

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-297-11

基于阶梯碳交易的 考虑多阶段规划的长期园区综合能源系统优化

王宏伟¹ 尹林林¹ 唐 亮¹ 李凯月² 刘吉营²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013;

2. 山东建筑大学 济南 250101)

【摘 要】 针对园区综合能源系统长期运行进行研究,建立了一种基于阶梯碳交易机制,并且考虑多阶段规划的系统优化模型。以最优经济性和最少碳排放为目标,利用长期、多阶段规划方法对各阶段设备的容量进行最优配置。分析阶梯碳交易机制的运行原理并构建模型,以全生命周期内阶梯碳交易、投资等成本之和最小为目标函数进行优化。探讨碳交易形式、规划阶段数量划分以及碳交易参数敏感性对园区综合能源系统经济性以及碳排放约束情况的影响。结果表明,提出的模型能够有效降低碳排放,并实现系统的最佳经济运行,且清洁能源设备的投建容量增加。研究为园区综合能源系统的经济低碳运行提供参考,在减少碳排放、促进新能源消纳、提高园区综合能源系统整体经济性等方面有很好的优化效果。

【关键词】 园区综合能源系统;多阶段规划方法;长期运行;阶梯碳交易机制;全生命周期

中图分类号 TK01+8 文献标志码 A

Optimization of Long-Term Park Regional Integrated Energy Systems with Consideration of Multi-Stage Planning Based on the Ladder-Type Carbon

Wang Hongwei¹ Yin Linlin¹ Tang Liang¹ Li Kaiyue² Liu Jiying²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp, Jinan, 250013;

2. Shandong Jianzhu University, Jinan, 250101)

【Abstract】 This study investigates the long-term operational dynamics of integrated energy systems in industrial parks, establishing a system scheduling model based on the ladder-type carbon trading mechanism that incorporates multi-stage planning. The model aims to achieve optimal economic performance alongside minimal carbon emissions, utilizing a long-term, multi-stage planning approach to optimally allocate the capacity of various equipment across stages. Additionally, we analyze the operational principles of the ladder-type carbon trading mechanism and construct a model with the objective of minimizing the total costs of the ladder-type carbon trading and investment over the entire lifecycle. Furthermore, we explore the impacts of carbon trading forms, the number of planning stages, and the sensitivity of carbon trading parameters on the economic performance of the integrated energy systems and carbon emission constraints. The results indicate that the proposed model effectively reduces carbon emissions while achieving optimal economic operation of the system, alongside an increase in the installed capacity of clean energy equipment. This research serves as a reference for promoting the economic and low-carbon

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFE0106800); 山东省高等学校青创人才引育计划项目 (鲁教科函 (2021) 51 号)

作者简介: 王宏伟 (1977-), 女, 硕士, 高级工程师, E-mail: wanghongwei@sdepci.com

通讯作者: 刘吉营 (1983-), 男, 博士, 教授, E-mail: JXL83@sdjzu.edu.cn

收稿日期: 2024-11-17

operation of integrated energy systems in industrial parks, demonstrating significant optimization effects in reducing carbon emissions, facilitating the absorption of new energy, and enhancing the overall economic efficiency of the systems.

【Keywords】 Park-level integrated energy systems; Multi-stage planning methods; Long-term operation; Ladder-type carbon trading mechanism; Life cycle perspective

0 引言

区域综合能源系统 (Regional Integrated Energy System, RIES) 可通过对区域内多种能源资源进行整合利用, 实现提高能源利用效率, 改变传统的用能形式, 提高清洁能源利用比例以及多系统协调优化, 减少污染排放的目的^[1]。园区综合能源系统 (Park-level Integrated Energy System, PIES) 是 RIES 的具体应用, 近年来在各地不同类型的工业园区获得了快速发展和应用, 构建清洁、低碳的 PIES 是促进产业向低碳可持续发展转型的有力支撑^[2]。

现阶段对 RIES 的研究已包含模型构建、算法优化、容量配置优化与运行等各个方面^[3], 实现了资源能源的合理优化配置, 提高了运算效率, 为 RIES 的优化研究提供了重要参考^[4]。但这些研究在进行系统设计时, 大多以一年作为规划期限^[5], 未考虑负荷、气象、政策等变化带来的波动性影响, 难以说明能源系统规划所可能产生的长期效果。并且在设备建模过程中, 未考虑设备使用寿命以及营运后期设备老化造成供能质量降低的问题, 规划方案与实际运行无法有效衔接^[6]。实际上现实中的园区负荷是不断变化的, 会随着规划发展以及工业大用户的入驻而增加, 如果设备容量不能满足实际负荷需求, 通常需要根据实际情况进行重新规划设计^[7]。一些学者已经认识到此问题, 并将中长期规划理念引入到 RIES 的规划设计中, 文献[8]提出了量化多能互补性的指标, 将该指标应用于 RIES 长期规划过程中, 总结互补性与经济性之间的关系。文献[9]提出了一种波动边界确定方法分析和解决能源价格不确定性, 并且构建了 RIES 多阶段随机规划模型, 通过实际案例验证了能源枢纽的建设时间顺序影响规划方案的整体结果。

综上所述, 长期规划理论已在 RIES 进行研究和应用, 也证明了长期规划理论的必要性^[10]。然而现阶段研究主要从经济角度出发讨论对 RIES 的规划优化, 对于碳交易、碳减排等对 RIES 长期

规划与运行的影响考虑不够全面。随着“碳达峰碳中和‘1+N’政策体系”的构建以及全国碳排放权交易市场的建立, 部分学者已经开始对现阶段低碳市场的 RIES 规划模式进行探索, 基本可以分为两类, 一是通过安装碳捕集设备, 提升系统的碳减排能力^[11,12]; 二是基于碳交易机制, 根据电力、天然气等能源市场的定价模型, 对碳排放配额进行买卖, 计算 RIES 在碳交易机制下的碳交易成本^[13]。对于考虑碳交易的 RIES 优化调度模型, 均考虑到系统的碳减排目标, 碳排放受到碳交易成本的约束^[14]。这些研究都将碳交易价格作为一个固定值, 即其值不随碳排放的变化而变化, 在碳排放费用的计算中, 主要通过添加惩罚系数来实现。对于阶梯碳交易机制的研究分析较少, 对于当前能源规划中亟待解决的碳减排问题关注不够。未考虑到碳交易市场的引导作用以及政策变化对碳交易价格的影响, 也未考虑到长期碳减排约束下 RIES 的优化运行^[15]。

