

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.09.002

含储氢结构的园区综合能源系统优化配置研究

Research on the optimal configuration of integrated energy systems for parks with hydrogen storage devices

钟鹏元¹, 杨晓宏¹, 寇建玉^{2*}

ZHONG Pengyuan¹, YANG Xiaohong¹, KOU Jianyu^{2*}

(1. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司, 呼和浩特 010010)

(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. Inner Mongolia Electric Power Survey & Design Institute Company Limited, Hohhot 010010, China)

摘要:氢能能量密度高,具有良好的储能能力,将储氢应用于园区综合能源系统可有效提高其经济性。为此,针对含储氢结构的园区综合能源系统进行了优化配置研究,首先以储氢替代储电的形式构建了含储氢结构的园区综合能源系统,以系统全寿命周期等年值为容量配置层目标函数,系统年运行成本为优化运行层目标函数,在能量平衡和设备出力等约束条件下,建立了相应的优化配置模型,并采用粒子群算法与CPLEX求解器相结合的双层优化算法进行求解,最后对园区算例的设备容量、运行方式、系统性能和经济性进行分析。分析表明,建立的含储氢结构的园区综合能源系统能实时可靠地满足用户能源需求,且相较于含储电结构的园区综合能源系统,两者性能大致相同,但前者经济效果更明显,进而验证了所提方法的可行性。

关键词:储氢; 园区综合能源系统; 优化配置模型; 双层优化算法; 算例分析; 可再生能源

中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)09-0011-09

Abstract: Since hydrogen energy is of high energy density and good energy storage capacity, its application to an integrated energy system for an industrial park can effectively improve the economy of the system. A study on the optimal configuration of integrated energy systems for parks with hydrogen storage devices is made. Firstly, electricity storage devices for the system are replaced by hydrogen storage devices. Then, the system takes the uniform annual value of its whole-life-cycle cost as the objective function of the capacity configuration layer, and its annual operating cost as the objective function of the optimal operating layer. Under the constraints on energy balance and equipment outputs, the corresponding model of the optimal configuration is established. The bi-level optimization algorithm that integrates particle swarm algorithm and CPLEX solver is used to solve the model. Finally, the equipment capacities, operation mode, system performance and economy of the power system for an industrial park are analyzed. The analysis results shows that the scheme of integrated energy systems for parks with hydrogen storage systems can meet users' real-time energy demand reliably. Comparing the power system with hydrogen storage devices and the one with electricity storage devices, their performances are roughly the same, but the former one is obviously more economic, which proves the practicability of the suggested method.

Keywords: hydrogen storage; integrated energy system for parks; optimal configuration model; bi-level optimization algorithm; case study; renewable energy

0 引言

园区综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是指在园区能源规划和利用过程中,通过对能源各环节进行协调和优化,形成的园区能源一体化控制系统,其具有输配设施投资少、能源利用率高、可再生能源消纳能力强和排污成本低等优点^[1-4]。

园区 IES 的优化配置与系统的高效性、可持续性和经济性密切相关,是园区 IES 设计规划需要解决的关键问题^[5]。

但随着园区能源种类及需求的增加,除系统需求响应、优化算法和可靠性等多种因素外,园区 IES 结构的多样化也是影响系统优化配置的重要因素^[6-12]。为此,毛志斌等^[13]对由风电、光伏和蓄电池组成的 IES 进行了优化配置研究;Luo 等^[14]对含有多

储能装置的 IES 进行了优化配置研究;吴桂联等^[15]对结构计及供能网络的大型园区 IES 进行了优化配置研究;宋倩倩^[16]对生态园区 IES 进行了优化配置研究,其系统结构除计及供能网络外,还引入了电转气设备,将电转氢气和电转甲烷技术应用到园区 IES 中。

由以上研究进展可知,园区 IES 的结构日益复杂,关于复杂结构的园区 IES 优化配置研究也在不断完善,但在目前园区 IES 结构中,涉及储氢的相对较少,大多采用蓄电池储电,关于含储氢结构的园区 IES 优化配置的研究更为少见。氢能能量密度高,具有较好的储能能力,对由可再生能源转化的不稳定、过剩的电能而言,是极为合适的储能介质^[17-20]。因而针对含储氢结构的园区 IES 进行优化配置研究十分有必要。

本文以储氢替代储电的形式构建了含储氢结构的园区 IES,建立了相应的优化配置模型,并采用粒子群算法与 CPLEX 求解器相结合的双层优化算法进行求解,最后通过园区实例分析验证了本文所提方法的可行性。

1 园区综合能源系统模型

1.1 系统结构

本文讨论的含储氢结构的园区 IES 主要由能源输入层、能源转换层、能源存储层和能源需求层 4 部分组成。能源输入层主要由风电和光伏组成,在风电和光伏供电不足时,通过外部电网购电,以满足用户用能需求。能源转换层利用电锅炉供热,并采用电制冷机和吸收式制冷机供冷,其中吸收式制冷机能有效加强热能与冷能之间的耦合。能源存储层除通过储热罐储热外,还将电解槽、储氢罐和氢燃料电池构成储氢系统,以此替代蓄电池,达到间接储电的目的。能源需求层主要包含用户的冷热电负荷需求,系统整体结构如图 1 所示。

1.2 设备模型

1.2.1 光伏发电模型

光伏发电(Photovoltaic, PV)的输出功率主要受辐照度及温度的影响,具体表达式如下^[21]

$$P_{PV,t} = P_{T,t} \frac{E_{N,t}}{E_T} [1 + f(T_{n,t} - T_1)], \quad (1)$$

式中: $P_{PV,t}$ 为 t 时段光伏的实际功率, kW; $P_{T,t}$ 为 t 时段光伏的最大输出功率, kW; $E_{N,t}$ 为 t 时段光伏的实际辐照度, W/m^2 ; E_T 为光伏的标准辐照度, W/m^2 ; f 为光伏的功率温度系数, %/K; $T_{n,t}$ 为 t 时段光伏的实际工作温度, K; T_1 为光伏的标准工作温度, K。

