

# 考虑不同控制策略下的多能互补 能源互联网优化调度

彭道刚<sup>1</sup>, 张孟然<sup>1</sup>, 沈丛奇<sup>2</sup>, 姚峻<sup>2</sup>, 张宇<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海明华电力技术工程有限公司, 上海 200090)

**摘要:**为提升多能互补能源互联网的高效经济运行, 考虑多能流设备之间的协同运行、约束条件及分时电价因素, 以经济、环保综合效益为多目标函数, 提出 3 种不同运行优化控制策略下的优化调度模型。文中对含风光发电单元、冷热电联供单元、储冷/热单元和储电单元的数学模型进行研究, 并利用自适应小生境遗传算法通过优化获得模型参数, 再根据二级对比原则, 基于模型对三种不同运行方式下的综合效益进行对比。最后将该系统调度优化模型应用于某产业园区夏季典型日中。仿真结果表明, 在并网售电状态下, 园区的综合效益达到最优。

**关键词:**多能互补能源互联网; 分时电价; 多能流; 协同运行; 优化调度

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.002 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2022)01-0017-12

## Optimal scheduling of multi-energy complementary energy internet considering different control strategies

PENG Daogang<sup>1</sup>, ZHANG Mengran<sup>1</sup>, SHEN Congqi<sup>2</sup>, YAO Jun<sup>2</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Minghua Electric Power Technology Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

**Abstract:** This paper takes the multi-energy complementary energy internet economic operation as the research purpose, considers the cooperative operation, constraints and time-of-use electricity price factors among multi-energy flow equipment, and takes the economic and environmental comprehensive benefits as the multi-objective function, and proposes three different operational optimization control strategies. In this paper, the mathematical model including wind and solar power generation unit, combined cooling, heating and power unit, cooling/heating unit and electricity storage unit is studied. The model parameters are obtained by optimization using the adaptive niche genetic algorithm. According to the second-level comparison principle, the comprehensive benefits under three different operation modes are compared based on the model. Finally, the system scheduling optimization model is applied to a typical summer day in an industrial park. The simulation results show that the comprehensive benefits of the park are optimal in the state of grid-connected electricity sales.

**Key words:** multi-energy coupling distributed energy internet; time-of-use power price; multi-energy flow; coordinated operation; optimal scheduling

收稿日期: 2018-12-01; 修回日期: 2019-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(71871160); 上海市“科技创新行动计划”社会发展领域项目(16DZ1202500); 上海市科学技术委员会工程技术研究中心项目(14DZ2251100)

通信作者: 彭道刚(1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事智能发电自动化、新能源微电网与能源互联网研究; E-mail: pengdaogang@126.com

随着互联网技术、可再生能源技术和数据通信技术不断地发展,一种融合了能源生产、运输、消费、分配的新型电网应运而生。该能源网络中集合了多种分布式能源形式(风、光、天然气)、余热利用单元、储电蓄能单元等。然而,能源多样化增加了系统的波动性,为改善这一影响,研究者提出了多能互补能源互联网。

能源互联网作为能源和互联网的融合,以风、光等可再生能源及互联网为核心,结合“源—网—荷—储”运营模式,实现各分布式能源协调运行及各能源之间的高效利用<sup>[1-2]</sup>。分布式能源互联网的优化调度从系统经济性、环保性出发,综合考虑区域内的负荷需求、各分布式能源形式的运行特性、运行优化等信息,确定各分布式能源的出力,使冷热电负荷在各分布式能源和储能单元之间实现最优分配。文献[3]提出一种基于组件动态团队形成并兼顾集中式控制与分布式控制优势的机制,协调单一的电能传输,导致其忽略了能源系统的冷热负荷调度优化需求;文献[4]提出的动态多能体系统,以不同用能形式为主要切入点,融合了一次能源设备优化模型的用能、供能的能量协调运行策略;文献[5]研究了包含多种能源形式的微电网系统的运行调度架构,考虑分时电价并根据能源系统的运行时段,执行不同的协调调度策略;文献[6]选择从优化设备本身模型及运行策略入手,采用双层算法进行设计优化,但目标函数的设定,没有全面的考虑环保与能效问题;文献[7-8]选择以燃料成本最小作为优化的目标函数;文献[9]主要以储能设备的充放电状态作为切入点,在满足储能设备本身约束的基础上,同时考虑供能电能质量及充放电深度等,通过采用 GA 算法求解供热工况下,综合效益成本最低的调度优化;文献[10-11]实例表明了集风、光/冷热电为一体的能源系统,比单一的冷热电经济效益要高;文献[12]从环境的污染及碳排放来实现联供系统的运行优化;文献[13]分析冷热电三联供(combined cooling, heating and power, CCHP)的运行策略,以经济性为目标,结合可再生能源的随即处理方法,只提出了详细的 CCHP 微网调度优化策略;文献[14]考虑了一种运行策略下多能协同系统的优越性。

综上所述,较多文献对含有可再生能源的分布式能源系统经济性展开了研究,尽管考虑了某种运行策略的系统经济性,但是这种运行优化并没有考虑能源系统实际所处的工作模式。鉴于此,本文根据分布式能源互联网各发电设备的运行特点和外部电网运行状况,考虑典型日用户侧需求及分时电价因素,针对多能互补能源互联网并网售电模式、并网不售电模式和离网模式,制定优化调度策略。在多能流约束条件下,建立多能互补能源互联网优化调度模型,利用自适应小生境遗传算法,对某园区多能互补能源互联网进行供需双侧优化调度。结合能源系统在不同运行策略下,各能源出力状况的综合效益,做出相关分析与比较。

## 1 多能互补分布式能源系统优化调度

### 1.1 多能互补分布式能源系统结构

多能互补能源互联网,充分体现了能源互联网“源—网—荷—储”的多元特性,“源”既可以是光、风等可再生能源,也可以是以天然气为燃料的冷热电三联供系统;“网”包括了电网、气网、热网;“荷”包括冷、热、电负荷;“储”包括储电、蓄冷、蓄热等。从供能范围来看,多能互补能源互联网主要满足商业、住宅、新型产业园区等城市功能区的冷、热、电需求。

本文研究的多能互补能源互联网能源结构如图 1 所示,由风光可再生能源发电单元、冷热电三联供单元、储能单元构成。冷热电三联供单元主要由动力设备、余热回收利用设备、调峰设备等组成,主体结构如图 2 所示。