基于以上分析和现有研究存在的问题, 以 PIES 为研究对象, 通过对 RIES 这一具体应用的研究分析为 RIES 的经济低碳运行提供参考。为解决传统单阶段规划容量与实际需求不匹配导致的经济性问题, 并充分考虑系统的长期发展和低碳运行目标, 提出了一种基于阶梯碳交易机制, 考虑多阶段规划的长期 PIES 优化模型, 以 PIES 全生命周期成本最小为目标函数进行优化求解。讨论了规划阶段数量划分、碳交易形式以及碳交易参数变化对 PIES 经济效益及减少碳排放能力的影响。

1 研究方法

1.1 模型构建

1.1.1 PIES 系统模型

PIES 系统结构如图 1 所示, 外部输入能源有外部电网电力和天然气, 通过 PIES 系统可以满足用户冷热电负荷需求。其中电负荷由外部电网、热电联产机组 (CHP)、光伏发电机组 (PV) 满

足; 热负荷由热电联产机组 (CHP)、燃气锅炉 (GB)、空气源热泵 (HP) 满足; 冷负荷由空气源热泵 (HP)、电制冷机 (EC)、吸收式制冷机

(AC) 满足。为了更加经济高效的利用区域可再生能源, 配备相应的储能系统, 解决可再生能源输出不确定性的问题。

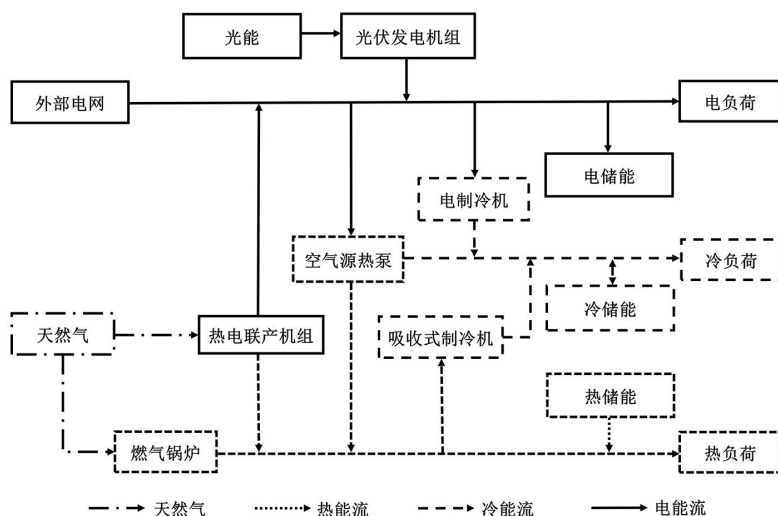


图 1 PIES 系统结构图

Fig.1 Structure of the PIES

1.1.2 PIES 长期、多阶段规划架构

在传统的多阶段规划方法的基础上, 综合考虑园区负荷的增长需求以及碳减排的目标, 建立 PIES 多阶段规划示意图如图 2 所示。假设待建设的 PIES 总规划周期设定为 Y 年, 根据负荷增长水

平划分为 K 个阶段, 并在每个阶段的开始进行配置投资以满足负荷增长, 规划各阶段设备最优投建容量。按照不同设备的使用寿命合理安排设备的更新情况, 图中虚线框代表新安装的设备, 实线框代表已安装的设备^[16]。

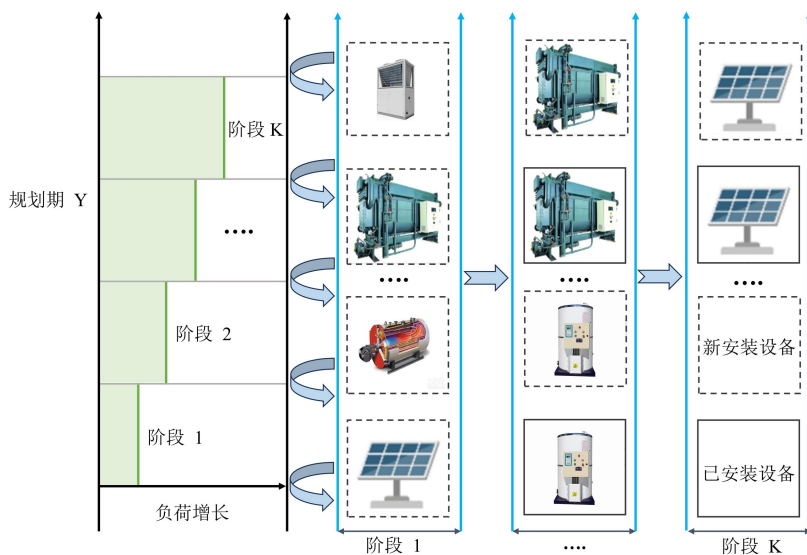


图 2 PIES 长期多阶段规划方法示意图

Fig.2 Diagram of long-term, multi-stage planning method

1.1.3 阶梯碳交易机制模型

碳交易的基本原理在于将二氧化碳排放权作

为商品在交易市场进行买卖, 从而达到减排的目的, 强化和完善碳交易机制对于双碳目标的实现

具有重要意义^[17]。碳交易市场的交易对象主要是碳排放配额，碳排放配额是指政府或相关机构分配给企业允许其排放一定量 CO₂ 的权利，这种权利以配额的形式存在。目前我国对于碳排放额的分配方式为无偿分配^[18]。

