

# 园区综合能源系统日前多目标优化调度

胡伟<sup>1</sup>, 杨梓俊<sup>1</sup>, 王瑾然<sup>2</sup>, 卫志农<sup>2</sup>, 荆江平<sup>2</sup>, 马洲俊<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;  
3. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:**园区综合能源系统是目前中国综合能源示范项目重要的物质载体。园区综合能源系统优化调度往往兼顾多个量纲与数量级不同的目标。基于同里综合能源服务中心的实际工程建设,建立了考虑综合能源总体能效、综合能源成本和可再生能源协同消纳为目标的园区综合能源多目标优化调度模型。同时,利用标么化后的目标函数固定步长求取 Pareto 平面的解集,插值拟合绘制 Pareto 平面后使用近理想解排序法选取理想解。最后,以同里园区为案例对上述模型进行了仿真验证,在 Pareto 平面上根据实际工程要求选取了理想解作为最优解,分析了园区各设备的运行,为园区综合能源系统的未来建设和发展提供理论与技术支持。

**关键词:**园区综合能源系统;多目标优化;Pareto 平面;日前优化调度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.002 中图分类号:TM 721 文章编号:1673-9140(2021)01-0013-08

## Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system in the industry park

HU Wei<sup>1</sup>, YANG Zijun<sup>1</sup>, WANG Jinran<sup>2</sup>, WEI Zhinong<sup>2</sup>, JING Jiangping<sup>2</sup>, MA Zhoujun<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;  
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. Nanjing Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** The integrated energy system in the industry park is an important material carrier for Chinese comprehensive energy demonstration projects. Its optimal scheduling often takes into account multiple goals with different dimensions and orders of magnitude. Under the background, based on the actual engineering construction of Tongli comprehensive energy service center, a multi-objective optimal scheduling model of integrated energy in the industry park with the goal of considering the overall energy efficiency of integrated energy, integrated energy costs, and collaborative consumption of renewable energy is established. At the same time, the solution set of the Pareto plane is obtained by using the fixed step length of the objective function after unitization. The ideal solution is selected by the near ideal solution sorting method after the Pareto plane is drawn by interpolation fitting. Finally, the Tongli Park is selected as a case to verify the above model. On the Pareto plane, a ideal solution is chosen as the optimal according to the actual engineering requirement. The operation of the various equipment in the industry park is analyzed to provide theoretical and technical support for the future construction and development of the integrated energy system in the industry park.

**Key words:** integrated energy system in the industry park; multi-objective optimization; pareto plane; day-ahead optimal scheduling

收稿日期:2019-08-10;修回日期:2019-09-02

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019024);国家自然科学基金(51877071)

通信作者:卫志农(1962-),男,教授,主要从事电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化研究;E-mail:wzn-nj@263.net

区域综合能源系统作为综合能源服务重要的物质基础,实现了冷、热、电、气等多种能源之间的相互转换与互补互济<sup>[1]</sup>。目前,中国各省市都在加快推进多能互补集成优化示范工程和综合能源系统示范工程的建设,推动中国能源利用模式的转型,让能源发展朝着清洁高效和安全可持续的方向前进<sup>[2]</sup>。

园区综合能源系统作为典型的微型综合能源系统,是目前综合能源系统重要的表现形式<sup>[3]</sup>。已于2018年9月26日正式投入运行的同里综合能源服务中心(以下简称同里园区)位于苏州市同里古镇,它是国网江苏省电力有限公司与苏州市政府共建的综合能源示范园区,旨在展示未来区域能源供给与消费形态的创新实践,构建清洁低碳、安全高效的新型能源体系,引领城市能源变革发展。同里园区具有冷、热和电等多种能源类型,同时具备多元化的能源存储、转换和分配设备,能够提供丰富、准确的综合能源数据信息。

根据建设规划,同里园区优化运行包括综合能源总体能效最优、综合能源成本最低和可再生能源协同消纳量最大3个目标。各目标之间相辅相成、相互制约,使得园区的优化运行构成了一个典型的多目标优化决策问题。研究如何协调3个优化目标,最终实现园区的最优运行是至关重要的。

目前,针对园区综合能源系统优化运行的相关研究,文献[4]考虑可再生能源消纳、能耗和碳排放等指标,建立多能园区的优化配置模型,并分析其优化运行策略;文献[5]提出一种多能源多层次的调度层级划分模型,以对园区内的分布式设备进行管理;文献[6]基于改进的遗传算法,提出工业园区多能系统的能量管理模式。而对于园区综合能源系统的多目标优化研究,文献[7]建立以年总费用、年污染排放和年能耗为优化目标的园区微能网多目标优化模型;文献[8]考虑园区总体运行成本最低和系统排放污染物最低2个目标,依托天津中新生态城智能电网创新示范区,建立园区多目标优化模型;文献[9]以系统总收益最大化和能源利用率最大化为优化目标,构建微能源网多目标优化调度模型;文献[10]则将最低运行成本、环境成本和能源转化成本3个目标考虑到园区的运行优化中。

