

文章编号: 2095-2163(2022)07-0134-08

中图分类号: TM732

文献标志码: A

基于碳排放与需求响应的园区 IES 双层优化调度

代帅帅, 高岩

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 以往的综合能源系统供需侧管理研究,几乎完全忽略了电转气的余热回收和用户对天然气的灵活需求。为提高系统整体能源利用率,降低系统日运行成本和用户日用能成本,本文结合可再生能源和电、热、天然气能源的生产、转换以及储能设备,构建了考虑碳排放和需求响应的园区综合能源系统双层优化模型。利用对偶理论、KKT 条件及 Big-M 法,将下层模型转换为上层模型的线性约束条件后求解。模型以系统是否考虑热电联产机组、改进后电转气技术、用户需求响应等,分成不同场景进行实验分析。仿真结果表明,基于电、热、气等能源设备协同供能作用下,需求响应的参与,降低了系统 6.7% 的日运行成本、用户 10.7% 的日用能成本及 5.7% 的日碳排放成本。

关键词: 综合能源系统优化; 碳排放; 需求响应; 电转气余热回收; KKT 条件

Bi-level optimal scheduling of integrated energy systems based on carbon emissions and demand response

DAI Shuashuai, GAO Yan

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] Previous research on supply and demand management of integrated energy systems have almost completely ignored the waste heat recovery from power to gas and the flexible demand for natural gas by users. To improve the overall energy utilization of the system, reduce the daily operating cost of the system and the daily energy cost of users, a bi-level optimization model of the integrated energy system of the park is constructed in this paper, considering carbon emission and demand response by combining renewable energy and electricity, heat and natural gas energy production, conversion, and energy storage devices. The lower model is solved after converting the upper model into a linear constraint using pairwise theory, KKT condition and Big-M method. The model is divided into different scenarios for experimental analysis based on whether the system considers CHP units, improved power-to-gas technology, and user demand response. The simulation results show that the participation of demand response reduces the daily operating cost of the system by 6.7%, the daily energy cost of the customer by 10.7% and the daily carbon emission cost of the customer by 5.7% based on the synergistic energy supply of electricity, heat and gas.

[Key words] integrated energy system optimization; carbon emissions; demand response; power-to-gas waste heat recovery; KKT conditions

0 引言

化石燃料的快速枯竭和环境污染的加剧,使得以清洁和可再生能源为基础的综合能源系统(Integrated Energy System, IES)更加适用。IES 是一种高效、低碳、优化规划与调度的能源供应系统,其可根据不同时段能源价格差异,选择其它能源等质转换来满足用户多种能源需求^[1],显著提高了系统能源利用率和运行经济性。

目前,国内外学者对 IES 的深入研究已取得一定成果。其中,文献[2]基于需求响应(Demand response, DR)提出一种多区域 IES 实时定价与优化调度策略,该

策略降低了电负荷消耗和碳排放。文献[3]中提出一种新型的冷、热、电多储能相结合的分布式 IES,通过优化系统配置,使能源损耗接近于 0。文献[4]针对电、热、气的协同作用,提出一种并网式 IES。系统利用沼气-太阳能-风能的互补性,有效地降低了 CO₂ 排放和能源损耗。文献[5]构建了一个可替代的热电一体化能源系统,以综合能源碳价格作为优化目标,使系统总生产成本和碳排放成本达到最小,碳排放成本在此指 IES 与用户因消耗天然气排放碳类污染物需向相关部门交付的环保成本。文献[6]研究了电、热、冷等多能互补分布式能源系统规划问题,所建模型可使系统低碳运行,并提高可再生能源利用率。文献[7-8]均将电

基金项目: 国家自然科学基金(72071130)。

作者简介: 代帅帅(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统优化运行;高岩(1962-),男,博士,教授,主要研究方向:智能电网实时定价、综合能源系统优化运行。

通讯作者: 高岩 Email: guoyan@usst.edu.cn

收稿日期: 2022-01-12

转气(Power to Gas,P2G)技术引入 IES 中,降低了 CO₂ 排放和天然气系统运行成本。文献[9]提出一种基于改进谱聚类方法的电-氢-气-热一体化 IES 随机优化调度策略,有效解决了 P2G 产气效率低以及负荷不确定性问题,实现多能源之间的协同作用。文献[10]采用随机场景法和鲁棒优化法对购能价格、风光出力 and 综合需求响应等多重不确定性进行建模,降低了系统运行成本,实现经济性与鲁棒性的协调优化。

IES 通过控制实时定价或分时定价,来促进和调动用户参与需求响应,实现真正意义上的削峰填谷。文献[11]建立了考虑需求响应的双层规划模型,来协调电力市场主从层次关系,提高了社会总福利,但上层模型忽略了供应商发电时的环保成本。文献[12]提出一种综合考虑电源侧与负荷侧特性的双层互动调度策略,该策略降低了负荷峰谷差,提高了电力系统运行的经济性和调节能力。文献[13]构建了以设计峰谷分时电、热价为依托的综合型价格需求响应模型,通过价格激励引导用户合理用能,有效提高了系统净收益。文献[14]建立了基于电价的用户需求响应和基于激励的热负荷需求响应模型,降低了电、热负荷峰谷差,提高了能源整体利用率。

综上所述,文献[3-6]中各系统内用户均未参与需求响应,以此降低能源消耗和系统运行成本。但文献[7-9]均未对 P2G 产生的过剩热能回收再

利用,造成了资源浪费。文献[12-14]未考虑系统耗气造成的碳排放成本,而碳排放成本的引入,可有效减少系统 CO₂ 排放量和天然气消耗量。此外,IES 的诸多研究领域中大都以用户电、热负荷为研究主体,分析需求响应或者碳排放对系统运行稳定性及其经济性的影响,很少将两者综合考虑,同时也忽略了用户对天然气使用的灵活性。为此,本文以用户电、热、气需求为研究对象,建立了考虑碳排放和需求响应的园区 IES 双层优化调度模型。针对双层模型,本文将采用对偶理论、KKT 条件、Big-M 法把下层模型转换为上层目标函数的线性约束条件后求解。通过仿真实验,验证 IES 中所建立模型的经济性、环保性。

