

# 考虑综合需求响应的园区综合能源系统经济性优化方法

刘雪飞<sup>1</sup>, 赵海彭<sup>2</sup>, 胡 珀<sup>1</sup>, 尹斌鑫<sup>2</sup>, 庞 凝<sup>1</sup>, 苗世洪<sup>2</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 河北 石家庄 050000; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**针对园区综合能源系统调节资源短缺导致的运行灵活性不足、经济效益偏低等问题,协调考虑居民用户参与综合需求响应和增建能量存储与转换设备两种措施,提出一种园区综合能源系统经济性优化方法。首先,在考虑空调、燃气供暖等设备调节能力的基础上,建立包含价格型与激励型负荷的综合需求响应模型;然后,分析居民用户参与需求响应的行为特性,建立室温偏差与用户参与度的相关性模型;最后,构建计及综合需求响应与设备增建的园区综合能源系统经济性优化模型。算例分析表明,提出的经济性优化方法,充分考虑居民用户参与综合需求响应,调节资源和优化配置增建设备容量,有效地提升了园区综合能源系统的经济性。

**关 键 词:**综合需求响应;用户响应特性;园区综合能源系统;多能流;经济性优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.001 中图分类号:TM73 文章编号:1673-9140(2022)01-0003-14

## Economic optimization method of comprehensive energy system in industrial park considering comprehensive demand response

LIU Xuefei<sup>1</sup>, ZHAO Haipeng<sup>2</sup>, HU Po<sup>1</sup>, YIN Binxin<sup>2</sup>, PANG Ning<sup>1</sup>, MIAO Shihong<sup>2</sup>

(1. Economic Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of insufficient operational flexibility and low economic benefits caused by the shortage of adjustment resources of the park-level integrated energy system (PIES), this paper coordinates and considers two measures of residential users participation in integrated demand response (IDR) and the addition of energy storage and conversion equipment, and proposes an economic optimization method for PIES. First of all, a IDR model including price-type and incentive-type loads on the basis of considering the adjustment capabilities of equipment such as air-conditioning and gas heating is established. Secondly, the behavioral characteristics of residential users participating in demand response is analyzed. Then a correlation model between room temperature deviation and user participation. Finally, an economic optimization model of PIES is constructed that takes into account the IDR and equipment expansion. The analysis of an example shows that the proposed economic optimization method fully considers the par-

收稿日期:2020-12-06;修回日期:2021-03-24

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(kjcb2020-008)

通信作者:赵海彭(1996-),男,硕士,主要从事综合能源系统运行研究;E-mail:zhaohaipeng@hust.edu.cn

participation of residential users in comprehensive demand response, adjusts resources and optimizes the allocation of additional equipment capacity, which effectively improves the economy of PIES.

**Key words:** integrated demand response; user response characteristics; park-level integrated energy system; multi-energy flow; economic optimization

园区综合能源系统(park-level integrated energy system, PIES)以电力系统为核心,耦合电、热、冷、气多种能源,具有能源协调互补、节能环保等多种优势,能够实现能源的高效利用,满足居民生活的能源多样化需求。作为 PIES 中的关键能量转换设备,热电联产(combined heat and power, CHP)机组可以同时输出电热功率,能源综合利用效率高。然而,CHP 机组输出的电热功率刚性耦合,而电能、热能的需求往往在时间上存在差异,系统在运行灵活性不足时,将面临新能源弃用与资源利用不协调等一系列问题,严重影响系统经济效益<sup>[1]</sup>。

建设电锅炉、地源热泵、燃料电池等能量耦合设备或配置多类型储能以协调能源供给结构,已成为解决 CHP 机组电热耦合效应弊端的有效手段<sup>[2-5]</sup>。然而,上述技术手段在提升运行效益的同时,也会极大地增加系统投资成本。综合需求响应(integrated demand response, IDR)在电力需求响应基础上发展而来,能够有效地调节 PIES 用户侧的多种能源需求,可以显著优化 PIES 运行<sup>[6]</sup>。在配置能量转换与储能设备时考虑 IDR 因素,有利于降低所需设备的容量。因此,研究考虑 IDR 与设备优化规划的 PIES 经济性提升方法具有重要意义。

当前,在 IDR 行为特性建模方面,文献[7]提出了考虑可转移、可中断、可替代负荷的 IDR 机制,提高 PIES 的灵活性和经济性;文献[8]面向商业园区,构建了包含冷/热/电/气的 IDR 模型;文献[9]详细描述了居民用户的建筑特性,构建考虑用户建筑储能的 IDR 模型。上述文献主要针对能源枢纽与商业中心等类型负荷的 IDR 行为特性进行建模,具有一定的借鉴意义。而居民用户拥有大量的多类型可调节资源,具有主体繁多且分散的特点,其参与 IDR 行为特性复杂,传统的 IDR 模型难以精确反映居民用户的行为特性。因此,有必要考虑居民用户响应资源的多样性及响应行为的复杂性,建立其精确的 IDR 模型。

在计及 IDR 的设备规划问题方面,文献[10]提出了计及电/热 IDR 的多能微网规划方法,但用户

侧能源耦合形式较为简单;文献[11]考虑电/热/气 IDR 对微网多种储能容量进行优化配置,但是其 IDR 模型不适用于居民用户,且未考虑能量转换设备的配置问题。因此,考虑居民用户 IDR 的 PIES 经济性优化问题仍有待研究。综上所述,现有关于 PIES 的经济性优化方法存在不足,在综合能源系统设备规划时,较少考虑 IDR 因素,并且针对居民用户的 IDR 模型尚不完善。

针对以上问题,本文首先充分考虑用户各类响应资源,建立包含价格型响应与激励型响应的 IDR 模型;其次,分析居民用户参与需求响应的行为特性,并建立 PIES 控制室温偏差与用户参与激励型需求响应积极性的关联特性模型;最后,构建考虑设备容量扩展规划并计及居民用户参与 IDR 的 PIES 经济性优化模型。算例分析表明,本文提出的 PIES 经济性优化方法能够充分地利用居民用户的调节资源,并合理配置增建设备的容量,有效地提升了园区综合能源系统的经济性。

## 1 充分考虑居民用户响应资源的 IDR 模型

考虑居民用户参与 IDR 的园区综合能源系统结构如图 1 所示。

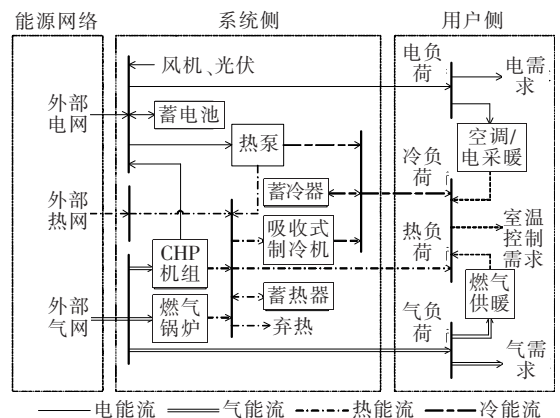


图 1 园区综合能源系统

Figure 1 Park-level integrated energy system

园区综合能源系统向用户供应电气热冷多种类型能源,综合需求响应方式包括单一能源横向的自我调节、不同能源纵向的耦合替换<sup>[12]</sup>。

综合能源系统中各能源子系统的性质差异明显。电力系统要求供需实时平衡,而居民用电习惯导致日内峰谷差明显,因此可采用实时、分时电价等手段以调节电力用能时段。燃气系统同样需要保证供需平衡,但燃气易于存储,因此并未形成分时计价的售气模式。热力系统主要为用户调节室内温度,用户对室内温度的感知具有模糊性,为冷热负荷提供了灵活的可调节空间<sup>[13]</sup>。各类能源在用户侧存在耦合关系,意味着用户不同类型的负荷可互相替代。通过控制与管理用户侧能源转换设备,以调节不同类型负荷的大小,对 PIES 能源子系统间的相互协调具有重要意义。

根据用户侧负荷的特性,将可参与响应的负荷分为转移型负荷、替代型负荷以及因用户温度感知模糊性提供的室温调节负荷,用户参与响应的方式可分为价格型与激励型 2 种。

### 1.1 价格型需求响应

转移型负荷响应为单一类型能源针对该能源价格信号,用户自发的将用能高峰时段的负荷转移至用能低谷时段的行为<sup>[14]</sup>。考虑各能源自身特点,燃气与热力缺乏分时计价需求,不考虑其价格需求响应。因此,仅考虑电价需求响应,以  $\Delta L_{p,t} = [\Delta P_{p,t} \ 0 \ 0 \ 0]$  表示转移型负荷响应量,其响应关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{p,1} \\ \Delta P_{p,2} \\ \vdots \\ \Delta P_{p,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{p,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P_{p,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & P_{p,t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_1/p_1 \\ \Delta p_2/p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_t/p_t \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_{\text{ELE}} \quad (1)$$