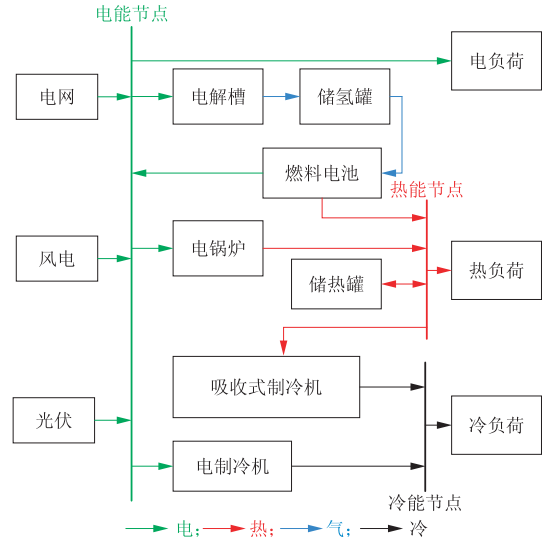


图1 园区综合能源系统结构

Fig. 1 Structure of the integrated energy system for the park

1.2.2 风力发电模型

风力发电(Wind Turbine, WT)输出功率主要受风速的影响,具体表达式如下^[5]

$$P_{WT,t} = \begin{cases} 0 & v_t \leq v_i \text{ 或 } v_t \geq v_o \\ \frac{v_t^3 - v_i^3}{v_e^3 - v_i^3} P_e & v_i < v_t \leq v_e \\ P_e & v_e < v_t < v_o \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $P_{WT,t}$ 为 t 时段风机的实际功率, kW; P_e 为风机的额定功率, kW; v_t 为 t 时段风机的实际风速, m/s; v_e 为风机的额定风速, m/s; v_o 为风机的切出风速, m/s; v_i 为风机的切入风速, m/s。

1.2.3 电解槽模型

电解槽(Electrolyzer, EL)通过电解水的方式制取氢气,其总反应式为 $2H_2O + \text{电能} \rightarrow 2H_2 + O_2$ 。数学模型可表示为

$$L_{EL,t} = \frac{3600P_{EL,t}\lambda_{EL}}{Q_{LHV}}, \quad (3)$$

式中: $L_{EL,t}$ 为 t 时段电解槽产生氢气的速率, mol/h; $P_{EL,t}$ 为 t 时段电解槽的输入电功率, kW; λ_{EL} 为电解槽的电解效率; Q_{LHV} 为氢气的低热值,取 240 kJ/mol。

1.2.4 储氢罐模型

储氢罐(Hydrogen Storage Tank, HST)采用压缩存储的方式存储氢气,通常选用钢瓶作为储氢罐。数学模型为

$$Q_{HST,t} = (1 - \xi_{HST})Q_{HST,(t-1)} + l_{HST,t}^{\text{in}} \Delta t \lambda_{HST}^{\text{in}} - \frac{l_{HST,t}^{\text{out}} \Delta t}{\lambda_{HST}^{\text{out}}}, \quad (4)$$

式中: $Q_{HST,t}$ 为 t 时段储氢罐的储氢状态, kg; $Q_{HST,(t-1)}$ 为 $t-1$ 时段储氢罐的储氢状态, kg; ξ_{HST} 为储氢罐的氢能自损耗率; $l_{HST,t}^{\text{in}}$ 为 t 时段储氢罐的输入速率, kg/h; $l_{HST,t}^{\text{out}}$ 为 t 时段储氢罐的输出速率, kg/h; Δt 为单位调

度时长, h ; $\lambda_{\text{HST}}^{\text{in}}$ 和 $\lambda_{\text{HST}}^{\text{out}}$ 分别为氢能输入和输出效率。另外, 蓄电池(Electric Energy Storage, EES)和储热罐(Thermal Energy Storage, TES)的数学模型与储氢罐类似。

1.2.5 氢燃料电池模型

氢燃料电池(Hydrogen Fuel Cell, HFC)能同时满足用户电能与热能的需求, 其总反应式为 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ 。数学模型可表示为

$$P_{\text{HFC}, t} = \frac{L_{\text{HFC}, t} Q_{\text{LHV}} \lambda_{\text{HFC}}}{3600}, \quad (5)$$

$$P_{\text{HFC}, \text{th}, t} = \frac{P_{\text{HFC}, t} (1 - \lambda_{\text{HFC}} - \lambda_{\text{loss}})}{\lambda_{\text{HFC}}}, \quad (6)$$

式中: $P_{\text{HFC}, t}$ 为 t 时段燃料电池的输出电功率, kW; $P_{\text{HFC}, \text{th}, t}$ 为 t 时段燃料电池的输出热功率, kW; $L_{\text{HFC}, t}$ 为 t 时段燃料电池消耗氢气的流量, mol/h; λ_{HFC} 为燃料电池的发电效率; λ_{loss} 为燃料电池的热损失效率。

1.2.6 电锅炉模型

电锅炉(Electric Boiler, EB)主要应用电阻发热或电磁感应原理为用户提供热能, 其电热转换过程为

$$P_{\text{EB}, \text{th}, t} = \lambda_{\text{EB}} P_{\text{EB}, t}, \quad (7)$$

式中: $P_{\text{EB}, \text{th}, t}$ 为 t 时段电锅炉的产热功率, kW; $P_{\text{EB}, t}$ 为 t 时段电锅炉的输入电功率, kW; λ_{EB} 为电锅炉的电热转换效率。

1.2.7 电制冷机模型

电制冷机(Electric Refrigerator, ER)采用蒸汽压缩式制冷的方式为用户提供冷能, 其数学模型为

$$P_{\text{ER}, \text{c}, t} = P_{\text{ER}, t} \lambda_{\text{ER}}, \quad (8)$$

式中: $P_{\text{ER}, \text{c}, t}$ 为 t 时段电制冷机的输出冷功率, kW; λ_{ER} 为电制冷机的能效系数; $P_{\text{ER}, t}$ 为 t 时段电制冷机的输入电功率, kW。

