

# 考虑电-碳交易的园区综合能源系统经济运行评估

廖波<sup>1</sup>, 张央<sup>1</sup>, 徐鸿飞<sup>1</sup>, 景琪文<sup>1</sup>, 薛晓岑<sup>2</sup>

(1.广东顺德电力设计院有限公司, 广东 佛山 528300; 2.南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 各类园区的二氧化碳排放量约占全国总体碳排放量的30%, 低碳高效的园区综合能源系统是实现我国“碳达峰、碳中和”目标的重要途径。文章首先建立了园区综合能源系统的电-碳市场交易架构, 分析了园区综合能源系统的碳排放责任; 然后综合考虑购能成本和碳排放交易成本, 以系统总体运行成本最小为目标, 提出考虑电-碳综合效益的园区综合能源系统经济运行评估模型。算例分析表明, 文章所提出的经济运行评估模型能充分反映综合能源系统的碳排放成本, 证明了间接碳排放成本的引入会增加总体运行成本, 更高的碳价和更高的减排目标均可以驱使园区减少碳排放总量, 助力实现“双碳”目标。

**关键词:** 综合能源系统; 工业园区; 碳排放; 经济运行

**中图分类号:** TK51; TK81; TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)02-0252-07

## 0 引言

能源是人类赖以生存和发展的基础, 面对气候变化问题和新一轮全球能源危机, 能源转型势在必行。我国提出实现“双碳”目标, 构建新型电力系统, 明确了能源电力行业转型发展的方向。目前, 我国各类园区达15 000家之多, 园区耗能约占全社会总耗能的69%, 二氧化碳排放量约占全国总排放量的31%<sup>[1]</sup>, 因此园区是我国降低二氧化碳排放, 实现“双碳”目标的关键领域。

随着能源生产和消费模式向低碳化、市场化、信息化转变, 综合能源系统<sup>[2]</sup>、能源互联网<sup>[3]</sup>等新技术新业态正蓬勃兴起。综合能源系统可分为跨区级、区域级和用户级等<sup>[4]</sup>, 园区综合能源系统(Park Integrated Energy System, PIES)通过对包含电/气/热/冷等多能耦合系统的合理规划和运行优化控制, 实现多能源的互动和转换, 向终端用户灵活供应冷、热、电等多种不同品位能源<sup>[5]</sup>。目前, 低碳、零碳园区综合能源系统正在我国迅速发展, 已建立了一系列示范工程, 如鄂尔多斯零碳产业园、杭州亚运低碳氢电耦合应用示范项目等。但对于低碳、零碳园区综合能源系统开展碳排放评估, 体现PIES低碳价值的电-碳综合效益经济运行方式尚缺乏研究。

目前, 已经有一些文献从能源利用率、经济性、环保性、可靠性和社会性等方面对园区综合

能源系统的整体效益进行了评估, 并构建了相应的评估指标体系<sup>[6-8]</sup>。文献[6]提出了园区综合能源系统能效评价指标, 并基于加权有向图建立了综合能源系统模型和能效评估方法。文献[9]建立了基于“驱动力-压力-状态-影响-响应”模型的区域综合能源系统评价指标体系, 通过网络层次分析法-熵值法-变异系数法求得各指标权重。文献[10]在园区综合能源系统中引入碳交易机制, 建立了考虑电热需求响应的综合能源系统低碳优化模型。在“双碳”目标背景下, PIES的运行优化目标将不限于传统的用能成本最小, 而是向“碳减排”、“零排放”方向转变<sup>[11]</sup>。此前, 较少有文献关注园区综合能源系统的碳排放责任问题, 这些方法所提出的评估指标体系难以满足新型电力系统对于园区进行低碳综合效益评估的需要。此外, 越来越多的研究指出, 消费者而不是生产者应该为电力生产的碳排放负责<sup>[12]</sup>, 因此在对园区综合能源系统进行综合效益评估时, 有必要进行深入研究PIES的碳排放责任和碳排放成本。

针对此问题, 本文分析了传统综合能源系统评估方法存在的不足, 考虑PIES碳排放流问题以及碳排放环境成本, 提出了体现园区综合能源系统低碳价值的经济运行评估方法, 以实现园区经济、环境综合效益的最大化。该评估方法在考虑园区购电成本和内部燃料成本的同时, 引入了园区