然而,上述针对综合能源园区的多目标优化研

究大多围绕经济成本、环境污染等目标,尚未将园区的可再生能源消纳和综合能源的能效纳入研究范围。因此,该文兼顾同里园区当前经济运行、协同消纳与提高能效3大战略目标,以同里园区实际工程框架为依据,建立园区综合能源系统多目标优化模型。同时,利用标么化后的目标函数遍历求取Pareto平面的解集,并插值绘制Pareto平面。最后,以同里园区为案例对模型进行验证,在Pareto平面上根据实际工程要求选取折中解作为最优解,分析园区各设备的运行,为同里的未来建设和发展提供理论支撑。

## 1 系统框架与模型假设

### 1.1 同里园区综合能源系统框架

同里园区首期规划面积3.5万平方米,共有两回10 kV进线(苏桐线与塔旺线),其冷、热和电的能源流动示意如图1所示。

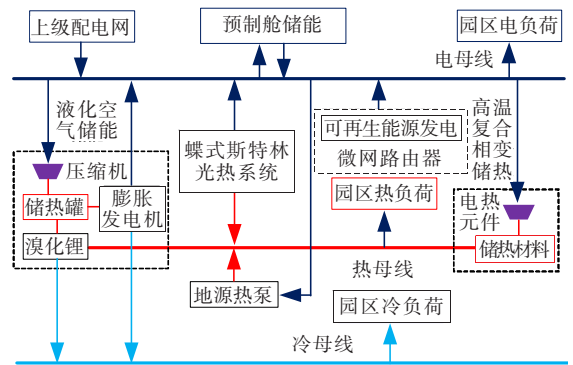


图1 同里园区能源流动示意

Figure 1 Energy flow in Tongli Park

同里园区目前已投入使用的核心能源设备包括液化空气储能系统、蝶式斯特林光热系统、地源热泵、高温复合相变储热系统和预制舱储能5种,同时园区的微网路由器内部还装配有小型的风电装置,为园区提供多元化的能源供给。

### 1.2 模型假设

考虑到研究目的与实际工程的复杂度,该文在建立园区能量流动和关键设备的数学模型时,基于冷、热和电功率的流动方向与设备物理原理进行了合理的简化和抽象。同时,该文不再考虑园区内同类负荷的区别,如将园区楼宇电负荷和“三合一”电子公路电负荷等统一视为园区电负荷。

同时,相比于可再生能源系统,园区负荷的随机性更弱。因此该文只考虑可再生能源的随机性,忽略园区冷、热、电负荷的随机性。

### 1.3 同里园区关键设备建模

#### 1.3.1 液化空气储能系统

园区中的液化空气储能系统可以将电能转化为液态空气的内能并加以存储。压缩机利用电能产热并存储在高温热水中,部分热量通过溴化锂双供机组向园区供热和供冷,另一部分则通过膨胀发电机产生电能并制冷。液化空气储能系统的数学模型为

$$H_{\text{HST},t}^{\text{in},\pi} = P_{\text{LAS},t}^{\pi} k_{\text{com}} \quad (1)$$

$$H_{\text{HST},t}^{\text{in},\pi} - H_{\text{HST},t}^{\text{out},\pi} - S_{\text{LAS},t}^{\pi} k_{\text{L}} = S_{\text{LAS},t+1}^{\pi} - S_{\text{LAS},t}^{\pi} \quad (2)$$

$$S_{\text{LAS},N}^{\pi} = S_{\text{LAS},1}^{\pi} = 0 \quad (3)$$

$$0 \leq S_{\text{LAS},t}^{\pi} \leq S_{\text{LAS}}^{\text{max}} \quad (4)$$

$$0 \leq H_{\text{HST},t}^{\text{in},\pi} \leq \lambda_{\text{HST},t}^{\text{in},\pi} H_{\text{HST}}^{\text{max}} \quad (5)$$

$$0 \leq H_{\text{HST},t}^{\text{out},\pi} \leq \lambda_{\text{HST},t}^{\text{out},\pi} H_{\text{HST}}^{\text{max}} \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{HST},t}^{\text{in},\pi} + \lambda_{\text{HST},t}^{\text{out},\pi} \leq 1 \quad (7)$$

$$H_{\text{HST},t}^{\pi} \eta_{\text{EG}} + H_{\text{HST},t}^{\pi} \eta_{\text{EG,E}} = H_{\text{HST},t}^{\text{out},\pi} \quad (9)$$

$$H_{\text{HST},t}^{\pi} \eta_{\text{EG}} = P_{\text{EG},t}^{\pi} \eta_{\text{EG,E}}^{-1} + Q_{\text{EG},t}^{\pi} \eta_{\text{EG,C}}^{-1} \quad (10)$$

$$H_{\text{HST},t}^{\pi} \eta_{\text{LB}} = H_{\text{LB},t}^{\pi} \eta_{\text{LB,H}}^{-1} + Q_{\text{LB},t}^{\pi} \eta_{\text{LB,C}}^{-1} \quad (11)$$

