

考虑阶梯碳交易和最优建设时序的 园区综合能源系统规划

江训谱¹, 吕施霖², 王健², 张莹颖², 包哲静³, 于淼³

(1. 浙江大学 工程师学院, 杭州 310015; 2. 国网浙江省电力有限公司综合服务分公司, 杭州 310005; 3. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 园区综合能源系统可以实现多种能源之间的多能互补、协同优化, 对于节能、增效、降碳具有重要意义。针对含电、气、热多种能源类型的园区综合能源系统, 提出一种考虑阶梯碳交易和最优建设时序的规划模型及求解方法。文章构建阶梯碳交易成本计算模型, 并加入碳达峰、碳中和的“双碳”约束以制约园区的碳排放量; 以计及投资成本、运维成本、碳交易成本、残值费用的全寿命周期费用现值最小为优化目标; 通过混合整数规划进行模型算法求解, 得到园区综合能源系统各设备的投建年份和容量配置方案。通过建立多个典型规划场景进行联合对比, 验证了该规划模型在减少碳排放、降低系统成本等方面的有效性, 并探讨了碳交易基准价格、投建次数和双碳约束对规划结果的影响。

关键词: 园区综合能源系统; 阶梯碳交易; 双碳约束; 最优建设时序

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2023.12.002

中图分类号: TM732

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2023)12-0011-09

Park-level integrated energy system planning considering tiered carbon trading and optimal construction timing

Jiang Xunpu¹, Lv Shilin², Wang Jian², Zhang Yingying², Bao Zhejing³, Yu Miao³

(1. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China.

2. Integrated Service Branch, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310005, China.

3. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The integrated energy system (IES) in industrial park enables the mutual complementation and coordinated optimization of multiple energy sources, which is of great significance for energy conservation, efficiency enhancement and carbon emission reduction. In this paper, the planning model and solution approach is proposed, considering tiered carbon trading and optimal construction timing for the IES in the park, which involves multiple energy types including electricity, gas and heat. The cost calculation model for a tiered carbon trading is developed, and the 'dual-carbon' constraints of carbon peaking and carbon neutrality are incorporated to restrict the carbon emissions of the park. The optimization objective is to minimize the net present value of the total life-cycle cost, which takes into account the investment cost, operation and maintenance cost, carbon trading cost, and residual value cost. The model is solved using a mixed-integer programming to determine the investment year and capacity configuration plan of equipment in the IES of park. To demonstrate the effectiveness of the planning model in reducing carbon emissions and decreasing system costs, a variety of typical scenarios are established for joint comparison of several typical planning scenarios. Additionally, the impacts of carbon trading benchmark prices, the number of construction phases and the dual carbon constraint on the planning results are explored.

Keywords: integrated energy system (IES), tiered carbon trading, dual carbon constraints, optimal construction timing

0 引言

近年来,随着能源需求不断地增长,如何实现能源的可持续发展得到了全社会的关注,我国也提出了 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的“双碳”战略

目标^[1]。随着能源需求的增长,热电联产(CHP)等新的技术也在迅速地发展^[2],电、热、气等多种能源得以相互耦合和协同,园区综合能源系统(PIES)可以实现多能源互补,从而实现能源综合利用,已经成为了实现能源可持续发展的重要途径之一。由于规划的年限比

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5211FW220001)

较长,根据不同的能源需求和供给情况,合理的建设时序可以最大限度地提高能源利用效率,减少投资浪费和降低环境污染。

PIES 的规划问题关系到综合能源系统运行的经济性、可靠性等多个方面,受到学者的广泛关注。文献[3]针对系统运行的经济性建立了考虑激励型需求响应的多区域规划模型;文献[4]提出了通过多区域冷热联设备和储能设备的协调运行来改善系统运行的经济性;文献[5]提出了考虑经济性、可持续性和可靠性协同优化的电气系统联合规划模型;文献[6-7]提出了在长周期的背景下考虑经济性的多阶段规划模型;文献[8]提出了考虑源荷互动和需求响应的园区双层规划模型以提高系统运行的自主性;文献[9]提出了考虑风电不确定性的混合鲁棒区间优化的模型以协调系统运行的经济性与可靠性。但是上述研究鲜有考虑系统设备最优的建设时序问题。

PIES 集多种能源于一体,实现能源的多能互补、协同优化,从而降低碳排放。在“双碳”目标的背景下,有必要将碳排放的影响纳入园区规划中进行考虑。文献[10]提出建立电-碳价格相关性和氢储能的综合能源系统以降低碳排放的模型;文献[11-12]研究碳交易对电气综合系统运行的影响;文献[13]研究碳交易在综合能源系统中的应用及未来的发展;文献[14-15]建立了阶梯碳交易模型,研究阶梯碳交易机制对系统容量配置的影响;文献[16]在中长期的多阶段规划引入氢能和碳交易的减排手段来提升园区的经济性与减排效果;文献[17-18]建立绿证与碳交易联合交易的模型以促进新能源的消纳量和降低系统的碳排放量。上述研究在园区中引入碳交易机制,有效地提高了系统的低碳性。

文中在上述研究基础上,综合考虑阶梯碳交易和最优建设时序,建立了阶梯碳交易成本模型,目标函数取为全寿命周期总费用折现到投资初年的现值,并结合碳达峰、碳中和的“双碳”目标设置碳排放约束条件,根据 PIES 的实际发展情况去考虑负荷在不同阶段的增长,进一步考虑 PIES 的建设时序,将投建年份设置为待寻优量,求解得出最佳建设时序;最后,讨论了碳交易基准价格和投建次数对园区规划结果的影响。

1 园区综合能源系统建模

1.1 PIES 的结构示意图

PIES 以能源耦合、多种能源相互关联和互补为特征,包含储能设备、能源生产与转换设备,满足系统终端用户的电/热/气的负荷要求。为表示所有设备的能量流动关系,文中采用电、热、气统一母线^[19]表示 PIES 的基本结构,如图 1 所示。通过该结构示意图,可以清晰直观地看到各个设备的连接、耦合关系。

