = C_{\text{sell}} + C_f - C_{\text{buy}} - C_{\text{fuel}} - C_{CO_2} - C_w \\ C_{\text{sell}} = \sum_{t=1}^T C_s P_{s,t} \Delta t \\ C_f = \sum_{t=1}^T C_s P_{s,t} \Delta t \\ C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^T C_b P_{b,t} \Delta t \\ C_{\text{fuel}} = \sum_{t=1}^T C_{\text{gas}} V_{\text{gt},t} \\ C_w = \sum_{t=1}^T C_i P_{i,t} \Delta t \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $C$ —园区多能互补系统利润, 元;  $C_{\text{sell}}$ —外电网售电收入, 元;  $C_f$ —园区售电收入, 元;  $C_s$  和  $C_b$ —售电价格和购电的固定电价, 元/ $(kW \cdot h)$ ;  $C_{\text{buy}}$ —多能互补系统购电支出;  $C_{\text{fuel}}$ —燃料成本, 元;  $C_{\text{gas}}$ —燃煤价格, 元/ $t$ ;  $C_w$ —园区内机组运维成本, 元;  $i$ —机组类别, 包括火电机组和风电设备、光伏设备和抽水储能设备;  $C_i$ —机组单位电能的维护成本, 元;  $P_{s,t}$ —园区在  $t$  时间的对外电网输出功率,  $kW$ ;  $P_l$ —多能互补系统在  $t$  时间对外电网输出功率,  $kW$ ;  $P_{i,t}$ —机组  $i$  在  $t$  时间的输出功率,  $kW$ 。

### 3.2 约束条件

#### 3.2.1 功率平衡约束

多能互补系统中功率平衡约束主要是指各机组发电功率与购电功率之和等于用电负荷和售电之和。平衡约束为:

$$P_{w,t} + P_{v,t} + P_{e,t} + P_{p,t} + P_{\text{buy},t} = P_l + P_{\text{sell},t} + P_{g,t} \quad (15)$$

式中:  $P_{w,t}$ —风电机组在  $t$  时间的电功率,  $kW$ ;  $P_{v,t}$ —光伏机组在  $t$  时间的功率,  $kW$ ;  $P_{e,t}$ —火电机组在时间  $t$  的功率,  $kW$ ;  $P_{\text{buy},t}$ —多能互补系统在  $t$  时间购电的功率,  $kW$ ;  $P_l$ —多能互补系统内在  $t$  时间的电功率,  $kW$ ;  $P_{\text{sell},t}$ —多能互补系统侧在  $t$  时间的售电功率,  $kW$ ;  $P_{g,t}$ —抽水蓄能蓄电在  $t$  时间的功率,  $kW$ 。

#### 3.2.2 机组出力约束

该系统中所有火电机组, 风电机组, 光伏机组都存在处理限制, 每个机组都应该满足出力的上下限约束:

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (16)$$

## 4 仿真分析

### 4.1 基础数据

以某区域多能互补系统为例进行计算分析。该多能互补系统中, 火电机组为 500 MW, 光伏 (PV) 机组和风力发电机组的容量均为 2 000 MW。系统分时电价见表 1, 其中, 谷段为 00:00—06:00 和 18:00—24:00; 平段为 06:00—10:00 和 15:00—18:00; 峰段为 10:00—15:00。该多能互补系统中各机组运行参数见表 2。图 2 为系统夏季典型日负荷预测曲线。

表1 系统分时电价(元/(kW·h))

Tab.1 Time-of-use electricity pricing for the system (yuan/(kW·h))

电价	谷段	平段	峰段
购	0.55	0.82	1.20
售	0.65	0.65	0.65

表2 各机组运行参数

Tab.2 Operating parameters of each generation unit

机组	功率上限/	功率下限/	维护成本/
	MW	MW	元·(kW·h) <sup>-1</sup>
火电	500	100	0.40
风电	2 000	0	0.18
光伏	2 000	0	0.16
抽水蓄能	300	0	0.05