1.2.8 吸收式制冷机模型

吸收式制冷机(Absorption Refrigerator, AR)应用汽化吸收热量的原理产生制冷的效果, 其数学模型为

$$P_{\text{AR}, \text{c}, t} = P_{\text{AR}, \text{th}, t} \lambda_{\text{AR}}, \quad (9)$$

式中: $P_{\text{AR}, \text{c}, t}$ 为 t 时段吸收式制冷机的输出冷功率, kW; λ_{AR} 为吸收式制冷机的能效系数; $P_{\text{AR}, \text{th}, t}$ 为 t 时段吸收式制冷机的输入热功率, kW。

2 优化配置模型

本文建立了园区 IES 双层优化配置模型, 模型结构如图2所示。上层为容量配置层, 下层为优化运行层, 首先将各设备容量和全寿命周期等年值等参数初始化, 并由上层模型将各设备容量传递给下层模型, 下层模型基于该设备容量, 在能量平衡和

设备出力等约束条件下, 以系统年运行成本最小为目标, 模拟系统优化运行, 得到各设备运行情况, 然后将系统运行成本传递给上层模型, 上层模型基于该运行成本重新修正系统全寿命周期等年值, 并对各设备容量进行重新规划, 再传递给下层模型, 上下2层模型反复迭代多次, 即可得到各设备容量最优配置结果。

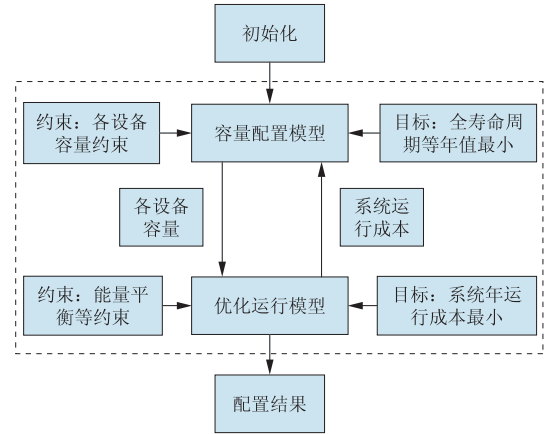


图2 双层优化配置模型结构

Fig. 2 Structure of the bi-level optimization configuration model

2.1 容量配置模型

2.1.1 目标函数

容量配置模型的决策变量为各设备容量, 目标函数为系统全寿命周期等年值, 其中系统全寿命周期指系统由规划设计到报废处理的年限。系统全寿命周期等年值主要包括设备购置成本等年值和系统年运行费用2个部分

$$C_{\text{all}} = C_{\text{ir}} + C_{\text{ob}}, \quad (10)$$

式中: C_{all} 为系统全寿命周期等年值, 元; C_{ir} 为设备购置成本等年值, 元; C_{ob} 为系统年运行费用, 元。

使用寿命低于系统全寿命周期的设备在寿命到期时应给予置换, 因而设备购置成本等年值应包括设备置换成本等年值和设备初始投资等年值2个部分

$$C_{\text{ir}} = \sum_{j=1}^N [(C_{\text{inv}}^j S_j + C_{\text{re}}^j S_j) \frac{r(1+r)^{n_s}}{(1+r)^{n_s} - 1}], \quad (11)$$

式中: N 为设备种类总数; r 为贴现率, %; n_s 为系统全寿命周期, 年; S_j 为 j 设备的容量, kW; C_{inv}^j 为 j 设备单位容量成本, 元; C_{re}^j 为 j 设备单位容量替换成本, 元。

2.1.2 约束条件

$$S_j^{\min} \leq S_j \leq S_j^{\max}, \quad (12)$$

式中: $S_j^{\min}$ 为 j 设备的容量下限, kW; $S_j^{\max}$ 为 j 设备的容量上限, kW。

2.2 优化运行模型

2.2.1 目标函数

优化运行模型的决策变量为各设备的输入、输出功率和系统购电功率,目标函数为系统年运行费用,该费用由系统年购电费用和设备年运维费用2个部分组成,本文假定在系统全寿命周期内系统年购电费用和设备年运维费用不变

$$C_{ob} = C_{om} + C_{bs}, \quad (13)$$

式中: C_{om} 为设备年运维费用,元; C_{bs} 为系统年购电费用,元。

设备年运维费用指系统中各设备在全年各时间段内的运维费用总和,表达式为

$$C_{om} = \sum_{t=1}^{8760/\Delta t} \sum_{j=1}^N (P_{j,t} C_{om}^j \Delta t), \quad (14)$$

式中:8760为年利用小时数; $P_{j,t}$ 为 j 设备在 t 时段的输出功率,kW; C_{om}^j 为 j 设备单位供能运维费用,元; Δt 为单位调度时长,h。

$$C_{bs} = \sum_{t=1}^{8760/\Delta t} (P_{g,t} C_{bs}^t \Delta t), \quad (15)$$

式中: $P_{g,t}$ 为系统 t 时段从电网购电的功率,kW; C_{bs}^t 为 t 时段的电价,元/(kW·h)。

2.2.2 约束条件

2.2.2.1 能量平衡约束

(1)电平衡约束

$$P_{g,t} + P_{PV,t} + P_{WT,t} + P_{HFC,t} \geq P_{e,t} + P_{EL,t} + P_{EB,t} + P_{ER,t}, \quad (16)$$

式中: $P_{e,t}$ 为用户端 t 时段的电功率,kW。

(2)热平衡约束

$$P_{EB,th,t} + P_{HFC,th,t} + P_{TES,t}^{out} \geq P_{TES,t}^{in} + P_{AR,th,t} + P_{h,t}, \quad (17)$$

式中: $P_{h,t}$ 为用户端 t 时段的热功率,kW; $P_{TES,t}^{out}$ 为 t 时段储热罐的输出热功率,kW; $P_{TES,t}^{in}$ 为 t 时段储热罐的输入热功率,kW。