1 园区综合能源系统建模

IES 内包含风电机组(Wind Turbine,WT)、蝶式斯特林光热系统(Disc-type Stirling photothermal system, DSPS)、燃气锅炉(Gas boiler,GB)、热电联产(Combined Heat and Power, CHP)机组、电锅炉(Electric boiler,EB)、P2G、储电池(Battery Storage,BS)、蓄热罐(Heat storage tank,HST)及储气罐(Gas Storage Tank,GST)等能源生产、存储和转换设备;系统仅考虑与电网交互(Grid Interactions,GI)以及用户电、热、气负荷的需求响应^[15-16],其运行结构如图 1 所示。

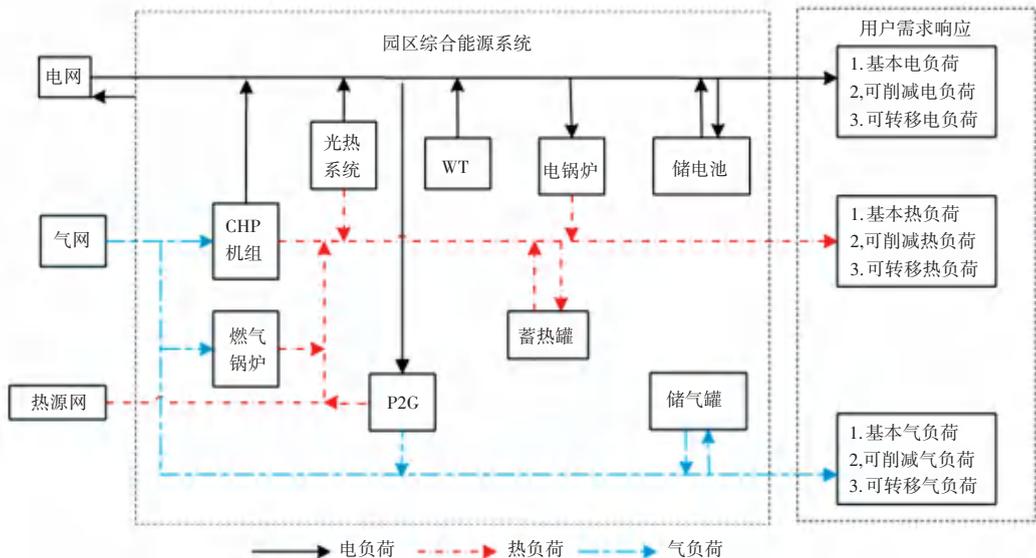


图 1 园区 IES 结构图

Fig. 1 Structure diagram of IES in the park

1.1 能源生产-转换设备模型

1.1.1 蝶式斯特林光热系统模型

DSPS 是一种具备高效发电、产热的清洁能源设备,且其产能成本较低,近年来在各个 IES 内受到广

泛使用。

$$P_{DSPS,h,t} = \sigma_{h/e} P_{DSPS,t} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{DSPS,t} \leq P_{DSPS,t}^{\max}$$

式中, $P_{DSPS,t}$ 、 $P_{DSPS,h,t}$ 为 DSPS 在 t 时刻电、热能输出

功率; $\sigma_{h/e}$ 为 DSPS 内热电比值; $P_{DSPS,t}^{\max}$ 为 t 时刻 DSPS 最大预测发电功率。

1.1.2 风电机组模型

风能属于可再生资源,且中国风力资源丰富,利用风力产电可有效降低化石能源消耗和环境污染度^[17]。

$$P_{WT,t} = \begin{cases} 0, & v < v_{in}, v > v_{out} \\ \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} P_{We}, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_{We}, & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{WT,t}$ 为风电出力; v 为实际风速; v_{in} 、 v_{out} 为输入输出风速; P_{We} 为风电装机容量; v_r 为额定风速。

1.1.3 CHP 机组模型

CHP 机组是由燃气轮机和余热锅炉组成,通过消耗天然气驱动涡轮叶片做功发电,排出的高温余热烟气经余热锅炉为用户提供热能。

$$\begin{aligned} P_{CHP,e,t} &= \eta_{CHP,e} P_{CHP,g,t} \\ P_{CHP,h,t} &= \alpha P_{CHP,e,t} \\ 0 &\leq P_{CHP,e,t} \leq P_{CHP,e}^{rate} \end{aligned} \quad (3)$$

$$R_{CHP,e}^{\min} \Delta t \leq P_{CHP,e,t} - P_{CHP,e,t-1} \leq R_{CHP,e}^{\max} \Delta t$$

式中, $P_{CHP,e,t}$ 、 $P_{CHP,h,t}$ 为 t 时刻 CHP 发电、产热功率; $P_{CHP,g,t}$ 为 t 时刻 CHP 燃气功率; $\eta_{CHP,e}$ 为 CHP 发电效率; α 为 CHP 的热电比,本文取值 1.2; $P_{CHP,e}^{rate}$ 为 CHP 发电额定功率; $R_{CHP,e}^{\max}$ 、 $R_{CHP,e}^{\min}$ 为 CHP 爬坡速率的上、下限。

1.1.4 GB 模型

GB 是 IES 内以天然气为燃料的主要热源设备,其产热性能高。

$$\begin{aligned} P_{GB,h,t} &= \eta_{GB,h} P_{GB,g,t} \\ 0 &\leq P_{GB,h,t} \leq P_{GB,h,rate} \end{aligned} \quad (4)$$

$$-R_{GB,e,dn} \Delta t \leq P_{GB,h,t} - P_{GB,h,t-1} \leq R_{GB,h,up} \Delta t$$