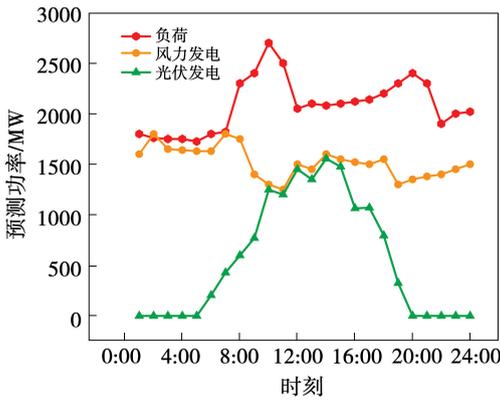


图2 系统典型日负荷预测曲线

Fig.2 Typical daily load forecast curve for the system

### 4.2 运行优化结果分析

碳交易是通过建立合法的碳排放权,并允许通过市场对碳排放权进行交易从而达成控制二氧化碳排放的交易机制。在碳交易机制指导下,可以更为公平准确地衡量现有能源的价值,更科学有效地降低碳排放,使双碳政策得到落实。为评估阶梯式碳交易机制的有效性,选择了两种运行情景,并通过仿真分析系统参与需求的运行工况。研究的主要目标是探讨碳交易机制是否对多能互补系统的经济运行和能效水平产生影响。