(3)冷平衡约束

$$P_{AR,c,t} + P_{ER,c,t} \geq P_{l,t}, \quad (18)$$

式中: $P_{l,t}$ 为用户端 t 时段的冷功率,kW。

(4)气平衡约束

$$L_{EL,t} \geq \alpha l_{HST,t}^{in}, \quad (19)$$

$$\alpha l_{HST,t}^{out} \geq L_{HFC,t}, \quad (20)$$

式中: α 为转换系数, $\alpha=500 \text{ mol/kg}$ 。

2.2.2.2 设备出力约束

$$Q_{HST,1} = Q_{HST,end}, \quad (21)$$

$$Q_{HST}^{min} \leq Q_{HST,t} \leq Q_{HST}^{max}, \quad (22)$$

$$l_{HST}^{min} \leq l_{HST,t}^{in} \leq l_{HST}^{max}, \quad (23)$$

$$l_{HST}^{min} \leq l_{HST,t}^{out} \leq l_{HST}^{max}, \quad (24)$$

$$0 \leq P_{EB,t} \leq S_{EB}, \quad (25)$$

$$0 \leq P_{EB,t+1} - P_{EB,t} \leq \Delta P_{EB}^{up}, \quad (26)$$

$$0 \leq P_{EB,t} - P_{EB,t+1} \leq \Delta P_{EB}^{down}, \quad (27)$$

$$0 \leq P_{ER,c,t} \leq S_{ER}, \quad (28)$$

$$0 \leq P_{AR,c,t} \leq S_{AR}, \quad (29)$$

$$0 \leq P_{EL,t} \leq S_{EL}, \quad (30)$$

$$0 \leq P_{HFC,t} \leq S_{HFC}, \quad (31)$$

式中: $Q_{HST,1}$ 和 $Q_{HST,end}$ 分别为一个调度周期内储氢罐的初始状态和结束状态,kg; Q_{HST}^{min} , Q_{HST}^{max} 分别为HST的储氢下限和储氢上限,kg; l_{HST}^{min} , l_{HST}^{max} 分别为充放功率下限和充放功率上限,kg/h; ΔP_{EB}^{up} , ΔP_{EB}^{down} 分别为EB的上、下坡率上限,kW; S_{ER} 为电制冷机的容量; S_{AR} 为吸收式制冷机的容量。另外,TES和EES的出力约束条件与HST类似。

2.2.2.3 与电网交互功率约束

$$0 \leq P_{g,t} \leq P_g^{max}, \quad (32)$$

式中: P_g^{max} 为系统最大购电功率,kW。

2.2.2.4 系统性能约束

(1)综合能源自给率约束。综合能源自给率 η_{self} 指可再生能源设备产生并输入到系统中的能量与输入到系统中总能量的比值,其反映了系统的可持续性。

$$P_{self} = \sum_{t=1}^{8760/\Delta t} (P_{e,t} + P_{EL,t} + P_{EB,t} + P_{ER,t} - P_{g,t} - P_{HFC,t}) \Delta t, \quad (33)$$

$$P_{all} = \sum_{t=1}^{8760/\Delta t} (P_{e,t} + P_{EL,t} + P_{EB,t} + P_{ER,t} - P_{HFC,t}) \Delta t, \quad (34)$$

$$\eta_{self} = P_{self}/P_{all}, \quad (35)$$

$$\eta_{self} \geq \eta_{self}^{min}, \quad (36)$$

式中: P_{self} 为可再生能源设备产生并输入到系统中的能量,kW·h; P_{all} 为输入到系统中的总能量,kW·h; η_{self}^{min} 为综合能源自给率下限,%。

(2)综合能源利用率约束。综合能源利用率 η_{use} 指用户能源需求总量与输入到系统中能源总量的比值,其反映了系统的高效性^[22]。

$$P_{use} = \sum_{t=1}^{8760/\Delta t} (P_{e,t} + P_{h,t} + P_{l,t}) \Delta t, \quad (37)$$

$$\eta_{use} = P_{use}/P_{all}, \quad (38)$$

$$\eta_{use} \geq \eta_{use}^{min}, \quad (39)$$

式中: P_{use} 为用户能源需求总量,kW·h; η_{use}^{min} 为综合能源利用率下限,%。

(3)弃风弃光率约束

$$P_{aba} = \sum_{t=1}^{8760/\Delta t} (P_{g,t} + P_{PV,t} + P_{WT,t} + P_{HFC,t} - P_{EL,t} - P_{EB,t} - P_{ER,t} - P_{e,t}), \quad (40)$$

$$P_{pw} = \sum_{t=1}^{8760/\Delta t} (P_{WT,t} + P_{PV,t}) \Delta t, \quad (41)$$

$$\eta_{aba} = P_{abg}/P_{pw}, \quad (42)$$

$$\eta_{aba} \leq \eta_{aba}^{\max}, \quad (43)$$

式中: P_{aba} 为光伏和风电产生的但未被利用的能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; P_{pw} 为光伏和风电产生的总能量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; η_{aba} 为弃风弃光率,%; $\eta_{aba}^{\max}$ 为弃风弃光率上限,%。

3 求解方法

基于建立的双层优化配置模型,本文采用相应的双层优化算法对模型进行求解。在MATLAB环境下借助粒子群算法对上层设备容量配置模型进行求解。粒子群算法中每个粒子代表一组设备容量,通过粒子的形式将各设备容量传递给优化运行层,同时在优化迭代的过程中需不断更新粒子的速度和位置,也即更新设备容量,进而得到最优设备容量。粒子速度及位置的更新为

$$v(d+1) = wv(d) + c_a r_a(d) [p(d) - x(d)] + c_b r_b(d) [g(d) - x(d)], \quad (44)$$

$$x(d+1) = x(d) + v(d+1), \quad (45)$$

$$w = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min})d}{D}, \quad (46)$$