其中,式(1)表示压缩机运行方程;式(2)~(6)为储热罐运行约束;式(7)、(8)分别为膨胀发电机和溴化锂机组运行约束。 $t$ 和 $\pi$ 分别为时间和随机场景序号(后同); $P_{\text{LAS},t}^{\pi}$ 和 $H_{\text{HST},t}^{\text{in},\pi}$ 分别为压缩机消耗的电能与产生的热能; $k_{\text{com}}$ 为压缩机压缩比; $H_{\text{HST},t}^{\text{out},\pi}$ 、 $S_{\text{LAS},t}^{\pi}$ 分别为流出储热罐的总热能和存储的热能; $k_{\text{L}}$ 为热损耗系数; $S_{\text{LAS}}^{\text{max}}$ 为储热罐存储上限; $\lambda_{\text{HST},t}^{\text{in},\pi}$ 、 $\lambda_{\text{HST},t}^{\text{out},\pi}$ 均为储热罐的二元状态变量; $H_{\text{HST},t}^{\pi} \eta_{\text{EG}}$ 和 $H_{\text{HST},t}^{\pi} \eta_{\text{EG,E}}$ 分别为储热罐流到膨胀发电机和溴化锂机组的热能; $\eta_{\text{EG}}$ 、 $\eta_{\text{EG,E}}$ 和 $\eta_{\text{EG,C}}$ 分别为膨胀发电机热能转换效率、热电转换效率和热冷转换效率; $P_{\text{EG},t}^{\pi}$ 和 $Q_{\text{EG},t}^{\pi}$ 分别为输出的电能和冷能。 $\eta_{\text{LB}}$ 、 $\eta_{\text{LB,H}}$ 和 $\eta_{\text{LB,C}}$ 分别为溴化锂机组热效率、热转换效率和冷转换效率; $H_{\text{LB},t}^{\pi}$ 和 $Q_{\text{LB},t}^{\pi}$ 分别为转换的热能和冷能。

#### 1.3.2 高温相变复合储热系统

高温相变复合储热系统能够在用电低谷时段通过电热元件将电能转化为高温热能,并储存在复合相变储热材料模块中,在高用热需求时通过板式换热器进行热交换后送入用户侧。高温相变复合储热

系统的数学模型为

$$H_{\text{HP},t}^{\text{in},\pi} = P_{\text{HP},t}^{\pi} k_{\text{ch}} \quad (12)$$

$$H_{\text{HP},t}^{\text{in},\pi} - H_{\text{HP},t}^{\text{out},\pi} - S_{\text{HP},t}^{\pi} k_{\text{HL}} = S_{\text{HP},t+1}^{\pi} - S_{\text{HP},t}^{\pi} \quad (13)$$

$$0 \leq H_{\text{HP},t}^{\text{in},\pi} \leq \lambda_{\text{HP},t}^{\text{in},\pi} H_{\text{HP}}^{\text{max}} \quad (14)$$

$$0 \leq H_{\text{HP},t}^{\text{out},\pi} \leq \lambda_{\text{HP},t}^{\text{out},\pi} H_{\text{HP}}^{\text{max}} \quad (15)$$

$$\lambda_{\text{HP},t}^{\text{in},\pi} + \lambda_{\text{HP},t}^{\text{out},\pi} \leq 1 \quad (16)$$

$$H_{\text{HP},t}^{\text{out},\pi} \eta_{\text{HX}} = H_{\text{HPL},t}^{\pi} \quad (17)$$

$$S_{\text{HP},N}^{\pi} = S_{\text{HP},1}^{\pi} = 0 \quad (18)$$

$$0 \leq S_{\text{HP},t}^{\pi} \leq S_{\text{HP}}^{\text{max}} \quad (19)$$

式中 $H_{\text{HP},t}^{\text{in},\pi}$ 和 $P_{\text{HP},t}^{\pi}$ 分别为流入储热模块的热能和电热元件消耗的电能; $k_{\text{ch}}$ 和 $\eta_{\text{HX}}$ 分别为电热元件转换效率和热交换效率; $H_{\text{HP},t}^{\text{out},\pi}$ 为流出储热模块的热功率; $H_{\text{HPL},t}^{\pi}$ 为送入用户侧的热功率; $S_{\text{HP},t}^{\pi}$ 为储热功率; $k_{\text{HL}}$ 为热损耗系数; $S_{\text{HP}}^{\text{max}}$ 为最大储热量; $\lambda_{\text{HP},t}^{\text{in},\pi}$ 和 $\lambda_{\text{HP},t}^{\text{out},\pi}$ 为高温相变复合储热的二元状态变量。

#### 1.3.3 蝶式斯特林光热系统

蝶式斯特林光热系统能够将一部分太阳辐射能汇集生成热能用于满足园区热负荷,另一部分则通过热力循环发电。目前,园区的光热系统按照“以热定电”模式运行,即热电比为恒定值。其数学模型为

$$H_{\text{ST},t}^{\pi} = P_{\text{ST},t}^{\pi} k_{\text{ST}} \eta_{\text{ST}} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{\text{ST},t}^{\pi} \leq P_{\text{solar},t}^{\pi} \quad (21)$$

式中 $P_{\text{ST},t}^{\pi}$ 和 $H_{\text{ST},t}^{\pi}$ 为光热系统输出的热能与电能; $k_{\text{ST}}$ 和 $\eta_{\text{ST}}$ 分别为热电比和热效率; $P_{\text{solar},t}^{\pi}$ 为根据实时太阳辐射计算得到的最大发电量。