收稿日期: 2023-07-26。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51877112); 广东汇源通集团有限公司集团科技项目(GS20220106)。

作者简介: 廖波(1982-), 男, 高级工程师, 研究方向为园区智慧能源、电动汽车需求侧响应。E-mail: 14685663@qq.com

在用电侧的碳排放责任分担,综合反映了园区的用能成本以及碳排放成本。通过设置多种场景,对比验证了本文所提评估方法的合理性和有效性。

### 1 园区综合能源系统电-碳交易框架

典型的园区综合能源系统涉及电、气、热、冷等多种能源,PIES 的电力生产设备主要包括燃气轮机、分布式光伏、分布式风电等,有的 PIES 还配置有储能和储热设备。园区所需的电力和天然气通过电网和气网从外部购买。园区内部的光伏发电系统采用“发自自用、余电上网”模式,所发电量主要用于满足园区自身需求,多余的电量可以出售给电网公司。外购电力根据其电源类型分为化石燃料发电、可再生能源发电等。典型的园区综合能源系统结构如图 1 所示。

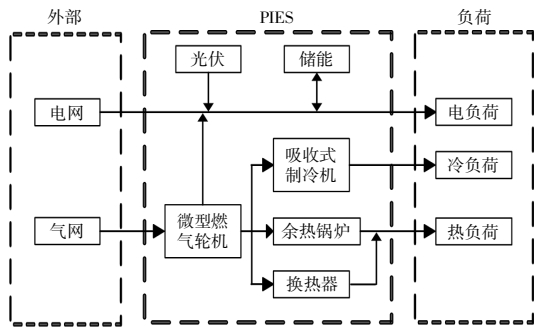


图 1 园区综合能源系统结构示意图

Fig.1 Structure of park integrated energy system

园区综合能源系统内部耦合了电、热、冷、气等多种能源,在生产运行过程中,多种能源的转化过程都会产生二氧化碳。近年来,我国相继建立了电力市场和碳排放权交易市场,全国碳交易市场的交易产品为碳排放配额。园区企业碳配额初始计算方法主要有基准线法、历史排放法和历史碳强度下降法。碳配额分配方法主要包括免费分配、有偿分配,或者两者相结合的方式。目前,企业碳配额分配以免费分配为主,当园区实际碳排放量高于免费配额时,则须要从碳交易市场有偿购买超出的碳排放额度。PIES 可以通过参与电力市场和碳市场交易,在满足园区用户电力需求的同时,进行系统内部资源优化配置,通过购买绿电、绿证等方式,尽量降低系统的二氧化碳排放总量,PIES 电-碳市场交易框架如图 2 所示。从图 1,2 可以看出,PIES 不仅有系统内部的能源流动,还可以从系统外部获取电力等多种能源。除了 PIES 内部能源供应单元产生的碳排放之外,这

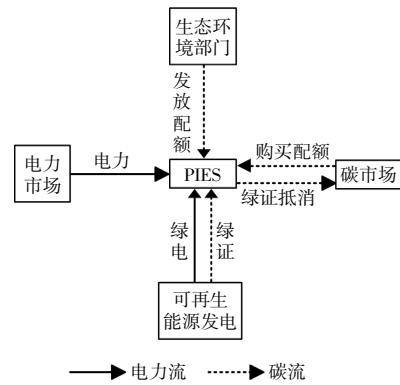


图 2 园区综合能源系统电-碳交易框架

Fig.2 Electricity-carbon trading framework of park integrated energy system

些从外部获取的能源所对应的碳排放责任也应归属于 PIES<sup>[13]</sup>。对于碳排放流理论和用户侧实际碳排放责任模型,文献[14-16]已有详细介绍,本文不再赘述。可见,园区综合能源系统中的碳排放主要包括化石燃料燃烧排放、工业过程排放、外购电力或热力对应的间接二氧化碳排放。在本文中,PIES 的碳排放责任定义为园区能源消耗全过程所产生的所有碳排放,即包含园区内部化石燃料消耗产生的直接碳排放和外部净输入电力对应的间接碳排放两部分。