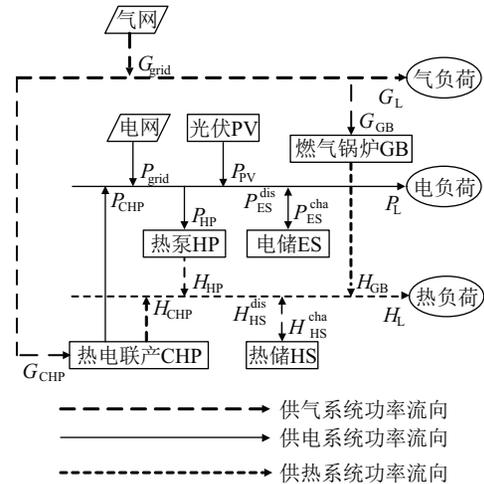


图 1 园区综合能源系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PIES structure

1.2 PIES 的设备建模

文中考虑 PIES 的候选规划的能源生产设备有光伏(PV),能源转换设备有热泵(HP)、热电联产、燃气锅炉(GB),储能设备有储电装置(ES)、蓄热装置(HS),各个候选设备的建模如下:

1) 光伏。

基于典型日的光照数据,假设 PV 以最大功率点追踪^[20]模式(MPPT)工作,PV 在 MPPT 的最大输出功率曲线是 PV 的预测输出功率曲线,PV 在任意时刻的实际输出功率均不能超过该最大输出功率,如式(1)所示:

$$0 \leq P_{pv}(t) \leq P_{pv}^{\max}(t) \quad (1)$$

式中 $P_{pv}(t)$ 表示 t 时段的 PV 实际输出功率; $P_{pv}^{\max}(t)$ 表示 t 时段 PV 在 MPPT 下的最大输出功率。

2) 能源转换设备。

如果将各种能源转换设备的输入功率、输出功率、转换效率分别表示为 $I_i(t)$ 、 $O_i(t)$ 和 η_i ,则能源转换设备的出力特性及其出力约束如式(2)和式(3)所示:

$$O_i(t) = \eta_i I_i(t) \quad i \in \{HP, CHP, GB\} \quad (2)$$

$$0 \leq O_i(t) \leq \bar{O}_i \quad i \in \{HP, CHP, GB\} \quad (3)$$

其中,式(2)表示各能源转换设备的输入输出功率之间的关系;式(3)表示设备出力的上下限约束; \bar{O}_i 指各设备的输出功率的上限,由设备当下的装机容量决定。

3) 储能设备。

储电、蓄热装置的能量转换关系相似,文中采用一个广义储能系统的通用模型^[21]对二者的运行特性进行描述,储能装置的运行特性模型如下:

$$0 \leq P_{cha}(t) \leq P_{cha}^{\max} \quad (4)$$

$$0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis}^{\max} \quad (5)$$

$$P_{cha}(t) \cdot P_{dis}(t) = 0 \quad (6)$$

$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) + \frac{\eta_{cha} P_{cha}(t) \Delta t - P_{dis}(t) \Delta t / \eta_{dis}}{W_{ESS}} \quad (7)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (8)$$

$$SOC(0) = SOC(T_0) \quad (9)$$

其中, $P_{cha}(t)$ 和 $P_{dis}(t)$ 表示储能设备的充、放能功率; P_{cha}^{max} 和 P_{dis}^{max} 表示储能设备的充、放能功率上限, 由储能设备当下的装机容量决定; $SOC(t)$ 表示储能设备在 t 时段的荷电状态(State of Charge, SOC); η_{cha} 和 η_{dis} 是储能设备的充、放能效率; W_{ESS} 表示储能设备的容量; SOC_{min} 和 SOC_{max} 表示储能荷电状态的上下限; Δt 表示时间间隔, 文中取 $\Delta t = 1 \text{ h}$ 。式(4)和式(5)表示储能设备的充、放能功率的上下限约束; 式(6)表示充、放能过程不能同时进行; 式(7)表示储能设备的 SOC 随充放电过程的变化; 式(8)表示储能荷电状态的上下限约束; 式(9)表示储能装置的周期始、末荷电状态相同, 考虑储能装置以日为周期循环, 所以 $T_0 = 24$ 。

2 园区综合能源系统的阶梯碳交易成本计算模型

2.1 PIES 的碳排放量和碳排放配额

碳交易政策最初是联合国为了应对气候问题而构建的一种国际贸易体系, 在我国处于逐渐发展的阶段^[22]。在碳交易市场中, 碳市场将碳排放权分配给企业并允许其自由交易。在电力行业, 我国主要是选择免费分配的方法用以分配碳排放配额^[23], 文中选取基准线法^[15]以确定园区的无偿碳排放配额, 认为 PIES 的碳排放主要来自外购电力、GB、CHP 这三个部分, 并考虑外购电力全部来自于火力发电。

PIES 的实际碳排放量如式(10)~式(13)所示:

$$E_n = E_{grid,n} + E_{GB,n} + E_{CHP,n} \quad (10)$$

$$E_{grid,n} = \beta_e \sum_{t=1}^T P_{grid,n}(t) \Delta t \quad (11)$$

$$E_{GB,n} = \beta_h \sum_{t=1}^T H_{GB,n}(t) \Delta t \quad (12)$$

$$E_{CHP,n} = \beta_h \cdot \sum_{t=1}^T (H_{CHP,n}(t) \Delta t + \varphi_{eh} P_{CHP,n}(t) \Delta t) \quad (13)$$

其中, E_n 、 $E_{grid,n}$ 、 $E_{GB,n}$ 、 $E_{CHP,n}$ 分别表示第 n 年 PIES、外购电力、GB、CHP 的实际碳排放量; β_e 、 β_h 分别表示单位电量、单位热量的碳排放量; $P_{grid,n}(t)$ 表示第 n 年的第 t 时段 PIES 向电网的购电功率; $H_{GB,n}(t)$ 表示第 n 年的第 t 时段燃气锅炉的热输出功率; $H_{CHP,n}(t)$ 、 $P_{CHP,n}(t)$ 表示第 n 年的第 t 时段 CHP 机组的热、电输出功率; 文中碳交易费用以年为时间尺度进行结算, 所以 $T = 8760$; φ_{eh} 是 CHP 机组发电量折算到发热量的折算系数^[23]。