#### 1.3.4 地源热泵

位于园区中心楼中央机房的的地源热泵只需要消耗少量的电能,利用表面浅层地热资源作为热源进行存储,以便在用能高峰期满足园区用能需求。地源热泵的数学模型为

$$H_{\text{GP},t} = \Delta T V_{\text{GP}} \rho c k_{\text{GP}} \quad (22)$$

$$P_{\text{GP},t}^{\pi} = \eta_{\text{GP}} H_{\text{GP},t}^{\text{in},\pi} \quad (23)$$

$$H_{\text{GP},t}^{\text{in},\pi} - H_{\text{GP},t}^{\text{out},\pi} - S_{\text{GP},t}^{\pi} k_{\text{GP}} = S_{\text{GP},t+1}^{\pi} - S_{\text{GP},t}^{\pi} \quad (24)$$

$$S_{\text{GP},N}^{\pi} = S_{\text{GP},1}^{\pi} \quad (25)$$

$$0 \leq S_{\text{GP},t}^{\pi} \leq S_{\text{GP}}^{\text{max}} \quad (26)$$

$$0 \leq H_{\text{GP},t}^{\text{in},\pi} \leq \lambda_{\text{GP},t}^{\text{in},\pi} H_{\text{GP},t} \quad (27)$$

$$0 \leq H_{\text{GP},t}^{\text{out},\pi} \leq \lambda_{\text{GP},t}^{\text{out},\pi} H_{\text{GP}}^{\text{max}} \quad (28)$$

$$\lambda_{\text{GP},t}^{\text{in},\pi} + \lambda_{\text{GP},t}^{\text{out},\pi} \leq 1 \quad (29)$$

式中  $H_{GP,t}$  和  $P_{GP,t}^\pi$  分别为地源热泵能够从外部环境吸收的最大功率和消耗的电能;  $\Delta T$  为温差;  $V_{GP}$ 、 $\rho$ 、 $c$  和  $k_{GP}$  分别为地源热泵储能罐体积、水密度、水比热容和转换效率;  $\eta_{GP}$  为电热消耗比;  $H_{GP,t}^{out,\pi}$  和  $S_{GP,t}^\pi$  分别为地源热泵输出的热功率和储能量;  $S_{GP}^{\max}$  为最大储热量;  $H_{GP}^{\max}$  为最大传输功率;  $\lambda_{GP,t}^{in,\pi}$  和  $\lambda_{GP,t}^{out,\pi}$  表示地源热泵的二元状态变量。

### 1.3.5 预制舱储能系统

园区装置的预制舱储能可以灵活且有效地填补园区的电力缺口,最大限度保障园区的生产和生活用电。其数学模型为

$$P_{ES,t}^{in,\pi} - P_{ES,t}^{out,\pi} - S_{ES,t}^\pi k_{ES} = S_{ES,t+1}^\pi - S_{ES,t}^\pi \quad (30)$$

$$S_{ES,1}^\pi = S_{ES,N}^\pi \quad (31)$$

$$0 \leq S_{ES,t}^\pi \leq S_{ES}^{\max} \quad (32)$$

$$0 \leq P_{ES,t}^{in,\pi} \leq \lambda_{ES,t}^{in,\pi} P_{ES}^{\max} \quad (33)$$

$$0 \leq P_{ES,t}^{out,\pi} \leq \lambda_{ES,t}^{out,\pi} P_{ES}^{\max} \quad (34)$$

$$\lambda_{ES,t}^{in,\pi} + \lambda_{ES,t}^{out,\pi} \leq 1 \quad (35)$$

式中  $P_{ES,t}^{in,\pi}$  和  $P_{ES,t}^{out,\pi}$  分别为流入和流出 ES 的电功率;  $S_{ES,t}^\pi$  为 ES 存储的能量;  $k_{ES}$  为自然损耗系数;  $S_{ES}^{\max}$  和  $P_{ES}^{\max}$  分别为最大储能量和最大传输功率;  $\lambda_{ES,t}^{in,\pi}$  和  $\lambda_{ES,t}^{out,\pi}$  均为预制舱储能的二元状态变量。

## 2 园区综合能源系统日前多目标优化模型

### 2.1 目标函数

根据同里园区的优化运行目标,该文建立多目标优化模型的目标函数包括综合能源成本最低、园区总体能效最优和可再生能源协同消纳量最大。

#### 1) 综合能源成本。

实现园区综合能源成本最低即需要降低从上级能源网络的能源购买成本。由于园区的冷、热能源皆为自给自足,且园区与上级网络只有电能交互,因此目标函数不再考虑冷、热能的成本,即

$$f_1 = \sum_{t=1}^{t_{\max}} \sum_{\pi=1}^{\pi_{\max}} p_\pi (\lambda_{E,t} P_{grid,t}^\pi) \quad (36)$$

式中  $p_\pi$  为随机场景  $\pi$  概率;  $\lambda_{E,t}$  为单位电价;  $P_{grid,t}^\pi$  为园区从上级电网购电功率。

#### 2) 园区总体能效。

园区的总体能效最大可以转化为能源的损耗量

最小,即“源—荷”的差值,即

$$f_2 = \sum_{t=1}^{t_{\max}} \sum_{\pi=1}^{\pi_{\max}} p_\pi (P_{grid,t}^\pi + P_{ST,t}^\pi + P_{WG,t}^\pi + H_{ST,t}^\pi) - \sum_{t=1}^{t_{\max}} \sum_{\pi=1}^{\pi_{\max}} p_\pi [(1 - \sigma_{E,t}^\pi) P_{EL,t}^\pi + (1 - \sigma_{H,t}^\pi) Q_{HL,t}^\pi + (1 - \sigma_{C,t}^\pi) Q_{CL,t}^\pi] \quad (37)$$