(1) 无偿碳排放配额计算模型

PIES 碳排放主要来源于外部电网购买电力（电力全部来源于火电）、CHP 机组运行以及 GB 燃烧。

$$E_q = E_p + E_{CHP} + E_{GB} \quad (1)$$

$$E_p = \beta_e \sum_{t=1}^{8760} P_{ele}(t) \Delta t \quad (2)$$

$$E_{CHP} = \theta \beta_h \sum_{t=1}^{8760} Q_{GT}(t) \Delta t + \varphi_{e,h} \sum_{t=1}^{8760} P_{GT}(t) \Delta t \quad (3)$$

$$E_{GB} = \theta \beta_h \sum_{t=1}^{8760} Q_{GB}(t) \Delta t \quad (4)$$

式中： E_q 、 E_p 、 E_{CHP} 、 E_{GB} 分别为 PIES 系统、系统外购电力、CHP 机组、GB 的无偿碳排放配额，吨； β_e 、 β_h 分别为单位电量、单位热量的无偿碳排放配额，吨/kWh； $P_{ele}(t)$ 为 t 时刻外购电功率，kW； $Q_{GT}(t)$ 为热功率输出值，kW； $P_{GT}(t)$ 为 GT 的电功率，kW； $\varphi_{e,h}$ 为折算系数； θ 为单位发热量的碳排放额度，吨/MJ； $Q_{GB}(t)$ 为燃气锅炉的供热功率，kW。

(2) 实际碳排放量计算模型

对于外部电网购买电力、CHP 机组运行以及 GB 燃烧产生的实际碳排放量进行计算。

$$E_a = E_{p,a} + E_{CHP,a} + E_{GB,a} \quad (5)$$

式中： E_a 、 $E_{p,a}$ 、 $E_{CHP,a}$ 、 $E_{GB,a}$ 分别为 PIES 系统、系统外购电力、CHP 机组、GB 的实际碳排放量，吨；其中 $E_{p,a}$ 、 $E_{CHP,a}$ 、 $E_{GB,a}$ 的计算方式与碳排放配额计算公式基本一致。

(3) 阶梯碳交易机制模型

根据碳交易主要涉及到的无偿碳排放配额与实际碳排放量之间的关系建立阶梯碳交易机制，对阶梯式碳交易成本进行计算。将两者之间的碳排放量差值划分为若干区间^[19,20]， l 为区间长度， γ 为碳交易基准价格（元/吨）， β 为价格增长率。在碳交易机制下，若企业实际碳排放量少于分配配额，则企业可以交易多余碳配额，反之则在碳交易市场购买超额部分。阶梯碳交易机制如图 3 所示。

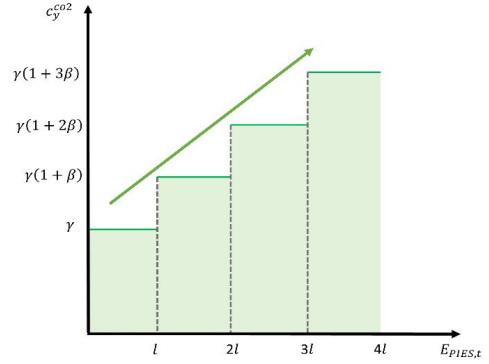


图 3 阶梯碳交易机制图

Fig.3 Diagram of LCT mechanism

阶梯碳交易模型如式（6）、（7）所示：

$$E_{PIES,t} = E_a \quad (6)$$

$$C_y^{CO2} = \begin{cases} \gamma E_{PIES,t} & E_{PIES,t} \leq l \\ \gamma(1+\beta)(E_{PIES,t}-l) + \gamma l & l \leq E_{PIES,t} \leq 2l \\ \gamma(1+2\beta)(E_{PIES,t}-2l) + \gamma(2+\beta)l & 2l \leq E_{PIES,t} \leq 3l \\ \gamma(1+3\beta)(E_{PIES,t}-3l) + \gamma(3+\beta)l & 3l \leq E_{PIES,t} \leq 4l \\ \gamma(1+4\beta)(E_{PIES,t}-4l) + \gamma(4+\beta)l & 4l \leq E_{PIES,t} \end{cases} \quad (7)$$

式中： C_y^{CO2} 为阶梯碳交易成本，元； $E_{PIES,t}$ 为实际碳排放量与碳排放配额之差，吨。

1.1.4 PIES 优化求解架构图

根据系统数学模型、多阶段规划模型、阶梯碳交易机制模型、目标函数以及约束条件之间的关系建立 PIES 优化求解架构图。

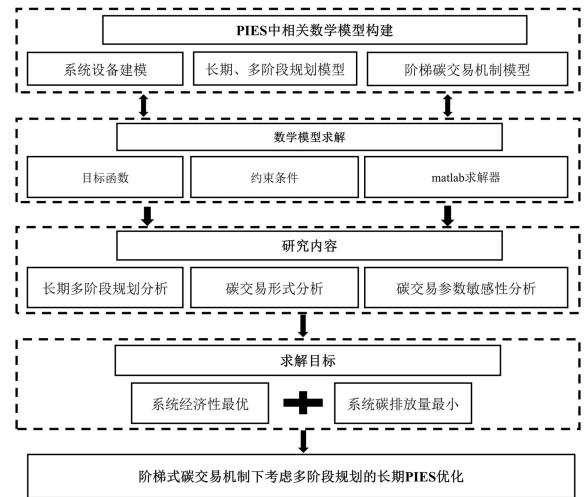


图 4 PIES 系统优化求解架构图

Fig.4 Optimization solution framework for PIES system

1.2 模型求解

1.2.1 目标函数

将 PIES 全生命周期内投资成本 C_{α}^{inv} 、设备残

值 C_{α}^{val} 、运行成本 C_y^{op} 、维护成本 C_y^{ma} 以及阶梯碳交易成本 $C_y^{CO_2}$ 之和的最小值作为目标函数。

$$C = \sum_{\alpha} \frac{C_{\alpha}^{inv}}{(1+\varphi)^{y\alpha-1}} - \sum_{\alpha} \frac{C_{\alpha}^{val}}{(1+\varphi)^{Y-1}} + \sum_y \frac{C_y^{op}}{(1+\varphi)^{y-1}} + \sum_y \frac{C_y^{ma}}{(1+\varphi)^{y-1}} + \sum_y \frac{C_y^{CO_2}}{(1+\varphi)^{y-1}} \quad (8)$$