式中  $\Delta P_{p,t}$  为转移型电负荷的变化量;  $T$  为调度时段数,  $t = 1, 2, \dots, T$ ;  $\mathbf{E}_{\text{ELE}}$  为价格弹性矩阵,是  $T \times T$  阶方阵,其主对角线元素  $e_{t,t}^{\text{ELE}}$  为自弹性系数,表示  $t$  时刻电价变化对  $t$  时刻电需求的影响关系,非主对角线元素  $e_{t,t'}^{\text{ELE}}$  为交叉弹性系数,表示  $t'$  时刻电价变化对  $t$  时刻电需求的影响关系;  $P_{p,t}$  为  $t$  时刻原始的价格型负荷;  $\Delta p_t$  为  $t$  时刻电价变化量;  $p_t$

为  $t$  时刻原始的能源价格。

### 1.2 激励型需求响应

替代型负荷响应是将用户的能源转换设备由系统侧统一管理,实现负荷侧多种类型能源转换行为与系统运行相协调的响应方式。现有关于居民用户的能源转换行为研究主要涉及空调、热水器等,能量耦合形式较为单一,为此需要构建更为全面的替代型负荷响应模型,以充分利用居民用户的可调节资源。本文冷热负荷针对用户的室温控制,考虑的能源转换设备主要有空调、燃气供暖设备,能量流向为电至热、电至冷、气至热 3 类,以  $\Delta L_{r,t} = [\Delta P_{r,t} \ \Delta F_{r,t} \ \Delta H_{r,t} \ \Delta U_{r,t}]$  表示替代型负荷响应,其响应关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta H_{r,t} \\ \Delta U_{r,t} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \eta_{\text{LCON\_H}} \cdot \lambda_{1,t} & \eta_{\text{LGH}} \\ \eta_{\text{LCON\_U}} \cdot \lambda_{2,t} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{r,t} \\ \Delta F_{r,t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\Delta P_{r,t}$ 、 $\Delta F_{r,t}$ 、 $\Delta H_{r,t}$ 、 $\Delta U_{r,t}$  分别为替代型电、气、热、冷负荷响应量;  $\eta_{\text{LCON\_H}}$ 、 $\eta_{\text{LCON\_U}}$ 、 $\eta_{\text{LGH}}$  分别为负荷侧的空调制热效率、空调制冷效率、燃气供暖设备制热效率;  $\lambda_{1,t}$ 、 $\lambda_{2,t}$  分别为空调制热、空调制冷所占替代型电负荷响应量的比重,且  $\lambda_{1,t} + \lambda_{2,t} = 1$ 。

室温调节负荷响应是一种 PIES 在一定范围内调节用户室内温度,使得用户冷热需求变化的响应方式。用户对温度感受具有模糊性,因此室温具有一定的可调节性。用户对温度感受一般用热舒适度表征,评价热舒适度的指标有预测平均评价(predicted mean vote, PMV)指标以及 ASHRAE 协会的热舒适要求指标等。PMV 是较为常用的一种热舒适度评价指标,基于人体热平衡的基本方程式以及心理学主观热感觉等,采用 7 级分度表征人体热舒适体验,PMV 数值与热感觉关系如表 1 所示。ISO7730 推荐 PMV 值在  $\pm 0.5$  之间。根据 PMV 值计算方法<sup>[15]</sup>,可以求得室温的可控变化范围。

表 1 PMV 数值与热感觉关系

Table 1 Relationship between PMV and thermal sensation

| 热感觉 | PMV 数值 | 热感觉 | PMV 数值 |
|-----|--------|-----|--------|
| 热   | +3     | 微凉  | -1     |
| 暖   | +2     | 凉   | -2     |
| 微暖  | +1     | 冷   | -3     |
| 适中  | 0      |     |        |

以  $\Delta L_{f,t} = [0 \ 0 \ \Delta H_{f,t} \ \Delta U_{f,t}]$  表示室温调节负荷响应量。其中,  $\Delta H_{f,t}$  为室温调节热负荷响应量,  $\Delta U_{f,t}$  为室温调节冷负荷响应量, 两者与室温相关。为表征室温与负荷响应量的关系, 需要建立用户侧热力系统模型。目前, 有关建筑热平衡模型已有较为详尽的研究<sup>[16-17]</sup>, 基于离散一阶热力学等效热参数模型可表示为

$$\begin{cases} q_{S0,i,t} = S_i \gamma_i (T_{\text{best}} - T_{\text{out},t}) - q_{\text{other},i,t} \\ \Delta q_{S,i,t} = \\ R_i (T_{\text{in},i,t} - T_{\text{in},i,t-1}) / \Delta t + S_i \gamma_i (T_{\text{in},i,t} - T_{\text{best}}) \\ q_{S0,i,t} + \Delta q_{S,i,t} = \\ H_{L,i,t} - U_{L,i,t} + \Delta H_{r,i,t} - \Delta U_{r,i,t} \\ \Delta q_{S,i,t} = \Delta H_{f,i,t} - \Delta U_{f,i,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $q_{S0,i,t}$  为基础的室温调节负荷;  $\Delta q_{S,i,t}$  为用户响应的室温调节负荷;  $S_i$  为用户  $i$  的散热面积;  $\gamma_i$  为用户的热损失系数;  $R_i$  为用户  $i$  房屋总热容;  $T_{\text{best}}$  为最舒适的室内温度;  $T_{\text{in},i,t}$  为用户  $i$  在  $t$  时刻建筑的室内温度;  $T_{\text{out},t}$  为  $t$  时刻建筑的室外温度;  $q_{\text{other},i,t}$  为阳光照射、室内设备工作等给房屋带来的热功率;  $\Delta t$  为调度时间间隔;  $H_{L,i,t}$ 、 $U_{L,i,t}$  分别为 PIES 向用户  $i$  供应的热功率与冷功率;  $\Delta H_{f,i,t}$ 、 $\Delta U_{f,i,t}$  分别为用户  $i$  室温调节的热负荷响应量与冷负荷响应量;  $\Delta H_{r,i,t}$ 、 $\Delta U_{r,i,t}$  分别为用户  $i$  替代型热负荷响应量与替代型冷负荷响应量。

式(3)中用户参数与系统参数关系为

$$\begin{cases} H_{L,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{user}}} (H_{L,i,t}), U_{L,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{user}}} (U_{L,i,t}) \\ \Delta H_{f,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{user}}} (\Delta H_{f,i,t}), \Delta U_{f,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{user}}} (\Delta U_{f,i,t}) \\ \Delta H_{r,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{user}}} (\Delta H_{r,i,t}), \Delta U_{r,t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{user}}} (\Delta U_{r,i,t}) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $H_{L,t}$ 、 $U_{L,t}$  为 PIES 实施 IDR 后的热负荷与冷负荷;  $N_{\text{user}}$  为用户数。

因此, 实施 IDR 后的负荷为

$$L_{\text{IDR},t} = L_{0,t} + \Delta L_{p,t} + \Delta L_{r,t} + \Delta L_{f,t} \quad (5)$$

式中  $L_{\text{IDR},t}$  为 PIES 实施 IDR 后的负荷向量, 由响应后的电负荷  $P_{L,t}$ 、气负荷  $F_{L,t}$ 、热负荷  $H_{L,t}$ 、冷负荷  $U_{L,t}$  组成;  $L_{0,t}$  为 PIES 实施 IDR 前的负荷向量, 由响应前初始的电负荷  $P_{L0,t}$ 、气负荷  $F_{L0,t}$ 、热负荷  $H_{L0,t}$ 、冷负荷  $U_{L0,t}$  组成。

## 2 居民用户参与需求响应特性分析

根据文第 1 章建立 IDR 模型可知, 需求响应形式分为价格型与激励型 2 类。价格型响应通过电价进行引导, 用户自主进行响应, 采用价格需求弹性模型可以较为准确的描述价格型响应量  $\Delta L_{p,t}$ 。激励需求响应需要 PIES 进行控制, 其由  $\Delta L_{r,t}$  与  $\Delta L_{f,t}$  组成,  $\Delta L_{r,t}$  与用户的制冷制热设备调节相关,  $\Delta L_{f,t}$  与用户的室温设置相关。室温调节作为居民用户的基本需求, 用户对其具有主导的控制权, 可以选择性的确定是否交由系统控制, 因此在确定激励需求响应量  $\Delta L_{r,t}$  与  $\Delta L_{f,t}$  时, 需要分析用户参与激励响应的行为特性。