式中  $P_{grid,t}^\pi$  和  $P_{WG,t}^\pi$  分别为园区从上级电网购买的电功率与风电机组注入园区的电功率;  $P_{EL,t}^\pi$ 、 $Q_{HL,t}^\pi$  和  $Q_{CL,t}^\pi$  分别为园区的电、热和冷负荷;  $\sigma_{E,t}^\pi$ 、 $\sigma_{H,t}^\pi$  和  $\sigma_{C,t}^\pi$  分别为对应的切负荷率。

#### 3) 可再生能源协同消纳。

最大化的可再生能源消纳量可以等价转化为园区的弃风和弃光量最小,即

$$f_3 = \sum_{\pi=1}^{\pi_{\max}} \sum_{t=1}^{t_{\max}} [(P_{solar,t}^\pi - P_{ST,t}^\pi) + (P_{wind,t}^\pi - P_{WG,t}^\pi)] \quad (38)$$

式中  $P_{wind,t}^\pi$  为预测的风电出力。

### 2.2 约束条件

在满足式(1)~(35)所示的设备约束之外,模型还需满足电、热和冷的功率平衡的约束:

$$P_{grid,t}^\pi + P_{WG,t}^\pi + P_{ST,t}^\pi = \quad (39)$$

$$P_{EL,t}^\pi + P_{LAS,t}^\pi + P_{HP,t}^\pi + P_{GP,t}^\pi$$

$$H_{LB,t}^\pi + H_{HPL,t}^\pi + H_{ST,t}^\pi + H_{GP,t}^{out,\pi} = H_{HL,t}^\pi \quad (40)$$

$$Q_{EG,t}^\pi + Q_{LB,t}^\pi = Q_{CL,t}^\pi \quad (41)$$

$$0 \leq P_{ST,t}^\pi \leq P_{solar,t}^\pi \quad (42)$$

$$0 \leq P_{WG,t}^\pi \leq P_{wind,t}^\pi \quad (43)$$

其中,式(39)为供电母线功率平衡方程;式(40)为供热功率平衡方程;式(41)为供冷母线平衡方程;式(42)~(43)为可再生能源约束。

### 2.3 多目标优化问题的求解

该文建立的园区多目标优化模型的最优解是一组 Pareto 最优解集。由于 3 个目标函数的量纲和数量级都有很大差异,因此需要对上述 3 个目标函数进行标么化处理,进而通过选定步长、遍历权重的方法获得多目标优化的 Pareto 平面。

对每个目标函数进行标么化的计算方法<sup>[11]</sup>:

$$F_z = \frac{f_z - f_z^{\min}}{f_z^{\max} - f_z^{\min}}, z \in 1, 2, 3 \quad (44)$$

然后,以  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  和  $\lambda_3$  作为每个目标的权重参数,可以将原多目标问题的目标函数转化为单目标问题的目标函数,即



$$\min F = \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \lambda_3 F_3 \quad (45)$$

进而可以通过遍历所有权重参数,即

$$\begin{cases} 0 \leq \lambda_1 \leq 1 \\ 0 \leq \lambda_2 \leq 1 - \lambda_1 \\ \lambda_3 = 1 - \lambda_1 - \lambda_2 \end{cases} \quad (46)$$

得到所有 Pareto 平面上的最优解集<sup>[12]</sup>。

为了最终的园区优化决策方案,该文使用逼近理想解排序<sup>[13-14]</sup>的方法从 Pareto 前沿上获得的理想解。逼近理想解排序法把多目标问题通过列成矩阵,归一化地确定理想解和负理想解,然后通过计算每一个目标与理想解和负理想解之间的欧氏距离,将与理想解逼近度最高的 Pareto 解集作为最终决策。

综上所述,该文建立的园区综合能源系统多目标优化模型的求解流程:

Step 1:建立以综合能源成本最低、能源的损耗量最小和可再生能源削减量最小的等价多目标优化模型;

Step 2:求解每个目标独立优化的模型,确定其最大值与最小值;

Step 3:利用上述最值,通过式(44)将每个目标函数标么化;

Step 4:将原问题转化为含每个目标权重系数的单目标问题;

Step 5:选定步长,求解单目标问题,得到足够的 Pareto 最优解;

Step 6:对所有 Pareto 最优解进行差值拟合,得到 Pareto 前沿;

Step 7:结合实际工程调度需求,在 Pareto 前沿上确定理想解作为原多目标优化问题的最终决策。

在 Step 2、5 中,该文使用 MATLAB 调用 GAMS 中的 CPLEX 求解器进行问题的求解。同时,在 Step 6 中,使用 MATLAB 进行 Pareto 前沿的插值绘制。

### 3 案例分析

#### 3.1 基础数据

以同里园区为例,验证该文所提出的多目标优化模型的合理性与可行性。

园区采用 2019 年 7 月 1 日起开始实施的江苏

省工业用电峰谷分时销售电价(10 kV 及以下大工业用户),如表 1 所示。

表 1 工业用电峰谷分时销售电价

Table 1 Industrial electricity peak and valley time prices

阶段	对应时段	电价/(元/(kW·h))
峰时	08:00-12:00,17:00-21:00	1.069 7
谷时	00:00-08:00	0.313 9
平时	12:00-17:00,21:00-24:00	0.641 8