式中, $P_{GB,h,t}$ 、 $P_{GB,g,t}$ 为 t 时刻 GB 产热、燃气功率; $\eta_{GB,h}$ 为 GB 产热效率; $P_{GB,h,rate}$ 为 GB 产热额定功率; $R_{GB,h,up}$ 、 $R_{GB,h,dn}$ 为 GB 爬坡速率的上、下限。

1.1.5 EB 模型

EB 主要通过消耗电能高效转化为热能的热源设备。

$$\begin{aligned} P_{EB,h,t} &= \eta_{EB,h} P_{EB,e,t} \\ 0 &\leq P_{EB,h,t} \leq P_{EB,h,rate} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $P_{EB,h,t}$ 、 $P_{EB,e,t}$ 为 t 时刻 EB 产热,耗电功率; $\eta_{EB,h}$ 为 EB 电转热效率; $P_{EB,h,rate}$ 为 EB 产热额定功率。

1.1.6 改进后 P2G 模型

P2G 分为电制氢和氢制甲烷两部分,后者在催化

剂作用下具有放热反应。相较于传统 P2G 技术,为防止热污染和资源浪费,本文将对该反应热回收再利用。改进后 P2G 运行过程如图 2 所示,模型如下:

$$\begin{aligned} P_{P2G,h,t} &= P_{P2G,e,t} \eta_{P2G,h} \\ P_{P2G,g,t} &= P_{P2G,e,t} \eta_{P2G,g} \\ P_{P2G,e}^{\min} &\leq P_{P2G,e,t} \leq P_{P2G,e}^{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

$$R_{P2G,e}^{\min} \Delta t \leq P_{P2G,e,t} - P_{P2G,e,t-1} \leq R_{P2G,e}^{\max} \Delta t$$

式中, $P_{P2G,e,t}$ 、 $P_{P2G,h,t}$ 、 $P_{P2G,g,t}$ 为 t 时刻 P2G 耗电、产热、产气功率; $\eta_{P2G,h}$ 、 $\eta_{P2G,g}$ 为 P2G 产热、产气效率; $P_{P2G,e}^{\max}$ 、 $P_{P2G,e}^{\min}$ 、 $R_{P2G,e}^{\max}$ 、 $R_{P2G,e}^{\min}$ 为 P2G 耗电功率与爬坡速率的上、下限。

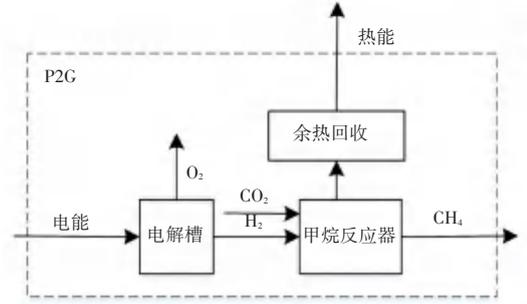


图 2 改进后 P2G 运行图

Fig. 2 Improved P2G operating diagram

1.2 储能设备模型

IES 储能设备由蓄电池、蓄热罐、储气罐构成。

1.2.1 储能设备容量约束

$$E_{f,t+1} = (1 - \delta_f) E_{f,t} + [P_{f,t}^{ch} \eta_f^{ch} - (P_{f,t}^{dc} / \eta_f^{dc})] \quad (7)$$

式中, $E_{f,t+1}$ 、 $E_{f,t}$ 为 $t+1$ 和 t 时刻储能设备的容量状态; δ_f 为储能设备能源损耗系数; $P_{f,t}^{ch}$ 、 $P_{f,t}^{dc}$ 为储能设备充放电功率; η_f^{ch} 、 η_f^{dc} 为储能设备充放电效率。

1.2.2 储能设备存储量约束

$$\begin{aligned} S_{f,\min} E_{f,\max} &\leq E_{f,t} \leq S_{f,\max} E_{f,\max} \\ E_{f,0} &= S_{f,0} E_{f,\max} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $E_{f,\max}$ 为储能设备最大容量; $S_{f,\max}$ 、 $S_{f,\min}$ 为储能设备存储能力上、下限; $E_{f,0}$ 为储能设备初始时刻存储量; $S_{f,0}$ 为储能设备初始时刻的存储能力。

1.2.3 储能设备起止容量平衡约束

$$E_f^T = E_f^0 \quad (9)$$

式中, E_f^0 、 E_f^T 为储能设备初始和结束时刻的容量状态, T 取值为 24 h, 周期为一天。

1.2.4 储能设备充放电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{f,t}^{ch} \leq u_{f,t}^{ch} P_{f,dc}^{\max} \\ 0 \leq P_{f,t}^{dc} \leq u_{f,t}^{dc} P_{f,dc}^{\max} \\ 0 \leq u_{f,t}^{ch} + u_{f,t}^{dc} \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $u_{f,t}^{ch}, u_{f,t}^{dc}$ 为储能设备处于充放能状态, 且 $u_{f,t}^{ch}, u_{f,t}^{dc} \in \{0, 1\}$ 。

2 双层优化调度模型

以往文献中 IES 双层优化模型中, 上层模型主要规划 IES 日运行成本最优问题^[18-19], 下层模型负责求解用户日用能成本最小化问题。而本文与之区别是: 上层同时考虑了系统转换能时的碳排放成本和激励用户参与需求响应的补偿成本; 下层计入了用户使用天然气时的碳排放成本。