PIES 的碳排放配额如式(14)所示:

$$E_n^* = E_{grid,n}^* + E_{GB,n}^* + E_{CHP,n}^* \quad (14)$$

式中 E_n^* 、 $E_{grid,n}^*$ 、 $E_{GB,n}^*$ 、 $E_{CHP,n}^*$ 分别表示第 n 年 PIES、外购电力、燃气锅炉、CHP 机组的碳排放配额。 $E_{grid,n}^*$ 、 $E_{GB,n}^*$ 、 $E_{CHP,n}^*$ 的计算方法与式(11)~式(13)相似, 区别就是将单位电量、单位热量的碳排放量 β_e 、 β_h 改为单位电量、单位热量的碳排放配额 β_e^* 、 β_h^* 。

PIES 第 n 年考虑碳配额后的交易碳排放量为 $E_{f,n}$, 表示为:

$$E_{f,n} = E_n - E_n^* \quad (15)$$

2.2 阶梯碳交易的计算模型

文中建立了阶梯碳交易的模型, 规定了若干个交易碳排放区间, 以及交易碳排放量 $E_{f,n}$ 在各个交易碳排放区间上对应的价格。当 $E_{f,n}$ 为负数时, 表示实际碳排放量小于碳配额, 此时 PIES 可以将多余的碳配额出售以获取收益; 当 $E_{f,n}$ 为正数时, 表示实际碳排放量大于碳配额, 那么 PIES 需要向碳交易市场购买所需的碳配额, 且所需购买的碳配额越多, 碳交易价格也会越高。

阶梯碳交易的交易区间及其个数通常由上级碳排放监管部分来制定, 园区是碳交易的执行者。在制定过程中, 通常会考虑气候变化数据、温室气体排放量以及预测模型、国家或地区的碳减排目标, 同时兼顾不同行业的差异和经济实际情况等因素。

第 n 年的阶梯碳交易费用 $C_{CO_2,n}$ 的计算如式(16)所示:

$$C_{CO_2,n} = \begin{cases} -cd + c(1+\alpha)(E_{f,n} + d) & E_{f,n} < -d \\ cE_{f,n} & -d \leq E_{f,n} < d \\ cd + c(1+\alpha)(E_{f,n} - d) & d \leq E_{f,n} < 2d \\ c(2+\alpha)d + c(1+2\alpha)(E_{f,n} - 2d) & 2d \leq E_{f,n} < 3d \\ c(3+3\alpha)d + c(1+3\alpha)(E_{f,n} - 3d) & 3d \leq E_{f,n} < 4d \\ c(4+6\alpha)d + c(1+4\alpha)(E_{f,n} - 4d) & E_{f,n} \geq 4d \end{cases} \quad (16)$$

式中 c 表示碳交易基准价格; d 表示碳排放区间长度; α 表示碳交易价格的增长幅度。碳交易价格和交易碳排放量 $E_{f,n}$ 的关系由图 2 所示。

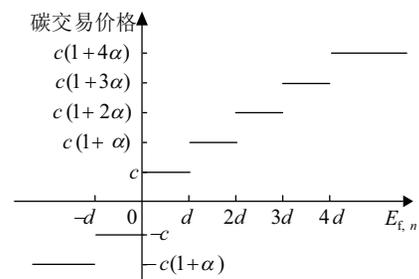


图 2 碳交易价格与交易碳排放量的关系图
Fig. 2 Relationship between carbon trading price and traded carbon emission

3 考虑最优建设时序的园区综合能源系统的多阶段规划模型

对于规划周期年限比较长的 PIES, 在制定规划时常常采用分期进行的多阶段规划方法。为规避设备出现寿命到期退役的情况发生, 文中将园区的规划周期设置为各类设备的寿命最小值, 并将该规划周期分成多个阶段分期规划, 对规划期内负荷的增长速度进行预测, 将投建年份和设备的投资容量设置为待寻优量, 然后求解优化模型得出优化结果。

3.1 目标函数

文中的 PIES 模型以计及全寿命周期内的投资成本、运行成本、维护成本和碳交易成本之和再减去规划期末的残值费用, 并折算到投资初年的现值总费用最小作为目标函数。投资成本在各规划阶段的首年年初结算, 残值费用在规划期末的末年年末结算, 运行成本、维护成本和碳交易成本在规划期内的每年年末结算一次。文中模型的目标函数为:

$$\min C = \sum_{n=1}^N (1 + \gamma)^{-n} (C_{\text{ope},n} + C_{\text{main},n} + C_{\text{CO}_2,n}) + \sum_{k=1}^K (1 + \gamma)^{-n_{k+1}} C_{\text{inv},k} - (1 + \gamma)^{-N} F_{\text{RV}} \quad (17)$$

式中 C 表示园区的全生命周期总费用现值; K 是园区规划阶段的数量; N 表示园区规划的周期年数; k 表示处于第 k 个规划阶段; n 表示处于规划的第 n 年; n_k 表示第 k 个规划阶段处于园区规划周期中的第 n_k 年; γ 表示年折算率; $C_{\text{inv},k}$ 表示在第 k 个规划阶段 PIES 系统的设备投资费用; $C_{\text{ope},n}$ 、 $C_{\text{main},n}$ 、 $C_{\text{CO}_2,n}$ 表示第 n 年 PIES 系统的运行、维护与碳交易费用; F_{RV} 表示规划期末设备的残值费用。碳交易费用的计算如式(16)所示, 投资成本、运行成本、维护成本与残值费用的计算如下:

1) 投资费用。

PIES 在第 k 个阶段的设备投资费用的计算如式(18)所示:

$$C_{\text{inv},k} = \mathbf{c}_{\text{inv}} \mathbf{Q}_k^T \quad (18)$$

式中 $\mathbf{c}_{\text{inv}} = [c_{\text{inv}}^m]_{1 \times M}$ 表示各类型待规划设备的单位容量投资成本所构成的矩阵; $\mathbf{Q}_k = [Q_k^m]_{1 \times M}$ 是第 k 个阶段的各类型待规划设备的配置容量所构成的矩阵, 定义 M 是待规划设备类型的数量; m 是待规划的设备类型, $m \in \{\text{PV}, \text{HP}, \text{CHP}, \text{GB}, \text{ES}, \text{HS}\}$; c_{inv}^m 表示 m 型设备的单位容量投资成本; Q_k^m 表示第 k 个阶段 m 型设备的配置容量。

2) 运行费用。

PIES 在第 n 年的运行费用计算如式(19)所示:

$$C_{\text{ope},n} = \sum_{t=1}^T (c_e(t) P_{\text{grid},n}(t) \Delta t + c_g G_{\text{grid},n}(t) \Delta t) \quad (19)$$