案例分析中典型的可再生能源的出力曲线来源于园区内的源—网—荷—储协调控制系统的数据库。利用文献[11]中所示的典型场景削减算法对海量历史数据进行削减,最终得到如图 2、3 所示的典型风电与光伏出力曲线(采用百分制表示)。每个典型场景的权重如表 2 所示。

同里园区典型的冷、热和电负荷如图 4 所示。

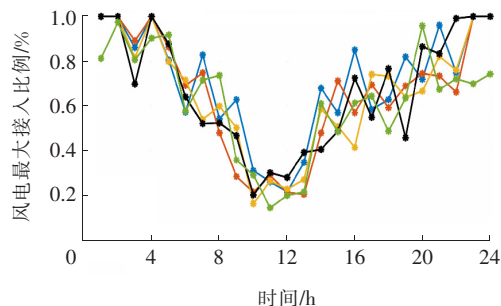


图 2 同里园区典型风电接入比例

Figure 2 Typical wind power access ratio of Tongli Park

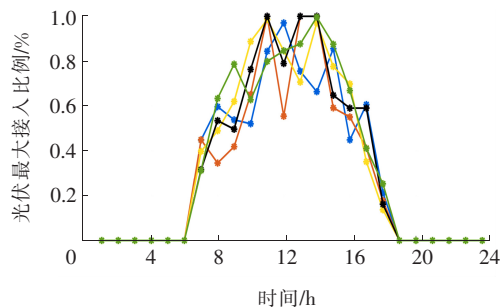


图 3 同里园区典型光伏接入比例

Figure 3 Typical photovoltaic access ratio of Tongli Park

表 2 每个典型场景的权重

Table 2 The weight of each typical scenario

场景序号	权重	
	风电	光伏
1	0.33	0.17
2	0.19	0.19
3	0.09	0.27
4	0.15	0.12
5	0.24	0.25

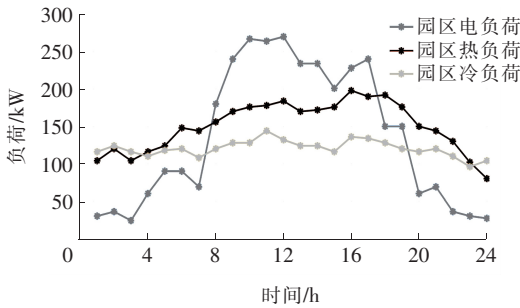


图4 同里园区的冷、热和电负荷

Figure 4 Cold, heat and electric load of Tongli Park

### 3.2 Pareto 前沿及园区运行分析

以 0.05 为步长,通过拟合得到 Pareto 平面如图 5 所示。依据同里园区的调度运行要求,3 个目标的优先级自高到低分别为综合能源成本最低、园区总体能效最高和可再生能源协同消纳量最大。然后,利用逼近理想解排序法得到的理想解对应的 3 个目标的权重分别为 0.51、0.27 和 0.22。

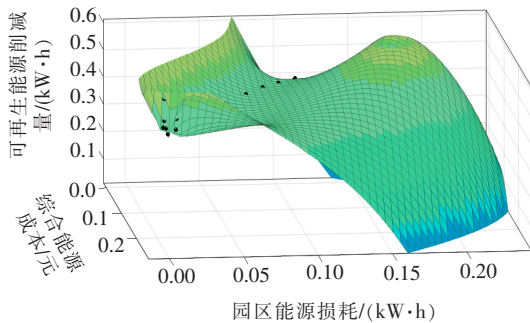


图5 插值得到的 Pareto 平面

Figure 5 Pareto plane after interpolation

此时,理想解对应的综合能源用能成本为 29 456.39 元,园区总能源损耗为 2 195.82 kW·h,可再生能源削减量为 967.59 kW·h。园区内各购能及主要设备的运行状态如下所述。

#### 1) 园区的电能购买分析。

同里园区的电能购买量如图 6 所示。可以看出,为了保证园区的能源供给,园区在 24 个时刻都需要从上级网络购买电能。其中,在 5:00、8:00—16:00 等几个时刻的购电功率较大。这是由于上述时刻的冷、热和电总负荷较高,且可再生能源(尤其是斯特林光热系统)在上述时段的出力无法保证园区的用能需求。

#### 2) 斯特林光热系统运行分析。

斯特林光热系统的电能与热能输出情况如图 7 所示。由于斯特林光热是按照“以热定电”的模式运行,因此其实际的电能出力是以热能需求来决定的。

从图中可以看出,因为目标 3 的权重很低,故斯特林光伏的消纳量较差。

#### 3) 液化空气储能系统运行分析。

图 8 展示了液化空气储能系统中储热罐的储热以及热能充/放情况。热能的热能主要集中在电价较低的时段,而释热则更多地集中在上午和下午。储热罐的运行一方面受可再生能源消纳的影响,另一方面则与园区的负荷特性息息相关。