场景1中,多能互补系统不考虑碳交易的影

响,主要考虑各项设备运行成本与发电利润。场景2引入阶梯碳交易机制,在考虑运行成本的同时也要考虑碳排放成本,以总成本作为目标函数进行计算。

场景1中不考虑碳排放,以满足用户负荷为目标,安排机组出力。图3为场景1中各设备出力的最佳调度曲线,图4为场景1中抽水蓄能最佳调度。

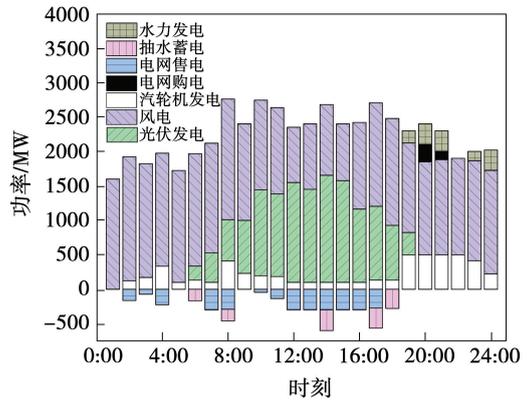


图3 场景1中各设备出力的最佳调度

Fig.3 Optimal scheduling output of each device in scenario 1

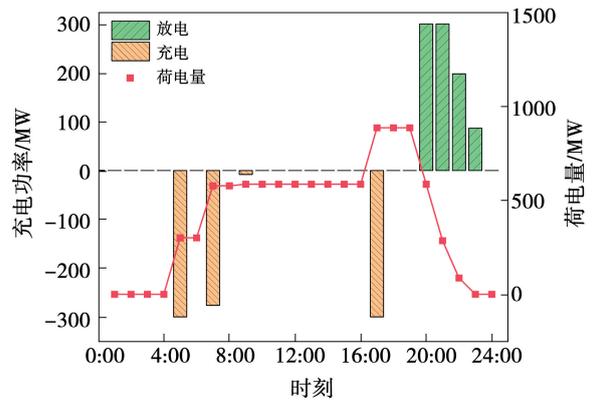


图4 场景1中抽水蓄能状态的最佳调度

Fig.4 Optimal scheduling of pumped storage energy state in scenario 1

由图3、图4可见,场景1中各项发电设备协同出力,在没有考虑火电机组碳排放的前提下,火电机组的出力比较多,弃风弃光率比较高,并且使用抽水蓄能的情况比较少。

场景2中多能互补系统在满足用户负荷的情况

下同时考虑接入碳市场交易,系统积极参与碳市场的前提下安排各项机组出力,图 5 为场景 2 中各项设备最佳调度出力,图 6 为场景 2 中抽水蓄能最佳调度。

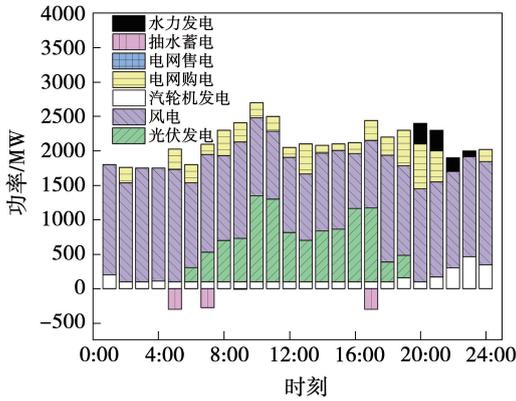


图 5 场景 2 各设备出力的最佳调度

Fig. 5 Optimal scheduling output of each device in scenario 2

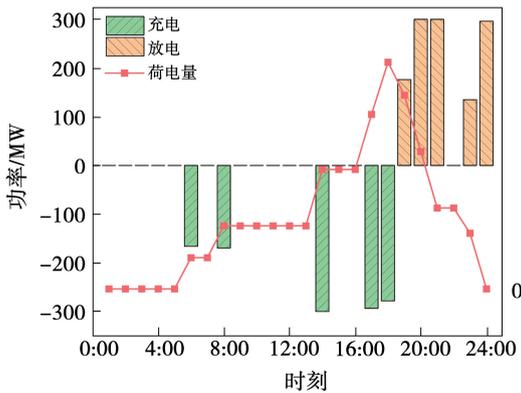


图 6 场景 2 抽水蓄能状态的最佳调度

Fig. 6 Optimal scheduling of pumped storage energy state in scenario 2

由图 5、图 6 可见,在场景 2 中接入碳市场,风电和光伏出力明显增加,在风电、光伏出力不足情况下会向配电网购电,而不是单纯地增加火电机组发电量。

#### 4.3 不同场景下优化结果分析

图 7 和图 8 分别为场景 1 和场景 2 中风力发电出力功率和光伏发电出力功率对比图。比较光伏和风电的出力情况,虽然两种出力情况存在巨大的波动,但是两者存在互补的趋势。在微电网系统中同

时接入光伏和风能,能够充分发挥这两个可再生能源的优势。场景 2 的发电功率大于场景 1,这是因为在场景 2 中引入了阶梯式碳交易,会提高使用汽轮机发电的成本,降低多能互补系统的利润。充分使用可再生能源可以节约碳排放成本,将多余的碳排放份额推入市场进行交易,提高利润并且降低系统的碳排放量。

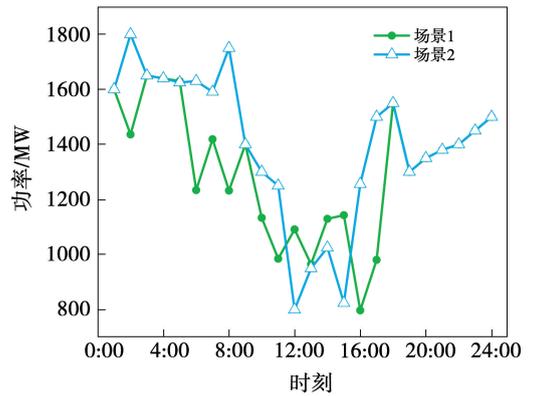


图 7 场景 1,2 不同时刻风电出力功率对比图

Fig. 7 Comparison of wind power output power at different times in scenarios 1 and 2

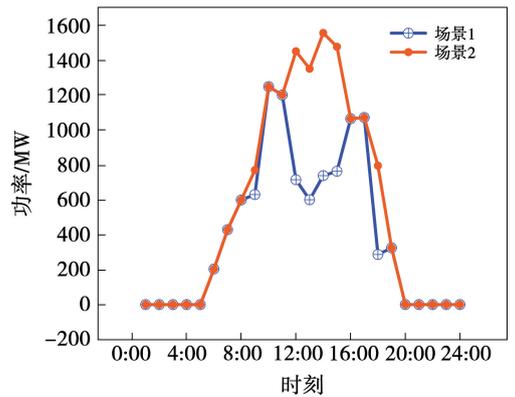


图 8 场景 1,2 不同时刻光伏出力功率对比图

Fig. 8 Comparison of photovoltaic output power at different times in scenarios 1 and 2

图 9 为两种场景下火电机组发电量的对比。由图 9 可知,接入碳市场会减少火电机组的发电量。火电机组在出力过程中产生  $\text{CO}_2$ ,致使发电成本增加。所以在策略上更偏向于使用新能源发电,并且碳排放产生费用的计算公式是阶梯型公式,大量的排放也会增加单位排放气体的成本。在接入碳市场