2.1 上层模型目标函数

上层模型目标函数以 IES 运行成本最小为目标, 由 IES 从外网购买热、天然气能成本、电能交互成本、各产能设备维护成本、碳排放成本以及激励用户参与需求响应的补偿成本等构成。

$$\min C_G = C_{G-hgb} + C_{G-mian} + C_{G-EX} - C_{G-CO_2} - C_{ehg-re} \quad (11)$$

式中, C_{G-hgb} 为 IES 向外网购买热、气能成本; C_{G-mian} 为系统运行维护成本; C_{G-GI} 为 IES 与电网交互成本; C_{G-CO_2} 为系统燃气时碳排放成本; C_{ehg-re} 为 IES 对用户参与需求响应的补偿成本。

(1) IES 向外网购热、气成本计算公式:

$$C_{G-hgb} = \sum_{t=1}^T (p_{Chb,t} P_{Ghb,t} + p_{Ggb,t} P_{Ggb,t})$$

式中, $p_{Ghb,t}, p_{Ggb,t}$ 为 IES 向外网购买热、气单价, $P_{Ggb,t}, P_{Ghb,t}$ 为 IES 内热、气能购买量。

(2) IES 运行维护成本计算公式:

$$C_{G-mian} = \sum_{t=1}^T [c_{DSPS,t} P_{DSPS,t} + c_{WT} P_{WT,t} + c_{GB} P_{GB,h,t} + c_{EB} P_{EB,h,t} + c_{CHP} P_{CHP,e,t} + c_{P2G} P_{P2G,g,t} + c_{BS} (P_{BS,t}^{ch} + P_{BS,t}^{dc}) + c_{HST} (P_{HST,t}^{ch} + P_{HST,t}^{dc}) + c_{GST} (P_{GST,t}^{ch} + P_{GST,t}^{dc})]$$

式中, $c_{WT}, c_{DSPS}, c_{GB}, c_{CHP}, c_{P2G}, c_{EB}$ 为 IES 内 WT 机组、DSPS、GB、CHP、EB 等设备运行维护成本系数; $P_{P2G,g,t}$ 为 t 时刻 P2G 产气功率; c_{BS}, c_{HST}, c_{GST} 为 BS、HST、GST 运行维护成本系数。

(3) IES 与电网间的交互成本计算公式:

$$C_{G-EX} = \sum_{t=1}^T \left[\frac{P_{Ges,t} + P_{Geb,t}}{2} (P_{Geb,t} - P_{Ges,t}) + \frac{P_{Geb,t} - P_{Ges,t}}{2} | (P_{Geb,t} - P_{Ges,t}) | \right]$$

式中, $P_{Geb,t}, P_{Ges,t}$ 为 IES 向电网购、售电价格, $P_{Geb,t}, P_{Ges,t}$ 为 IES 向电网购售电功率。

(4) IES 的碳排放成本计算公式:

$$C_{G-CO_2} = p_c \sum_{t=1}^T \beta_g (P_{CHP,g,t} + P_{GB,g,t} - P_{P2G,g,t})$$

式中, p_c 为碳税价格 (0.3 元/ Kg), β_g 为燃气发电、产热时的等效碳排放系数 (0.47 Kg/kW)。

(5) IES 对用户需求响应补偿成本计算公式^[20-21]:

$$C_{ehg-re} = \sum_{t=1}^T (p_{ecut-re} P_{ecut,t} + p_{etroutr-re} P_{etroutr,t} + p_{hcut-re} P_{hcut,t} + p_{htroutr-re} P_{htroutr,t} + p_{gcut-re} P_{gcut,t} + p_{gtroutr-re} P_{gtroutr,t}) \quad (12)$$

式中, $p_{ecut-re}, p_{hcut-re}, p_{gcut-re}, p_{etroutr-re}, p_{htroutr-re}, p_{gtroutr-re}$ 为用户参与电、热、气负荷可削减、可转出响应时的补偿收益系数; $P_{ecut,t}, P_{hcut,t}, P_{gcut,t}$ 和 $P_{etroutr,t}, P_{htroutr,t}, P_{gtroutr,t}$ 为 t 时刻用户可削减、可转出的电、热、气负荷量。

2.2 上层模型约束条件

(1) 电负荷功率平衡约束:

$$P_{Geb,t} - P_{Ges,t} + P_{DSPS,t} + P_{WT,t} + P_{CHP,e,t} - P_{EB,e,t} - P_{P2G,e,t} = P_{eL,t} + P_{BS,t}^{ch} - P_{BS,t}^{dc} \quad (13)$$

式中, $P_{BS,t}^{ch}, P_{BS,t}^{dc}$ 为 t 时刻储能电池充、放电功率。

(2) 热负荷功率平衡约束:

$$P_{Ghb,t} + P_{CHP,h,t} + P_{GB,h,t} + P_{DSPS,h,t} + P_{EB,h,t} + P_{P2G,h,t} = P_{hL,t} + P_{HST,t}^{ch} - P_{HST,t}^{dc} \quad (14)$$

式中, $P_{CHP,h,t}, P_{GB,h,t}, P_{HST,t}^{ch}, P_{HST,t}^{dc}$ 为 t 时刻 CHP、GB 输出热功率以及蓄热罐充、放热功率。

(3) 天然气功率平衡约束:

$$P_{Ggb,t} - P_{CHP,g,t} - P_{GB,g,t} + P_{P2G,g,t} = P_{gL,t} + P_{GST,t}^{ch} - P_{GST,t}^{dc} \quad (15)$$

式中, $P_{CHP,g,t}, P_{GB,g,t}, P_{GST,t}^{ch}, P_{GST,t}^{dc}$ 为 t 时刻 CHP、GB 内天然气输入功率和储气罐的充、放气功率。