考虑 PIES 中天然气分布式系统发电以及可再生能源出力对 PIES 的碳排放总量有着不可忽视的影响,本文针对参与电-碳市场交易的 PIES 提出了考虑电-碳交易的园区综合能源系统经济运行评估方法,建立园区综合能源系统经济运行评估模型,分别对系统的内部燃料消耗成本、外部购电成本、碳排放成本进行分析,并根据市场气价、电价、碳价,计算不同场景下 PIES 的最优运行方式。

### 2 电-碳综合经济运行评估模型

本文在“双碳”目标背景下,建立了综合考虑运行成本和碳排放成本的园区综合能源系统经济运行评估模型,为低碳、零碳园区综合能源系统的发展提供方法支撑。

#### 2.1 目标函数

为了评估园区综合能源系统电-碳交易的经济性和低碳效益,本文引入碳排放环境成本,在此基础上建立了考虑电-碳综合效益的综合能源系统经济运行模型,将园区综合能源系统运行的目标函数设置为电-碳综合运行成本最小。总的综

合运行成本包括内部燃料消耗成本、外部购电成本、碳排放环境成本,计算表达式为

$$\min C=C_{fc}+C_{pe}+C_{ct} \quad (1)$$

式中: $C$ 为园区综合能源系统的总运行成本; $C_{fc}$ 为系统内部燃料成本; $C_{pe}$ 为系统外部购电成本; $C_{ct}$ 为系统碳排放成本。

## 2.2 综合运行成本

### 2.2.1 内部燃料成本

系统内部燃料成本  $C_{fc}$  是指 PIES 正常运行所消耗的天然气燃料成本,其计算式为

$$C_{fc}=\sum_{t=1}^T \rho_{\text{gas}} \frac{P_t^{\text{GT}} \Delta t}{\eta_t^{\text{GT}} H_{\text{gas}}} \quad (2)$$

式中: $C_{fc}$ 为  $t$  时段总的燃料成本; $\rho_{\text{gas}}$ 为天然气价格; $P_t^{\text{GT}}$ 为微型燃气轮机在  $t$  时刻的输出功率; $\Delta t$ 为时段的长度; $\eta_t^{\text{GT}}$ 为  $t$  时刻燃气轮机的发电效率; $H_{\text{gas}}$ 为天然气的高位热值。

### 2.2.2 外部购电成本

外部购电成本  $C_{pe}$  是指 PIES 从外部电网所购买电量的费用,其计算式为

$$C_{pe}=AD_d \times P_{\text{buy}} \quad (3)$$

式中: $AD_d$ 为外购用电量; $P_{\text{buy}}$ 为系统从电网购电的价格。

### 2.2.3 碳排放成本

园区综合能源系统通过多能互补,融合了分布式光伏和风电,提高了用能效率,减少了化石燃料的消耗。PIES 自身供能所产生的二氧化碳,将产生负的环境外部性,同时其外购电力所对应的间接碳排放也应计入系统的碳排放责任。

本文在计算 PIES 碳排放时,参考生态环境部发布的《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》<sup>[7]</sup>,PIES 总的碳排放包含系统内部燃料燃烧产生的二氧化碳和外购电力产生的二氧化碳两部分。

系统碳排放量计算式为

$$E=E_{\text{rs}}+E_d-E_{\text{sd}} \quad (4)$$

式中: $E$ 为系统总的二氧化碳排放量; $E_{\text{rs}}$ 为系统化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量; $E_d$ 为外购电力产生的二氧化碳排放量,如果系统从电网购买的电力为可再生能源电力,则外购电的二氧化碳排放量可视为零; $E_{\text{sd}}$ 为系统向电网出售电力所

对应的二氧化碳排放量。

$E_{\text{rs}}$  为综合能源系统内各种发电设施燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放量的总和,计算式如下:

$$E_{\text{rs}}=\sum_{i=1}^n \left( FC_i \times C_{\text{ar},i} \times OF_i \times \frac{44}{12} \right) \quad (5)$$

式中: $FC_i$ 为第  $i$  种化石燃料的消耗量; $C_{\text{ar},i}$ 为第  $i$  种化石燃料的收到基碳元素含量; $OF_i$ 为第  $i$  种化石燃料的碳氧化率; $44/12$ 为二氧化碳与碳的相对分子质量之比。