用户参与激励响应的意愿与最舒适室温  $T_{\text{best}}$  和系统控制室温  $T_{\text{sys}}$  的差值  $\Delta T$  密切相关。由于用户对于室温变化的承受能力存在差异, 因此随着 PIES 控制的温度偏差增大, 用户参与需求响应的积极性将逐渐降低。居民用户随室温调节程度的参与响应情况如图 2 曲线 A 所示。根据用户参与室温调节的激励响应情况, 可分为完全响应区、部分响应区和无响应区 3 个部分。在完全响应区,  $|\Delta T|$  小于等于室温偏差下限  $T_{\text{low}}$ , 室温变化程度处于用户最适温度感知模糊性范围内, 用户不会因室温调节感到不适, 将全部参与激励需求响应; 在部分响应区,  $|\Delta T|$  处于室温偏差下限  $T_{\text{low}}$  与上限  $T_{\text{up}}$  之间, 部分用户因室温变化较大退出激励需求响应, 不再接受 PIES 对其室温及温度调节设备的控制, 并通过温度调节设备自主调节室温至  $-T_{\text{low}}$  至  $T_{\text{low}}$  范围内; 在无响应区,  $|\Delta T|$  大于等于室温偏差上限  $T_{\text{up}}$ , 室温变化程度过大, 所有用户均难以忍受室温偏差造成的不适, 全部退出激励需求响应。

用户的上述需求响应行为特性可表示为

$$N_{\text{puser}} = \begin{cases} N_{\text{user}}, & -T_{\text{low}} \leq \Delta T \leq T_{\text{low}} \\ (1 - \Delta T / (T_{\text{up}} - T_{\text{low}})) N_{\text{user}}, & T_{\text{low}} \leq \Delta T \leq T_{\text{up}} \\ (1 + \Delta T / (T_{\text{up}} - T_{\text{low}})) N_{\text{user}}, & -T_{\text{up}} \leq \Delta T \leq -T_{\text{low}} \\ 0, & \Delta T \leq -T_{\text{up}}, \Delta T \geq T_{\text{up}} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $N_{\text{puser}}$  为参与激励需求响应的用户数;  $N_{\text{user}}$  为用户总数;  $T_{\text{low}}$ 、 $T_{\text{up}}$  分别为室内温度限值。

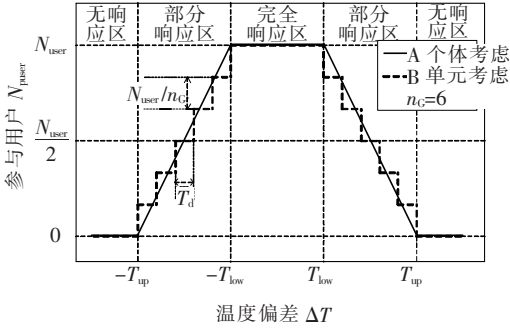


图 2 居民用户随室温调节程度的参与响应情况

Figure 2 Participation response of residential users with the degree of room temperature adjustment

用户退出需求响应后将调节室温至舒适区,假设其设定温度  $T_{\text{set}} \sim N(T_{\text{best}}, \sigma^2)$ , 为简化计算并尽可能贴合实际,实际优化过程中采用其期望值,即取  $T_{\text{set}}$  为  $T_{\text{best}}$ 。因此,根据居民用户参与激励需求响应与否分成 2 类, I 类为参与需求响应的用户, II 类为退出需求响应的用户。每个时刻根据 PIES 的室温控制信号, I 类与 II 类用户之间存在相互的转换。I 类用户由 PIES 控制室温,在  $t$  时刻  $T_{\text{in},\text{I},t}$  为  $T_{\text{sys},t}$ ; II 类用户自行设置舒适温度,在  $t$  时刻  $T_{\text{in},\text{II},t}$  为  $T_{\text{set}}$ 。用户的室温设置为

$$\begin{cases} T_{\text{in},i,t} = u_{i,t} T_{\text{sys},t} + (1 - u_{i,t}) T_{\text{set}} \\ \sum_{i=1}^{N_{\text{user}}} u_{i,t} = N_{\text{puser},t} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $u_{i,t}$  为 0-1 变量,表示用户  $i$  在  $t$  时刻参与激励需求响应的状态,当  $u_{i,t} = 1$  时,代表用户参与激励需求响应,否则用户不参与激励需求响应。

居民用户数量众多,拥有大量的调节资源,然而其具有小而分散的特点,若将每个用户作为单独的个体去进行分析,会导致 0-1 变量及约束条件过多,难以求解。为此,可以将行为相似的多个用户视作

一个单元进行分析,部分响应区如图 2 曲线 B 所示,式(6)、(7)分别转化为

$$N_{\text{puser},t} = \begin{cases} N_{\text{user}}, & -T_{\text{low}} \leq \Delta T_t \leq T_{\text{low}} \\ N_{\text{user}} \frac{n}{n_G}, & -T_{\text{up}} + (n-1) T_d \leq \Delta T_t \leq -T_{\text{up}} + n T_d \\ N_{\text{user}} \frac{n_G - n}{n_G}, & T_{\text{low}} + (n-1) T_d \leq \Delta T_t \leq T_{\text{low}} + n T_d \\ 0, & \Delta T_t \leq -T_{\text{up}}, \Delta T_t \geq T_{\text{up}} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_{\text{Gin},i,t} = u_{\text{G},i,t} T_{\text{sys},t} + (1 - u_{\text{G},i,t}) T_{\text{set}} \\ \sum_{i=1}^{n_G} u_{\text{G},i,t} = n_G \frac{N_{\text{puser},t}}{N_{\text{user}}} \end{cases} \quad (9)$$

每个单元的建筑热平衡模型可等效为一个房间进行分析<sup>[18]</sup>,式(3)、(4)可进一步表示为

$$\begin{cases} q_{\text{GS}0,i,t} = K_{1,i} (T_{\text{best}} - T_{\text{out},t}) - q_{\text{Gother},i,t} \\ \Delta q_{\text{GS},i,t} = K_{1,i} (T_{\text{Gin},i,t} - T_{\text{best}}) + K_{2,n} (T_{\text{Gin},i,t} - T_{\text{Gin},i,t-1}) \\ q_{\text{GS}0,i,t} + \Delta q_{\text{GS},i,t} = H_{\text{GL},i,t} - U_{\text{GL},i,t} + \Delta H_{\text{Gr},i,t} - \Delta U_{\text{Gr},i,t} \\ \Delta q_{\text{GS},i,t} = \Delta H_{\text{Gf},i,t} - \Delta U_{\text{Gf},i,t} \\ K_{1,i} = S_{\text{G},i} \gamma_{\text{G},i}, K_{2,i} = R_{\text{G},i} / \Delta t \\ H_{\text{L},t} = \sum_{i=1}^{n_G} (H_{\text{GL},i,t}), U_{\text{L},t} = \sum_{i=1}^{n_G} (U_{\text{GL},i,t}) \\ \Delta H_{\text{f},t} = \sum_{i=1}^{n_G} (\Delta H_{\text{Gf},i,t}), \Delta U_{\text{f},t} = \sum_{i=1}^{n_G} (\Delta U_{\text{Gf},i,t}) \\ \Delta H_{\text{r},t} = \sum_{i=1}^{n_G} (\Delta H_{\text{Gr},i,t}), \Delta U_{\text{r},t} = \sum_{i=1}^{n_G} (\Delta U_{\text{Gr},i,t}) \end{cases} \quad (10)$$

式(8)~(10)中  $n_G$  为用户单元数量;  $n=1,2,\dots,n_G-1$ ;  $T_d$  为室内温度变化分段值,  $T_d = (T_{\text{up}} - T_{\text{low}}) / (n_G - 1)$ ;  $u_{\text{G},i,t}$  为用户单元  $i$  在  $t$  时刻参与激励需求响应的状态;  $T_{\text{Gin},i,t}$  为用户单元  $i$  在  $t$  时刻的室内温度;  $q_{\text{GS}0,i,t}$  为用户单元  $i$  基础的室温调节负荷;  $\Delta q_{\text{GS},i,t}$  为用户单元  $i$  响应的室温调节负荷;  $K_{1,i}$ 、 $K_{2,n}$  均为常数系数,与用户单元  $i$  等效散热面积  $S_{\text{G},i}$ 、等效热损失系数  $\gamma_{\text{G},i}$ 、等效总热容  $R_{\text{G},i}$  以及调度时间间隔  $\Delta t$  相关;  $q_{\text{Gother},i,t}$  为用户单