式中: $v(d+1)$ 和 $v(d)$ 分别为粒子更新的速度和原来的速度; $x(d+1)$ 和 $x(d)$ 分别为粒子更新的位置和原来的位置; w 为动态惯性权重; $w_{\max}$ 为最大惯性权重,本文取0.9; $w_{\min}$ 为最小惯性权重,本文取0.4; c_a 和 c_b 均为学习因子,本文均取1.5; $r_a(d)$ 和 $r_b(d)$ 均为 $[0, 1]$ 内的随机数; $p(d)$ 为当前个体最优值所在位置; $g(d)$ 为当前全局最优值所在位置; d 为当前迭代次数; D 为最大迭代次数。

下层优化运行模型的求解为线性规划问题,基于上层模型所提供的各设备容量,以YALMIP工具箱为辅助,通过调用CPLEX求解器求解下层模型,得到系统最优运行情况,并将运行成本传递给上层模型,上下两层模型相互迭代多次,即可得到设备容量最优配置结果。双层优化算法的具体算法流程如图3所示。

4 算例分析

本文选取北方某园区为算例进行优化配置,通过对算例进行分析,进而验证本文所提方法的可行性。

4.1 算例基本情况

该园区采用图1所示系统供能结构。综合能源自给率和综合能源利用率下限均为80%,弃风弃光率上限为8%。设备效率的波动对系统年运行成本

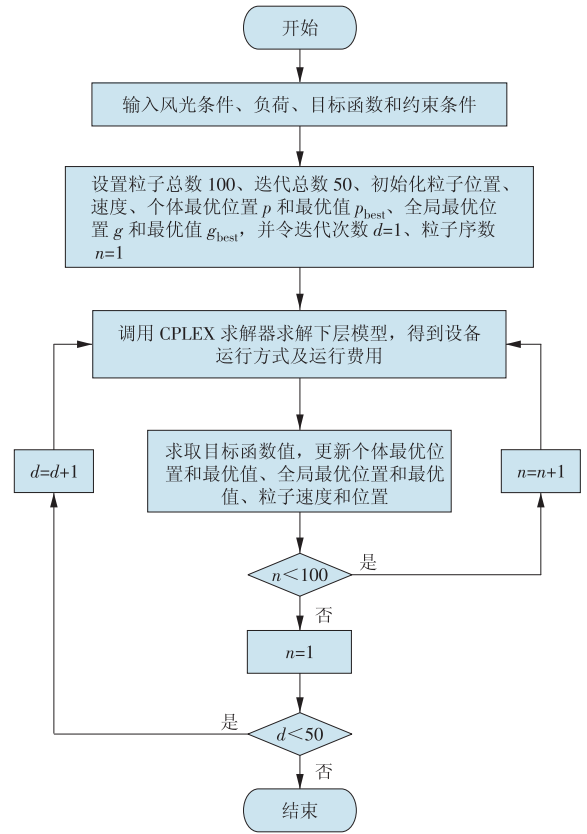


图3 算法流程

Fig. 3 Procedure of the algorithm

影响较小^[23],因此本文将设备效率视为常数。设备的参数均源于当前市场调研,其中储能设备参数见表1,其他设备参数见表2。分时电价见表3,单位调度时长取1h,电锅炉上下爬坡率上限均取电锅炉容量的12%,最大购电功率为100 MW,储热容量上限为180 MW。系统全寿命周期为20年,除储热罐和蓄电池使用寿命为10年外,其余设备均为20年,贴现率取6%。分别在春秋季、夏季和冬季各选取一典型日,以各典型日情况代表当季情况,典型日负荷情况如图4所示。

4.2 算例结果及分析

为对算例进行充分分析,本文在算例基础上增设3个场景,进而对多场景下的园区IES进行对比分析,各场景设置如下。

场景1:算例。

场景2:将场景1中由电解槽、储氢罐和燃料电池组成的储氢系统替换为蓄电池,其余条件不变,构成含储电结构的园区IES。

场景3:将场景1中分时电价改为固定电价,电价取0.5025元/(kW·h),其余条件不变。

场景4:将场景2中分时电价同样改为固定电价,电价也取0.5025元/(kW·h),其余条件不变。

表 1 储能设备参数

Table 1 Parameters of energy storage equipment

参数	HST	TES	EES
单位购置成本/元	300	320	1 800
单位替换成本/元	280	280	1 500
单位运维成本/元	0.002 0	0.003 4	0.004 0
输入效率	0.97	0.91	0.95
输出效率	0.97	0.91	0.95
功率下限	0.00	0.00	0.00
功率上限	$0.20 S_{\text{HST}}$	$0.20 S_{\text{TES}}$	$0.20 S_{\text{EES}}$
储能上限	$0.95 S_{\text{HST}}$	$1.00 S_{\text{TES}}$	$1.00 S_{\text{EES}}$
储能下限	$0.20 S_{\text{HST}}$	$0.10 S_{\text{TES}}$	$0.10 S_{\text{EES}}$
自损耗率	0.010	0.010	0.001

注:表中 S_{HST} 为储氢罐的容量; S_{TES} 为储热罐的容量; S_{EES} 为蓄电池的容量。

表 2 其他设备参数

Table 2 Parameters of other equipment

设备	单位购置成本/元	单位替换成本/元	单位运维成本/元	效率/%
PV	4 000	3 500	0.010	—
WT	6 000	5 500	0.006	—
EL	6 000	4 800	0.020	0.60
HFC	2 500	2 000	0.022	0.60/0.25
EB	750	600	0.013	0.91
ER	540	420	0.015	3.00
AR	750	700	0.014	1.20

表 3 分时电价

Table 3 Time-of-use price of electricity

时段	时间划分	电价/[元·(kW·h) ⁻¹]
谷时段	00:00—04:00	0.487 4
	10:00—15:00	
平时段	04:00—10:00	0.502 5
	15:00—17:00	
	21:00—24:00	
高峰时段	17:00—21:00	0.743 7