式中 $c_e(t)$ 表示 t 时段的购电价格; c_g 表示单位折算后的购气价格; $G_{\text{grid},n}(t)$ 表示在第 n 年的第 t 时段园区向气网的购气功率。

3) 维护费用。

PIES 在第 n 年的维护费用计算如式(20)所示:

$$C_{\text{main},n} = \sum_{t=1}^T \mathbf{c}_{\text{main}} \mathbf{P}_{\text{main},n}^T(t) \Delta t \quad (20)$$

式中 $\mathbf{c}_{\text{main}} = [c_{\text{main}}^m]_{1 \times M}$ 表示各类型待规划设备的单位功率维护成本所构成的矩阵; c_{main}^m 表示 m 型设备的单位功率维护成本; $\mathbf{P}_{\text{main},n}(t) = [P_{\text{main},n}^m(t)]_{1 \times M}$ 表示各类型待规划设备的输出功率所构成的矩阵; $P_{\text{main},n}^m(t)$ 表示 m 型设备在第 n 年的第 t 时段的输出功率; 若 m 型设备表示储能设备, 那么 $P_{\text{main},n}^m(t)$ 表示储能设备的充能功率与放能功率之和。

4) 残值费用。

在规划期末, 无论设备是否寿命到期, 都存在一定的残值费用, 所以需要考虑它们折旧后的残值费用, PIES 在规划期末的残值费用计算如式(21)所示:

$$F_{\text{RV}} = \sum_{j=1}^M \left[C_{\text{inv},j} \left(1 - \frac{(1 - \delta_j) T_j}{N_j} \right) \right] \quad (21)$$

式中 $C_{\text{inv},j}$ 表示第 j 类设备的投资费用; δ_j 是第 j 类设备的净残值率; T_j 是第 j 类设备在规划期末的已使用年数; N_j 是第 j 类设备的寿命年限。

3.2 约束条件

1) 功率平衡约束。

PIES 需要满足电、热、气的功率平衡约束, 如式(22)~式(24)所示:

$$P_{\text{grid},n}(t) + P_{\text{PV},n}(t) + P_{\text{CHP},n}(t) = P_{\text{L},n}(t) + P_{\text{HP},n}(t) + P_{\text{ES},n}^{\text{cha}}(t) - P_{\text{ES},n}^{\text{dis}}(t) \quad (22)$$

$$H_{\text{HP},n}(t) + H_{\text{CHP},n}(t) + H_{\text{GB},n}(t) = H_{\text{L},n}(t) + H_{\text{HS},n}^{\text{cha}}(t) - H_{\text{HS},n}^{\text{dis}}(t) \quad (23)$$

$$G_{\text{grid},n}(t) = G_{\text{L},n}(t) + G_{\text{CHP},n}(t) + G_{\text{GB},n}(t) \quad (24)$$

其中, $P_{\text{L},n}(t)$ 、 $H_{\text{L},n}(t)$ 、 $G_{\text{L},n}(t)$ 分别表示第 n 年的第 t 时段电、热、气负荷功率; $P_{\text{HP},n}(t)$ 与 $H_{\text{HP},n}(t)$ 分别表示第 n 年的第 t 时段热泵的电输入功率与热输出功率; $G_{\text{CHP},n}(t)$ 与 $G_{\text{GB},n}(t)$ 分别表示第 n 年的第 t 时段热电联产和燃气锅炉的气输入功率; $P_{\text{ES},n}^{\text{cha}}(t)$ 与 $P_{\text{ES},n}^{\text{dis}}(t)$ 表示第 n 年的第 t 时段储电装置的充电、放电功率; $H_{\text{HS},n}^{\text{cha}}(t)$ 与 $H_{\text{HS},n}^{\text{dis}}(t)$ 表示第 n 年的第 t 时段蓄热装置的蓄热、放热功率。

2) 设备运行约束。

PIES 的设备运行约束由式(1)~式(9)所示。

3) 上级网络交互功率约束。

PIES 与上级电网、气网的交互功率需要被限制在一定范围以内, 如式(25)~式(26)所示:

$$P_{\text{grid}}^{\min} \leq P_{\text{grid},n}(t) \leq P_{\text{grid}}^{\max} \quad (25)$$

$$G_{grid}^{\min} \leq G_{grid,n}(t) \leq G_{grid}^{\max} \quad (26)$$

其中, P_{grid}^{\min} 和 P_{grid}^{\max} 分别表示与上级电网交互功率的最小、最大值; G_{grid}^{\min} 和 G_{grid}^{\max} 分别表示与上级气网交互功率的最小、最大值。

4) “双碳”约束。

碳达峰约束如式(27)所示:

$$E_{f,x} \geq E_{f,n}, \quad n \in \{1, \dots, N\} \quad (27)$$

式中 x 表示碳达峰在规划的第 x 年实现, 碳达峰指的是 PIES 考虑碳配额后的交易碳排放量最多。

根据“双碳”目标, 在碳排放达到峰值之后, 碳排放逐步回落。文中设置在碳达峰后, 交易碳排放量每年下降 $v\%$ 及以上, 故碳中和约束如式(28)所示:

$$E_{f,y+1} \leq (1 - v\%) \cdot E_{f,y}, \quad y \geq x \quad (28)$$

式中 y 表示达到碳达峰之后的年份。

文中构建的是混合整数线性规划模型, 通过 Matlab R 2021a 中的 Cplex 求解器进行求解, 得到园区多阶段规划的优化结果。

4 算例研究

4.1 算例数据

文中的算例来源于我国某地区的电/热/气耦合的 PIES, 为真实地反映 PIES 的运行情况, 将一年分成三个典型日, 分别为夏季典型日、冬季典型日、过渡季典型日, 三个典型日的电负荷、热负荷、气负荷需求曲线和 PV 的最大输出功率曲线如图 3 所示。