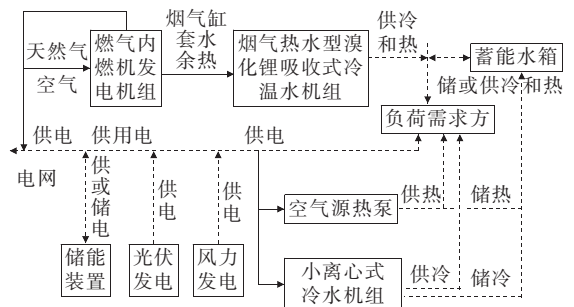


图 1 多能互补分布式能源互联网的能源结构

Figure 1 Multi-energy complementary distributed energy internet energy structure

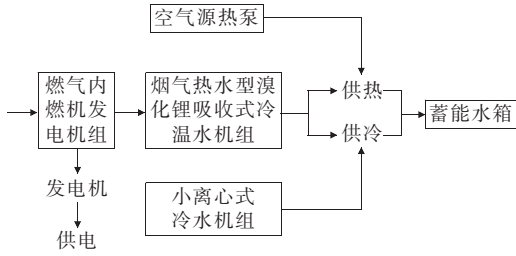


图 2 冷热电三联供系统主体结构

Figure 2 Main structure of combined cooling, heating and power system

储能部分采用蓄能槽及储电池替代传统单一的电池储能,作为区域能源系统的调峰设备。

## 1.2 多能互补能源互联网系统优化调度模型

本文构建基于多能互补分布式能源互联网供需双侧的优化调度模型,考虑风光等可再生能源和冷热电三联供系统的同时,考虑了蓄能水槽,以改变传统单一的蓄能方式。以工业园区的能源互联网系统为研究对象,考虑各能源设备出力特性及用户需求配置<sup>[15-16]</sup>。以分布式能源互联网的总运维费用、环保费用最低,即综合经济效益最高为目标。优先利用风光等清洁能源,提高可再生能源的就地消纳。采用二级优化对比原则,第 1 级将传统分供系统与多能互补能源发电系统效益对比,证明多能互补分布式能源互联网在促进了外电网的“削峰填谷”,缓解电网负荷压力的同时提高了区域新能源的就地消纳能力,实现真正意义上的清洁高效;第 2 级将多能互补能源互联网系统在并网售电、并网不售电和离网 3 种不同运行方式下的综合经济效益进行对比,求解出最佳综合经济效益的运行方式。

### 1.2.1 目标函数

综合考虑分布式能源互联网的运行、环保成本,以此保证能源互联网运行时的综合效益,其总目标函数为

$$\min C_3 = [C_1, C_2] \quad (1)$$

式中  $C_1$  为经济运行成本目标;  $C_2$  为环保目标。

1) 目标函数 1: 运维成本最低。采用常规的日前调度模型,系统成本函数主要考虑了系统运营时的各项运行成本,即

$$\begin{aligned} \min C_1 = & \sum_{i=1}^N (C_{i,o} + C_{i,f}) + C_{\text{Grid}} + \\ & C_{i,\text{DP}} + C_{\text{BT}} = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{i=1}^N O_i P_i + \frac{f P_{\text{GE}}}{L_{\text{HV}} \eta_{\text{GE}}} \right) + \\ & P_{\text{Grid},b} f_b - P_{\text{Grid},s} f_s + C_{i,\text{DP}} + \lambda \sum_{i=1}^T P_{\text{BT},d} \quad (2) \end{aligned}$$

$$C_{i,\text{DP}} = \sum_{i=1}^N \frac{C_{\text{osti}} R_i P_{i,t}}{8760 P_i f_i} \quad (3)$$

式中  $C_{i,o}$ 、 $C_{i,f}$ 、 $C_{\text{Grid}}$ 、 $C_{i,\text{DP}}$  分别为能源互联网中各分布式发电单元  $i$  的运维成本、燃料消耗成本及与外电网之间的购售电成本和折旧维护成本;  $N$  为分布式发电单元的个数;  $O_i$  为能源互联网中各分布式发电单元  $i$  的初始安装容量单位出力的运维管理成本;  $P_i$  为分布式发电单元  $i$  的输出功率;  $f$  为天然气价格;  $L_{\text{HV}}$  为天然气低热值;  $\eta_{\text{GE}}$  为燃气内燃机机组的发电效率;  $P_{\text{Grid},b}$ 、 $f_b$ 、 $P_{\text{Grid},s}$ 、 $f_s$  分别为  $t$  时刻分布式能源互联网向外电网的购电量、购电电价、售电量和售电电价;  $\lambda$  为蓄电池放电折旧成本;  $P_{\text{BT},d}$  为蓄电池放电功率;  $T$  为充电时段总数;  $C_{\text{osti}}$  为发电单元类型  $i$  的单位容量安装成本;  $R_i$  发电单元类型  $i$  的资本回收系数;  $f_i$  发电单元类型  $i$  的容量因素;  $P_{i,t}$  发电单元类型  $i$  在  $t$  时刻的输出功率。

2) 目标函数 2: 环保成本最低。

$$C_2 = C_{\text{CCHP}} + C_{\text{Grid}} \quad (4)$$

$$C_i = \sum_{i=1}^N \left( \sum_{k=1}^M (\alpha_{ik} \lambda_{ik} P_i) \right) \quad (5)$$

式中  $C_{\text{CCHP}}$ 、 $C_{\text{Grid}}$  为分布式能源互联网中联供系统和外电网的排污处理费用;  $C_i$  为发电单元  $i$  (GE、Grid) 的环保处理费用;  $M$  为排放类型 ( $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}_2$ );  $\alpha_k$ 、 $\lambda_k$  分别为发电单元类型  $i$  在污染排放类型为  $k$  时的单位污染处理费用和排放系数;  $P_i$  为发电单元类型  $i$  的输出功率。

### 1.2.2 约束条件

1) 等式约束。

① 电功率平衡约束。

$$P_{\text{Load},t} = P_{\text{Grid},t} + P_{\text{BT},t} + \sum_{i=1}^T (P_{\text{WT}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{GE}}) \quad (6)$$

式中  $P_{\text{Load},t}$  为  $t$  时刻园区用户及发电设备制冷、

供热所需的电负荷;  $P_{\text{Grid},t}$  为能源互联网与外电网交换功率;  $P_{\text{BT},t}$  为  $t$  时刻储能电池充电量和放电量,蓄电取负值,放电取正值;  $P_{\text{WT}}$ 、 $P_{\text{PV}}$ 、 $P_{\text{GE}}$  为发电单元型 PV、WT、CCHP 的输出功率。

②热/冷功率平衡约束。冷热电三联供单元需满足冷/热功率平衡等式约束,即

$$Q_{\text{Load},t} = Q_{\text{AC},t} + Q_{\text{CL},t} + Q_{\text{EC},t} + Q_{\text{S},t} \quad (7)$$

式中  $Q_{\text{Load},t}$  为  $t$  时刻系统的所有热/冷负荷;  $Q_{\text{AC},t}$  为溴化锂冷温水机组的供热/冷量;  $Q_{\text{CL},t}$  为离心式制冷机组的制冷量;  $Q_{\text{EC},t}$  为空气源热泵的供热量;  $Q_{\text{S},t}$  为蓄能水槽的供冷/热量。

冷/热功率平衡为

$$Q_{\text{AC},t} + Q_{\text{CL},t} + Q_{\text{CS},t} = Q_{\text{c},t} \quad (8)$$

$$Q_{\text{AC},t} + Q_{\text{EC},t} + Q_{\text{HS},t} = Q_{\text{h},t} \quad (9)$$