4.2.1 设备容量及系统运行分析

经优化配置后,各场景对应各设备容量配置情况见表4,场景1的园区IES春秋季节典型日系统运行情况如图5所示。

通过比较场景1与场景2的设备容量可知,场景1中风电容量较小,但配置了较大的光伏容量以弥补风机发电量的不足;2个场景中储热罐容量配置基本相同,但场景1需配置较大容量的电锅炉,同时燃料电池也提供一部分热能,进而满足其热能需求;两场景均未配置吸收式制冷机,表明电制冷机在两系统中制冷效果更明显。场景3与场景4的容量对比情况类似于场景1和场景2的对比情况。以上2组容量对比情况表明,相较于含储电结构的园

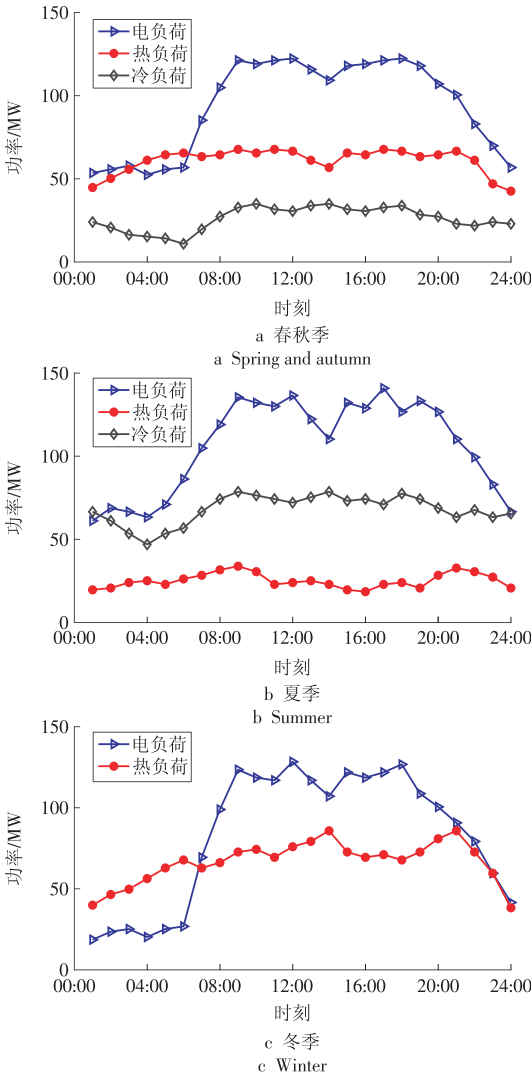


图 4 四季典型日负荷情况

Fig. 4 System loads in typical days in four seasons

表 4 设备容量配置情况

Table 4 Capacity configuration of the equipment

设备	单位	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
PV	MW	89.1	59.7	91.5	59.7
WT	MW	372.0	388.0	368.0	388.0
EL	MW	4.9	—	4.1	—
HFC	MW	15.6	—	16.0	—
HST	kg	3 898.0	—	4 001.0	—
EES	MW·h	—	67.8	—	67.8
TES	MW·h	179.9	180.0	180.0	180.0
EB	MW	159.2	127.4	178.6	127.4
ER	MW	78.6	78.6	78.6	78.6
AR	MW	0.0	0.0	0.0	0.0

区IES,将储氢系统应用于园区IES中将改变其各设备容量,进而满足园区能源需求。

由图5a可知,由于春秋季节风光条件较好,光伏和风电发电量充足,出于运行经济性考虑,系统在春秋季节典型日内主要依靠风电和光伏供电,并未通

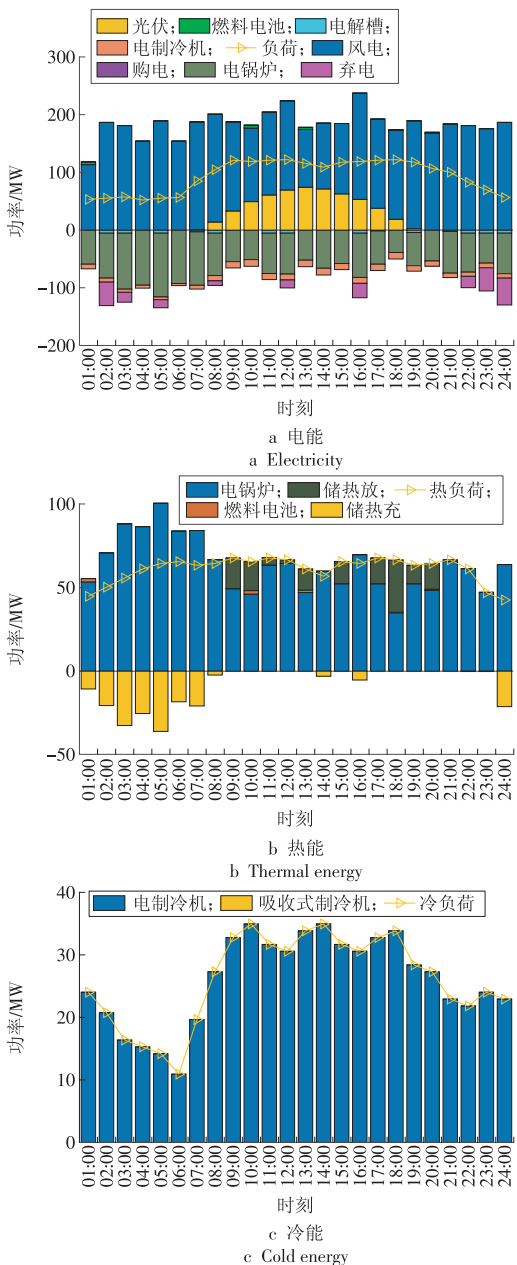


图 5 春秋季典型日系统运行情况

Fig. 5 Operation status of the system in a typical day in spring and autumn

过电网购置电能。在风电和光伏供电不足时,储氢罐释放氢能用于燃料电池放电,以填补电能缺口。在电能需求侧,除大部分电能用于满足园区电负荷外,系统内部电锅炉耗电量相对较大,其次是电制冷机,多余电能通过电解槽电解水制氢存储在储氢罐内。另外,在 22:00—05:00 间,电负荷较小,有少量弃电。