(4) 电网交互功率约束:

$$P_{emin} \leq P_{Geb,t} \leq P_{emax} \quad (16)$$

式中, P_{emax}, P_{emin} 为 IES 与电网交互功率上、下限。

2.3 下层模型目标函数

下层模型目标函数以用户综合用能成本最低为最优化目标, 其包含用户从 IES 购入电、热、天然气等综合能源成本, 用户参与需求响应获得 IES 补偿收益以及用户使用天然气产生的碳排放成本。

$$\min C_U = C_{U-ehgb} - C_{ehg-re} + C_{Ugas-CO_2} \quad (17)$$

式中, C_{U-ehgb} 为用户从 IES 购能成本; C_{ehg-re} 为用户参与需求响应获得的补偿收益; C_{Ugasc} 为用户耗气时的碳排放成本。

(1) 用户向 IES 购能成本:

$$C_{U-ehg} = \sum_{t=1}^T (p_{uhb,t} P_{hL,t} + p_{ugb,t} P_{gL,t} + p_{ueb,t} P_{eL,t}) \quad (18)$$

式中, $p_{ueb,t}, p_{uhb,t}, p_{ugb,t}$ 为用户购电、热、气单价。

(2) 用户耗气时碳排放成本:

$$C_{U_{gas-CO_2}} = P_c \sum_{t=1}^T \beta_g P_{gL,t} \quad (19)$$

2.4 下层模型约束条件

IES 内用户需求负荷分为基本负荷(不因价格变化而变化)和可响应负荷两种类型。可响应负荷具有较强的灵活性,其包括可削减和可转移负荷。根据系统能源供应情况,可灵活调整用能负荷量及用能时段^[22]。电、热、气负荷需求响应模型如下:

$$0 \leq P_{xcut,t} \leq P_{xcut}^{max} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{xtrin,t} \leq P_{xtrin}^{max} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{xtout,t} \leq P_{xtout}^{max} \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{xtrin,t} = \sum_{t=1}^T P_{xtout,t} \quad (23)$$

$$P_{xL,t} = P_{xLj,t} - P_{xcut,t} + P_{xtrin,t} - P_{xtout,t} \quad (24)$$

式中, $x \in \{ele, heat, gas\}$; P_{xcut}^{max} 、 P_{xtrin}^{max} 、 P_{xtout}^{max} 为 t 时刻用户可接受的电、热、气最大可削减、可转入以及可转出负荷量; $P_{xLoad,t}$ 为 t 时刻用户需求响应后电、热、气负荷消耗量; $P_{xLj,t}$ 为 t 时刻用户电、热、气基本负荷消耗量。

3 仿真实验

针对上述双层混合整数规划问题,根据对偶理论、KKT 条件和 Big-M 法,将下层模型转换为上层模型的线性约束条件,最后利用 MATLAB-YALMIP 求解器对单目标函数求解。

3.1 场景描述

为验证所建模型的经济性和环保性,本文将分为 4 个场景,对不同结构组成的园区 IES 优化调度策略进行探讨分析研究,具体分类见表 1。

表 1 场景分类

Tab. 1 Scene classification

场景	DR	CHP	P2G	GB+DSPS+ WT+EB	储能系统		
					电	热	气
1	×	×	×	√	√	√	√
2	×	√	×	√	√	√	√
3	×	√	√	√	√	√	√
4	√	√	√	√	√	√	√

注:“√”表示系统运行中含有该设备,而“×”则表示不含有该设备。

3.2 日负荷及可再生能源日出力功率预测

根据系统各设备模型及其参数,对可再生能源日出力与电、热、气负荷需求量进行预测,(本文暂不考虑预测存在的细微误差),预测曲线如图 3 所示。

3.3 能源交易价格与需求响应策略

园区 IES 能源交易价格采用分时定价,详见表 2。

用户参与需求响应时,其各时段最大负荷削减量占该时段负荷消耗量的 5%;最大负荷转移量占该时段负荷消耗量的 8%。负荷可转移时段不同于可削减时段;前者为 5:00-22:00,而后者为全天 24 h^[19]。IES 为鼓励用户参与需求响应,将给予一定的经济补偿。系统内电负荷在每时段可削减、可转出补偿成本系数分别为 0.6 元/kW 和 0.3 元/kW;热负荷在每时段可削减、可转出补偿成本系数分别为 0.3 元/kW 和 0.15 元/kW;气负荷在每时段可削减、可转出补偿成本系数分别为 0.2 元/kW 和 0.1 元/kW^[22]。

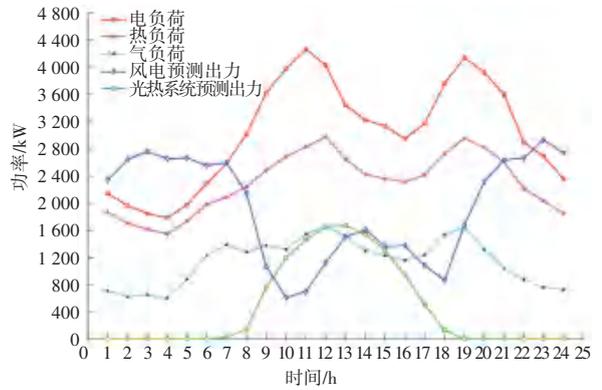


图 3 日负荷及可再生能源日出力功率预测曲线

Fig. 3 Daily load and renewable energy sunrise power prediction curve

表 2 能源交易价格(单位:元/kW)

Tab. 2 Energy transaction price (Unit: Yuan/kW)

交易主体	交易时段		
	峰	平	谷
购售能	9:00~13:00	14:00~17:00	0:00~8:00
	18:00~21:00		22:00~24:00
IES 售电	1.1	0.64	0.3
IES 购电	1.0	0.58	0.25
用户购电	1.27	0.8	0.4
IES 购热	0.85	0.6	0.33
用户购热	0.98	0.7	0.38
IES 购气	0.41	0.3	0.21
用户购气	0.52	0.4	0.31