式中: y 为规划期内的年份; Y 为规划周期; φ 为折现率。

(1) 投资成本

α 阶段的投资成本主要指的是设备投资成本, 由单位容量投资成本, 额定装机容量决定。

$$C_{\alpha}^{inv} = \left(\sum_{n=1}^N C_{\alpha}^n M_n \right) \quad (9)$$

式中: C_{α}^n 为设备额定装机容量, kW; M_n 为单位容量投资成本, 元/kW。

(2) 设备残值

考虑在规划期末年, 仍未达到退役寿命的设备具有的再回收价值。

$$C_{\alpha}^{val} = \sum_{n=1}^N \left(1 - \frac{(Y+1-y_{\alpha})(1-X_n)}{Y_n} \right) C_{\alpha}^n M_n \quad (10)$$

式中: X_n 为第 n 台设备的净残值率。

(3) 运行成本

主要考虑 PIES 向外部电网购电以及售电、向上级气网购气的费用, 由系统运行时实际用量决定。

$$C_y^{op} = \sum_{t=1}^{8760} (c_{ele}(t) P_{ele}(t) + c_c(t) P_{ele,c}(t) + c_{gas}(t) V_{gas}(t)) \quad (11)$$

式中: $c_{ele}(t)$ 为 t 时刻购电价格, 元; $P_{ele}(t)$ 为 t 时刻购电量, kW; $c_c(t)$ 为 t 时刻售电价格, 元; $P_{ele,c}(t)$ 为 t 时刻售电量, kW; $c_{gas}(t)$ 为 t 时刻燃气价格, 元/Nm³; $V_{gas}(t)$ 为购气量, Nm³。

(4) 维护成本

主要考虑 PIES 中各类设备的维护费。

$$C_y^{ma} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{n=1}^N (c_{ma,n}(t) P_{eq,n}(t)) \quad (12)$$

式中: $c_{ma,n}(t)$ 为设备的单位维护成本, 元/kW; $P_{eq,n}(t)$ 为设备的输出功率, kW。

1.2.2 约束条件

(1) 系统能量平衡约束

系统运行需满足电、热、冷功率平衡的约束条件^[21]。

电功率平衡:

$$P_{pv}(t) + P_{GT}(t) + P_{ele}(t) + P_{EES}^{ds}(t) = P_{use}(t) + P_{HP}(t) + P_{EES}^{ch}(t) + P_{ele,c}(t) \quad (13)$$

热功率平衡:

$$Q_{GB}(t) + Q_{HP}^h(t) + Q_{GT}(t) + Q_{EES}^{ds}(t) = Q_{use}^h(t) + Q_{EES}^{ch}(t) + Q_{AC}(t) \quad (14)$$

冷功率平衡:

$$C_{AC}(t) + C_{EC}(t) + C_{HP}^c(t) + C_{CES}^{ds}(t) = C_{use}^c(t) + C_{CES}^{ch}(t) \quad (15)$$

(2) 设备运行约束

设备的累计投建容量对设备运行状态的约束^[22]。

$$0 \leq P_i(t) \leq P_{i,y}^{max}(t) \leq \sum W_{P_i}^K \quad (16)$$

$$\sum W_{P_i}^K = P_i^1 + P_i^2 + \dots + P_i^K \quad (17)$$

$$0 \leq H_j(t) \leq H_{j,y}^{max}(t) \leq \sum W_{H_j}^K \quad (18)$$

$$\sum W_{H_j}^K = H_j^1 + H_j^2 + \dots + H_j^K \quad (19)$$

$$0 \leq C_b(t) \leq C_{b,y}^{max}(t) \leq \sum W_{C_b}^K \quad (20)$$

$$\sum W_{C_b}^K = C_b^1 + C_b^2 + \dots + C_b^K \quad (21)$$

$$y \in K \quad (22)$$

式中: $P_{i,y}^{max}$ 、 $H_{j,y}^{max}(t)$ 、 $C_{b,y}^{max}(t)$ 为发电设备、制热设备、制冷设备额定容量的上限, kW; $W_{P_i}^K$ 、 $W_{H_j}^K$ 、 $W_{C_b}^K$ 为发电设备、制热设备、制冷设备在 S_K 规划阶段设备的累计容量, kW; $y \in K$ 表示第 y 年属于第 K 个规划阶段。

(3) 储能设备约束

ES 的容量存储状态应满足上下限要求。

$$\delta_{ES}^{min} S_{ES} \leq E_{ES}(t) \leq \delta_{ES}^{max} S_{ES} \quad (23)$$

一天的开始和结束时 ES 的存储能量状态相等。

$$E_{ES}(0) = E_{ES}(T) \quad (24)$$

ES 的容量存储状态应满足以下约束条件。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES}^{ds}(t) \leq U_{ES}^{ds}(t) P_{ES}^{ds,max} \\ 0 \leq P_{ES}^{ch}(t) \leq U_{ES}^{ch}(t) P_{ES}^{ch,max} \\ U_{ES}^{ds}(t) + U_{ES}^{ch}(t) \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

式中: $E_{ES}(0)$ 和 $E_{ES}(T)$ 分别为初末时刻储能设备储存的容量, kW; $U_{ES}^{ch}(t)$ 和 $U_{ES}^{ds}(t)$ 分别表示 t 时刻储能设备的充放状态; $P_{ES}^{ch}(t)$ 和 $P_{ES}^{ds}(t)$ 为储能