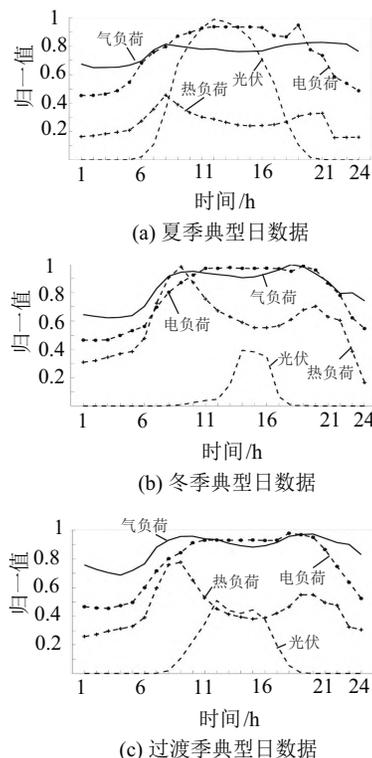


图 3 典型日下负荷、光伏出力预测曲线

Fig. 3 Predicted load and PV output curves of typical days

PIES 的规划周期 N 设置为 15 年, 折算率 γ 取为 8%, 设备残值率 δ_j 取为 0.06, 储能装置的周期始、末荷能状态 SOC 设置为 0.3。PIES 采用分时电价机制, 园区向上级电网购电的日内分时电价如表 1 所示, 购气价格为 0.28 元/(kW·h)。参考全国碳交易市场的最新成交数据, 碳交易基准价格定为 56 元/t, 碳交易相关的其他参数参考文献[14]。

表 1 电价

Tab. 1 Electricity price

购电	时间	价格(元/(kW·h))
峰价	11:00-16:00, 19:00-21:00	1.35
平价	8:00-11:00, 16:00-19:00, 21:00-24:00	0.90
谷价	00:00-08:00	0.47

各类待规划设备的投资、维护及寿命等参数参考了相关文献^[24-27], 并根据市场价格波动适当地进行调整, 相关参数参考文献[14]和文献[24]。根据 PIES 的负荷增长特点, 即: 规划初期处于快速增长期, 负荷的增长率较快; 规划中期处于平稳增长期, 负荷的增长率有一定降低; 规划后期达到成熟期, 负荷增速进一步降低; 给出 PIES 的负荷信息如表 2 所示。运行算例的计算机 CPU 是 Core i7-1195G7, 内存 16G。

表 2 PIES 的负荷信息

Tab. 2 Load information of PIES

	规划初期 最大负荷 功率/kW	规划期 1-5 年内负荷年 增长率/%	规划期 6-10 年内负荷 年增长率/%	规划期 11-15 年内负荷 年增长率/%
电负荷	220	10	8	6
热负荷	320	10	8	6
气负荷	260	10	8	6

4.2 各场景仿真结果分析

对于文中建立的考虑最优建设时序和阶梯碳交易的规划模型, 设置了如下 4 种场景进行对比。其中, 设置 PIES 规划的第 8 年达峰; 在碳达峰后, 交易碳排放量每年下降 8% 及以上。

1) 场景 1: 单阶段规划, 考虑阶梯碳交易;

2) 场景 2: 多阶段规划, 规划段数为 3, 投建年份待寻优, 碳交易以固定的基准价格进行;

3) 场景 3: 多阶段规划, 规划段数为 3, 在规划期的第 1、6、11 年投建设备, 考虑阶梯碳交易;

4) 场景 4: 多阶段规划, 规划段数为 3, 投建年份待寻优, 考虑阶梯碳交易。

各类场景下的投建年份及设备的配置容量见表 3, 各类场景折算到规划初年的现值费用及碳排放量见表 4。

表 3 各类场景下的投建年份及设备的配置容量

Tab. 3 Construction year and equipment configuration capacity under different scenarios

场景	规划阶段	投建年份/年	PV/kW	HP/kW	CHP/kW	GB/kW	ES/(kW·h)	HS/(kW·h)
1	第 1 阶段	1	447.1	195.0	351.3	341.8	761.4	392.4
	第 2 阶段	1	343.4	156.9	219.0	32.4	572.5	280.8
2	第 2 阶段	5	131.5	68.7	120.5	19.3	147.7	133.6
	第 3 阶段	10	137.3	50.7	224.5	28.8	0	184.5
3	第 1 阶段	1	355.5	163.5	237.8	47.3	559.3	304.6
	第 2 阶段	6	139.3	59.7	159.4	22.0	128.5	98.0
	第 3 阶段	11	130.2	56.8	199.0	0	4.4	149.5
4	第 1 阶段	1	341.8	156.4	233.0	25.3	547.9	276.9
	第 2 阶段	5	124.2	63.5	124.2	21.6	116.3	137.5
	第 3 阶段	10	149.4	55.5	218.2	29.9	20.3	176.2

表 4 各类场景折算到规划初年的现值费用及碳排放量

Tab. 4 Present value costs and carbon emissions of scenarios converted to the initial planning year

场景	全生命周期费用/万元	投资费用/万元	运行费用/万元	维护费用/万元	碳交易费用/万元	残值费用/万元	碳排放量/t
1	3 062.0	890.8	2 167.1	106.2	8.9	111.0	2 634.0
2	2 991.5	976.8	2 102.3	106.7	7.52	201.7	2 378.4
3	2 993.8	986.2	2 105.4	106.5	7.45	211.8	2 093.6
4	2 992.5	979.6	2 102.7	106.6	7.40	203.8	2 072.3

对比场景 1 和场景 4 可以发现,场景 4 的 PV、HP、CHP 这些设备的投建总容量比场景 1 高,场景 4 的 GB 设备的总容量比场景 1 低,这是多阶段规划在规划后期阶段投入的设备的残值较高的原因。场景 1 与场景 4 的投资费用与残值费用之差比较接近,但是运行费用场景 1 比场景 4 高 3.06%,这是因为在规划前期阶段,场景 1 投建的设备冗余严重,虽然投资费用低,但减去残值费用与场景 4 接近;但在规划后期阶段,场景 1 的设备投建容量相对场景 4 稍低,更多地依赖于从外部购气、购电,所以运行费用更高。场景 1 的碳排放量比场景 4 高 27.11%,这是由于多阶段规划中设备规划更加灵活,在规划后期可以选择投建更多的 PV、CHP 这类碳排放较少的设备,所以多阶段规划中总碳排放量大大降低。这说明在进行多阶段规划后,在满足各类负荷需求的基础上,可以减少单阶段规划因超前投建所导致的设备冗余和折旧损耗,设备投建更加灵活,也可以减少总碳排放,对规划期内的全生命周期成本和低碳运行都有较大的优化效果。