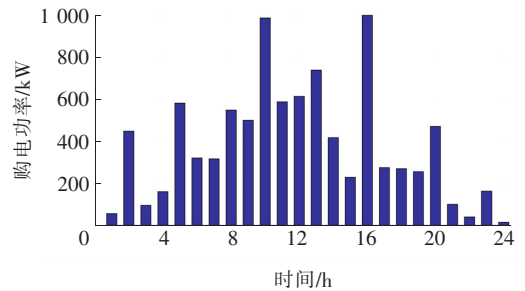


图6 同里园区电能购买情况

Figure 6 Electricity purchase situation of Tongli Park

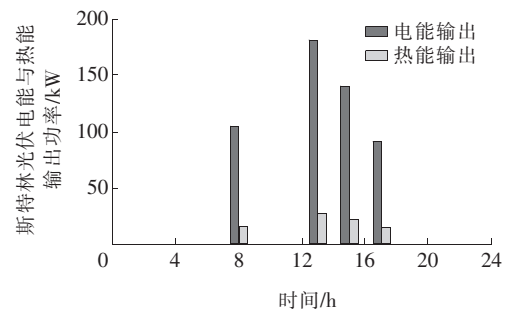


图7 斯特林光热系统运行结果

Figure 7 Results of Stirling photothermal system operation

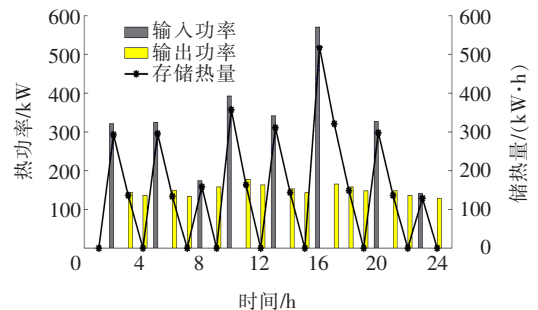


图8 液化空气储能系统中储热罐运行结果

Figure 8 Results of heat storage tank operation in air liquefied energy storage system

储热罐输送到溴化锂机组与膨胀发电机的热能情况如图 9 所示。在全时段内,热能都会输送到溴化锂机组中,以产生热能和冷能。

#### 4) 高温相变复合储热系统运行分析。

高温相变复合储热系统的热能存储状态如图 10 所示。可以看出,由于高温相变复合储热系统是

通过电能转化为热能进行存储的,所以储热阶段更多的集中在白天的时段。

5)地源热泵运行分析。

地源热泵的运行状态如图 11 所示。可以看出,地源热泵的储热主要集中在 6:00、8:00 和 10:00 等温差较大的时段,并在热负荷较高的时段释放热能以满足园区的热需求,实现热能的时间互补。

6)预制舱储能系统。

预制舱储能系统的充放电与蓄电状态如图 12 所示。可以看出,预制舱储能在 2:00—3:00 时段进行充电,经过电能的自然损耗,在 24:00 放电以补充电力需求。其充电时段的电力负荷较低。

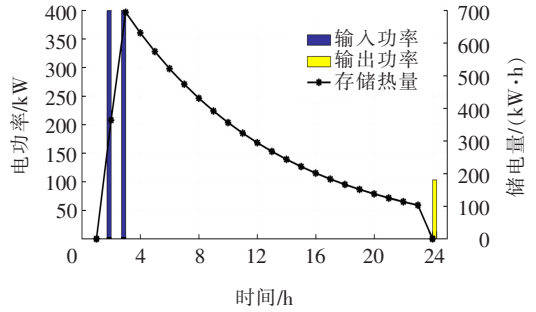


图 12 预制舱储能系统运行结果

Figure 12 Results of prefabricated tank storage system

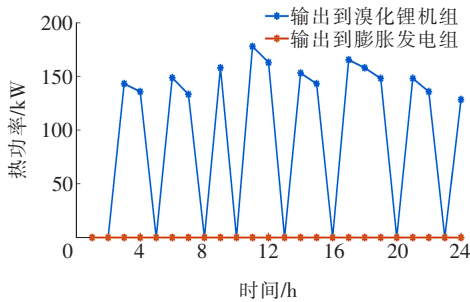


图 9 储热罐输出热能的结果

Figure 9 Result of heat output from a heat storage tank

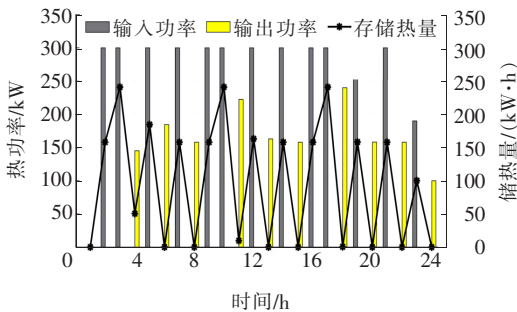


图 10 高温相变复合储热系统运行结果

Figure 10 Results of high temperature phase change composite heat storage system

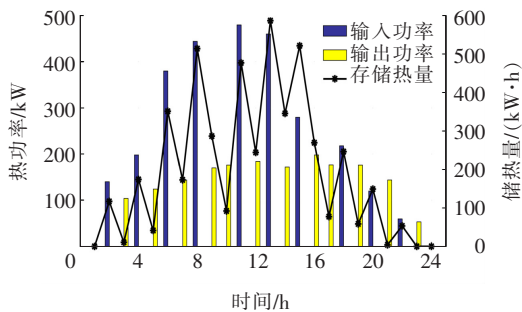


图 11 地源热泵运行结果

Figure 11 Results of ground-source pump

3.3 不同 Pareto 解对优化调度结果的影响

Pareto 解的不同选择会对园区优化调度结果产生影响。在此,选取 3 组不同的 Case 进行决策的对比分析,每个 Case 对应的权重如表 3 所示。

表 3 不同解的权重设置

Table 3 The weight setting of each case

Case	权重		
	目标 1	目标 2	目标 3
1	0.80	0.15	0.05
2	0.05	0.80	0.15
3	0.15	0.05	0.80

3 个 Case 中各目标函数的结果如表 4 所示。

在 Case 1 中,当目标 1 为多目标优化的主导时,对比 Case 2 和 Case 3 可以发现,此时园区的综合能源成本的优化效果更佳。同样地,当目标 2、3 为主导时,有着同样的结论。