设备的最大充放功率, kW; S_{ES} 为储能设备的安装容量, kW; δ_{ES}^{min} 和 δ_{ES}^{max} 分别表示储存状态范围。

1.2.3 模型求解方法

通过在 MATLAB 环境下的 YALMIP 工具箱调用 CPLEX 求解器对长期的、多阶段的阶梯式碳交易 PIES 模型进行仿真规划。基于线性规划的算法, 通过将问题转化为标准形式, 利用 CPLEX 求解器来求解模型并得到最优解^[23]。

1.3 案例研究

1.3.1 案例设置

根据构建的长期的、多阶段的阶梯碳交易园区规划模型, 设置了三大类场景进行仿真计算,

分别对碳交易形式、规划阶段数量以及阶梯碳交易参数变化对 PIES 的影响进行探讨分析, 设置情景如下:

第一类场景讨论碳交易形式的影响, 分别为工况 1~工况 4, 比较固定碳价格与阶梯碳交易这两种不同的碳交易形式对规划的影响。

第二类场景讨论规划阶段数量的影响, 分别为工况 5~工况 8, 均以阶梯碳交易机制进行碳交易, 不同在于规划阶段数量。

第三类场景讨论阶梯碳交易参数变化的影响, 考虑碳交易基准价格变化、价格增长率变化对系统运行的影响。

表 1 不同案例的设置情况

Table 1 Settings of different cases

案例	碳交易形式			规划阶段			阶梯碳交易参数	
	固定碳价格	阶梯碳交易	单阶段	3 阶段	5 阶段	15 阶段	基准价格	价格增长率
场景一	工况 1	✗	✗					
	工况 2		✗					
	工况 3	✗		✗				
	工况 4		✗	✗				
场景二	工况 5		✗					
	工况 6		✗	✗				
	工况 7		✗		✗			
	工况 8		✗			✗		
场景三	工况 9		✗	✗			✗	
	工况 10		✗	✗				✗

1.3.2 参数设定

以处于规划阶段的某工业园区为研究对象, 每年根据季节选取夏季、冬季、过渡季的三个典型日。太阳辐射强度如图 5 所示, 其数据来自中国气象数据, 气候变化对太阳辐射影响较小, 因此假定整个规划期内保持不变。初始年度典型日负荷需求如图 6 所示, 基于此工业园区可行性研究报告, 负荷预测部分设定园区电、热、冷负荷需求在规划期内以年均 2.0%的比例增长, 因负荷增长率设定对多阶段优化是有影响的, 负荷率设定过高会影响系统设备容量配置的选择, 不利于对碳交易形式、规划阶段数量划分以及碳交易参数敏感性变化的讨论, 因此研究假设园区负荷增长的结构变化有限, 主要通过年均 2.0%的负荷

增长率反映总负荷需求的变化。

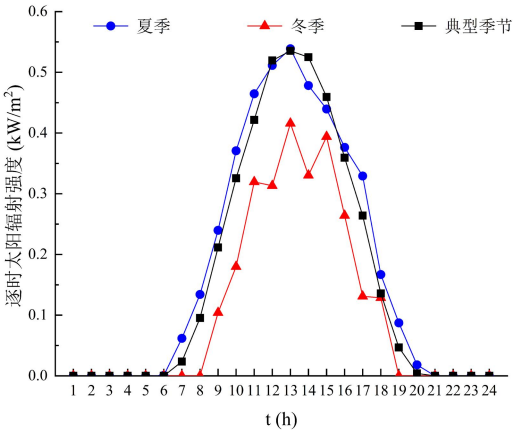


图 5 逐时太阳辐射强度

Fig.5 Hourly solar radiation intensity

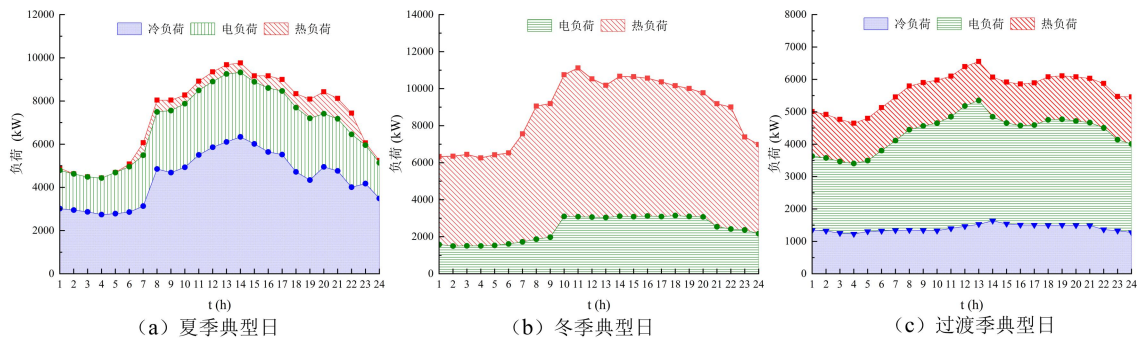


图 6 典型日负荷

Fig.6 Typical daily load

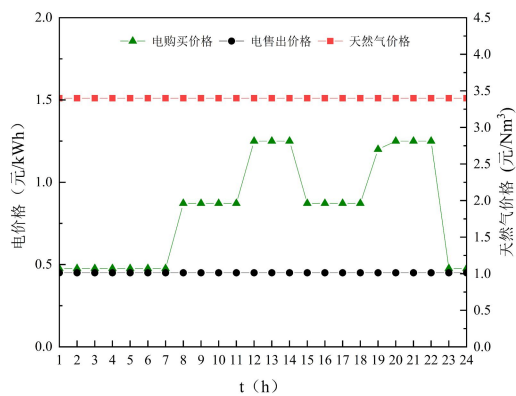


图 7 能源价格

Fig.7 The energy prices

外部购入能源包括电网电力和天然气, 电价

参考电网运营商提供的年度电价确定, 采用分时电价如图 7 所示, 购气价格为 3.3 元/Nm³。

2 结果分析

2.1 系统低碳性效益验证

考虑场景一中工况 1~工况 4 这 4 种典型设置, 对 PIES 进行优化配置。由表 2 可知, 相同规划阶段数量下, 采用阶梯碳交易机制的案例虽然全生命周期成本略有增加, 但是碳交易成本以及总的碳排放量大大减少。工况 4 较工况 3 全生命周期成本增加 0.15%, 碳交易成本下降 8.57%, 碳排放量降幅为 0.6%。