元  $i$  的总干扰热功率;  $H_{GL,i,t}$ 、 $U_{GL,i,t}$ 、 $\Delta H_{Gr,i,t}$ 、 $\Delta U_{Gr,i,t}$ 、 $\Delta H_{Gf,i,t}$  以及  $\Delta U_{Gf,i,t}$  分别为用户单元  $i$  的系统热功率供给量、系统冷功率供给量、替代型热负荷响应量、替代型冷负荷响应量、室温调节热负荷响应量以及室温调节冷负荷响应量。通过将大量而分散的居民用户划分为用户单元,居民用户参与激励需求响应特性分析得以简化。

### 3 PIES 经济性优化模型

本文针对 CHP 机组热电出力的刚性耦合降低系统经济性的问题,提出配置能量耦合设备与多类型储能装置,以及考虑居民用户参与需求响应的解决方法,所建立的园区综合能源系统经济性优化模型如下。

#### 3.1 优化目标

本文以园区综合能源系统的日均建设运行成本最小为目标,进行系统的经济性优化。优化模型的目标函数为

$$\begin{aligned} \min C_O &= C_{BUY} + C_{OP} + C_{PUN} + C_{ESP} \quad (11) \\ \left\{ \begin{aligned} C_{BUY} &= \sum_{t=1}^T (\varphi_{E,t} P_{BUY,t} + \varphi_G F_{BUY,t} + \varphi_H H_{BUY,t}) \cdot \Delta t \\ C_{OP} &= \sum_{i=1}^{N_D} \left( \sum_{t=1}^T (c_{op,i} E_{i,t}) + c_{start,i} N_{start,i} \right) \\ C_{PUN} &= c_{PUN} \sum_{t=1}^T (P_{AWP,t} + P_{APV,t} + H_{ABAN,t}) \\ C_{ESP} &= C_{INI} + C_{REP} \\ C_{INI} &= \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{N_C} (C_{CON,i}) \frac{\zeta(1+\zeta)^{N_P}}{(1+\zeta)^{N_P} - 1} \\ C_{REP} &= \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{N_C} \left( C_{CON,i} \sum_{j=1}^{K_i} \frac{1}{(1+\zeta)^{j m_i}} \right) \frac{\zeta(1+\zeta)^{N_P}}{(1+\zeta)^{N_P} - 1} \end{aligned} \right. \quad (12) \end{aligned}$$

式中  $C_O$  为系统的日均建设运行成本;  $C_{BUY}$ 、 $C_{OP}$ 、 $C_{PUN}$ 、 $C_{ESP}$  分别为系统外部购能成本、运行维护成本、弃能惩罚成本和以全寿命周期成本折算的增建设备日均投资成本;  $\varphi_{E,t}$ 、 $\varphi_G$ 、 $\varphi_H$  分别为外部购电、购气及购热价格;  $P_{BUY,t}$ 、 $F_{BUY,t}$ 、 $H_{BUY,t}$  分别

为  $t$  时刻系统的外部购电量、购气量、购热量;  $\Delta t$  为调度时间间隔;  $T$  为调度周期总时段数;  $E_{i,t}$  为设备  $i$  在  $t$  时刻的出力;  $c_{op,i}$  为设备  $i$  的维护成本;  $c_{start,i}$  为设备启停成本;  $N_{start,i}$  为设备启动次数;  $c_{PUN}$  为弃能惩罚系数;  $P_{AWP,t}$ 、 $P_{APV,t}$ 、 $H_{ABAN,t}$  分别为弃风量、弃光量与弃热量;  $C_{INI}$ 、 $C_{REP}$ 、 $C_{CON,i}$  分别为增建设备的日均安装成本、日均置换成本以及设备  $i$  的总安装成本;  $N_D$  为系统中设备数量;  $N_C$  为系统增建设备数量;  $N_P$  为工程周期;  $\zeta$  为折现率;  $n_i$  为设备  $i$  的寿命;  $K_i = N_P/n_i$ , 当  $N_P/n_i$  为非整数时,向 0 取整。

#### 3.2 约束条件

##### 3.2.1 设备约束

热电联产机组、燃气锅炉(gas boiler, GB)、热泵(heat pump, HP)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、储能设备(energy storage, ES)的详细运行模型可参见文献[19-20]。本文考虑建设的设备包括 GB、HP 及电池储能(battery energy storage, BES)、热储能(heat storage, HS)、冷储能(cold storage, CS)。

1) CHP 机组出力约束为

$$\begin{cases} s_{CHP,t} P_{CHP\_MIN} \leq P_{CHP,t} \leq s_{CHP,t} P_{CHP\_MAX} \\ s_{CHP,t} H_{CHP\_MIN} \leq H_{CHP,t} \leq s_{CHP,t} H_{CHP\_MAX} \end{cases} \quad (13)$$

式中  $P_{CHP,t}$  为  $t$  时刻 CHP 机组输出的电功率;  $H_{CHP,t}$  为  $t$  时刻 CHP 机组输出的热功率;  $s_{CHP,t}$  为  $t$  时刻 CHP 机组的运行状态,  $s_{CHP,t}=0$  为机组在  $t$  时刻停机,  $s_{CHP,t}=1$  为机组在  $t$  时刻运行;  $P_{CHP\_MIN}$  与  $P_{CHP\_MAX}$  为 CHP 机组的最小与最大电功率;  $H_{CHP\_MIN}$  与  $H_{CHP\_MAX}$  为 CHP 机组的最小与最大热功率。

2) GB 出力约束为

$$0 \leq H_{GB,t} \leq s_{GB,t} (H_{GB\_MAX} + H_{GB\_ESP}) \quad (14)$$

式中  $s_{GB,t}$  为 GB 在  $t$  时刻的运行状态,  $s_{GB,t}=1$  表示 GB 在  $t$  时刻运行, 否则表示停机;  $H_{GB,t}$  为  $t$  时刻 GB 输出的热功率;  $H_{GB\_MAX}$  为系统原有 GB 的最大热功率;  $H_{GB\_ESP}$  为增建 GB 的热功率。

3) HP 出力约束为

$$\begin{cases} 0 \leq H_{HP,t} \leq s_{HP,H,t} (H_{HP\_MAX} + H_{HP\_ESP}) \\ 0 \leq U_{HP,t} \leq s_{HP,U,t} (U_{HP\_MAX} + U_{HP\_ESP}) \\ 0 \leq s_{HP,H,t} + s_{HP,U,t} \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中  $s_{HP,H,t}$ 、 $s_{HP,U,t}$  分别为  $t$  时刻 HP 制热状态变量与制冷状态变量,状态变量为 1 时,表示 HP 工作在该状态,否则表示未在该状态; $H_{HP,t}$ 、 $U_{HP,t}$  分别为  $t$  时刻 HP 输出的热功率与冷功率; $H_{HP\_MAX}$ 、 $U_{HP\_MAX}$  分别为系统原有 HP 最大热功率与冷功率; $H_{HP\_ESP}$ 、 $U_{HP\_ESP}$  分别为增建 HP 的热功率与冷功率。

4) AC 出力约束为

$$0 \leq U_{AC,t} \leq s_{AC,t} U_{AC\_MAX} \quad (16)$$

式中  $U_{AC,t}$  为 AC 制冷功率; $s_{AC,t}$  为  $t$  时刻 AC 的工作状态,当其值为 1 时,表示设备运行,否则表示设备停机; $U_{AC\_MAX}$  为 AC 最大制冷功率。

5) ES 的能量状态范围与充能、放能功率约束为

$$\begin{cases} S_{ES\_MIN} \leq S_{ES,t} \leq S_{ES\_MAX} \\ 0 \leq P_{ESC,t} \leq s_{ESC,t} (P_{ESC\_MAX} + P_{ESC\_ESP}) \\ 0 \leq P_{ESD,t} \leq s_{ESD,t} (P_{ESD\_MAX} + P_{ESD\_ESP}) \\ 0 \leq s_{ESC,t} + s_{ESD,t} \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