$E_d$  的计算式如下:

$$E_d=AD_d \times EF_d \quad (6)$$

式中: $EF_d$ 为电网排放因子,2022 年度全国电网平均排放因子( $\text{CO}_2$ )为  $0.5703 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ 。

$E_{\text{sd}}$  的计算式如下:

$$E_{\text{sd}}=AD_{\text{sd}} \times EF_d \quad (7)$$

式中: $AD_{\text{sd}}$ 为系统向电网出售的电量。

环境溢价反映了低碳/零碳综合能源系统的环境属性价值,综合能源系统的碳成本计算式为

$$C_{ct}=E \times \lambda \quad (8)$$

式中: $\lambda$ 为碳市场价格。

## 2.3 约束条件

### 2.3.1 燃气轮机运行约束

$$0 \leq P_t^{\text{GT}} \leq P_{\text{max}}^{\text{GT}} \quad (9)$$

$$\left| P_t^{\text{GT}} - P_{t-1}^{\text{GT}} \right| \leq \Delta P_{\text{max}}^{\text{GT}} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{GT}}$ 为燃气轮机输出功率的上限; $\Delta P_{\text{max}}^{\text{GT}}$ 为燃气轮机发电的爬坡上限。

### 2.3.2 余热锅炉运行限制

$$0 \leq H_t^{\text{GB}} \leq H_{\text{max}}^{\text{GB}} \quad (11)$$

式中: $H_{\text{max}}^{\text{GB}}$ 为余热锅炉输出功率的上限; $H_t^{\text{GB}}$ 为  $t$  时刻余热锅炉的输出功率。

### 2.3.3 储能设备运行限制

$$S_{\text{min}}^{\text{ES}} \leq S_t^{\text{ES}} \leq S_{\text{max}}^{\text{ES}} \quad (12)$$

$$0 \leq P_t^{\text{ch}} \leq u_t^{\text{ch}} P_{\text{max}}^{\text{ch}} \quad (13)$$

$$0 \leq P_t^{\text{dis}} \leq u_t^{\text{dis}} P_{\text{max}}^{\text{dis}} \quad (14)$$

式中: $S_{\text{max}}^{\text{ES}}$ ,  $S_{\text{min}}^{\text{ES}}$ 分别为储能设备荷电状态的上、下限; $P_{\text{max}}^{\text{ch}}$ ,  $P_{\text{max}}^{\text{dis}}$ 分别为储能设备的最大充电、放电功

率;  $u_t^{ch}, u_t^{dis}$  分别为储能设备在  $t$  时刻充电、放电状态的二进制变量。

### 2.3.4 功率平衡约束

$$P_t^{GT} + P_t^{PV} + P_t^{pe} = P_t^L + P_t^{ch} - P_t^{dis} + P_t^{EC} \quad (15)$$

$$H_t^{HB} + H_t^{HS} = H_t^L \quad (16)$$

$$C_t^{GT} \times COP_{AC} = H_t^{air} \quad (17)$$

式中:  $P_t^L$  为系统的基本负荷;  $P_t^{PV}$  为光伏系统出力, 本文假设 PIES 内部的光伏发电量全部发自自用;  $P_t^{pe}$  为外部电网供电功率;  $P_t^{ch}, P_t^{dis}$  分别为储能电池的充、放电功率;  $P_t^{EC}$  为电制冷机的输入功率;  $H_t^L$  为 PIES 的热需求;  $H_t^{HB}, H_t^{HS}$  分别为余热锅炉和换热设备供热量;  $H_t^{air}$  为 PIES 冷负荷功率;  $COP_{AC}$  为吸收式制冷机的制冷系数。

## 3 算例分析

### 3.1 园区基础数据

为了验证本文提出的园区综合能源系统电-碳效益综合评估方法的合理性, 以某一典型的园区综合能源系统为例进行仿真分析。园区的能源转换设备主要包括天然气分布式能源系统 (Gas Distributed Energy System, GDES)、余热蒸汽锅炉、光伏发电系统、电池储能系统、换热器以及变压器等设施。综合能源系统各设备的参数如表 1 所示。气网天然气价格为 2.85 元/m<sup>3</sup>; 园区采用分时电价, 分时电价时段如表 2 所示。园区典型日的光伏出力曲线如图 3 所示。