式中  $Q_{\text{CS},t}$  为储能系统的蓄/放冷功率;  $Q_{\text{c},t}$  为园区的冷负荷功率需求功率;  $Q_{\text{HS},t}$  为热能储能系统的蓄/放热功率;  $Q_{\text{h},t}$  为园区热负荷需求功率。

2)不等式约束。

①燃气内燃机功率约束。在燃气内燃机运行过程中,其出力还会受到技术上的限制,其爬坡约束为

$$\begin{cases} P_{\text{GE}}^t - P_{\text{GE}}^{t-1} \leq P_{\text{GE,up}}, P_{\text{GE}}^t \geq P_{\text{GE}}^{t-1} \\ P_{\text{GE}}^t - P_{\text{GE}}^{t-1} \leq P_{\text{GE,down}}, P_{\text{GE}}^t \leq P_{\text{GE}}^{t-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $P_{\text{GE}}^t$  为当前内燃机发电功率;  $P_{\text{GE}}^{t-1}$  为上一时段内燃机发电功率;  $P_{\text{GE,up}}$ 、 $P_{\text{GE,down}}$  分别为内燃机在该时间段内发电功率的最大增幅和最大降幅。

$$\begin{aligned} P_{\text{GE}} &= (a_{\text{GE}}Q_{\text{f}} + b_{\text{GE}})\delta_{\text{GE}} \\ Q_{\text{gas}} &= (m_{\text{GE}}Q_{\text{f}} + n_{\text{GE}})\delta_{\text{GE}} \\ \{Q_{\text{w}} &= (e_{\text{GE}}Q_{\text{f}} + f_{\text{GE}})\delta_{\text{GE}} \quad (11) \\ Q_{\text{f}} &= V_{\text{f}}L_{\text{HV}}/3.6 \\ |P_{\text{min}}\delta_{\text{GE}} &\leq P_{\text{GE}} \leq P_{\text{max}}\delta_{\text{GE}} \end{aligned}$$

式中  $P_{\text{GE}}$  为燃气内燃机发电出力;  $Q_{\text{f}}$  为单位时间内内燃机进入的燃料释放的热量;  $V_{\text{f}}$  为天然气耗量,  $\text{Nm}^3$ ;  $Q_{\text{gas}}$ 、 $Q_{\text{w}}$  分别为单位时间燃气内燃机排出烟气和缸套冷却水的可利用热量;  $P_{\text{min}}$ 、 $P_{\text{max}}$  分别为内燃机的最小、最大发电出力;  $\delta_{\text{GE}}$  为内燃机的运行状态,内燃机运行时为 1,停机时为 0;  $a_{\text{GE}}$ 、 $b_{\text{GE}}$ 、 $m_{\text{GE}}$ 、 $n_{\text{GE}}$ 、 $e_{\text{GE}}$ 、 $f_{\text{GE}}$  为常数,与各设备额定功率有关。

②可再生能源发电出力约束。可再生能源发电

出力需满足机组容量限制才能稳定运行,即

$$P_{\text{w},t}^{\text{min}} \leq P_{\text{w},t} \leq P_{\text{w},t}^{\text{max}} \quad (12)$$

$$P_{\text{pv},t}^{\text{min}} \leq P_{\text{pv},t} \leq P_{\text{pv},t}^{\text{max}} \quad (13)$$

式(12)、(13)中  $P_{\text{w},t}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{w},t}^{\text{max}}$  分别为风力发电单元  $t$  时刻出力上、下限;  $P_{\text{w},t}$  为风力发电单元的  $t$  时刻输出功率;  $P_{\text{pv},t}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{pv},t}^{\text{max}}$  分别为光伏发电单元  $t$  时刻出力上、下限;  $P_{\text{pv},t}$  为光伏发电单元在  $t$  时刻时输出功率的大小。

③烟气热水型溴化锂冷温水机组功率约束。溴化锂冷温水机组在运行过程中,输出冷/热功率受自身特性的限制,不能大于设备自身的额定功率,即

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{\text{AC},c} \leq Q_{\text{AC},c\text{IN}} \\ 0 \leq Q_{\text{AC},h} \leq Q_{\text{AC},h\text{IN}} \end{cases} \quad (14)$$

式中  $Q_{\text{AC},c}$  为溴化锂冷温水机组的制冷功率;  $Q_{\text{AC},h}$  为溴化锂冷温水机组的制热功率;  $Q_{\text{AC},c\text{IN}}$ 、 $Q_{\text{AC},h\text{IN}}$  分别为溴化锂冷温水机组的额定制冷容量和额定制热容量,即

$$\begin{aligned} Q_{\text{AC},c} &= C_{\text{AC},c} \times Q_{\text{AC},\text{in}} \\ Q_{\text{AC},h} &= C_{\text{AC},h} \times Q_{\text{AC},\text{in}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $C_{\text{AC},c}$  为溴化锂冷温水机组的制冷能效系数;  $Q_{\text{AC},\text{in}}$  为余热回收系统提供的热功率;  $C_{\text{AC},h}$  为制热能效系数。

④离心式制冷机组功率约束。离心式冷水机组制冷出力约束为

$$0 \leq Q_{\text{CL}} \leq Q_{\text{CL},\text{N}} \quad (16)$$

式中  $Q_{\text{CL}}$  为离心式制冷机组的制冷量;  $Q_{\text{CL},\text{N}}$  为离心式制冷机在额定功率运行下的的制冷功率。

$$Q_{\text{CL}} = \sigma_{\text{CL}} \times P_{\text{CL}} \times \eta_{\text{CL}} \quad (17)$$

式中  $\sigma_{\text{CL}}$  为电动离心式冷水机组的运行状态;  $\eta_{\text{CL}}$  为离心式制冷机组的制冷能效系数;  $P_{\text{CL}}$  为离心式制冷机组制冷所需电量。

⑤水蓄能功率约束。水蓄能是作为能源系统中调峰设备而存在,其在夜间用电谷时,开启电制冷和热泵设备,将产生的冷/热量储存在蓄能槽中,在冷/热负荷需求高峰期释放出来。因此,水蓄能系统能大大提高系统的综合利用效率。另外,由于外电网实施分时电价,蓄能调控技术对能源系统运行的经济性将更加有利。蓄水槽作为常用蓄能设备,具有蓄冷、热的功能。蓄能设备区分运行工况下,蓄能为



$$S_{CS}^{t+1} = \begin{cases} [S'_{CS}(1 - \delta_{CS}) + Q'_{CS,c} \eta_{CS,c} \Delta t, \text{蓄冷} \\ S'_{CS}(1 - \delta_{CS}) - \frac{Q'_{CS,d}}{\eta_{CS,d}} \Delta t, \text{放冷} \end{cases} \quad (18)$$

$$S_{HS}^{t+1} = \begin{cases} [S'_{HS}(1 - \delta_{HS}) + Q'_{HS,c} \eta_{HS,c} \Delta t, \text{蓄热} \\ S'_{HS}(1 - \delta_{HS}) - \frac{Q'_{HS,d}}{\eta_{HS,d}} \Delta t, \text{放热} \end{cases} \quad (19)$$