表 2 工况 1~工况 4 的规划结果比较

Table 2 Comparison of Planning Results from case 1 to case 4

案例	总成本/万元	投资/万元	碳交易/万元	总碳排放量/吨
工况 1	34836.19	13212.06	323.37	389530.60
工况 2	34900.42	13085.43	287.32	388118.80
工况 3	30776.02	11712.92	254.30	351793.50
工况 4	30820.59	11700.40	232.51	349699.80

由图 8 可知, CES 投建容量为 0, 这是因为系统配备可以提供冷负荷的设备较多, 不需要储存冷负荷即可满足需求。采用阶梯碳交易机制的案例 EC、GB 投建容量较少, CHP、HES (储热设备) 投建容量增加。对于 GB, 总安装容量最高减少了 584.68kW; 对于 CHP, 总安装容量最多增加了 225.62kW。CHP 作为能量梯级利用的核心设备, 能够同时提供电能以及热能, 可以减少外购电力造成的高额碳排放, 减少对 GB 这种高碳排放设备的使用。因此阶梯碳交易机制更好的响应碳减排约束, 在系统运行过程中有效减少对高碳排放设备的使用, 减少二氧化碳的排放。

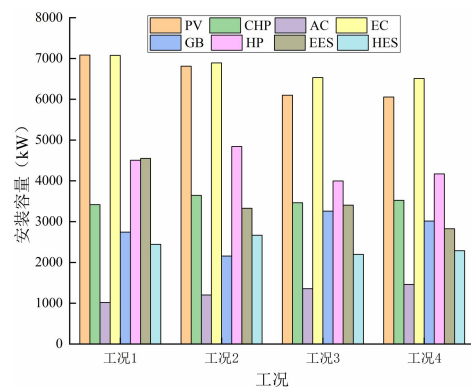


图 8 工况 1~工况 4 的最优设备容量配置情况

Fig.8 Optimal equipment installed capacity allocation of cases 1 to 4

2.2 系统整体经济性分析

考虑场景二中工况 5~工况 8 这 4 种典型设置, 对 PIES 进行优化配置。

由表 3 可知, 四个案例的投资成本在总成本中占比 37%~45%, 运行成本占比基本在 58%左右, 设备残值、维护成本和碳交易成本占比较少。随着规划阶段数量不断增加, 设备运行成本、维护成本不断下降, 设备残值不断上升, 其中工况 8 较工况 5 维护成本降幅为 15.35%。相比于多阶段

规划模型, 单阶段规划模型在初始年就根据规划末年的负荷需求投建设备, 设备使用时间较长, 导致设备运行和维护成本增加, 设备回收价值低, 设备残值低。系统总成本呈下降趋势, 其中工况 8 较工况 5 总成本减少了 5293.41 万元, 降幅为 15.2%。多阶段规划模型会根据规划阶段的负荷需求, 合理投建设备, 所以投资总成本下降, 设备回收价值高, 设备残值不断增加。因此多阶段规划方法对于 PIES 整体经济性有很好的优化效果。

表 3 工况 5~工况 8 全生命周期成本比较

Table 3 Comparison of Life Cycle Costs from case 5 to case 8

案例	总成本/万元	投资成本/万元	设备残值/万元	运行成本/万元	维护成本/万元	碳交易成本/万元
工况 5	34900.42	13085.43	1436.08	20359.76	2603.98	287.32
工况 6	30820.59	11700.40	1427.41	18031.21	2283.87	232.51
工况 7	30592.95	12105.24	1772.39	17735.93	2278.75	245.42
工况 8	29607.00	13313.30	3554.04	17462.37	2204.23	230.85

2.3 基于阶梯碳交易机制下的多阶段规划影响分析

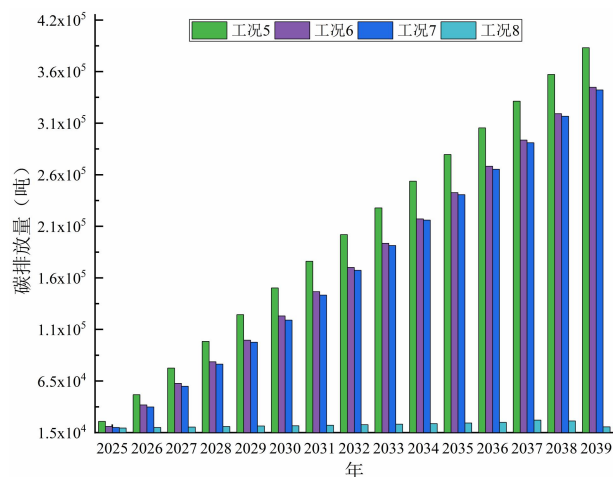


图 9 工况 5~工况 8 累计碳排放量

Fig.9 Accumulated carbon emissions of cases 5 to 8

由图 9 可知, 对比传统单阶段划分工况 5 和规划阶段数量为 15 的工况 8 可以发现, 随着规划阶段划分数量的增加, 碳排放量显著降低, 降幅为 14.6%。并且根据前面提到的系统整体经济性分析可知, 随着规划阶段划分数量的增加, 系统全生命周期总成本不断降低。因此综合分析以上 8 个典型案例可以得出, 基于阶梯碳交易机制的并