式中  $S_{ES,t}$  为 ES 在  $t$  时刻的能量状态,即当前储存能量与最大存储能量的比值; $S_{ES\_MIN}$ 、 $S_{ES\_MAX}$  为 ES 能量状态的下限与上限; $P_{ESC,t}$ 、 $P_{ESD,t}$  为 ES 在  $t$  时刻的充电与放电功率; $P_{ESC\_MAX}$ 、 $P_{ESD\_MAX}$  为 ES 充能与放能功率上限; $P_{ESC\_ESP}$ 、 $P_{ESD\_ESP}$  为增建 ES 的充能与放能功率; $s_{ESC,t}$ 、 $s_{ESD,t}$  分别为储能的充能与放能状态,当值为 1 时,表示储能处于对应的状态。

### 3.2.2 能源子系统约束

1) 电力系统。PIES 中电力系统部分由外部电网、风力发电机组、光伏发电机组、CHP 机组、BES、HP 和电负荷组成,其功率平衡关系为

$$\begin{aligned} P_{BUY,t} + P_{WP,t} + P_{PV,t} + P_{CHP,t} + \\ P_{BESd,t} - P_{BESc,t} - P_{HP,t} = P_{L,t} \end{aligned} \quad (18)$$

式中  $P_{BUY,t}$  为购电功率; $P_{WP,t}$  为风力发电功率; $P_{PV,t}$  为光伏发电功率; $P_{CHP,t}$  为 CHP 机组输出的电功率; $P_{BESc,t}$ 、 $P_{BESd,t}$  为电池的充、放电功率; $P_{HP,t}$  为热泵耗电功率。

2) 燃气系统。PIES 的燃气系统属于低压配气

系统,可仅考虑气量平衡。燃气系统部分由外部气网、CHP 机组、GB 以及燃气负荷组成,园区综合能源系统中,单位时间燃气流量平衡方程为

$$F_{BUY,t} - F_{CHP,t} - F_{GB,t} = F_{L,t} \quad (19)$$

式中  $F_{BUY,t}$  为购气流量; $F_{CHP,t}$  为 CHP 耗气量; $F_{GB,t}$  为 GB 耗气量。

3) 热力系统。PIES 的热力系统分为供热系统与供冷系统 2 个部分。PIES 供能范围小、管道距离短,因此忽略热力系统传输的惯性及损耗。

供热系统部分由外部购热、CHP 机组、GB、HP、HS、AC 以及热负荷组成,系统热功率平衡约束为

$$\begin{aligned} H_{BUY,t} + H_{CHP,t} + H_{GB,t} + H_{HP,t} + \\ H_{HSD,t} - H_{HSC,t} - H_{AC,t} = H_{L,t} + H_{ABAN,t} \end{aligned} \quad (20)$$

式中  $H_{BUY,t}$  为系统外部购热功率; $H_{HSC,t}$ 、 $H_{HSD,t}$  为储热装置的充、放能功率; $H_{CHP,t}$  为 CHP 机组输出的热功率; $H_{GB,t}$  为 GB 输出的热功率; $H_{HP,t}$  为 HP 输出的热功率; $H_{AC,t}$  为 AC 消耗的热功率; $H_{ABAN,t}$  为弃热量。

供冷系统部分由 AC、HP、CS 以及冷负荷组成,系统冷功率平衡约束条件为

$$U_{AC,t} + U_{HP,t} + U_{CSD,t} - U_{CSC,t} = U_{L,t} \quad (21)$$

式中  $U_{AC,t}$  为 AC 输出的冷功率; $U_{HP,t}$  为 HP 输出的冷功率; $U_{CSC,t}$ 、 $U_{CSD,t}$  为储冷装置的充、放能功率。

4) 其他约束。风电、光伏出力约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{WP,t} \leq P_{WPfore,t} \\ 0 \leq P_{PV,t} \leq P_{PVfore,t} \end{cases} \quad (22)$$

式中  $P_{WPfore,t}$ 、 $P_{PVfore,t}$  分别为风电与光伏预测出力。

系统以并网不上网模式运行,仅能从外部购能,不能售能,因此购电量与购气量需满足:

$$\begin{cases} P_{BUY,t} \geq 0 \\ F_{BUY,t} \geq 0 \\ H_{BUY,t} \geq 0 \end{cases} \quad (23)$$

### 3.2.3 综合需求响应约束

根据文第 1、2 章相关内容,综合需求响应需满足式(1)、(2)、(5)、(8)~(10)的约束。

电价需求响应的电价变化量需要满足:

$$-k_p \cdot p_t \leq \Delta p_t \leq k_p \cdot p_t \quad (24)$$

式中  $k_p$  为电价允许变化比例;  $p_t$  为  $t$  时刻用户初始电价;  $\Delta p_t$  为  $t$  时刻用户电价变化量。

替代型需求响应考虑用户能量耦合设备出力限制,对替代型负荷响应量进行约束,即

$$\begin{cases} 0 \leq \eta_{\text{LCON\_H}} \Delta P_{r,i,t} \leq H_{\text{LCONM}} \\ 0 \leq \eta_{\text{LCON\_U}} \Delta P_{r,i,t} \leq U_{\text{LCONM}} \\ 0 \leq \eta_{\text{LGHM}} \Delta F_{r,i,t} \leq H_{\text{LGHM}} \end{cases} \quad (25)$$

式中  $H_{\text{LCONM}}$  为用户空调的最大制热功率;  $U_{\text{LCONM}}$  为用户空调的最大制冷功率;  $H_{\text{LGHM}}$  为用户燃气供暖设备最大功率。

### 3.3 非线性约束转换

在文 3.2 节的约束条件中,式(8)、(9)所示的居民用户参与激励需求响应特性约束,以及式(14)、(15)、(17)组成的能量转换设备与储能装置的容量规划约束存在非线性问题。大  $M$  法是一种通过引入一个极大常数以及辅助二进制变量,将逻辑或非非线性约束转换为等效线性约束的方法<sup>[20]</sup>。因此,本文采用大  $M$  法将非线性规划问题转换为混合整数线性规划问题,消除模型中的非线性约束。借助大  $M$  法,式(8)可转化为

$$\begin{cases} N_{\text{puser},t} = N_1 z_{1,t} + N_2 z_{2,t} + \dots + N_{2n_G+1} z_{2n_G+1,t} \\ \Delta T_t \leq \\ T_1 z_{1,t} + T_2 z_{2,t} + \dots + T_{2n_G} z_{2n_G,t} + M z_{2n_G+1,t} \\ \Delta T_t > \\ -M z_{1,t} + T_1 z_{2,t} + T_2 z_{3,t} + \dots + T_{2n_G} z_{2n_G+1,t} \\ z_{1,t} + z_{2,t} + \dots + z_{2n_G+1,t} = 1, z_{i,t} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (26)$$

式中  $N_i$  为第  $i$  段用户参与数;  $T_i$  为第  $i$  段与第  $i+1$  段分段处的温度偏差值;  $z_{i,t}$  为 0-1 变量;  $M$  为一个近似无穷大的常数。当  $z_{i,t} = 1$  时,式(26)等效为  $T_{i-1} < \Delta T_t \leq T_i$ 、 $N_{\text{puser},t} = N_i$ ,表示式(8)第  $i$  段温度偏差范围以及对应的参与激励需求响应用户单元数量。因此,式(26)与式(8)等价。

式(9)的非线性部分可转化为

$$\begin{cases} T_{\text{sys},t} - (1 - u_{G,i,t}) M \leq \\ T_{\text{in},i,t} \leq T_{\text{sys},t} + (1 - u_{G,i,t}) M \\ T_{\text{set}} - u_{G,i,t} M \leq T_{\text{in},i,t} \leq T_{\text{set}} + u_{G,i,t} M \end{cases} \quad (27)$$

当  $u_{G,i,t} = 1$  时,式(27)等效为  $T_{\text{sys},t} \leq T_{\text{in},i,t} \leq$

$T_{\text{sys},t}$ ; 当  $u_{G,i,t} = 0$  时,式(27)等效为  $T_{\text{set}} \leq T_{\text{in},i,t} \leq T_{\text{set}}$ 。因此,式(27)与式(9)等价。

式(14)、(15)、(17)线性化方法相似,此处以式(14)为例,其结果为

$$\begin{cases} 0 \leq H_{\text{GB},t} \leq \\ (H_{\text{GB\_MAX}} + H_{\text{GB\_ESP}}) + (1 - s_{\text{GB},t}) M \\ 0 \leq H_{\text{GB},t} \leq s_{\text{GB},t} M \end{cases} \quad (28)$$

对于式(28),当  $s_{\text{GB},t} = 1$  时,式(28)与  $0 \leq H_{\text{GB},t} \leq (H_{\text{GB\_MAX}} + H_{\text{GB\_ESP}})$  等价;当  $s_{\text{GB},t} = 0$  时,式(28)与  $H_{\text{GB},t} = 0$  等价。因此,式(28)与式(14)等价。