式(18)、(19)中  $S_{CS}^{t+1}$ 、 $S_{HS}^{t+1}$  分别为冷、热储能设备蓄放冷/热后的蓄能状态;  $S'_{CS}$ 、 $S'_{HS}$  分别为蓄能设备当前的蓄能状态;  $Q'_{CS,c}$ 、 $Q'_{HS,c}$  分别为蓄能设备的蓄冷/热功率;  $Q'_{CS,d}$ 、 $Q'_{HS,d}$  分别为蓄能设备的放冷/热功率;  $\delta_{CS}$ 、 $\delta_{HS}$  为冷/热蓄能设备的自放冷率;  $\eta_{CS,c}$ 、 $\eta_{HS,c}$  分别为蓄能设备的蓄冷/热效率;  $\eta_{CS,d}$ 、 $\eta_{HS,d}$  分别为蓄能设备的放冷/热效率;  $\Delta t$  为蓄能设备蓄放冷/热的时长。

供冷时蓄能和放能约束为

$$\begin{cases} S_{CS}^{\text{down}} \leq S_{CS} \leq S_{CS}^{\text{up}} \\ 0 \leq Q_{CS,c} \leq Q_{CS,c}^{\text{up}} \\ 0 \leq Q_{CS,d} \leq Q_{CS,d}^{\text{up}} \end{cases} \quad (20)$$

供热时蓄能和放能约束为

$$\begin{cases} S_{HS}^{\text{down}} \leq S_{HS} \leq S_{HS}^{\text{up}} \\ 0 \leq Q_{HS,c} \leq Q_{HS,c}^{\text{up}} \\ 0 \leq Q_{HS,d} \leq Q_{HS,d}^{\text{up}} \end{cases} \quad (21)$$

式(20)、(21)中  $S_{CS}$ 、 $S_{HS}$  分别为冷/热储能设备蓄能状态;  $Q_{CS,c}$ 、 $Q_{CS,d}$  分别为蓄能设备蓄冷和放冷功率;  $Q_{HS,c}$ 、 $Q_{HS,d}$  分别为蓄能设备蓄热和放热功率;  $S_{CS}^{\text{down}}$ 、 $S_{HS}^{\text{down}}$  为蓄能设备的蓄冷、热量下限;  $S_{CS}^{\text{up}}$ 、 $S_{HS}^{\text{up}}$  为蓄能设备的蓄冷、热量上限;  $Q_{CS,c}^{\text{up}}$ 、 $Q_{HS,c}^{\text{up}}$  为蓄能设备的蓄冷/热功率上限;  $Q_{CS,d}^{\text{up}}$ 、 $Q_{HS,d}^{\text{up}}$  为蓄能设备的放冷、热量功率上限。

⑥ 储能电池运行约束。储能电池的数学模型为

$$S_{BT}^{t+1} = \begin{cases} [S'_{BT}(1 - \delta_{BT}) + \frac{P'_{BT,c} \times \eta_{BT,c}}{C_N} \cdot \Delta t, \text{充电} \\ S'_{BT}(1 - \delta_{BT}) - \frac{P'_{BT,d}}{C_N \eta_{BT,d}} \cdot \Delta t, \text{放电} \end{cases} \quad (22)$$

式中  $S_{BT}$ 、 $S_{BT}^{t+1}$  分别为储能电池充放电前、后的荷电量状态;  $\delta_{BT}$  为储能电池的自放电率;  $P'_{BT,c}$ 、 $P'_{BT,d}$  为储能电池的充、放电功率;  $C_N$  为储能电池的

额定容量;  $\eta_{BT,c}$ 、 $\eta_{BT,d}$  为储能电池的充、放电效率;  $\Delta t$  为储能电池的充放电时长。储能电池的充放电功率与其工作寿命有密切关系,因此对储能充放电功率需进行限制<sup>[17]</sup>。

$$\begin{cases} S_{BT}^{\text{down}} \leq S_{BT} \leq S_{BT}^{\text{up}} \\ 0 \leq P_{BT,c} \leq P_{BT,c}^{\text{up}} \\ 0 \leq P_{BT,d} \leq P_{BT,d}^{\text{up}} \end{cases} \quad (23)$$

式中  $S_{BT}^{\text{up}}$ 、 $S_{BT}^{\text{down}}$  为储能电池的能量状态上、下限;  $P_{BT,c}^{\text{up}}$ 、 $P_{BT,d}^{\text{up}}$  分别为储能电池允许最大充电功率和最大放电功率;储能模型中的充放电平衡是以保证系统经济性为前提,考虑分时电价因素,在电谷时为储能电池充电,在用电高峰时期选择为用户供电。若当前电荷量小于能量下限,则输出功率为 0,储能电池停止工作。

## 2 自适应小生境遗传算法及应用流程

### 2.1 多能互补能源互联网的模糊化

对多能互补分布式能源互联网的运行优化分配进行实例分析时,其基本计算思路是:为了缓和各目标函数求解过程中存在的矛盾,首先分别求得各子目标函数在各子约束条件下的最优解,再通过求得的最优解将各子目标函数模糊化(即转化为各自的隶属度函数),然后求使交集的隶属度函数取最大值的解,即为所求的能源互联网运行优化结果。

1) 隶属度函数的确定。隶属度函数的不同形式将影响到多目标优化的最优解,因此如何依据问题的特点来确定隶属度函数是解决问题的关键。本文选用降半  $\Gamma$  分布,相应的分布如图 3 所示,具体表达为

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ e^{-k(x-a)}, & x > a, k > 0 \end{cases} \quad (24)$$

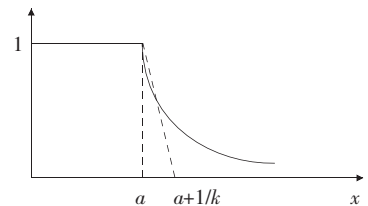


图 3 降半  $\Gamma$  分布

Figure 3 Half- $\Gamma$  distribution

设  $k = \frac{1}{f_{i,\min}}$ ,  $a = f_{i,\min}$ , 则  $u_i$  在  $(0, 1]$  区间内的

隶属度函数为

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & f_i \leq f_{i,\min} \\ e^{-\frac{f_i - f_{i,\min}}{f_{i,\min}}}, & f_i > f_{i,\min} \end{cases} \quad (25)$$

式中  $f_{i,\min}$  为子目标函数  $f_i$  在约束条件下的最小值,  $i=1, 2$ 。

2) 模糊模型的建立。引入模糊隶属度变量  $\mu$  后, 依据最大隶属度原则, 能源互联网的运行优化模型可描述为

$$\begin{cases} \max & \mu(t) \\ \text{s. t.} & \mu(t) \leq \mu_1(t) \\ & \mu(t) \leq \mu_2(t) \end{cases} \quad (26)$$