且考虑多阶段规划的系统调度模型在减少碳排放、促进新能源消纳、提高系统经济性等方面有积极作用。

2.4 阶梯碳交易参数敏感性分析

2.4.1 碳交易基准价格影响分析

在工况 4 的基础上, 改变碳交易基准价格, 分析参数变化对阶梯碳交易机制的影响。由图 10 可知, 随着 γ 的增加, 碳排放量整体呈现先上升后趋与稳定最后下降的趋势, 碳交易成本整体呈现下降的趋势, 中间有波动上升。在基准价格为 200 元/吨时, 碳排放量值最大; 基准价格为 350 元/吨时, 碳交易成本值最大; 在基准价格为 500 元/吨时, 碳排放量和碳交易成本值最小。在基准价格较低时, 系统受到碳排放约束较小, 系统更多的关注经济性, 购电成本较低, 因此增加外购电力, 这导致碳交易费用上升, 碳排放量上升。而随着 γ 增加, 碳交易成本也随之上升, 系统综合产电成本低于外购电力成本, 系统开始减少外购电力, 外购能源的经济性无法抵消其高昂的碳交易成本, PIES 开始调整自身的用能形式, 提高清洁能源的使用比例, 减少外购能源, 碳排放量减少, 碳交易成本降低。

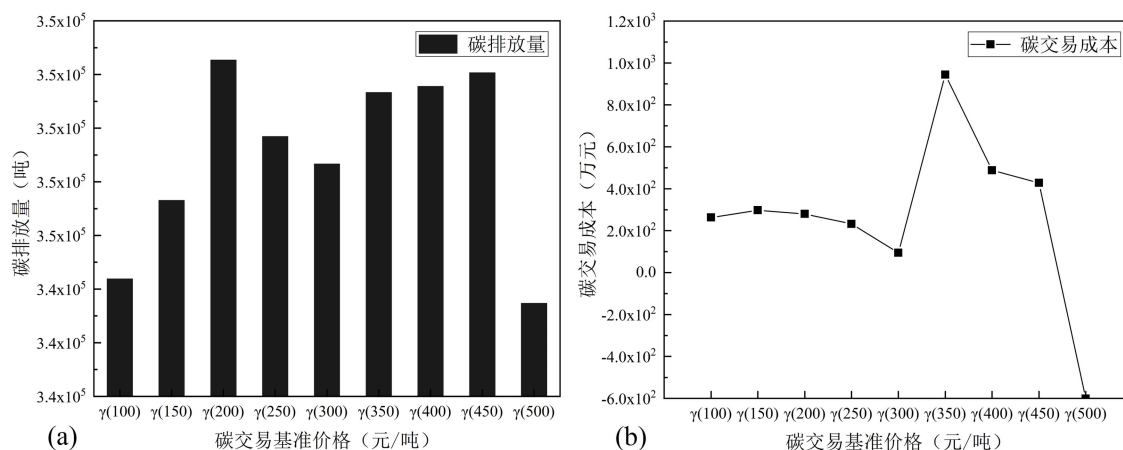


图 10 在工况 4 基础上不同碳交易基准价格下碳排放量、碳交易成本变化

Fig.10 Changes in carbon emissions and carbon trading costs under different benchmark price for case 4

2.4.2 价格增长率影响分析

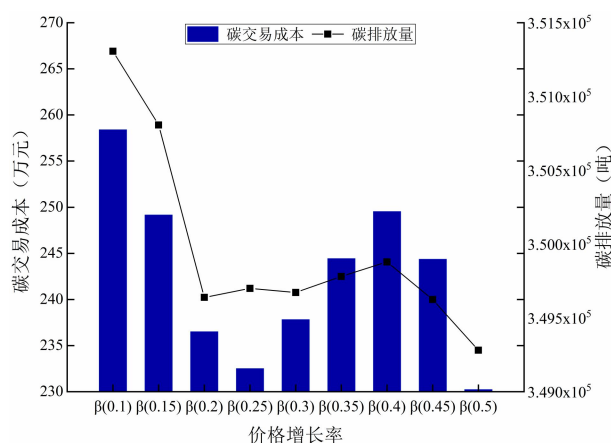


图 11 在工况 4 基础上不同价格增长率下碳排放量、碳交易成本变化

Fig.11 Changes in carbon emissions and carbon trading costs under various rates of price growth for case 4

在工况 4 的基础上, 改变价格增长率, 分析参数变化对阶梯碳交易机制的影响。由图 11 可知, 随着价格增长率的提高, 碳排放量整体呈现先下降再升高再下降的趋势, 碳交易成本整体呈现下降的趋势, 中间有波动上升。在增长率为 0.1 时, 碳排放量和碳交易成本值最大, 在增长率为 0.5 时, 碳排放量和碳交易成本值最小。当价格增长率较低时, 系统综合产电成本高于外购电力成本, 考虑整体经济性最优, 系统选择外购电力, 因此碳排放量增加, 碳交易成本上升。但是随着价格增长率的提高, 碳交易成本增加, 其在全生命周期中所占的比重也随之上升, 系统受到碳排放量

的影响程度增强。为了实现最佳经济效益, 系统开始减少外购电力, 从而降低碳排放量和碳交易成本。而随着增长率的值大于 0.4 以后, 系统受到碳排放的约束增强, 碳交易成本比重持续上升, 系统开始约束高碳排放设备的使用, 这进一步降低了碳排放量和碳交易成本。

3 结论

建立了一个基于阶梯碳交易机制的考虑多阶段规划的长期 PIES 优化模型, 以 15 年为规划期限, 充分考虑负荷变化带来的波动性影响, 以及设备使用寿命对系统运营的影响, 对 PIES 长期运行进行了研究。与从经济角度出发研究 PIES 优化的研究不同, 建立了阶梯碳交易机制, 系统碳排放受到碳交易成本的约束, 实现了碳减排约束下长期 PIES 的优化运行。通过设置三大类场景, 探讨分析了碳交易形式、规划阶段数量以及碳交易参数变化对 PIES 的影响, 得到以下结论。

(1) 阶梯碳交易可以在系统运行过程中有效减少对高碳排放设备的使用, 增加清洁能源设备的投建容量, 在有效约束 PIES 碳排放、消纳新能源等方面发挥了积极作用。