通过大  $M$  法转化,本文所建立的园区综合能源系统经济性优化模型中非线性约束转化为线性约束,求解过程得到简化。

### 3.4 求解方法

本文的优化问题为混合整数线性优化问题,采用 MATLAB 的 YALMIP 工具箱调用 CPLEX 求解器进行求解。

## 4 算例分析

本文算例以华北地区某园区为例进行分析,其结构如图 1 所示,各设备与储能的运行及规划参数见表 2。园区服务 180 个居民用户,用户空调制热/冷与燃气供暖设备的最大功率均设置为 0.75 kW,用户空调制热冷效率为 3.5,燃气供暖效率为 1.0。算例中将用户划分为 5 个单元,每个单元 36 个用户。全年 365 天划分为过渡季、供冷季与供热季,比例为 61 : 153 : 151<sup>[21]</sup>。该地区过渡季、供冷季与供热季典型日的风光出力、电/气负荷如图 3 所示,温度数据参见文献[15]。系统供冷季集中供冷,供热季集中供热,过渡季不供应热力。因此,为避免资源浪费,在过渡季限制 CHP 机组运行。系统购电价格采用分时电价,峰时段 10:00—15:00、18:00—21:00 为 1.378 2 元/(kW·h),谷时段 01:00—07:00、24:00 为 0.365 8 元/(kW·h),其余时段为 0.859 5 元/(kW·h),需求响应电价允许变化比例设定为 0.2;天然气价格为 2.83 元/m<sup>3</sup>;购热价格为 0.6 元/(kW·h)。电负荷中转移型负荷占比为 50%,设置电价弹性矩阵自弹性系数为 -0.2。用户



表 2 系统设备参数

Table 2 System equipment parameters

| 设备     | 功率/kW         |               | 效率                     | 建设成本/<br>(元/kW) | 寿命/<br>a | 运维成本/<br>(元/kW) | 其他参数          |
|--------|---------------|---------------|------------------------|-----------------|----------|-----------------|---------------|
|        | 下限            | 上限            |                        |                 |          |                 |               |
| CHP 机组 | 150(电)/250(热) | 500(电)/833(热) | 0.30(电)/0.50(热)        | 4 000           | 20       | 0.025           | 启停成本 10/(元/次) |
| 热泵     | 0(热)/0(冷)     | 100(热)/100(冷) | 3.80(热)/4.20(冷)        | 7 000           | 20       | 0.017           | —             |
| 燃气锅炉   | 0             | 100           | 0.85                   | 1 000           | 20       | 0.026           | —             |
| 吸收式制冷机 | 0             | 800           | 0.83                   | 1 100           | 20       | 0.020           | —             |
| 风机     | 0             | 200           | —                      | 7 000           | 25       | 0.020           | —             |
| 光伏     | 0             | 200           | —                      | 9 000           | 20       | 0.024           | —             |
| 锂离子电池  | -50           | 50            | 0.90 (0.20 ≤ S ≤ 0.90) | 1 000           | 10       | 0.018           | 功率:容量 = 1:4   |
| 水蓄热器   | -50           | 50            | 0.95 (0.10 ≤ S ≤ 0.90) | 210             | 10       | 0.016           | 功率:容量 = 1:4   |
| 水蓄冷器   | -50           | 50            | 0.95 (0.10 ≤ S ≤ 0.90) | 210             | 10       | 0.016           | 功率:容量 = 1:4   |

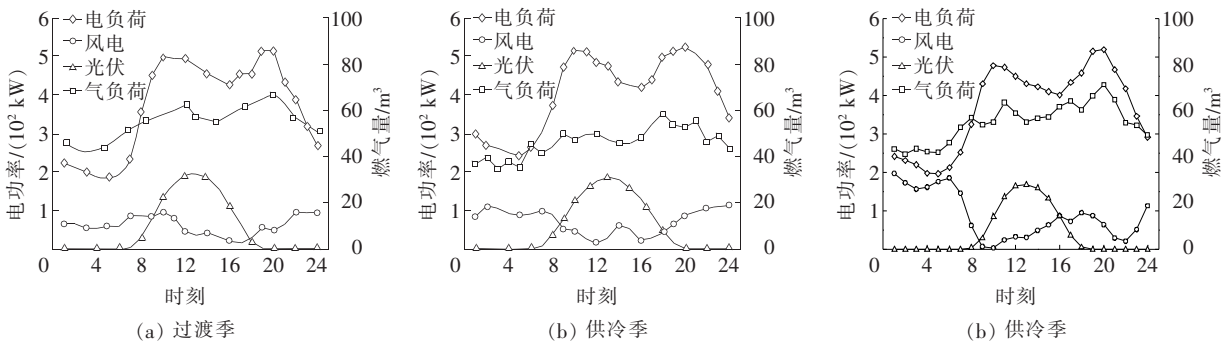


图 3 典型日的电气负荷及风光出力数据

Figure 3 Electrical & gas load and WTG & PV cell output data of typical day in transition

温度响应范围设置为  $T_{low}=0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  与  $T_{up}=2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 仅考虑 IDR 而不考虑用户参与激励响应行为时,室温可变范围设置为  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以 24 h 为调度周期,调度时段数  $T=24$ ,单位调度时间  $\Delta t=1\text{ h}$ 。工程周期  $N_p=20\text{ a}$ ,折现率  $\zeta=8\%$ 。

4.1 场景设置

为分析本文所提经济性优化模型对园区综合能源系统经济性的提升作用,设置如表 3 所示场景。

表 3 场景设置

Table 3 Scenario setup

| 场景 | 增建能量 |      | 考虑综合需求响应 | 考虑用户参与行为 |
|----|------|------|----------|----------|
|    | 转换设备 | 存储设备 |          |          |
| 1  | ×    | ×    | ×        | ×        |
| 2  | ×    | ×    | √        | ×        |
| 3  | ×    | ×    | √        | √        |
| 4  | √    | ×    | ×        | ×        |
| 5  | ×    | √    | ×        | ×        |
| 6  | √    | √    | ×        | ×        |
| 7  | √    | √    | √        | ×        |
| 8  | √    | √    | √        | √        |

4.2 典型日下 IDR 对系统运行影响分析

本文提出了充分考虑居民用户响应资源的综合需求响应模型,并且计及了用户的参与特性。为验证 IDR 对系统运行的影响,本文对比原始系统(场景 1)、考虑 IDR 的系统(场景 2)与计及用户参与 IDR 特性的系统(场景 3)的运行情况。

4.2.1 IDR 结果分析

不同场景下,系统负荷及用户用能情况如图 4、5 所示。通过场景 2、3 的价格型需求响应结果可知,采用电价引导用户可以实现对电负荷的削峰填谷。对比场景 2、3 与场景 1 的系统负荷及用户用能情况。

1)对于供冷季, IDR 在电负荷谷时段增加用电需求。在电负荷峰时减少用电需求;午间时段光伏出力较多,经济效益较好的 CHP 出力受限,而冷负荷较大。在场景 1 的午间时刻,系统通过效率较低的 GB 供给 AC 热能用于制冷,因此在该时段通过空调供冷增加用电需求,有利于增加 CHP 机组出

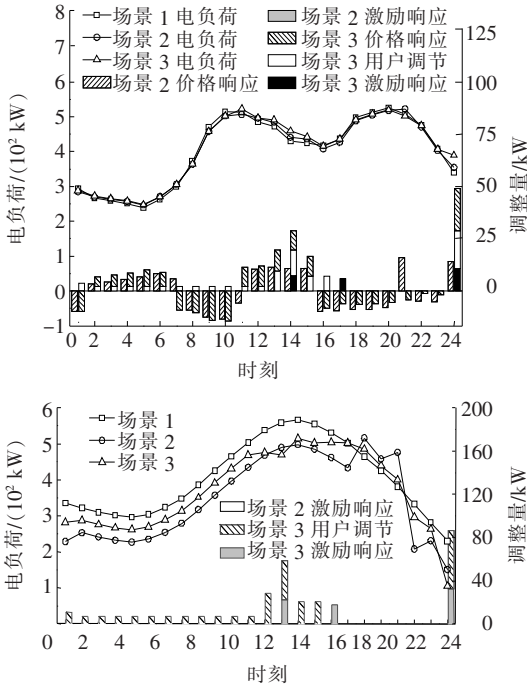


图4 供冷季不同场景下的电/冷负荷及用户用能情况  
Figure 4 Electrical/cold load and user-adjusted energy under different scenarios in cooling season