将场景 2 和场景 4 进行对比可以得到,场景 4 的 PV、CHP 设备的投资总容量比场景 2 稍高,场景 4 的 HP 设备的投资总容量比场景 2 稍低,这是因为场景 2 的碳交易以固定的基准价格进行,相当于变相地降低了碳交易价格,所以场景 2 的规划倾向于选择相对便宜但碳排放量高的 HP 设备,场景 2 的总碳排放量远大于场景 4。然而,场景 2 的全生命周期费用比场景 4 略低,这是因为场景 2 的碳交易费用的单价降低了。综合来看,场景 4 选择了阶梯碳交易虽然会导致总费用稍微增加了 0.03%,但是碳排放量相对场景 2 降低了

12.87%,这说明了阶梯碳交易机制比以固定的价格进行碳交易在实现低碳性的方面更有优势。

对比场景 3 和场景 4 可以发现,场景 4 仅仅是将 PIES 内设备的投资年份设置为变量,通过求解得出设备的最佳投建年份,其他均与场景 3 相同。场景 4 的投建费用与全生命周期成本比场景 3 略低,且总碳排放量比场景 3 下降了 1.02%。由此可知,将投建年份设为变量,各类规划设备的配置会更加灵活,全生命周期成本和低碳性可以进一步得到优化。

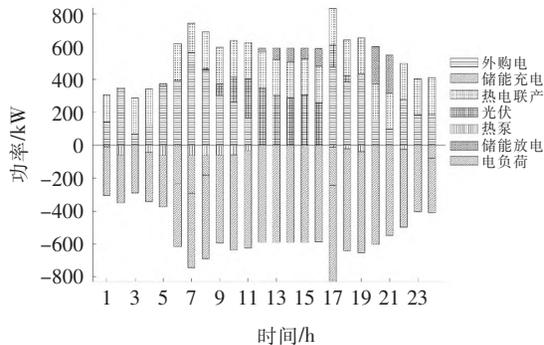
场景 1 - 场景 4 的求解时间分别是 10.498 s、31.145 s、11.107 s、36.279 s,可见将规划年份设置为待寻优量后,求解时间明显变长。

选取 PIES 在场景 4 下的规划期最后一年的过季典型日的电、热、气功率平衡进行分析,各设备出力及负荷结果如图 4 所示。可以发现,储电装置在电价低谷时段充电,在电价高峰时放电,符合“低储高发”原则;由于电热相互耦合,蓄热装置也是在电价低谷时段蓄热,在电价高峰时放热。PIES 中的各类能源设备协同调度,在满足用户各类负荷需求的同时尽量降低自身的运行成本。

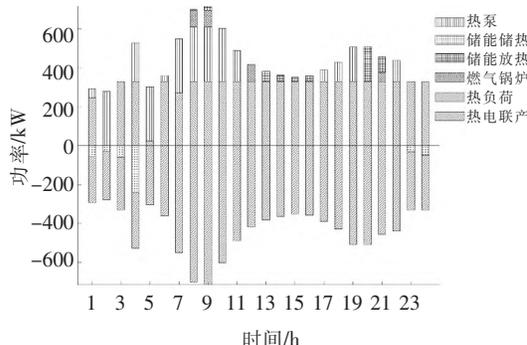
4.3 碳交易基准价格的影响分析

基于场景 4,探究分析碳交易基准价格对园区规划的影响,改变碳交易的基准价格,得到对应的总碳排放量和碳交易费用现值,结果如图 5 所示。由图 5 可以得到,伴随着碳交易基准价格越来越高,总碳排放量在逐步地下降,碳交易费用现值总体来说是先升高后降低的趋势。当碳交易费用较低时,园区出于考虑经济性的目标,更多地选择外购价格较低的电和投建价格

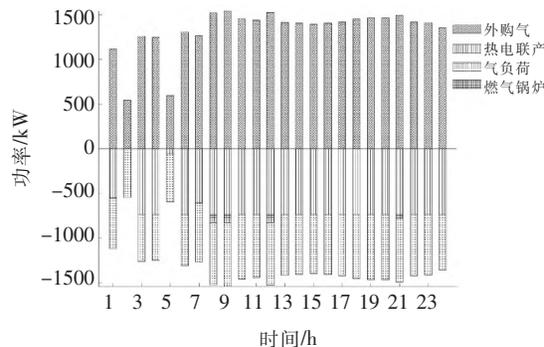
相对较低但碳排放量较多的 HP 设备,由于碳交易价格的升高,碳交易费用对园区规划的影响权重增加,PIES 开始逐步地提高光伏、CHP 这类清洁设备的出力,改变园区的用能方式,从而降低系统的碳排放量。



(a) 过渡季典型日电功率平衡



(b) 过渡季典型日热功率平衡



(c) 过渡季典型日气功率平衡

图 4 规划期末年过渡季典型日的功率平衡

Fig. 4 Supply and demand balance on typical day of transition season at the ending year of planning period

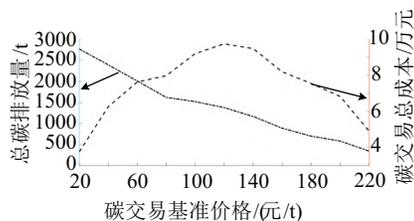


图 5 碳排放量、碳交易总成本、碳交易基准价格的关系
Fig. 5 Relations between carbon emission, total cost of carbon trading and benchmark price of carbon trading

4.4 PIES 规划的投建次数的影响

考虑阶梯碳交易,将 PIES 的投建年份设置为待寻优量,同时将园区的投建次数 K 设置为变量。设置一个 0-1 变量 X_i 用以表示 PIES 在第 i 年是否投建了新设备, X_i 为 0 表示该年没有投建任何设备, X_i 为 1 表示投建了新设备,即 $\sum_{i=1}^N X_i = K$ 。

研究投建次数 K 对全寿命周期费用现值的影响,结果如表 5 所示。根据表 5 可知,随着投建次数的增加,全寿命周期费用现值有所下降。这是因为随着投建次数的增加,待规划设备投建可以更加灵活,超前投建导致的冗余更少,设备的利用率更高,全寿命周期费用现值越少。但是投建次数越多,投建所需的人工费用越多,文中未将这部分费用计入目标函数,所以在园区规划时还应根据实际情况选择合适的投建次数。