之后,场景 2 的碳排放量比场景 1 低了 3 208.5 t。

表 3 为不同运行场景下系统运行成本分析。由表 3 可知:场景 1 的弃风弃光率远远大于场景 2,但是场景 1 中汽轮机承担发电量远远大于场景 2。将火电机产生的 CO<sub>2</sub>按照阶梯性的碳市场进行交易计算,场景 1 中的碳排放权购买数额会远远大于场景 2,导致运行总成本增加。场景 1 和场景 2 的机组运维成本相差不大,但总运行成本相差巨大,主要因为碳排放权的购买成本相差较大。

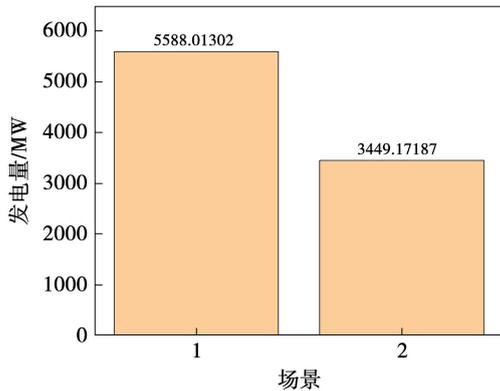


图 9 场景 1,2 火电机组发电量对比

Fig.9 Comparison of power generation of thermal power units in scenarios 1 and 2

表 3 场景 1,2 运行参数

Tab.3 Operating parameters for the system in scenarios 1 and 2

参 数	场景 1	场景 2
弃风率/%	28.5	0
弃光率/%	14.0	8.2
收益/万元	1 535.4	1 822.2
等效碳排放权购买/万元	324.5	216.6
运维成本/万元	1 065.6	963.7
系统运行总成本/万元	1 390.2	1 180.3

表 4 为场景 1 和场景 2 运行成本比例表。可以清晰看出,在多能互补系统接入碳市场后,燃气轮机整体运维成本的比例会减小,碳排放权将占据总体运维成本重要比率,该比率可以非常明显地影响总体运行的利润。在碳交易机制的影响下,能够有效倒逼发电企业发展新能源技术,降低 CO<sub>2</sub> 排放。

表 4 场景 1,2 系统运维成本比例

Tab.4 System O&M cost ratios in scenarios 1 and 2

名 称	场景 1	场景 2
运维成本/万元	1 065.6	963.7
风电运维成本/%	22.6	22.0
光伏运维成本/%	21.9	21.3
燃气轮机运维成本/%	54.3	41.8
抽水蓄能运维成本/%	1.2	4.1
碳排放成本/%	0	1.8

### 5 结 论

针对园区新系统运行优化问题,构建了考虑碳交易机制与需求响应的园区多能互补系统运行优化模型,主要研究成果如下:

(1) 考虑新能源系统参与碳交易市场,能够在保持不大量提高运行成本的前提下降低碳排放。由于碳交易机制较强的碳排放约束力,在其阶梯式碳交易机制能够更有效地引导碳排放减少,因此通过设置合理的碳交易参数,可以更好地引导系统减少碳排放。

(2) 使用抽水蓄能作为储能系统,相较于储能电池的前期投入与后期维护成本更小,并且抽水储能的容量更大,能够更好地发挥出新能源发电成本较低的优势。

(3) 考虑了碳交易价格对系统碳排放量和总成本的影响,采用阶梯式碳交易更有利于清洁机组的上网。因其对碳排放量有更为严格的控制,能够有效地减少化石能源的燃烧,并提高系统对新能源的消纳率。

### 参考文献:

[1] 武昭原,周 明,王剑晓,等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J]. 中国电机工程学报,2022,42(21): 7746-7764.  
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target[J]. Proceedings of CSEE, 2022, 42(21): 7746-7764.