(2) 长期、多阶段规划方法可以更好的响应负荷随年份增长变化, 合理规划安排设备投建时间, 降低设备运行成本和维护成本, 增加设备残值, 降低系统全生命周期成本, 有效提高 PIES 系统整体经济性。

(3) 对于 PIES 长期规划, 合理的规划阶段

数量划分可以以较低总成本实现碳排放量的同等降低。对比均采用阶梯碳交易机制的案例,规划阶段数量的增加会导致碳排放量大幅减少 14.6%,生命周期成本也大幅下降了 15.2%。

(4) 系统碳排放量以及碳交易成本对于碳交易基准价格以及价格增长率的变化较敏感,随着碳交易基准价格以及价格增长率的增加,系统碳排放量以及碳交易成本变化趋势是波动的,在基准价格为 500 元/吨和价格增长率为 0.5 时,碳排放量和碳交易成本值最小。因此需合理设置碳交易基准价格以及价格增长率才能实现 PIES 运行的低碳性以及经济效益。

研究为 RIES 的规划提供了一些思路,但在以下方面的考虑还存在欠缺。对于电价、气价等能源价格的波动性未进行考虑,实际中对于工业园区中用户能源价格的设置需要综合考虑多方面的因素。随着国际环境的变化,清洁能源发电以及天然气开采技术的进步,电价、气价并不是一成不变的,能源价格的变化也会对碳交易市场产生一定的影响。其次,研究未考虑不确定因素和不确定性程度对 RIES 长期规划的影响,例如气候变化,天气状况的差异会造成光伏出力产生波动,进而对光伏发电机组的出力产生影响,可再生能源的间歇性和不稳定性可能会影响能源系统的容量配置,导致不同的运行结果。因此在未来的研究中应继续深入探讨这些问题,探讨新型的 RIES 优化配置。

参考文献:

- [1] 吴涵,刘洋,杨祺铭,等.计及需求响应的分布鲁棒博弈区域综合能源系统运行优化策略[J].电力建设,2022,43(4):108-118.
- [2] 林文智,杨苹,陈芯羽,等.计及需求响应不确定性的园区综合能源系统日前经济优化调度[J].电力建设,2021,42(12):9-20.
- [3] 郑诗程,许浩,郎佳红,等.计及光伏不确定性的多区域综合能源系统多场景分布鲁棒优化调度[J].太阳能学报,2024,45(3):460-469.
- [4] 雷杨,赵纪峰,丁石川,等.考虑双重不确定性的区域综合能源系统多阶段滚动随机规划[J].电力系统自动化,2023,47(20):53-63.
- [5] H Xiao, F Long, L Zeng, et al. Optimal scheduling of regional integrated energy system considering multiple uncertainties and integrated demand response[J]. Electric Power Systems Research, 2023,217(109169).
- [6] 周伟,孙永辉,谢东亮,等.计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J].电网技术,2024,48(1):61-73.
- [7] 张晓,陈胜,卫志农,等.计及广义储能的园区综合能源系统低碳规划[J].电力自动化设备,2024,44(3):40-48.
- [8] X Lin, N Zhang, W Zhong, et al. Regional integrated energy system long-term planning optimization based on multi-energy complementarity quantification[J]. Journal of Building Engineering, 2023,68(106046).
- [9] Y Lei, D Wang, H Jia, et al. Multi-stage stochastic planning of regional integrated energy system based on scenario tree path optimization under long-term multiple uncertainties[J]. Applied Energy, 2021, 300(117224).
- [10] 曹严,穆云飞,贾宏杰,等.考虑建设时序的园区综合能源系统多阶段规划[J].中国电机工程学报,2020,40(21):6815-6828.
- [11] 胡福年,周小博,张彭成,等.计及碳捕集的综合能源系统低碳经济优化调度[J].太阳能学报,2024,45(3):419-427.
- [12] W Dong, Z Lu, L He, et al. Low-carbon optimal planning of an integrated energy station considering combined power-to-gas and gas-fired units equipped with carbon capture systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138(107966).
- [13] 黄冬梅,王干帅,孙锦中,等.碳交易机制下园区综合能源系统优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2024, 36(5):90-98.
- [14] 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.
- [15] 杨晓辉,邓叶恒,王晓鹏,等.基于碳交易-绿色证书联合交易机制的含 CHP-CCS-P2G 耦合的区域综合能源系统低碳经济调度[J].太阳能学报,2024,45(6):

- 244-254.
- [16] I van Beuzekom, B-M Hodge, H Slootweg. Framework for optimization of long-term, multi-period investment planning of integrated urban energy systems[J]. *Applied Energy*, 2021,292(116880).
- [17] 袁世琦,潘鹏程,魏业文,等.园区综合能源系统低碳经济优化调度模型研究[J].*太阳能学报*,2024,45(3):347-356.
- [18] 张洪涛,周意入,涂玲英,等.计及绿证-碳交易与氢能的综合能源系统多时间尺度优化调度[J].*电力系统及其自动化学报*,2023,35(11):95-106.
- [19] 陈志,胡志坚,翁菖宏,等.基于阶梯碳交易机制的园区综合能源系统多阶段规划[J].*电力自动化设备*,2021,41(9):148-155.
- [20] D Lei, Z Zhang, Z Wang, et al. Long-term, multi-stage low-carbon planning model of electricity-gas-heat integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and CCS[J].*Energy*, 2023,280(128113).
- [21] 方仍存,杨洁,周奎,等.计及全生命周期碳成本的园区综合能源系统优化规划方法[J].*中国电力*,2022,55(12):135-146.
- [22] F Han, J Zeng, J Lin, et al. Multi-stage distributionally robust optimization for hybrid energy storage in regional integrated energy system considering robustness and nonanticipativity[J]. *Energy*, 2023, 277(127729).
- [23] P Yang, H Jiang, C Liu, et al. Coordinated optimization scheduling operation of integrated energy system considering demand response and carbon trading mechanism[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023,147(108902).