由图 5b 可知,春秋季典型日内,电锅炉 00:00—07:00 内产热较多,除满足用户逐步攀升的热负荷需求外,多余热能由储热罐存储,在 09:00—20:00 释放,补充系统在该时间段内缺额的热能,燃料电池在产生电能的同时,也产生少量热能,进一步填

补系统的热能缺口。由图 5c 可知,在系统春秋季典型日内,冷能只由电制冷机供应。

综合设备容量和系统运行方式分析可知,本文建立的含储氢结构的园区 IES 能充分利用储能设备削峰填谷的功能,并实时有效地满足用户用能需求。

4. 2. 2 系统性能分析

本文对系统性能分析主要考虑系统高效性、可持续性和弃风弃光率 3 方面,其中系统高效性和可持续性分别通过综合能源利用率和综合能源自给率反映。经优化配置后,各场景对应系统性能情况见表 5。

表 5 系统性能情况

Table 5 Performance of the system

%

场景	综合能源利用率	综合能源自给率	弃风弃光率
1	105.85	92.51	8.00
2	106.43	92.89	7.99
3	106.21	92.35	7.91
4	106.46	92.92	7.99

由于各场景中均配置了一定容量的电制冷机,其能效系数为 3,而其运行时从空气中吸收的能量并未计入系统输入能量中,且其他设备效率均较高,使得各场景的系统综合能源利用率均大于 100%,高于综合能源利用率下限 80%。通过场景 1 与场景 2 间的比较可知,两场景的综合能源利用率大致相等,表明两系统具有同等的高效性;另外,两系统的综合能源自给率均为 92% 左右,高于综合能源自给率下限 80%,说明两系统可持续性高且大致相同;两系统弃风弃光率均维持在了约束上限 8% 左右,验证了优化配置过程种对弃风弃光率约束的必要性,同时也表明两系统弃风弃光率较低且大致等同。场景 3 和场景 4 的系统性能对比情况与场景 1 和场景 2 的对比情况类似。总的来说,在系统综合能源自给率和综合能源利用率均高于 80%,且弃风弃光率低于 8% 的约束条件下,本文建立的含储氢结构的园区 IES 与含储电结构的园区 IES 性能均较高且大致等同。

4. 2. 3 系统经济性分析

本文主要通过对比分析系统各项成本情况进而分析系统的经济性。经优化配置后,各场景的各项成本情况如图 6 所示。

由图 6a 可知,相较于场景 2,场景 1 的系统年运行成本高出了 8.84%,其主要原因是购电费用的增加,同时设备种类的增加,即多出了燃料电池和电解槽的运维成本,也使得系统年运行成本较高;但

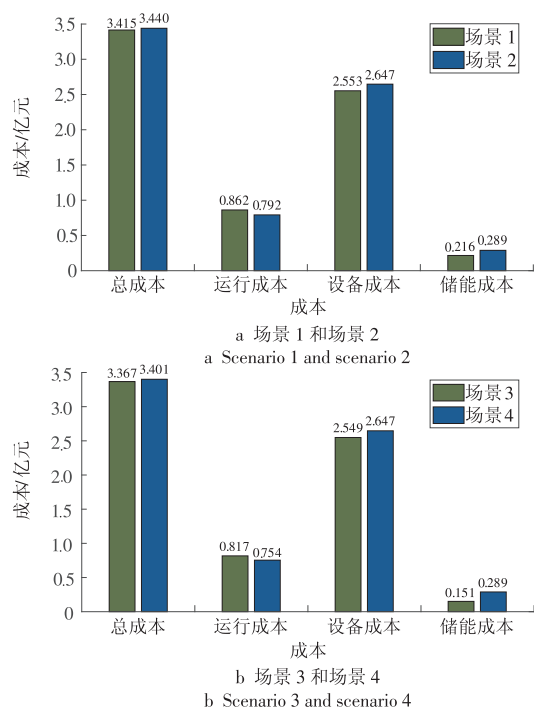


图 6 各场景的各项成本情况

Fig. 6 Various costs under different scenarios

年设备购置成本降低了 3.55%，尤其储能设备成本降低了 25.26%，其中含储氢结构的园区 IES 储能设备成本为电解槽、储氢罐、燃料电池和储热罐的设备总成本，储能设备成本下降的原因在于将储氢应用于园区 IES 中降低了储能设备的配置容量，这在一定程度上解决了由电解槽和燃料电池效率低、价格高带来的成本问题，也进一步体现了储氢在园区 IES 中良好的经济性和适用性；系统年总成本也即系统全生命周期等年值降低了约 250 万元，表明系统年设备购置成本的降低弥补了其运行成本较高的经济缺陷。由图 6b 可知，相较于场景 4，场景 3 的各项成本变化趋势与场景 1 相较于场景 2 类似。总体而言，相较于含储电结构的园区 IES，本文建立的含储氢结构的园区 IES 虽运行成本较高，但其设备成本较低，尤其是储能设备成本较低，这使得系统整体经济效果更明显。

5 结论

本文建立了含储氢结构的园区 IES 优化配置模型，通过双层优化算法对模型进行求解，并通过园区实例分析，验证了本文所提方法的可行性，同时得出以下结论。

(1) 本文建立的含储氢结构的园区 IES 能充分利用储能设备削峰填谷的功能，并实时有效地满足用户用能需求，保证供能网络的可靠性。

(2) 在系统综合能源自给率和综合能源利用率

均高于 80%，且弃风弃光率低于 8% 的前提下，本文建立的含储氢结构的园区 IES 与含储电结构的园区 IES 性能均较高且大致等同，这为系统高效且可持续性运行提供了保障。

(3) 相较于含储电结构的园区 IES，本文建立的含储氢结构的园区 IES 虽运行成本较高，但其设备购置成本较低，尤其是储能设备成本较低，使得系统整体经济效果更明显，这有助于含储氢结构的园区 IES 的进一步推广。