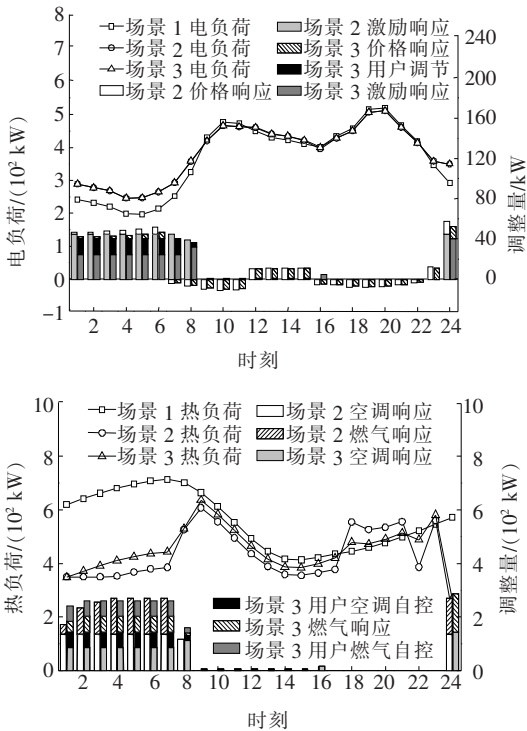


图5 供热季不同场景下的电/热负荷及需求响应情况  
Figure 5 Electrical/heat load and user-adjusted energy under different scenarios in heating season

有利于系统运行及经济性提升;在 19:00—21:00 时段,该时段电价较高,冷负荷受电负荷影响,CHP 机组增发满足系统电能需求,同时增发的热能为避免浪费用于 AC 供冷,系统冷负荷增加。

2) 对于供热季,系统 01:00—08:00 时段及 24:00 时刻 IDR 作用下用户大规模响应,这部分时段电负荷较小而热负荷较大,系统 CHP 机组为满足供热需求增加出力,易造成了风电的弃用。场景 2 与场景 3 在此时通过电热替代增加电负荷减小热负荷,有利于系统风电的消纳,避免从外部高价购热,使得系统经济性提升。在 19:00—21:00 时段,热负荷受电负荷影响而增加,其与供冷季冷负荷调节原因一致。通过供热季 01:00—08:00 时段需求响应情况可知,此时用户空调优先响应并达到最大出力,同时燃气供暖设备大量出力用以减小热负荷,可见相对于仅考虑空调的 IDR 模型,本文模型对用户的响应资源利用更加充分。

#### 4.2.2 用户参与 IDR 意愿分析

不同场景下系统设定室温如图 6 所示。对比场景 2 与场景 3 的系统设定室温,两者室温设定的整体趋势一致。但是,由于场景 3 考虑到用户参与需求响应的行为特性,系统设定室温偏离最适温度的程度相对较小。场景 3 用户参与激励需求响应情况如图 7 所示。

1) 在供冷季,01:00—12:00 时段,系统处于轻度调节状态,4 个用户单元参与需求响应;13:00—16:00 时段,由于光伏高发限制 CHP 机组出力造成了系统供冷效率下降,系统深度调节系统冷负荷,此时 3 个用户群参与响应,由图 4 可知,该时段用户空调参与调节使得系统冷负荷下降;17:00—23:00 时段,电负荷较高而风光出力较小,为避免高价购电 CHP 机组大量出力,此时系统保持设定室温不至于过低造成用户不适,因此 5 个用户单元全部参与响应;24:00 时刻,CHP 机组退出,系统通过调节降低冷负荷。

2) 在供热季,01:00—07:00 时段,由于该时段风电高发并且电负荷较小而热负荷较大导致弃风,

力,并提升系统经济效益。系统冷负荷在 01:00—18:00 时段与 22:00—24:00 时段减少,降低冷负荷

系统在此时大幅调节热负荷,使得用户侧利用电、气资源替代热能,达到减小热负荷并增大电负荷的目的,促进了风电的消纳;08:00—15:00 时段,系统对用户室温进行较小程度的调节以提高经济性;16:00—23:00 时段,与供冷季相应 17:00—23:00 时段原因相似,此时系统保持设定室温不至于过高造成用户不适,因此 5 个用户单元全部参与响应;24:00 时刻,CHP 机组退出,系统控制用户空调进行响应满足供热需求。

比于场景 1,供热季系统运行成本显著降低,供冷季运行成本同样有一定程度的下降。场景 3 相比于场景 2,经济性略有下降,但相较于场景 1,系统经济性仍得到了明显提升。

表 4 综合需求响应对系统经济性影响

Table 4 The influence of IDR on system economy 元

| 场景 | 典型日系统运行成本 |           |
|----|-----------|-----------|
|    | 供冷季       | 供热季       |
| 1  | 9 813.61  | 12 097.92 |
| 2  | 9 483.03  | 10 916.42 |
| 3  | 9 621.45  | 11 125.99 |

4.3 考虑增建设备与 IDR 的经济性提升效果分析

本文 PIES 经济性优化模型同时考虑了设备容量的进一步优化以及用户参与 IDR 的影响。为此,对表 3 中的场景 4~8 进行对比分析。不同场景下系统日均成本明细如表 5 所示。

表 5 不同场景下系统日均成本明细

Table 5 System average daily cost details

| 场景 | under different scenarios |        |       |        | 元         |
|----|---------------------------|--------|-------|--------|-----------|
|    | 购能成本                      | 运维成本   | 弃用成本  | 增建成本   | 日均总成本     |
| 1  | 10 243.99                 | 502.74 | 36.80 | 0.00   | 10 783.52 |
| 4  | 9 697.36                  | 504.55 | 21.66 | 164.49 | 10 388.07 |
| 5  | 10 056.40                 | 519.67 | 15.14 | 102.89 | 10 694.10 |
| 6  | 9 652.31                  | 512.20 | 0.00  | 198.81 | 10 363.32 |
| 7  | 9 514.46                  | 475.77 | 0.04  | 90.85  | 10 081.12 |
| 8  | 9 618.11                  | 496.06 | 0.00  | 101.13 | 10 215.31 |

由表 5 可知,场景 4 至场景 8 的购能成本、弃用成本以及日均总成本相比于场景 1 均有所下降,说明在原始系统的基础上增加设备与实施 IDR 会使系统的经济性得到提升,能源弃用情况得到改善。场景 4 与场景 5 相比,购能成本更低、弃用成本较高,原因是场景 4 建设热泵可提高能源利用效率使得购能成本降低。然而能量转换设备是对相比于能量存储设备不能实现能量在时间上的转移,对能量弃用情况的改善能力有限。场景 6 与场景 4、5 相比,系统弃能情况得以改善,经济性进一步提升,表明了能量转换设备与能量存储设备的协调配置相比于仅配置其中一类更具优势。场景 7 考虑了在用户侧实施 IDR、用户侧设备参与系统调节、系统运行的

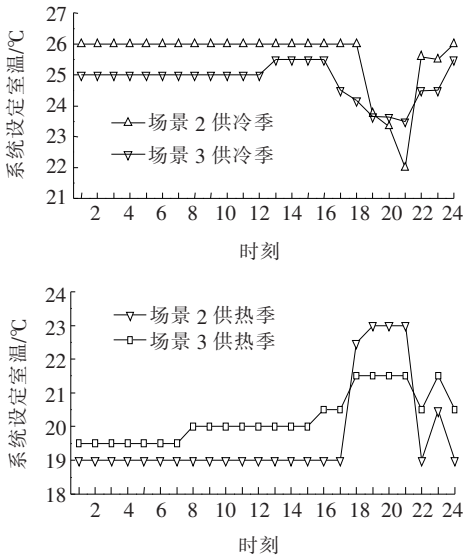


图 6 不同场景下系统设定室温

Figure 6 Room temperature setting in different scenarios

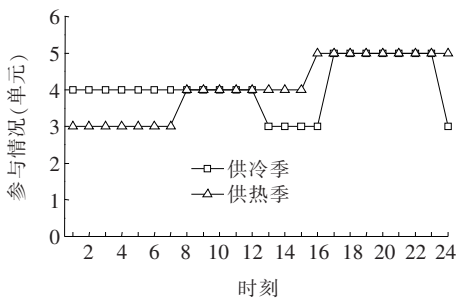


图 7 场景 3 的用户参与激励需求响应情况

Figure 7 User participation incentive demand response in scenario 3

上述分析表明,IDR 可以优化园区综合能源系统的运行,且在考虑用户行为特性后,IDR 将顾及用户的舒适度与忍受能力,调节程度相对减轻。综合需求响应对系统经济性影响如表 4 所示,场景 2 相