表 4 不同 Case 中各目标函数结果

Table 4 Results of the objective function in different cases

Case	综合能源成本/ 元	园区总能耗/ (kW·h)	可再生能源削减/ (kW·h)
1	21 777.03	2 900.19	87.59
2	56 610.29	1 119.67	1 057.59
3	23 903.33	2 623.42	77.59

4 结语

该文兼顾以综合能源总体能效、综合能源成本和可再生能源协同消纳为多目标,建立了园区综合能源多目标优化调度模型,旨在为园区综合能源系统的优化运行提供理论支撑。同时,对原目标函数进行标化处理并求取了 Pareto 平面来表示所有可能的解集。最后使用逼近理想排序法选取了理想

解。研究表明,上述模型能够较好地兼顾3个目标,实现园区的多目标优化决策。

### 参考文献:

- [1] 王威,李润秋,张鹭,等. 计及多类型电储能的综合能源系统优化运行对比分析研究[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(2):110-116+123.  
WANG Wei, LI Runqiu, ZHANG Lu, et al. Comparative analysis and research on optimal operation of the integrated energy system considering multi-type electrical storage[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(2):110-116+123.
- [2] 王宏,闫园,文福拴,等. 国内外综合能源系统标准现状与展望[J]. 电力科学与技术学报, 2019,34(3): 3-12.  
WANG Hong, YAN Yuan, WEN Fushuan, et al. Standards associated with integrated energy systems: current situation and research prospects[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019,34(3): 3-12.
- [3] 王源,南海鹏,关欣. 风水储微电网优化调度策略研究[J]. 高压电器, 2020,56(5):216-222.  
WANG Yuan, NAN Haipeng, GUAN Xin. Optimal scheduling strategy of wind-hydro-storage micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(5):216-222.
- [4] 钱嘉欣,武家辉,姚磊,等. 基于能值分析和多目标决策法的CCHP-PV-Wind系统综合性能评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(2):130-139.  
QIAN Jiixin, WU Jiahui, YAO Lei, et al. Comprehensive performance evaluation of a CCHP-PV-Wind system based on energy analysis and a multi-objective decision method[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(2):130-139.
- [5] 董文杰,田廓,陈云斐,等. 能源互联网下基于博弈与证据理论的综合能源系统评价方法研究[J]. 智慧电力, 2020,48(7):73-80.  
DONG Wenjie, TIAN Kuo, CHEN Yunfei, et al. Evaluation method of comprehensive energy system based on game theory & evidence theory under energy internet[J]. Smart Power, 2020,48(7):73-80.
- [6] 杜先波,陶苏滕,刘述波,等. 综合能源系统日前-日内多目标优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2020,57(16):109-117.  
DU Xianbo, TAO Sumeng, LIU Shubo, et al. Day-ahead and intraday optimal control strategies of integrated energy system considering multiple objectives[J]. Electrical Measure-
- ment & Instrumentation, 2020,57(16):109-117.
- [7] 周灿煌,郑杰辉,荆朝霞,等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. 电网技术, 2018,42(6): 1687-1697.  
ZHOU Canhuang, ZHENG Jiehui, JING Zhaoxia, et al. Multi-objective optimal design of integrated energy system for park-level microgrid[J]. Power System Technology, 2018,42(6): 1687-1697.
- [8] 陈昊炜. 智能电网园区多类型能源优化调度研究[D]. 天津:天津大学, 2017.
- [9] 陈丽萍,林晓明,许苑,等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(6):9-16.  
CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Modeling and multi-objective optimal dispatch of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Protection and Control, 2019,47(6):9-16.
- [10] 侯旭倩. 电一气一热型微能源网多目标优化运行研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [11] 陈聪,沈欣炜,夏天,等. 计及烟效率的综合能源系统多目标优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 60-67.  
CHEN Cong, SHEN Xinwei, XIA Tian, et al. Multi-objective optimal dispatch method for integrated energy system considering exergy efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(12): 60-67.
- [12] 王瑾然,卫志农,张勇,等. 计及不确定性的区域综合能源系统日前多目标优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3496-3506.  
WANG Jinran, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Multi-objective optional day-ahead dispatching for regional integrated energy system considering uncertainty[J]. Power System Technology, 2018,42(11): 3496-3506.
- [13] Arslan T. Aweighted euclidean distance based TOPSIS method for modeling public subjective judgments[J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2017, 34(3):1-18.
- [14] 金伟超,韩畅,杨莉,等. 计及多阶段抗灾性能的骨干网架多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2020,44(15):52-61.  
JIN Weichao, HAN Chang, YANG Li, et al. Multi-objective optimization of backbone power grid considering multi-stage disaster resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(15):52-61.