式(6) ~ (9)

式中  $\mu(t)$  为综合效益成本在  $t$  时刻的满意度;  $\mu_1(t)$  为运维成本在  $t$  时刻的满意度;  $\mu_2(t)$  为环保成本在  $t$  时刻的满意度。

## 2.2 遗传算法

对于多能互补能源互联网的运行优化问题, 能源系统中所求解的决策变量多, 目标函数复杂, 且需要考虑的约束条件众多。基本遗传算法的交叉和变异因子具有随机性, 系统在寻找最优解时, 会存在局部最优解和全局最优解 2 种情况, 因此对学者的研究带来了一定的局限性, 增大了所研究问题的复杂性。

## 2.3 自适应小生境遗传算法

本文选用一种自适应小生境遗传算法, 解决最优值求解所面临的问题。自适应小生境遗传算法是在小生境机制基础上, 引入自适应遗传算子和个体优化算子的优化算法<sup>[18]</sup>, 结合相对于遗传算法初始值的随机性, 自适应小生境遗传算法采用遍历方法产生初始个体, 可以更好地保持解的多样性, 同时具有很高的全局寻优能力和收敛速度。

## 2.4 自适应小生境遗传算法的应用

针对在本文多能互补能源互联网系统中的应用基本思想是: 对分布式能源互联网中各可控出力单元(风、光、冷热电联供), 建立多目标模糊优化的数学模型, 并将多目标能源互联网的模糊化, 将求得出

力与工程实际中已知参数带入算法中; 储能、蓄能单元作为位置单元进行二进制编码操作, 将目标函数作为适应度函数, 生成初始种群; 适应度值评价, 选择个体; 自适应改变交叉概率及变异概率的大小, 并通过淘汰手段, 淘汰适应度较低的个体, 保留适应度较高个体。直到达到终止条件退出循环, 从而求得满足约束条件的最优解, 即求得目标函数的最小值。小生境遗传算法在分布式能源互联网运行优化调度中的算法流程如图 4 所示。

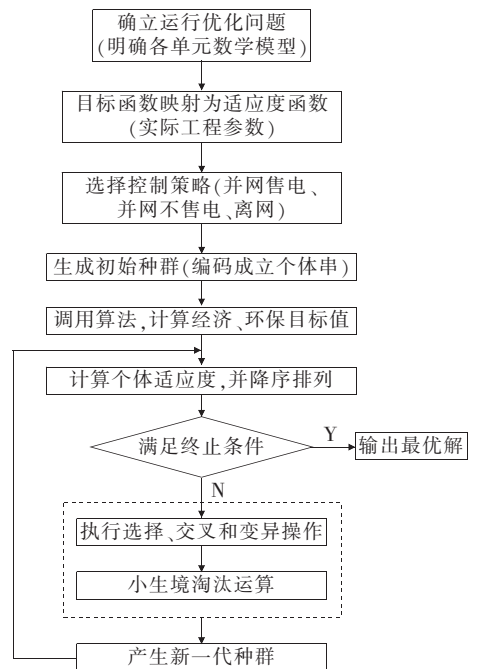


图 4 分布式能源互联网优化调度算法

Figure 4 Flow chart of distributed energy internet optimization scheduling algorithm

以工业园区多能互补能源互联网系统为研究对象, 提出并网售电、并网不售电及离网状态下 3 种不同的分布式能源互联网优化运行策略。并网售电模式下, 分布式能源互联网能够与外电网进行功率交互, 实现电能双向流动, 即用户可以上网买电, 又可以向电网销售多余的电量, 即  $P_{\text{Grid},b}$ 、 $P_{\text{Grid},s}$  数值均大于等于 0, 并网不售电即  $P_{\text{Grid},b}$  数值大于等于 0,  $P_{\text{Grid},s}$  数值等于 0。离网状态下, 冷热电联供系统运行在“冷/热定电”方式下, 能源系统优先利用可再生能源发电; 在用能高峰时段, 当各分布式单元无法满足区域全部负荷需求时, 则优先考虑储能电池及蓄能设备供电, 若在储能、蓄能系统仍不能满足区域负

荷需求,则根据负荷需求的重要性,优先保证 1、2 级重要负荷的供能。因此,离网状态下,  $P_{Grid,b}$ 、 $P_{Grid,s}$  数值均为 0。自适应小生境遗传算法不仅提高了算法的全局收敛性和收敛速度,同时也保证了算法计算的稳定性,为之后求解多目标下的能源互联网运行优化打下基础。

### 3 实例分析

本文以华东地区某综合产业园区的实际工程为参考,建设以风力、光伏、天然气为基础能源的冷热电联供的分布式能源系统,旨在为区域内各种不同类型的用能单元提供冷、热、电,有效地提高能源利用效率,实现低碳排放。该产业园区总占地面积为 6 000 m<sup>2</sup>,总建筑面积为 20 000 m<sup>2</sup>,本文以夏季典型日供电为例,实验结果同样适用于任何所选典型日。该产业园区安装 3 台小型风机,额定发电总容量为 350 kW,发电运行参数见表 1,光伏发电单元安装额定总容量为 500 kW,两者共同构成了产业园区能源互联网的可再生能源发电系统。

该产业园区多能互补能源互联网的冷热电三联供单元,主动力系统配置了 1 台 GE 公司的颜巴赫 JMS620 燃气内燃机,其额定发电功率为 3 349 kW。采用 2 台电动离心式制冷机和 5 台空气源热泵机组,利用电制冷/热作为整个能源系统冷/热能的补充设备。采用一套额定蓄热容量为 12 500 kW·h、额定蓄冷容量为 21 500 kW·h 的水蓄能装置,冷/热储能装置运行性能参数如表 2。表 3 为各发电单元的污染物排放系数及处理成本。

在算例仿真过程中,根据前期所建数学模型、运行优化多目标函数、约束条件、运行策略,运用提出的自适应小生境遗传算法,兼顾各能源设备的出力,进行分布式能源互联网的运行优化仿真。

表 1 风力发电运行性能参数

Table 1 Wind power operating

performance parameters			m/s
设备	切入风速	切出风速	额定风速
WT	3.5	25	11.5

表 2 冷/热储能装置运行性能参数

Table 2 Operating performance parameters of cold/heating energy storage device

储能装置	出力限制/kW		自损耗率 (1 h)/%	效率	
	蓄能	放能		蓄能	放能
HS(热蓄能)	2 130	1 720	0.2	0.85	0.90
CS(冷蓄能)	3 050	1 830	0.2	0.80	0.85

表 3 内燃机及外电网污染物排放系数及处理成本

Table 3 Internal combustion engine and external power grid pollutant emission coefficient and treatment cost