灵活性相比原始系统得到提升,因此相比于场景 6 系统的增建成本显著下降,日均总成本降低。场景 8 在场景 7 的基础之上更进一步地考虑了用户参与 IDR 的行为特性,系统对于室温的调节与场景 7 相比较为较为保守,用户侧可调节资源减少,因此经济性相对较差,但更符合实施 IDR 的实际情况,避免了因 IDR 预期效果过于理想造成的系统规划调度偏离实际情景的问题。

不同场景下系统增建设备情况如表 6 所示。由表 6 可知,系统选择增建的能量转换设备为 HP,选择增建的能量存储设备仅有 HS。HP 建设成本虽高,但其转换效率高,有利于降低系统运行成本; BES 建设成本相比于 HS 更为高昂,而 CS 虽建设成本与 HS 相同,但其仅在供冷季发挥作用,这 2 类储能经济较差。场景 7、8 相比于场景 6,所需建设的 HP 与 HS 均减小,说明考虑 IDR 可以有效地减少原始系统所需建设设备的容量。从初始投资成本考虑,场景 6、7 及场景 8 的初始建设投资分别为 65.02、27.50、31.18 万元,因此考虑 IDR 可显著减少经济性优化建设的初始投资,对于项目实施更加友好。场景 8 与场景 7 相比,HP 的建设容量增加 20 kW,表明考虑用户参与需求响应行为特性后,系统的 IDR 响应资源相对减少,系统的设备建设较多,更为保守。

表 6 不同场景下系统设备容量配置情况

Table 6 Configuration of system equipment capacity under different scenarios kW

| 场景 | GB | HP  | BES | HS  | CS |
|----|----|-----|-----|-----|----|
| 1  | —  | —   | —   | —   | —  |
| 4  | 0  | 320 | —   | —   | —  |
| 5  | —  | —   | 0   | 300 | 0  |
| 6  | 0  | 280 | 0   | 160 | 0  |
| 7  | 0  | 90  | 0   | 130 | 0  |
| 8  | 0  | 110 | 0   | 130 | 0  |

## 5 结语

本文以典型园区综合能源系统为研究对象,考虑居民用户丰富的综合需求响应资源以及用户参与

需求响应的复杂行为特性,构建了计及设备容量扩展配置的园区综合能源系统经济性优化模型。通过算例分析,得到如下结论。

1)在考虑空调、燃气供暖等设备调节能力的基础上,建立了包含价格型与激励型负荷的居民用户 IDR 模型。相较于传统需求响应模型,本文模型能够充分利用居民用户的调节资源,有利于提升居民用户参与 IDR 的积极性。

2)所建立的居民用户参与 IDR 的行为特性模型,考虑了用户对室温偏差的不同耐受程度,能够精确描述用户的 IDR 响应行为,在经济性优化过程中保证了用户的舒适性,使得优化方案更为合理。

3)与传统的优化方法相比,本文提出的 PIES 经济性优化方法,协调考虑了居民用户参与 IDR 和增建能源转换与存储设备 2 种措施,有效地提高了 PIES 的灵活性,经济性提升效果更加显著。

## 参考文献:

- [1] 邹云阳,杨莉,冯丽,等.考虑热负荷二维可控性的微网热电协调调度[J].电力系统自动化,2017,41(6):13-19.  
ZOU Yunyang, YANG Li, FENG Li, et al. Coordinated heat and power dispatch of microgrid considering two-dimensional controllability of heat loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 13-19.
- [2] 李正茂,张峰,梁军,等.含电热联合系统的微电网运行优化[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3569-3576.  
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3569-3576.
- [3] 李健强,余光正,汤波,等.考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):11-20.  
LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 11-20.

- [4] 随权,马啸,魏繁荣,等. 计及燃料电池热—电综合利用的能源网日前调度优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(6):1603-1613+1857.  
SUI Quan, MA Xiao, WEI Fanrong, et al. Day-ahead dispatching optimization strategy for energy network considering fuel cell thermal-electric comprehensive utilization[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1603-1613+1857.
- [5] 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.
- [6] 田丰,贾燕冰,任海泉,等. 计及用户行为及满意度的电—气综合能源系统优化调度[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5):31-38.  
TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, et al. Optimal dispatch of electricity-gas integrated energy system considering user behavior and satisfaction[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5):31-38.
- [7] 白雪婷,杨瑞琪,陈泽春,等. 计及综合需求响应的园区综合能源系统优化运行[J]. 电力科学与技术学报, 2021,36(3):27-35.  
BAI Xueting, YANG Ruiqi, CHEN Zechun, et al. Optimal operation of the park integrated energy system considering integrated demand response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):27-35.
- [8] 张敏,王金浩,常潇,等. 考虑可再生能源不确定性的热—电耦合微能源系统多目标鲁棒规划方法[J]. 中国电力, 2021, 54(4):119-129+140.  
ZHANG Min, WANG Jinhao, CHANG Xiao, et al. A multi-objective robust planning method for thermal-electrical coupling micro-energy system considering the uncertainty of renewable energy [J]. Electric Power, 2021, 54(4):119-129+140.
- [9] 葛少云,刘静仪,刘洪,等. 需求响应机制下含建筑虚拟储能的能源站经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4):35-47.  
GE Shaoyun, LIU Jingyi, LIU Hong, et al. Economic dispatch of energy station with building virtual energy storage in demand response mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4):35-47.
- [10] 宋阳阳,王艳松,衣京波. 计及需求侧响应和热/电耦合的微网能源优化规划[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3469-3476.  
SONG Yangyang, WANG Yansong, YI Jingbo. Micro-grid energy source optimization planning considering demand side response and thermo-electrical coupling [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3469-3476.
- [11] 吴勇,吕林,许立雄,等. 考虑电/热/气耦合需求响应的多能微网多种储能容量综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16):1-10.  
WU Yong, LV Lin, XU Lixiong, et al. Optimized allocation of various energy storage capacities in a multi-energy microgrid considering electrical/thermal/gas coupling demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16):1-10.
- [12] 徐笋,孙宏斌,郭庆来. 综合需求响应研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24):7194-7205+7446.  
XU Zhong, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24):7194-7205+7446.
- [13] 杨经纬,张宁,王毅,等. 面向可再生能源消纳的多能源系统:述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):11-24.
- [14] 徐晨博,薛友,林紫茵,等. 计及可转移负荷的电—气综合能源系统多目标优化[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3):13-23.  
XU Chenbo, XUE You, LIN Zhiyan, et al. Multi-objective optimization of an integrated electricity-gas energy system considering transferable loads[J]. Journal of E-

- lectric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 13-23.
- [15] 马艳, 郭星辰, 陈汝科, 等. 基于多主体收益的电-气综合能源系统协调规划研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(2): 1-6.  
MA Yan, GUO Xingchen, CHEN Ruke, et al. Coordinated planning of electricity-gas integrated energy system considering multi-agent profit[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 1-6.
- [16] 孙鹏, 滕云, 冷欧阳, 等. 考虑供热系统多重热惯性的电热联合系统协调优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6059-6071.  
SUN Peng, TENG Yun, LENG Ouyang, et al. Coordinated optimization of combined heat and power systems considering multiple thermal inertia of heating system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6059-6071.
- [17] 陈厚合, 李泽宁, 靳小龙, 等. 集成智能楼宇的主动配电网建模及优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6550-6563.  
CHEN Houhe, LI Zening, JIN Xiaolong, et al. Modeling and optimization of active distribution network with integrated smart buildings[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6550-6563.
- [18] WU C, GU W, JIANG P, et al. Combined economic dispatch considering the time-delay of district heating network and multi-regional indoor temperature control [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 118-127.
- [19] 黄景光, 陈波, 林湘宁, 等. 基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 162-168.  
HUANG Jingguang, CHEN Bo, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimal operation of islanded microgrid based on crow search algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 162-168.
- [20] 孙强, 谢典, 聂青云, 等. 含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 79-88.  
SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load [J]. Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.
- [21] 尚敬福, 马克睿, 花志浩, 等. 计及碳排放的综合能源系统优化调度及仿真实现[J]. 供用电, 2021, 38(11): 77-84.  
SHANG Jingfu, MA Kerui, HUA Zhihao, et al. Optimal scheduling and simulation of integrated energy system considering carbon emission[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(11): 77-84.