[2] 孙 雯,陈紫薇,张玉琼,等. 基于动态规划的 SOFC 冷热电三联供综合能源系统日前经济调度[J]. 中国电机工程学报,

- 2022,42(21):7775-7784.
- SUN Wen, CHEN Ziwei, ZHANG Yuqiong, et al. Economic day-ahead scheduling of SOFC-based integrated tri-generation energy system using dynamic programming [J]. Proceedings of CSEE, 2022,42(21):7775-7784.
- [3] 崔 杨,于世鹏,张节潭,等.考虑光热电站调峰补偿的高比例新能源电力系统经济调度[J].中国电机工程学报,2022,43(13):4922-4934.
- CUI Yang, YU Shipeng, ZHANG Jietan, et al. Economic dispatch of high-proportion renewable energy power system considering peak-shaving compensation of concentrating solar power plant [J]. Proceedings of CSEE, 2022, 43(13):4922-4934.
- [4] 陈永龙,朱金大,杨冬梅,等.基于多方利益博弈的园区级综合能源系统经济优化运行技术研究[J].高电压技术,2021,47(1):102-112.
- CHEN Yonglong, ZHU Jinda, YANG Dongmei, et al. Research on economic optimization operation technology of park-level integrated energy system based on multi-party interest game [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1):102-112.
- [5] RASHID I. Comparative study based on techno-economics analysis of different shipboard microgrid systems comprising PV/wind/fuel cell/battery/diesel generator with two battery technologies: A step toward green maritime transportation [J]. Renewable Energy, 2024, 221:119670.
- [6] 谭 晶,何 川,陈保瑞,等.考虑水光蓄互补和直流外送的电力系统分布鲁棒优化调度方法[J].中国电机工程学报,2024,44(15):5947-5959.
- TAN Jing, HE Chuan, CHEN Baorui, et al. Distributionally robust optimal scheduling method of power system considering hydropower-photovoltaic-pumped storage complementarity and DC transmission [J]. Proceedings of CSEE, 2024, 44(15):5947-5959.
- [7] 黄文涛,罗 杰,葛磊蛟,等.考虑灵活碳捕集电厂与抽水蓄能联合的广义经济调度策略[J].中国电机工程学报,2024,44(4):1430-1445.
- HUANG Wentao, LUO Jie, GE Leijiao, et al. Consider a generalized economic dispatch strategy combining flexible carbon capture power plants and pumped storage [J]. Proceedings of CSEE, 2024, 44(4):1430-1445.
- [8] LI Q, DONG X, YAN M, et al. Research on the hybrid wind-solar-energy storage AC/DC microgrid system and its stability during smooth state transitions [J]. Energies, 2023, 16(24):7930.
- [9] 崔 杨,曾 鹏,仲悟之,等.考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2021,41(3):10-17.
- CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading [J]. Electric Power Automation Equipment 2021, 41(3):10-17.
- [10] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等.考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J].电力自动化设备,2021,41(9):48-55.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production [J]. Electric Power Automation Equipment 2021, 41(9):48-55.
- [11] 任德军,刘自发,高峰,等.考虑碳交易机制与需求响应的园区综合能源系统电热协同运行优化研究[J].热力发电,2022,51(3):119-130.
- REN Dejun, LIU Zifa, GAO Feng, et al. Electrothermal coordinated operation optimization of park integrated energy system considering carbon trading mechanism and demand response [J]. Thermal Power Generation 2022, 51(3):119-130.
- [12] YOSHIHIDE T. CFD Prediction for wind power generation by a small vertical axis wind turbine: A case study for a university campus [J]. Energies, 2023, 16(13):4912.
- [13] NIE Y, HUANG Y, LUO W, et al. Design of on-line monitoring system for photovoltaic power generation power quality based on Stm32 [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2418(1):012021.
- [14] YAN L, XUAN L, YAN Z, et al. Investment efficiency assessment model for pumped storage power plants considering grid operation demand under fuzzy environment: A case study in China [J]. Sustainability, 2023, 15(11):8724.
- [15] 李秋航,李华强,何永祥,等.计及碳排放成本的输电网与风电分布鲁棒协同扩展规划[J].电力信息与通信技术,2023,21(1):62-70.
- LI Qiuhang, LI Huaqiang, HE Yongxiang, et al. A distributionally robust joint expansion planning for transmission network and wind power considering carbon emissions cost [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(1):62-70.
- [16] 张晓辉,刘小琰,钟嘉庆.考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6132-6142.
- ZHANG Xiaohui, LIU Xiaoyan, ZHONG Jiaqing. Integrated energy system planning considering a reward and punishment ladder-type carbon trading and electric-thermal transfer load uncertainty [J]. Proceedings of CSEE. 2020, 40(19):6132-6142.