表 1 设备参数  
Table 1 Operational parameters of PIES

设备	参数
微型燃机	1 000 kW
余热锅炉	0.5 t
换热器	675 kW
光伏	8 656 kW
储能	1.2 MW/2.4 MW·h

表 2 园区分时电价  
Table 2 Time-of-use electricity prices in the park  
元/(kW·h)

时段	谷段	平段	峰段
	22:00-8:00	8:00-9:00	9:00-11:00
11:00-13:00	13:00-15:00	15:00-17:00	
		17:00-22:00	
电价	0.266 1	0.877 9	1.057 7

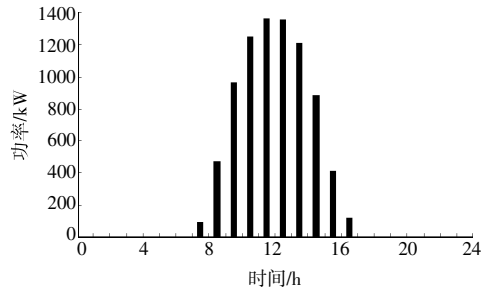


图 3 典型日光伏出力  
Fig.3 Typical daily photovoltaic output

### 3.2 园区基础数据

通过构建不同的综合能源系统碳排放交易场景, 可以得到不同的系统总运营成本, 本文设置了 4 种场景进行对比分析。

场景 1: 园区企业碳排放配额全部免费分配, 即无须考虑园区综合能源系统的碳排放成本。

场景 2: 同时计入园区综合能源系统内部化石燃料燃烧的碳排放以及系统外购电对应的间接碳排放, 所产生的碳排放均须向碳市场购买配额, 碳配额价格取 2022 年全国碳市场碳排放配额成交均价, 即 55.3 元/t。

场景 3: 同时计入系统外购电碳排放和内部碳排放成本, 碳配额价格取 2022 年欧盟碳市场价格, 即 720 元/t。

场景 4: 同时计入系统外购电碳排放和内部碳排放成本, 并且在场景 2 的基础上, 设置碳减排目标, 要求园区减少碳排放总量的 10%。

针对以上 4 种场景, 在优化软件 GAMS 中调用 Cplex 求解器分别进行求解, 单位调度时长为 1 h, 仿真得到的日运行方案和各项成本如表 3 所示。图 4 为 4 种场景下的电能调度曲线。

从表 3 可以看出, 在 PIES 中计入碳排放成本, 将增加综合能源系统的总体运行成本, 场景 2 日运行总成本比场景 1 增加了 6.2%, 但是并没有减少系统碳排放总量, 总成本的增加仅是购买碳

表 3 4 种场景运行成本  
Table 3 Daily operating cost of PIES

场景	总成本 万元	外部购电成本 万元	碳排放成本 万元	碳排放量 t
1	21.1	13.6	0	240.2
2	22.4	13.6	1.3	240.2
3	37.7	12.0	15.2	210.5
4	23.5	12.2	1.2	216.0