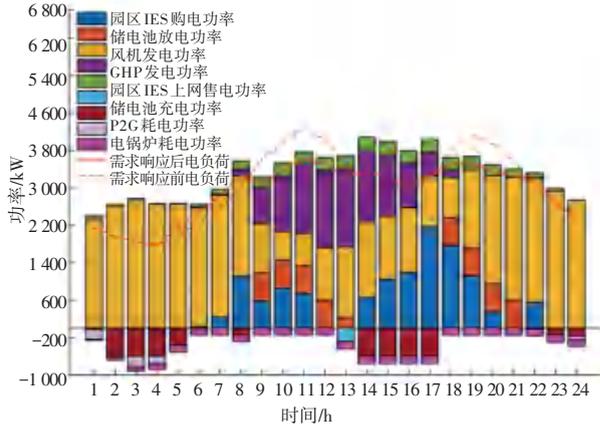
3.4 系统优化调度结果分析

本文主要根据场景 4 中 IES 内各负荷供需平衡图,对系统优化调度结果进行分析,如图 4。

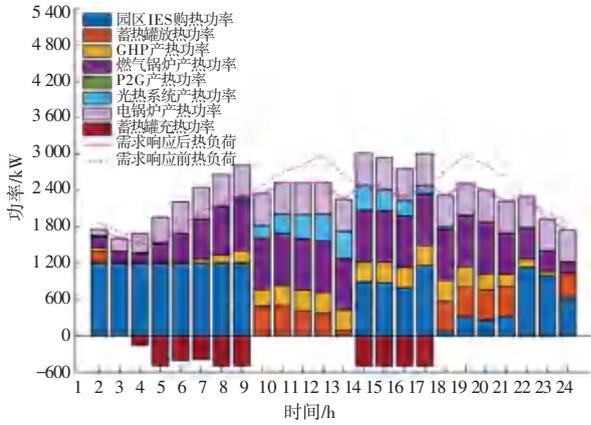
场景 4 相较于其它场景,IES 综合考虑了 CHP 机组、P2G 技术的使用以及用户需求响应的参与。

由图 4(a)可见,1:00~4:00 和 23:00~24:00 是电能需求低谷时段,用户不参与电负荷响应,此时风电机组产电过剩。为减少能源浪费,将多余的电能分别输送给 P2G、EB 及 BS,用于生产天然气、热能或者进行电能存储。9:00~13:00 和 18:00~21:00

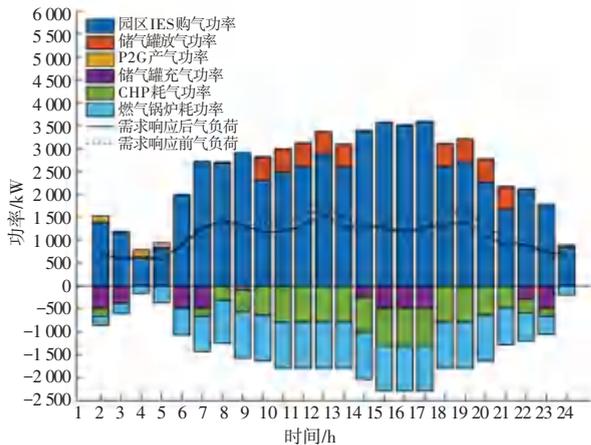
是电能需求高峰时段,参与电负荷响应后的用户用电量明显减少。在 CHP、风光发电及储电池放电的协作配合下,系统供电压力减弱;此时段售电价格相对较高,可将多余电能上网售卖获利。14:00~17:00是电价平峰期,用户用电增加。为降低 IES 经济成本,系统从外网购电满足其需求,并对储电池充电,保持系统供需平衡^[23-24]。



(a) 电负荷供需平衡图



(b) 热负荷供需平衡图



(c) 气负荷供需平衡图

图4 场景4优化调度结果

Fig. 4 Scenario 4 optimized scheduling results

由图 4(b)得,在 1:00~2:00 和 23:00~24:00 时段,IES 向热网购热能力受限,P2G 产热不足;利用 EB、GB 产热效率高的特性,配合蓄热罐放热来满足用户热能需求。在 3:00~8:00 时段,EB、GB 产热明显增多;CHP、PSDS 也启动产热,多余热能输送给蓄热罐。9:00~13:00 和 18:00~21:00 时段由于用户热负荷响应的参与,热能需求显著降低,第二时段光热系统停止供热,不足部分由蓄热罐放热满足,既可提高能源利用率;也能降低 IES 外网购热成本。14:00~17:00 是热价平峰期,外网低价购热对蓄热罐充热。

由图 4(c)得,用户参与需求响应使得天然气在日周期内消耗量大大减少。1:00~4:00 时段,P2G 吸收 CO₂ 合成天然气,降低 IES 外网购气量;9:00~13:00 和 18:00~21:00 时段,为维持系统稳定,储气罐放气加以 IES 外网购气共同满足 CHP、GB 产热耗气需求;在气价低谷和平峰期,IES 内用户气能需求量相对较低,该时段持续对储气罐充气以维持储能系统性能稳定。

3.5 电、热、气负荷需求响应分析

由图 5 可知,9:00~13:00 和 18:00~21:00 为用能高峰时段,由于购能价格较高,用户均选择相应的转出和削减,以降低用能需求^[25]。其中 4:00~9:00 和 22:00~24:00 以及 14:00~17:00 分别是能源价格低谷和平价时段,用户用能需求均上升,可见负荷需求量总体呈现由用能高峰时段向低谷时段转移。由图可知,可削减和可转出负荷量明显高于可转入负荷量,用户能源总需求量减少,节约了能源消耗。