本文对含储氢结构的园区 IES 与含储电结构的园区 IES 进行了对比分析，下一阶段可研究同时含有储氢和储电结构的园区 IES 优化配置模型，并与含储氢结构的园区 IES 进行对比，进而对两者有进一步的认识。

参考文献：

- [1] HONG B, CHEN J, ZHANG W, et al. Integrated energy system planning at modular regional-user level based on a two-layer bus structure [J]. CSEE Journal of Power and Energy System, 2018, 4(2): 188-196.
- [2] 郝然, 艾芊, 姜子卿. 区域综合能源系统多主体非完全信息下的双层博弈策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 194-201.
- HAO Ran, AI Qian, JIANG Ziqing. Bi-level game strategy for multi-agent with incomplete information in regional integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 194-201.
- [3] WANG Y, HUANG Y, WANG Y, et al. Optimal scheduling of the RIES considering time-based demand response programs with energy price [J]. Energy, 2018, 164 (1): 773-793.
- [4] 于雪风. 含储氢及储热的园区综合能源系统优化配置与运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [5] 王玉东. 基于双层优化的区域综合能源系统规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [6] 边晓燕, 史越奇, 裴传逊, 等. 计及经济性和可靠性因素的区域综合能源系统双层协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4529-4543.
- BIAN Xiaoyan, SHI Yueqi, PEI Chuanxun, et al. Bi-level collaborative configuration optimization of ICES considering economy and reliability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4529-4543.
- [7] 张海静, 杨雅琦, 赵昕, 等. 计及需求响应的区域综合能源系统双层优化调度策略[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 141-150.
- ZHANG Haijing, YANG Yongqi, ZHAO Xin, et al. Two-level optimal dispatching strategy for regional integrated energy system considering demand response [J]. Electric Power,

- 2021, 54(4): 141-150.
- [8] 章文浦, 王强钢. 基于遗传算法的分布式多能互补能源系统优化配置[J]. 华电技术, 2021, 43(1): 52-58.
- ZHANG Wenpu, WANG Qianggang. Optimal allocation of multi-energy complementary distributed energy system based on genetic algorithm [J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 52-58.
- [9] 吴福保, 史如新, 桑丙玉, 等. 考虑能量成本和污染排放的综合能源系统优化配置[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 10-17.
- WU Fubao, SHI Ruxin, SANG Bingyu, et al. Optimization of integrated energy system considering energy cost and pollution emission [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 10-17.
- [10] 仇知, 王蓓蓓, 贾树俊, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 176-185.
- QIU Zhi, WANG Beibei, JIA Shujun, et al. Bi-level optimal configuration planning model of regional integrated energy system considering uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 176-185.
- [11] 赵鑫, 郑文禹, 侯智华, 等. 基于粒子群优化算法的多能互补系统经济调度研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 14-20.
- ZHAO Xin, ZHENG Wenyu, HOU Zhihua, et al. Research on economic dispatch of multi-energy complementary system based on particle swarm optimization [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 14-20.
- [12] 潘华, 肖雨涵, 梁作放, 等. 基于复杂网络的电-气-热综合能源系统健壮性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 104-112.
- PAN Hua, XIAO Yuhuan, LIANG Zuofang, et al. Robustness analysis of electricity-gas-heat integrated energy system based on complex network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 104-112.
- [13] 毛志斌, 陈琦, 王威力, 等. 基于果蝇算法的综合能源系统容量优化配置研究[J]. 内江科技, 2021, 42(5): 13-14.
- [14] LUO F, SHAO J, JIAO Z, et al. Research on optimal allocation strategy of multiple energy storage in regional integrated energy system based on operation benefit increment [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 125: 106376.
- [15] 吴桂联, 林婷婷, 郑洁云, 等. 大型园区综合能源系统能源站优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 116-122.
- WU Guilian, LIN Tingting, ZHENG Jieyun, et al. Optimal allocation of energy stations in large-scale park integrated energy system [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(9): 116-122.
- [16] 宋倩倩. 生态园区综合能源利用双层多目标优化配置研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
- [17] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书 (2019版)[R]. 2019.
- [18] 任大伟, 侯金鸣, 肖晋宇, 等. 能源电力清洁化转型中的储能关键技术探讨[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2751-2759.
- REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Exploration of key technologies for energy storage in the cleansing transformation of energy and power [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2751-2759.
- [19] 王长君, 刘硕, 丁薛峰. 相变储能技术在清洁供暖中的应用研究[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 91-96.
- WANG Changjun, LIU Shuo, DING Xuefeng. The study on application of phase change energy storage technology in clean heating [J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 91-96.
- [20] 蒋文坤, 韩颖慧, 薛智文, 等. 多能互补能源系统中储能原理及其应用[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(1): 63-71.
- JIANG Wenkun, HAN Yinghui, XUE Zhiwen, et al. Energy storage technologies and their applications in multi-energy complementary power system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(1): 63-71.
- [21] 高章鹏. 面向园区微网的综合能源系统优化配置与运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [22] 林晓明, 张勇军, 陈伯达, 等. 计及多评价指标的园区能源互联网双层优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(20): 8-15, 30.
- LIN Xiaoming, ZHANG Yongjun, CHEN Boda, et al. Bi-level optimal configuration of park energy internet considering multiple evaluation indicators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 8-15, 30.
- [23] HOLJEVAC N, CAPUDER T, ZHANG N, et al. Corrective receding horizon scheduling of flexible distributed multi-energy micro-grids [J]. Applied Energy, 2017, 207: 176-194.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

钟鹏元(1995), 男, 在读硕士研究生, 从事综合能源系统方面的研究, z4280211312@163.com;

杨晓宏(1971), 女, 教授, 博士生导师, 硕士, 从事太阳能热发电能源高效利用及储能等方面的研究及教学, yxh1109@163.com;

寇建玉*(1971), 女, 正高级工程师, 从事综合能源系统等方面的设计规划与咨询工作, kjianyu2011@126.com.

*为通信作者。