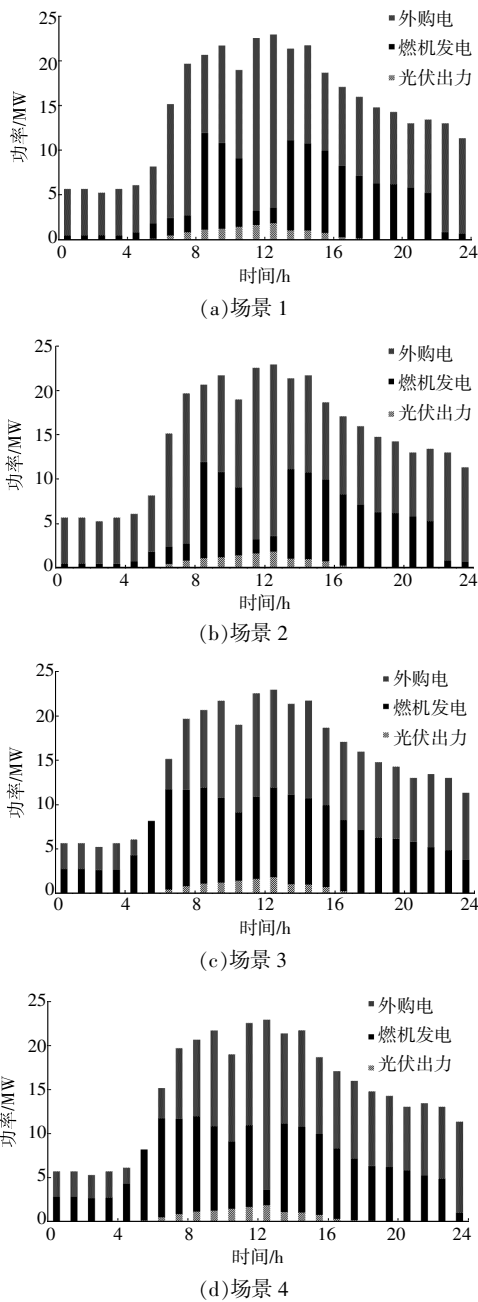


图 4 电能调度曲线

Fig.4 Power dispatching curve

配额的费用。当碳配额价格为 55.3 元/t 时,尽管计入了碳排放成本,但没有改变 PIES 的用电模式,仅在外购电价峰段采用 GDES 多发电;在其他时段,由于天然气价格较高,在当前碳价下,GDES 的碳减排收益不足以抵消使用天然气发电导致的成本增加。因此在场景 2 中,计入碳成本并未减少系统碳排放总量,如图 4(a),(b)所示。

当碳配额价格达到 720 元/t 时,随着碳排放成本的急剧升高,碳配额价格开始发挥显著作用,

系统大幅增加了燃气轮机发电,如图 4(c)所示。从表 3 可以看出,此时场景 3 中碳排放总量为所有场景中最低,与场景 1 和场景 2 相比下降了 12.4%。同时,在场景 3 中,由于碳配额价格高昂,系统碳排放成本显著增加,同时内部天然气消耗成本也有所增加,系统总体运行成本达到最大值,分别比场景 1 和场景 2 增长了 78.7%和 68.3%。因此可以得出结论,高昂的碳配额价格可以起到降低综合能源系统碳排放量的作用,但也将极大增加系统的运行成本。

在计入碳排放成本的同时,给综合能源系统设定了 10%的碳减排要求。GDES 的单位发电碳排放量明显低于外购电,场景 4 通过 GDES 的优化运行,系统在各个时段倾向于通过微型燃气轮机发电取代外购电,如图 4(a),(d)所示。从表 3 可以看出,与场景 1 相比,场景 4 碳排放总量降低了 10.1%,总运行成本增加了 11.4%,系统外购电成本和系统碳排放成本均有所减少,并明显降低了系统碳排放总量;PIES 内部天然气发电量的增加,虽然减少了碳排放总量,但也会导致外部购气成本的增加。由此可见,设定合理的碳减排要求,也能促进综合能源系统降低碳排放,对总运行成本的影响比提高碳价要小。

由此可见,当园区能源消费水平相当时,计及碳排放成本明显提高了系统整体运行成本。在考虑碳排放成本的情况下,园区出于自身利益最大化考虑,会自发地进行 PIES 运行优化,使用内部 GDES 发电取代部分外购电,或者从外部电网购买绿色电力或者绿证,以降低系统电-碳综合运行成本。这种策略不仅能促进园区综合能源系统的高效运行,同时也降低了园区的碳排放水平。

#### 4 结论

本文针对多能耦合的园区综合能源系统,计及系统内部碳排放和外部购电碳排放,提出了考虑电-碳综合效益的 PIES 经济运行评估方法,对比分析了计入碳排放成本、碳配额价格变化以及设置碳减排指标,对系统总体运行成本和碳排放总量的影响,所得结论如下。

①在“双碳”目标下,考虑碳排放成本之后,提升了园区综合能源系统的碳减排意愿,无论是提高碳价,还是强制设定碳减排指标,均可以使得系统减排二氧化碳 10%以上。当碳价较高时,会大

幅增加 PIES 的运行成本,增加企业负担。应在碳市场中纳入更多的行业,结合碳配额定价和设定企业减排指标等多种手段,促进园区自发地节能减排,消纳更多的清洁电力。

②此前的研究较少将外购电碳排放考虑进系统运行成本中,本文指出应对综合能源系统所有用能类型的碳排放进行分析。当引入外购电间接碳排放之后,会对系统总体碳排放成本产生显著影响,园区会综合考虑外购电碳排放、PIES 内部碳排放,进行综合能源系统优化运行,或者在购电时优选低碳的可再生能源电力,以减少单位耗能的碳排放成本,降低系统总体运行成本。