表 5 投建次数与全寿命周期费用现值的关系

Tab. 5 Relations between the number of construction phases and the present value of life cycle cost

投建次数 K	1	2	3	4	5
全寿命周期费用现值/万元	3 062.0	3 008.6	2 992.5	2 987.2	2 983.4

4.5 改变“双碳”约束的影响分析

在场景 4 的基础上设置在碳达峰后交易碳排放量每年下降 8% 及以上,同时改变园区碳达峰的年份,其他条件都保持不变。将碳达峰的年份分别设置为园区规划的第 5 年、第 8 年、第 11 年,不同的碳达峰年份的规划结果的如表 6 所示。根据表 6 可知,随着碳达峰年份的提前,园区的 CHP 配置总容量会增加,同时全寿命周期费用增加,总碳排放量减少。这是因为碳达峰年份的提前,对碳排放的约束更高,总碳排放量会有所降低,园区倾向于选择 CHP 这类清洁设备,同时全寿命周期费用也会有所升高。

表 6 不同的碳达峰年份的规划结果

Tab. 6 Planning results for different carbon peak years

碳达峰的年份	第 5 年	第 8 年	第 11 年
CHP 配置总容量/kW	588.8	575.4	558.5
全寿命周期费用/万元	2 995.7	2 992.5	2 991.2
总碳排放量/t	1 759.1	2 072.3	2 354.2

在场景 4 的基础上设置 PIES 规划的第 8 年达峰,同时改变园区在碳达峰后交易碳排放量每年下降的速度,其他条件都保持不变。在第 8 年园区碳达峰后,交易碳排放量分别设置为每年至少下降 4%、8%、12%,碳达峰后交易碳排放量不同下降速度所对应的规划结果如表 7 所示。根据表 7 可知,随着碳达峰后交易碳排放量每年下降比例的增加,对碳排放的约束也会更严格,碳排放量会有所下降,园区也会倾向于选择 CHP 这类清洁设备,但是会导致园区总费用有一定的增加。

表 7 碳达峰后交易碳排放量不同下降速度的规划结果
Tab. 7 Planning results of different decline rates of carbon emissions after reaching carbon peak

交易碳排放量下降速度	4%	8%	12%
CHP 配置总容量/kW	559.9	575.4	586.2
全生命周期费用/万元	2 991.9	2 992.5	2 993.1
总碳排放量/t	2 236.4	2 072.3	1 904.1

5 结束语

为了更好地实现国家“双碳”战略任务,文中提出了考虑阶梯碳交易和最优建设时序的 PIES 多阶段规划,以全寿命周期总费用折算到投资初年的现值最小作为优化目标,求解得到设备投建的最优年份和最优设备容量。通过仿真实验,得到以下结论:

1) 所提出的考虑最优建设时序的 PIES 多阶段规划方法可以使得设备投建更加灵活,设备冗余更少,对园区整体的经济性与低碳性有一定优化效果;

2) 基于阶梯碳交易机制,同时与我国“双碳”战略目标相结合,在模型中考虑碳达峰的年份以及碳达峰后碳排放量逐年下降的约束;研究碳价对碳排放量和碳交易总成本的影响,从而分析碳交易价格对园区用能方式的影响;

3) 考虑投建次数对园区规划的影响,可以发现投建次数越多,全寿命周期成本越少,从而分析得到:随着投建次数增多,设备可以投建地更加灵活,设备的利用率更高;

4) 研究“双碳”约束对园区规划的影响。随着碳达峰年份的提前或碳达峰后交易碳排放量下降速度的增加,对园区碳约束更加严格,配置的 CHP 清洁设备有所增加,总碳排放量下降,同时也会导致全寿命周期费用有所增加。

未来的研究可以深入探讨光伏出力不确定性对规划结果的影响,引入分布鲁棒模型刻画光伏出力不确定性,并构建系统容量规划的分布鲁棒优化模型,降低优化结果的保守性。

参考文献

[1] 中国经济时报社. 国家电网发布碳达峰碳中和行动方案[N]. 中国经济时报, 2021-3-24(4).
China Economic Times. State Grid releases carbon peak carbon neutral action plan[N]. China Economic Times, 2021-03-24(4).

[2] Wang Dan, Liu Liu, Jia Hongjie, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 130-145.

[3] 范宏, 鲁家阳, 陆骁霄. 考虑激励型需求响应的多区域综合能源系统协同规划[J/OL]. 电测与仪表: 1-9[2023-04-21].
Fan Hong, Lu Jiayang, Lu Xiaoxiao. Collaborative planning of multi-region integrated energy system considering incentive demand response[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-9[2023-04-21].

[4] 赵晶晶, 应伦杰, 屈靖雅. 多区域含冷热电联供和储能的综合能源系统运行优化[J]. 电测与仪表, 2022, 59(10): 16-22.

Zhao Jingjing, Ying Lunjie, Qu Jingya. Operation optimization of multi-zone integrated energy system with cold, hot and electric power supply and energy storage [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 16-22.

[5] M. Farrokhifar, Y. Nie, D. Pozo. Energy systems planning: a survey on models for integrated power and natural gas networks coordination [J]. Applied Energy, 2020, 262: 114567.

[6] 邹磊, 唐一铭, 刘祝平, 等. 考虑分期规划与设备替换的园区型综合能源系统最优配置方法[J]. 中国电力, 2021, 54(9): 176-186.
Zou Lei, Tang Yiming, Liu Zhuping, et al. Optimal allocation method of integrated energy system in garden area considering stage planning and equipment replacement[J]. China Electric Power, 2021, 54(9): 176-186.

[7] 赵鑫, 陈彦奇, 杨正军, 等. 双碳目标下园区综合能源系统长期多阶段经济规划[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-12[2023-04-27].
Zhao Xin, Chen Yanqi, Yang Zhengjun, et al. Long-term and multi-stage economic planning of integrated energy system in park under dual carbon target [J/OL]. Journal of Electric Power Systems and Automation: 1-12[2023-04-27].

[8] 李东东, 汪露璐, 王维, 等. 考虑源荷互动的综合能源系统多目标双层规划[J/OL]. 电网技术: 1-15[2023-05-24].
Li Dongdong, Wang Lulu, Wang Wei, et al. Multi-objective two-layer planning of integrated energy system considering the interaction of source and charge [J/OL]. Power Grid Technology: 1-15[2023-05-24].