排放类型	污染物排放系数/(kg/kW·h)		单位处理成本/(元/kg)
	内燃机	外电网	
NO <sub>x</sub>	0.078 0	1.6	62.964
SO <sub>2</sub>	0.023 2	1.8	14.843
CO <sub>2</sub>	654	889	0.210

#### 3.1 风光出力预测及负荷分析

本文选取 8 月份某日作为夏季典型日,参考该园区典型日太阳光强度、风速、环境温度和用户侧冷热电数据进行算例分析。算例考虑分时电价及政府对于分布式发电的价格补贴等因素,其中,该园区的燃气价格及购售电价格按所在地的实际情况取值。

依据本文风光出力的优化调度模型及典型日的温度、风速、光照强度等数据,对可再生能源进行出力预测<sup>[19]</sup>。预测出风力、光伏出力的分布情况如图 5 所示。本文产业园区建筑采用单位面积冷负荷指标为 72 W/m<sup>2</sup>,单位面积热负荷指标为 47 W/m<sup>2</sup>。算例分析选择园区夏季典型日冷负荷、电负荷(热负荷为 0),分布情况如图 6 所示。

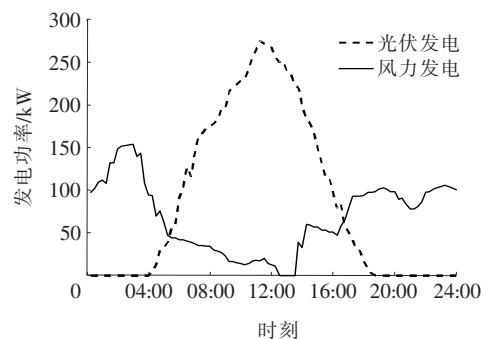


图 5 园区夏季典型日的可再生能源出力

Figure 5 Renewable energy output on a typical summer day in the park

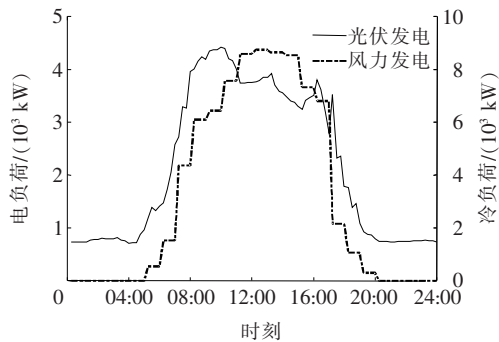


图6 园区夏季典型日的冷、电负荷

Figure 6 Typical cold and electric loads during the summer season in the park

### 3.2 运行策略及算例仿真分析

1) 策略1:并网售电。在并网售电的策略一运行方式下,园区夏季典型日冷能、电能优化调度结果如图7、8所示,其中蓄能和储能设备出力中,正为放能,负为蓄能。

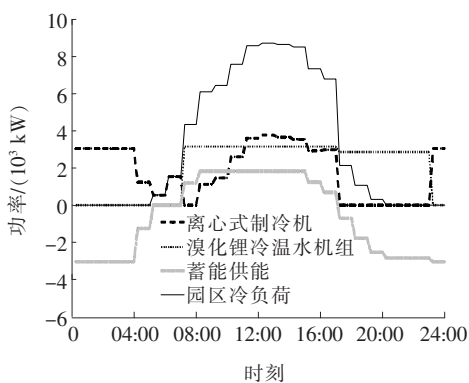


图7 园区夏季典型日冷能调度优化结果(并网售电)

Figure 7 Typical summer cold energy dispatch optimization results in the park (grid selling)

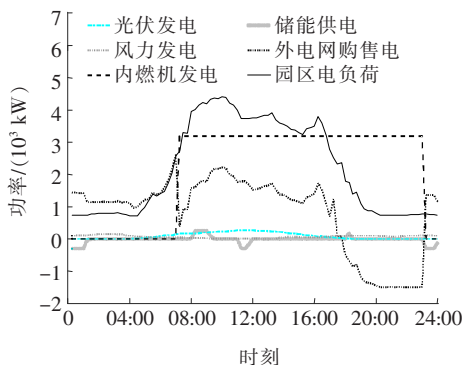


图8 园区夏季典型日电能调度优化结果(并网售电)

Figure 8 Typical summer day electricity scheduling results in the park (grid selling)

由图7可知,00:00—05:00离心式制冷机利用谷时段低电价为蓄能装置蓄冷能;07:00时,蓄能装置达到满蓄能状态;07:00以后,园区冷负荷需求量不断提升,为避开外电网峰时段,此时溴化锂冷水机组满负荷运行,期间由蓄能装置放能和离心式制冷机制冷来填补冷能缺额;17:00—24:00园区冷负荷需求降低,但考虑整个系统的综合效益,此时内燃机仍处于运行状态,在峰时段向电网售电,溴化锂冷水机组生产的多余的冷能,借助于为蓄能装置蓄能。

由图8可知,00:00—07:00在外电网谷时段,利用外电网购电满足园区的电负荷需求、储能需求以及设备用电需求;07:00后,用电高峰时段,利用燃气内燃机的发电出力,为园区供电,期间的电能缺额由储能和外电网购电补充;17:00后,园区电负荷逐渐下降,直至趋于平稳,此时燃气内燃机仍然工作在满负荷状态,满足园区电负荷的同时,多余电量上网,以获得更多的经济效益。

2) 策略2:并网不售电。在并网不售电的策略2运行方式下,园区夏季典型日冷能、电能优化调度结果如图9、10所示,其中蓄能和储能中,正为放能,负为蓄能。

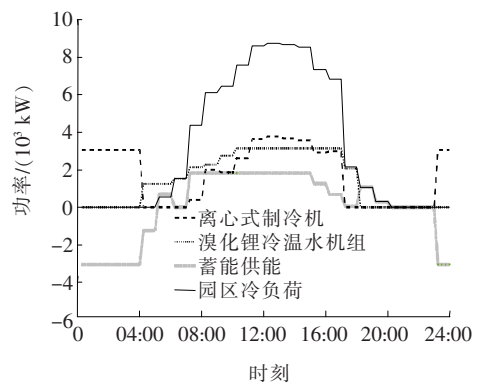


图9 园区夏季典型日冷能调度优化结果(并网不售电)

Figure 9 Typical summer cold energy dispatch optimization results in the park (On-grid does not sell electricity)

结合图9、10可知,冷能优化调度的过程为00:00—07:00充分利用外电网谷时段,驱动离心式制冷机制冷,满足园区冷负荷需求及蓄能冷功率需求,并同时为储能设备进行充电;07:00—18:00包



括外电网的平时段与峰时段,此时段应优先充分利用燃气内燃机的发电出力,即内燃机基本工作在满负荷运行状态。内燃机的发电量满足用户侧电负荷需求的同时也要满足溴化锂冷水机组、离心式制冷机及其他设备的电耗,相应的电能缺额由外电网购电来填补;11:00—12:00 用能高峰时段,更多的缺额由储能和蓄能设备填补;18:00—20:00 园区冷、电负荷需求逐渐下降,此时段减少内燃机出力,由蓄能装置供冷;20:00—23:00 园区冷负荷需求趋于零,此时内燃机处于停机状态;23:00—24:00 利用谷时外网电,满足蓄冷能与储能电需求。