③免费分配碳配额,或者较低的碳配额价格,能够促进园区优化能源消费结构,减少碳排放总量,仅在一定程度上增加了 PIES 运行成本。

如何制定合理的碳配额分配政策,建立健全碳排放市场交易体系,对于园区综合能源系统低碳化、零碳化发展,加快实现我国“双碳”目标至关重要,也是下一步的研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 李嘉祺,陈艳波,陈来军,等.工业园区综合能源系统低碳经济优化运行模型[J].高电压技术,2022,48(8):3190-3200.
- [2] 宫飞翔,李德智,田世明,等.综合能源系统关键技术综述与展望[J].可再生能源,2019,37(8):1229-1235.
- [3] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联网简述[J].电工技术学报,2016,31(1):1-13.
- [4] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等.能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(12):3292-3306.
- [5] 王成山,吕超贤,李鹏,等.园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6791-6803,7093.
- [6] 田立亭,程林,李荣,等.基于加权有向图的园区综合能源系统多场景能效评价方法[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6471-6483.
- [7] 王舒萍,张沈习,程浩忠,等.计及用户热舒适度的综合能源系统可靠性指标及评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(1):86-95.
- [8] 张玉莹,李雷,刘萧民.计及不确定性的综合能源系统运行效益综合评估方法[J].可再生能源,2019,37(11):1671-1678.
- [9] 马丽叶,张涛,卢志刚,等.基于变权可拓云模型的区域综合能源系统综合评价[J].电工技术学报,2022,37(11):2789-2799.
- [10] 孙亮,原瑞彤,张程,等.考虑电热需求响应的综合能源系统低碳优化运行[J].可再生能源,2023,41(6):836-844.
- [11] 朱建全,刘海欣,叶汉芳,等.园区综合能源系统优化运行研究综述[J].高电压技术,2022,48(7):2469-2482.
- [12] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等.新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J].电网技术,2022,46(3):821-833.
- [13] 胡博,孙铠彬,邵常政,等.面向全过程碳足迹的园区综合能源系统碳感知与优化方法[J].高电压技术,2022,48(7):2495-2504.
- [14] Chongqing Kang, Tianrui Zhou, Qixin Chen, et al. Carbon emission flow from generation to demand: a network-based model[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(5):2386-2394.
- [15] Wenyong Wang, Qunhai Huo, Huawei Deng, et al. Carbon responsibility allocation method based on complex structure carbon emission flow theory[J]. Scientific Reports,2023,13:1521.
- [16] Yaohua Cheng, Ning Zhang, Baosen Zhang, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2):1307-1318.
- [17] 生态环境部.企业温室气体排放核算与报告指南发电设施[EB/OL].[https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221\\_1008430.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html),2022-12-19.

## Economic operation evaluation of park integrated energy system considering electricity-carbon trading

Liao Bo<sup>1</sup>, Zhang Yang<sup>1</sup>, Xu Hongfei<sup>1</sup>, Jing Qiwen<sup>1</sup>, Xue Xiaocen<sup>2</sup>

(1.Guangdong Shunde Power Design Institute Co.,Ltd., Foshan 528300, China; 2.School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** The carbon dioxide emissions of various parks account for about 30% of China's total carbon emissions. The low-carbon and efficient park integrated energy system is an important way to achieve China's "carbon peak, carbon neutrality" goal. Firstly, this paper establishes the electricity-carbon market trading architecture of the park integrated energy system, and analyses the carbon emission responsibility of the park integrated energy system. Then, considering the energy purchase cost and carbon emission transaction cost, the economic operation evaluation model of the electricity-carbon benefit of the park integrated energy system is proposed with the goal of minimizing the overall operation cost of the system. The example analysis shows that the economic operation evaluation model proposed in this paper can fully reflect the carbon emission cost of the integrated energy system, and proves that the introduction of indirect carbon emission cost will increase the overall operation cost. Higher carbon price and higher emission reduction targets can drive the parks to reduce the total carbon emission and help achieve the "double carbon" goal.

**Keywords:** integrated energy system; industrial park; carbon emission; economic operation