[9] Dong Yingchao, Zhang Hongli, Ma Ping, et al. A hybrid robust-interval optimization approach for integrated energy systems planning under uncertainties[J]. Energy, 2023, 274.

[10] 黄悦华, 李晨, 陈晨, 等. 计及电-碳价格相关性和氢储能的综合能源低碳经济调度[J/OL]. 电测与仪表: 1-11[2023-04-21].
Huang Yuehua, Li Chen, Chen Chen, et al. Comprehensive energy low-carbon economic scheduling considering the correlation of electric-carbon price and hydrogen storage [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-11[2023-04-21].

[11] Qiu Jing, Dong Zhaoyang, Zhao Junhua, et al. Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 1035-1046.

[12] 王义军, 胡一鸣, 许家豪. 计及风能-碳捕集运行模式下的区域综合能源低碳经济调度[J/OL]. 电测与仪表: 1-11[2023-04-27].
Wang Yijun, Hu Yiming, Xu Jiahao. Regional comprehensive energy low-carbon economic dispatching under wind energy and carbon capture operation mode [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-11[2023-04-27].

[13] 万文轩, 冀亚男, 尹力, 等. 碳交易在综合能源系统规划与运行中的应用及展望[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 39-48.
Wan Wenxuan, Ji Yanan, Yin Li, et al. Carbon trading in the integrated energy system planning and running the application and prospects of [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 39-48.

[14] 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.
Chen Zhi, Hu Zhijian, Weng Changhong, et al. Multi-stage planning of park integrated energy system based on stepped carbon trading mechanism [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 148-155.

[15] 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. Comprehensive energy system planning considering the uncertainty of power-heat transfer load and carbon trading with Rewards and Punishments[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6132-6142.
- [16] 王小飞, 任洪波, 吴琮, 等. 考虑中长期碳减排约束的区域综合能源系统多阶段动态规划[J/OL]. 中国电力; 1-11[2023-05-24].
Wang Xiaofei, Ren Hongbo, Wu Qiong, et al. Multi-stage dynamic planning of regional integrated energy system considering medium and long-term carbon emission reduction constraints [J/OL]. China Electric Power; 1-11[2023-05-24].
- [17] 赵芳正, 王俊江, 陈斌. 考虑绿证-碳配额互认的区域综合能源系统低碳经济调度[J/OL]. 电测与仪表; 1-11[2023-05-24].
Zhao Fangzheng, Wang Junjiang, Chen Bin. Low-carbon economic dispatch of regional integrated energy system considering mutual recognition of green certificate and carbon quota [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation; 1-11[2023-05-24].
- [18] 骆判, 刘泓志, 赵伟杰, 等. 考虑碳-绿证联合交易的跨境综合能源系统协同运行优化[J/OL]. 电力自动化设备; 1-17[2023-05-24].
Luo Zhao, Liu Hongzhi, Zhao Weijie, et al. Collaborative operation optimization of cross-border integrated energy system considering carbon-green certificate joint trading [J/OL]. Electric Power Automation Equipment; 1-17[2023-05-24].
- [19] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33, 3.
Wang Chengshan, Hong Bowen, Guo Li, et al. General Modeling Method for Optimal Scheduling of Cold, Hot and Power Supply Micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33, 3.
- [20] 刘维康, 王丹, 余晓丹, 等. 考虑电气转换储能和可再生能源集成的微能源网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 11-20, 72.
Liu Weikang, Wang Dan, Yu Xiaodan, et al. Multi-objective Planning of micro-energy grid considering electric conversion energy storage and renewable energy integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 11-20, 72.
- [21] 刁涵彬, 李培强, 吕小秀, 等. 考虑多元储能差异性的区域综合能源系统储能协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 151-165.
Diao Hanbin, Li Peiqiang, Lv Xiaoxiu, et al. Energy storage Cooperative Optimal Configuration of regional integrated energy System considering the diversity of multiple energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 151-165.
- [22] 潘险险, 余梦泽, 隋宇, 等. 计及多关联因素的电力行业碳排放权分配方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 35-42.
Pan Xianxian, Yu Mengze, Sui Yu, et al. Carbon emission allocation scheme of electric power industry considering multiple correlation factors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 35-42.
- [23] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 697-707.
Qu Kaiping, Huang Linni, Yu Tao, et al. Decentralized scheduling of multi-region integrated energy system under carbon trading mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 697-707.
- [24] 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.
Cao Yan, Mu Yunfei, Jia Hongjie, et al. Multi-stage planning of integrated energy system in Park considering construction timing [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6815-6828.
- [25] 蒲愿, 程浩忠, 宋毅, 等. 计及多能耦合的区域综合能源系统最优能流计算[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9): 8-15.
Pu Yuan, Cheng Haozhong, Song Yi, et al. Calculation of optimal energy flow in a regional integrated energy system considering multi-energy coupling [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(9): 8-15.
- [26] 万文轩, 冀亚男, 尹力, 等. 碳交易在综合能源系统规划与运行中的应用及展望[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 39-48.
WanWenxuan, Ji Yanan, Yin Li, et al. Application and prospect of carbon trading in the planning and operation of integrated energy system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 39-48.
- [27] 陈昌铭, 张群, 黄亦昕, 等. 考虑最优建设时序和云储能的园区综合能源系统优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 24-32.
Chen Changming, Zhang Qun, Huang Yixin, et al. Optimal allocation method of integrated energy system in Park considering optimal construction timing and cloud energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 24-32.

作者简介:



江训谱(1998—),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统规划与运行。Email:22260159@zju.edu.cn

吕施霖(1990—),男,工程师,研究方向为信息系统优化。Email:392022437@qq.com

王健(1985—),男,工程师,研究方向为综合能源系统建设与运维。Email:465925024@qq.com

张莹颖(1984—),女,高级工程师,研究方向为信息系统优化。Email:28488836@qq.com

包哲静(1974—),女,博士,副教授,研究方向为人工智能在电力系统的应用。Email:zjbao@zju.edu.cn

于森(1984—),男,博士,教授,研究方向为微电网建模与控制、优化。Email:zjuyumiao@zju.edu.cn

收稿日期:2023-04-28;修回日期:2023-10-22
(任美辉 编发)