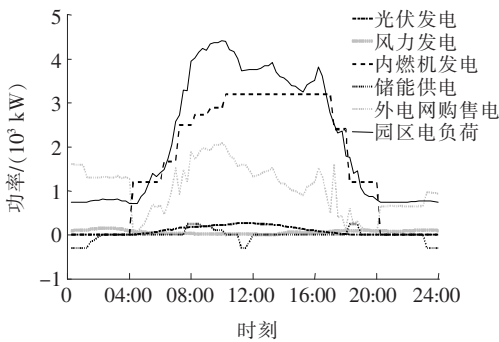


图 10 园区夏季典型日电能调度优化结果(并网不售电)

Figure 10 Typical summer day electricity scheduling results in the park(On-grid does not sell electricity)

分布式能源互联网在策略 1 和策略 2 的优化调度中,风光可再生能源发电功率被充分消纳,园区的电能需求主要由外电网购电、内燃机发电满足。在策略 1、策略 2 情况下,夏季典型日的运维、燃料、电网购电成本与传统分供形式下的成本进行一级比较,具体见表 4、5,传统分供系统用户侧电能通过向外电网购电满足,夏季的冷负荷由电制冷满足。

表 4 策略一夏季典型日下成本比较

Table 4 Costs comparison for strategy 1 in

a typical day during summer 元

供能方式	设备运维成本	燃料成本	电网购电成本	电网售电收益	总成本
联供	1 652	18 547	36 996	3 646	53 549
传统分供	242	0	69 946	0	70 188
节约成本	-1 410	-18 547	32 950	3 646	16 639

由表 4、5 可知,并网售电模式、不售电模式与传统分供方式相比,多能互补能源互联网系统购电成

本、总成本均有明显的下降,尤其售电模式下,购电成本下降了 47.1%,总成本下降了 23.7%。并网售电不仅促进了外电网的削峰填谷,缓解电网压力,还更好地消纳了区域新能源的发电,实现真正意义上的高效清洁,由此可见,建立多能互补能源互联网具有重要的实际意义。

3) 策略 3:离网运行。当外电网发生故障时,为了保证园区设备的安全,需要切断园区分布式能源互联网与外电网的联结,园区能源互联网进入离网运行状态。在离网状态情况下,风光可再生能源及储能装置提供电能有限,工作人员需要对园区每一时刻 1、2 级重要负荷功率需求进行数据分析,通过数据预测技术,预测重要负荷功率,保证园区重要负荷供能不中断的同时,最大限度的供应冷、热、电。如图 11 所示,为该园区典型日的重要负荷的电能预测功率。

在离网运行仿真过程中,以 15 min 为超短时段进行实时运行优化调度,共计 96 个时段。下面针对离网状态下,夏季典型日的离网运行优化调度结果展开分析。在离网状态下,夏季典型日园区电能、冷能实时优化调度的结果如图 12、13 所示。其中,蓄能和储能中,正为放能,负为蓄能。

表 5 策略 2 夏季典型日下成本比较

Table 5 Costs comparison for strategy 2 in a typical day during summer 元

供能方式	设备运维成本	燃料成本	电网购电成本	总成本
联供	1 071	11 098	43 807	55 976
传统分供	232	0	69 914	70 146
节约成本	-839	-11 098	26 107	14 170

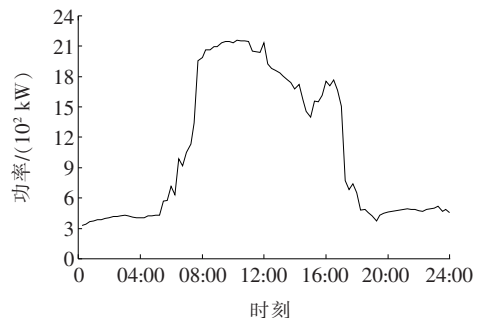


图 11 园区离网运行状态下重要负荷的电能需求  
Figure 11 Power demand for important loads under off-grid operating conditions in the park

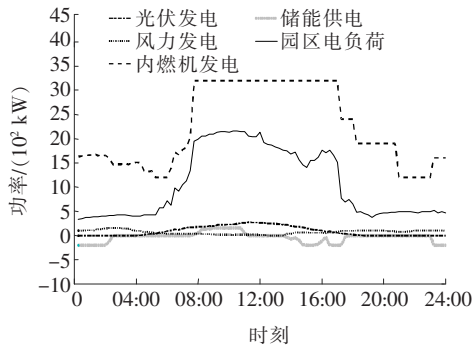


图 12 园区夏季典型日电能调度优化结果(离网)

Figure 12 Typical summer day electricity scheduling results in the park(Off-grid)

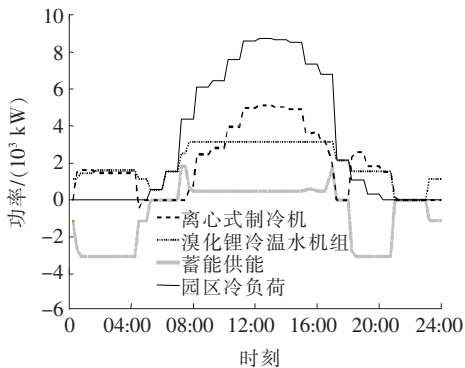


图 13 园区夏季典型日冷能调度优化结果(离网)

Figure 13 Typical summer cold energy dispatch optimization results in the park(Off-grid)

由图 12 可知,00:00—05:00 园区的电负荷需求较低,此时充分运用燃气内燃机发电出力,对储能装置进行充电;05:00—07:00 之间,储能设备已基本达到满充状态,此时园区的电负荷需求开始变化,需要针对电负荷的变化,调节内燃机的出力状况;08:00—11:00,园区的电负荷需求不断上升,此时内燃机满负荷供电还不足的情况下,采用储能电池放能补充;11:00—16:00 以后,园区电负荷需求达到峰值,储能设备达到满放状态,此时,与并网状态相比,需要切除部分负荷,以保证园区分布式能源互联网的稳定运行;16:00—21:00,园区的负荷需求逐渐下降,内燃机的放电功率足够维持园区电负荷需求;21 点后,园区电负荷需求降至最低,且变化不大,此时利用内燃机发电出力,对储能设备进行充电,直至达到满充,并根据实际负荷需求的变化调节内燃机的出力状态。

由图 13 可知,离网运行状态下,园区分布式能

源互联网采用“以冷/热定电”原则运行,能够满足园区的冷负荷需求。00:00—05:00 园区冷负荷需求和分时电价较低,所以利用离心式制冷机与溴化锂冷温水机组为蓄能装置蓄能,为冷负荷的高峰时段蓄能装置放冷做准备;07:00 后,蓄能部分达到满蓄能状态,且园区的冷负荷需求不断上升,由园区内优先满足冷能需求原则,溴化锂机组基本处于满负荷运行状态,冷能缺额再由离心式制冷机组与蓄能设备提供;18:00 后,园区冷负荷需求下降,此时利用溴化锂机组与离心式制冷机给蓄能设备蓄能。