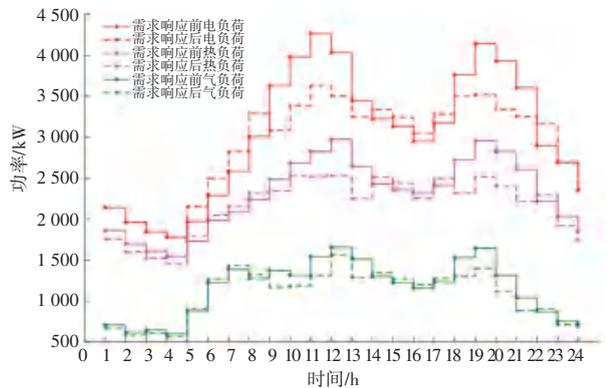


图5 需求响应前后电热气负荷需求对比图

Fig. 5 Comparison of electric heating and gas load demand before and after demand response

通过综合分析可得,电、热、气负荷参与需求响应后,在分时电价、热价、气价及系统补偿激励的引导下,负荷峰谷差显著变小,真正意义上实现了削峰填谷。

3.6 不同场景下经济成本分析

园区 IES 内不同场景优化后的各项成本,以及总运行成本见表 3。由于用户在场景 1、2、3 下的购能成本、补偿收益以及总用能成本相同,本文仅以场景 1、4 作主要对比分析(见表 4)。

表 3 园区 IES 运行成本
Tab. 3 Operating cost of IES in the park 元

场景	经济成本	维护成本	碳排放成本	补偿成本	总运行成本
1	43 994.5	2 637	2 719.5	0	49 351
2	41 300.3	2 693.4	4 234.3	0	48 228
3	41 155.8	2 739.1	4 122.1	0	48 107
4	34 038.2	2 711.6	4 106.6	4 021.6	44 878

由表 3 中场景 1、2 的经济分析结果可知,IES 增加 CHP 机组为用户供能,可节约 6%的购能经济成本,增加 2.1%的设备维护成本,整体上节约 2.3%的日运行成本;由场景 2、3 的经济分析结果可知,IES 在前者的基础上增加 P2G 设备,节约 2.6%的日碳排放成本和 0.3%的日运行成本;由场景 3、4 的经济分析结果可知,用户参与负荷需求响应,可为系统节省 17.3%的购能经济成本、1%的设备维护成本以及 6.7%的日运行成本。由此可见,CHP、P2G 以及 DR 的共同参与,显著降低了 IES 日运行总成本。其中,IES 内碳排放成本的降低,体现了 CO₂排放量的减少。

表 4 用户用能成本
Tab. 4 Energy cost for users 元

场景	购能成本	补偿收益	碳排放成本	总用能成本
1	114 950	0	3 892.2	118 842.2
4	106 440	4 021.6	3 668.5	106 086.9

由表 4 中场景 1、4 的经济分析结果可知,在电热气协同优化的作用下,需求响应的参与降低了用户 7.4%的购能成本、5.7%的碳排放成本以及 10.7%的日用能成本。因此,用户可积极参与 IES 制定的能源需求响应策略。综上所述,本文所建立的双层模型有效降低了 IES 日运行成本和用户日用能成本,且减少了系统产能和用户用能产生的碳排放量,具有一定的经济性和环保性。

4 结束语

本文根据能源生产、转换、存储等设备特性,提出了计及电、热、气负荷需求响应的园区 IES 优化调度运行策略。通过仿真实验分析与对比,得到以下主要结论:

(1) 实施电、热、气能需求响应可将负荷从用能

高峰期转移至低谷期,起到削峰填谷的作用,这使得用户总能源消耗量和系统外网购能成本均有所减少。

(2) IES 在传统 P2G 技术的基础上,增加余热回收装置,降低了热能的污染和浪费。电锅炉、燃气锅炉、CHP 机组、光热系统以及风电机组之间的协作供能,有效地提高整体能源利用率和保障系统的稳定运行。

(3) 对用户参与需求响应给予相应的经济补贴,不仅减少了用户天然气消耗时的碳排放量,还节省了日用能成本。

(4) 该双层模型降低了电、热能源的大规模消耗,改善了系统的灵活性,具有一定的经济性和环保性。

本文在这里仅研究了小型单一园区 IES 的优化调度运行策略。随着新型信息技术对电、气、冷、热等多种能源生产、转换、存储进行综合管理和协调优化的 IESs 研究和发展,可更加有效地提高能源利用率,降低各系统运行成本,减少环境污染。基于此,接下来将结合新型低碳能源、高效产能设备、不同优化策略对 IES 调度问题进一步深入研究。

参考文献

- [1] YANG DC, WANG M, YANG RQ, et al. Optimal dispatching of an energy system with integrated compressed air energy storage and demand response[J]. Energy, 2021, 234: 506-526.
- [2] YUAN GX, GAO Y, YE B. Optimal dispatching strategy and real-time pricing for multi-regional integrated energy systems based on demand response[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1424-1446.
- [3] LIU ZJ, GUO JC, WU D, et al. Two-phase collaborative optimization and operation strategy for a new distributed energy system that combines multi-energy storage for a nearly zero energy community[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 230(15): 113800.
- [4] WU T, BU SQ, WEI X, et al. Multitasking multi-objective operation optimization of integrated energy system considering biogas-solar-wind renewables[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113736.
- [5] ZHANG YJ, HAO JH, GE ZH, et al. Optimal clean heating mode of the integrated electricity and heat energy system considering the comprehensive energy-carbon price[J]. Energy, 2021, 231: 120919.
- [6] LIU CR, WANG HQ, TANG YF, et al. Optimization of a Multi-Energy Complementary Distributed Energy System Based on Comparisons of Two Genetic Optimization Algorithms[J]. Processes, 2021, 9(8): 1360-1388.
- [7] 李媛,冯昌森,文福拴,等. 含电动汽车和电转气的园区能源互联网能源定价与管理[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 1-10.
- [8] YANG BW. Multi-objective optimization of integrated gas-electricity energy system based on Improved multi-object cuckoo algorithm[J]. Energy Science and Engineering, 2021: 1-19.