由仿真分析可知,离网运行状态时,为满足冷热电联供系统部分“以冷/热定电”的基本要求,优先满足园区多能互补能源互联网的冷/热能负荷需求。电负荷需求则根据各分布式能源的实际出力状态,优先满足园区内重要负荷的电能需求,切除部分可中断负荷;因此园区的各分布式能源的容量设置合理,本文所提出的优化调度方案也是有效可行。

### 3.3 成本分析

综合 3 种不同运行策略下夏季典型日的电、冷调度结果,依据园区电、气能源价格以及各类设备运维、环保成本,计算分布式能源互联网的综合效益,结果如表 6 所示。

表 6 不同运行策略下成本比较

Table 6 Cost comparison under different operating strategies

策略	经济运行成本	环保成本	总成本
1	53 549	16 511	70 060
2	55 976	17 830	73 806
3	53 406	12 954	66 360

由表 6 可知,并网运行模式下,售电与不售电状态,即策略 1 与策略 2,其经济成本相差 2 427 元,环保成本相差 1 319 元,总成本相差 3 746 元,即在总安装成本一致的情况下,并网售电模式既能够达到经济效益最优,又能够实现更好的环保性。策略 3 为外电网故障状态时离网运行状态的成本,虽然其经济成本与环保成本都较策略 1 低,但是园区只能保证重要负荷的能源供应,不能作为园区的运行常态。

## 4 结语

本文主要基于不同能量生产设备、能量转换设备和能量储存设备的多能互补能源互联网系统,考虑用户侧不同工况下的冷热电负荷需求,对不同控制策略下系统的经济运行进行了研究。构建含风光发电单元、冷热电联供单元、储冷/热单元和储电单元的数学模型,考虑设备之间的能流耦合关系及分时电价的因素,研究并网售电、并网不售电及离网状态下系统的运行优化。

选取华东地区某产业园区的分布式能源互联网数据作为算例。算例分析表明:与独立的 CCHP 系统相比,多能互补能源系统的经济效益有明显提高,在不同调度策略下,综合成本均有明显下降,验证了多能互补形式的优越性;在离网运行状态下,储能、蓄能装置作为调峰部分,能最大可能地保证园区重要负荷的供能;在并网售电策略下,园区供能成本降低最大,达 23.7%,能够有效地缓解供能的压力,达到“削峰填谷”的效果,且在售电补贴的政策下,将会进一步提升园区能源互联网运行的经济性。本研究成果为能源互联网的经济运行提供建议。

### 参考文献:

[1] 张晶,胡纯瑾,于海玉,等. 能源互联网重点领域标准国际化布局研究[J]. 供用电,2021,38(7):3-8.  
ZHANG Jing, HU Chunjin, YU Haiyu, et al. Research on internationalization layout of energy internet technical standards in key areas[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(7): 3-8.

[2] 周兵兵,林宏宇,杨莘博,等. 可再生能源多能互补系统多主体效益均衡模型[J]. 智慧电力,2020,48(1):74-79.  
ZHOU Bingbing, LIN Hongyu, YANG Shenbo, et al. Multi-agent benefit equilibrium model for renewable energy in multi-energy complementary system[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 74-79.

[3] REN F, ZHANG M, SOETANTO D, et al. Conceptual design of a multi-agent system for interconnected power systems restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 732-740.

[4] 孙秋野,滕菲,张化光,等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3667-3677.  
SUN Qiuye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceeding of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677.

[5] 何祥兴. 含多微网的配电网优化调度研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

[6] REZVAN A T, GHARNEH N S, GHAREHPETIAN G B. Optimization of distributed generation capacities in buildings under uncertainty in load demand[J]. Energy & Buildings, 2013, 57(57): 58-64.

[7] HERNANDEZ-ARAMBURO C A, GREEN T C, MUGNIOT N. Fuel consumption minimization of a micro-grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 673-681.

[8] 沈琛云,王明俭,李晓明. 基于风—光—蓄—火联合发电系统的多目标优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11): 74-82.  
SHEN Chenyun, WANG Mingjian, LI Xiaoming. Multi-objective optimal dispatch based on wind-solar-pumped storage-thermal combined power system [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 66-73.

[9] 陈洁,杨秀,朱兰,等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 7-15.  
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.

[10] 李坚,吴亮红,张红强,等. 基于排序交叉优化算法的冷热电联供微电网经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 137-145.  
LI Jian, WU Lianghong, ZHANG Hongqiang, et al. Microgrid economic dispatch of combined cooling, heating and power based on a rank pair learning crisscross optimization algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 137-145.

[11] 顾伟,吴志,王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 177-185.  
GU Wei, WU Zhi, WANG Rui, Multi-objective optimi-

- zation of combined heat and power microgrid considering pollutant emission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14):177-185.
- [12] 周任军, 李绍金, 陈瑞先, 等. 采用模糊自修正粒子群算法的碳排放权交易冷热电多目标调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6119-6126.  
ZHOU Renjun, LI Shaojin, CHEN Ruixian, et al. Combined cool ad heat power multi-objective scheduling considering carbion essions trading using algorithm of fuzzy self-correction particle swarmoptimization [J]. Proceeding of the CSEE, 2014, 34(34):6119-6126.
- [13] 周晓倩, 余志文, 艾芊, 等. 含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6):26-33.  
ZHOU Xiaqian, YU Zhiwen, AI Qian, et al. Review of optimal dispatch strategy of micrigrid with CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):26-33.
- [14] 杨天蒙, 韩震焘, 史喆, 等. 能源互联网系统中复合储能协调优化配置方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5):8-13.  
YANG Tianmeng, HAN Zhentao, SHI Zhe, et al. Coordinated optimal configuration method of hybrid energy storage in energy internet system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5):8-13.
- [15] 姜子卿, 郝然, 艾芊. 基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J]. 电力自动化设备. 2017, 37(6):260-267.  
JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):260-267.
- [16] 杨鑫, 杨洪朝, 张党强. 考虑可再生能源的冷热电联供系统环境经济调度模型[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(4):87-92.  
YANG Xin, YANG Hongchao, ZHANG Dangqiang. Environmental economic dispatch model of combined cooling heating and power system considering renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4):87-92.
- [17] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. 电网技术, 2017, 36(12):26-31.  
ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 36(12):26-31.
- [18] 华洁, 崔杜武. 基于个体优化的自适应小生境遗传算法[J]. 计算机工程, 2010, 36(1):194-196.  
HUA Jie, CUI Duwu. Adaptive niche genetic algorithm based on individual optimization[J]. Computer Engineering, 2010, 36(1):194-196.
- [19] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4):113-120.  
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with echp and energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):113-120.