- [9] WANG ZX, HU JJ, LIU BZ et al. Stochastic optimal dispatching strategy of electricity-hydrogen-gas-heat integrated energy system based on improved spectral clustering method [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126 (PA): 106495.
- [10] 马国真,林毓军,张泽亚,等. 计及源荷多重不确定性的综合能源系统鲁棒经济调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (20): 43-52.
- [11] YUAN GX, GAO Y, YE B et al. A bilevel programming approach for real-time pricing strategy of smart grid considering multi-microgrids connection [J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45 (7): 10572-10589.
- [12] 陈志杰,李凤婷,赵新利,等. 考虑源荷特性的双层互动优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (1): 135-141.
- [13] 吕振华,李强,韩华春,等. 计及源荷不确定性和多类储能响应的园区 IES 多目标优化调度模型[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36 (2): 40-50.
- [14] 李政洁,撒奥洋,周生奇,等. 计及综合需求响应的综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (21): 36-42.
- [15] XI Y F, FANG J K, CHEN Z, et al. Optimal coordination of flexible resources in the gas-heat-electricity integrated energy system [J]. Energy, 2021, 223: 119729.
- [16] ZHU DF, YANG B, LIU Q, et al. Energy trading in microgrids for synergies among electricity, hydrogen and heat networks [J]. Applied Energy, 2020, 272: 115225.
- [17] YE B, GAO Y, YUAN GX. Renewable energy investment study for electric power enterprise based on a time period with expected supply [J]. Enterprise Information Systems, 2021: 192364.
- [18] LU Z M, GAO Y, XU C. Sustainability evaluation of public-

- private partnership microgrid considering uncertainty and risk preference [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2021, 26: 100426.
- [19] 牟晨璐,丁涛,李立,等. 基于分层分布式调度的多园区服务商与综合能源供应商两级协调优化运行模型[J]. 电网技术, 2021, 25 (9): 1-14.
- [20] MA Z J, ZHENG Y P, MU C L, et al. Optimal trading strategy for integrated energy company based on integrated demand response considering load classifications [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021, 128: 106673.
- [21] LU Z M, GAO Y, XU C. Evaluation of energy management system for regional integrated energy system under interval type-2 hesitant fuzzy environment [J]. Energy, 2021, 222: 119860.
- [22] TAO L, GAO Y, CAO L, et al. Distributed real-time pricing for smart grid considering sparse constraints and integration of distributed energy and storage devices [J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2021, 34 (5): 1280-1293.
- [23] 陶莉,高岩,朱红波,等. 有可再生能源和电力存储设施并网的智能电网优化用电策略[J]. 中国管理科学, 2019, 27 (2): 150-157.
- [24] ZHU HB, GAO Y, HOU Y, et al. Real-time pricing considering different type of smart home appliances based on Markov decision process [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 107: 486-495.
- [25] WANG HJ, GAO Y. Real-time pricing method for smart grids based on complementarity problem. Journal of Modern Power [J]. Systems and Clean Energy, 2019, 7 (5): 1280-1293.

(上接第 133 页)

对加 Rot hamming 窗使用不同截止频率的低通滤波器,结果如图 6 所示,在 k 等于 1.4 时可等同于没有加入低通滤波器匹配率为 63%; k 大概在 0.7 时取得极值点,此时具有最佳匹配率 75%;随着 k 增大匹配率下降。综上可知,对加窗后的相位相关进行频域低通滤波可进一步提高图像匹配率。

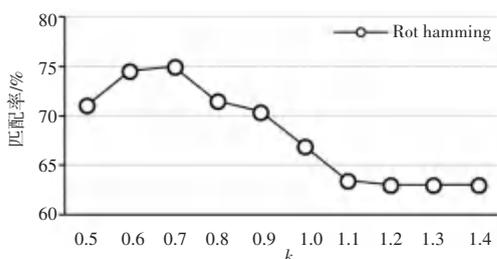


图 6 截止频率对匹配率影响

Fig. 6 Effect of cutoff frequency on matching rate

5 结束语

本文在基本相位相关的基础上,加入窗函数,通过增量型核回归的方法构造二维圆对称窗函数,并将其用于多谱段图像匹配。实验结果说明加窗的相位相关对多谱段图像匹配的有效性,并证明增量型核回归的方法构造二维圆对称窗函数的有效值。在

此基础上再对加窗的相位相关进行理想低通滤波处理,进一步提高了匹配率。本文的方法能有效降低频谱泄露和边缘效应对相位相关算法的影响,从而提高多谱段图像匹配的正确率。

由于 SAR 图像和光学图像存在较大的差异,所以匹配率并不高,针对通过以上方法不能匹配的多谱段图像,基于特征的方法具有更鲁棒、更灵活的特点,未来希望通过基于特征的算法进行匹配,以进一步提高匹配率。

参考文献

- [1] PAN C, ZHANG Z, YAN H, et al. Multisource data registration based on NURBS description of contours [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29 (2): 569-591.
- [2] ZITOVA B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. Image and vision computing, 2003, 21 (11): 977-1000.
- [3] KUGLIN C D. The phase correlation image alignment method [C]//Proc. Int. Conference Cybernetics Society, 1975: 163-165.
- [4] HUANG T S. Two-Dimensional Windows. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1972, 20 (1): 88-89.
- [5] LIU B, LIAO X. Image denoising and magnification via kernel fitting and modified SVD [C]//2009 Fifth International Conference on Information Assurance and Security. IEEE, 2009: 521-524.