

DOI: 10.19666/j.rlfed.202207140

# 考虑低碳经济运行的四联供综合能源系统 优化调度

赵乃新, 顾文波, 美合日阿依·穆太力普  
(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**[摘要]** 针对多能源互补机制运行条件下综合能源系统优化调度困难的问题, 从降低系统运维成本、减少 CO<sub>2</sub> 排放和可再生能源弃用等方面进行了多目标优化调度研究。建立了电-气-热-冷能源系统各设备的数学模型, 并针对储能设备在长期运行模拟中的建模难点, 建立了可模拟综合能源系统长期运行调度的约束条件, 采用低碳经济运行指标对综合能源系统进行了优化, 并对最低运行成本调度和最小碳排放调度的结果进行了比较。模拟了碳价和运维成本增加对调度结果的影响。仿真结果表明, 仅使用最小运维成本或最低碳排放作为调度指标将导致高碳排放或高运维成本, 而低碳经济调度综合考虑可再生能源的消纳和碳减排指标, 可以降低整个系统的低碳经济运行成本。

**[关键词]** 综合能源系统; 多目标优化; 低碳经济运行

**[引用本文格式]** 赵乃新, 顾文波, 美合日阿依·穆太力普. 考虑低碳经济运行的四联供综合能源系统优化调度[J]. 热力发电, 2023, 52(4): 54-62. ZHAO Naixin, GU Wenbo, Meiheriayi MUTAILIPU. Optimal dispatching of electricity-gas-heat-cooling integrated energy system considering low-carbon economy[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(4): 54-62.

## Optimal dispatching of electricity-gas-heat-cooling integrated energy system considering low-carbon economy

ZHAO Naixin, GU Wenbo, Meiheriayi MUTAILIPU  
(The College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

**Abstract:** Against the difficulty of optimal scheduling of integrated energy systems under the operating conditions of multiple energy complementary mechanisms, a multi-objective optimal scheduling study is carried out considering the reduction of system operation and maintenance costs, carbon dioxide emission and renewable energy abandonment. A mathematical model is established for all the equipments in the electric-gas-heat-cold energy system. The constraint conditions that can simulate the long-term operation scheduling of the integrated energy system are established to solve the modeling difficulties of energy storage equipment in the long-term operation simulation, and the comprehensive energy system is optimized by using low-carbon economic operation index. The results of the minimum operation cost scheduling and the minimum carbon emission scheduling are compared. Moreover, the influence of carbon price and operation and maintenance cost increase on scheduling results is simulated. The simulation results show that, using only the minimum operation and maintenance cost or the lowest carbon emission as the scheduling index will lead to high carbon emission or high operation and maintenance cost, and the low-carbon economic scheduling considering the consumption of renewable energy and carbon emission reduction index can reduce the low-carbon economic operation cost of the whole system.

**Key words:** integrated energy system; multi-objective optimization; low-carbon economy operation

收稿日期: 2022-07-25 网络首发日期: 2022-08-31

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21&ZD133); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01C87)

Supported by: National Social Science Foundation of China (21&ZD133); Natural Science Foundation of Xinjiang Province (2022D01C87)

第一作者简介: 赵乃新(1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统建模, naixin\_zhao@stu.xju.edu.cn.

通信作者简介: 顾文波(1992), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为可再生能源、综合能源系统设计等, wenbo.gu@xju.edu.cn.

在能源危机和环境日益恶化的背景下,未来可再生能源将逐步取代传统化石能源,实现全球能源和工业体系的演变重构。能源和专业体系向源荷实时匹配、智能调节和多能互补方向发展,而通过包含多种能源的综合能源系统(integrated energy system, IES)的优化调度,可打破不同能源间的壁垒实现多能互补,满足用户侧的电、热、冷、气等需求<sup>[1]</sup>。同时建立综合能源的优化调度方案,可充分利用风、光等可再生能源,提高可再生能源在供能体系的比例,也是我国实现碳达峰碳中和的重要途径<sup>[2-3]</sup>。

国内外众多学者关于综合能源系统进行了大量的研究。文献[4]首次提出了 Energyhub(能量枢纽)的概念,指出未来能源发展趋势应当是打破每种能源调度网络的相互独立,各种能源互补由能量枢纽进行统一调度,为用户端提供综合能源服务。文献[5]基于冷热电联供(combined cooling, heat and power, CCHP)系统,使用 Energyhub 的方法进行了建模,但是建模过程十分复杂,不适合推广到具有多种供能设备的大规模系统。文献[6]对能量枢纽进行了系统阐述,并给出了综合能源系统标准化建模的方法。当考虑到跨区域能源调度时,除了电能可以瞬时传输外,热、气等能源在长距离传输上具有较大时延,无法快捷准确实现联合调度。为此,文献[7-11]构建了统一能路理论,通过将多种能源传输网络统一等效为求解速度快和精度高的电路形式进行调度。

在众多研究成果的基础上,综合能源系统基本形成了一套成熟的建模理论。针对该复杂系统,文献[12]提出了针对大型公共建筑的3E(运行成本、CO<sub>2</sub>排放和综合能源利用率)指标优化调度方法,对多个指标进行归一化,利用层次分析法确定各指标在综合指标中的权重,从而将多目标问题转化为单目标问题。文献[13]利用碳价等将多个不同的运行指标转化为量纲相同的经济性指标,将多目标转为单目标从而实现了综合能源系统的低碳经济调度。文献[14]在综合能源系统中增加了 P2G(power to gas)设备,并构建了双层优化模型,将储能侧也纳入了系统的优化调度。文献[15]引入了兼顾能源数量和质量的焓效率,构建了两阶段的双层优化模型。但以上文献进行的均为 24 h 的调度模拟,未进行更长周期的调度模拟。根据大量文献调研,应当基于实际的负荷侧需求和当地能源供应情况,选择合适的供能设备组建 IES 并系统建模,同

时考虑到环境成本和经济成本,制定综合性的运行指标来实现能源系统的优化调度。

本文在上述研究的基础上考虑用户负荷的多样性,以乌鲁木齐为例,基于当地实际气象条件模拟负荷侧需求和能源供应情况,建立同时提供电-气-热-冷 4 种负荷的综合能源系统。其中,为实现可再生能源消纳,增加了蓄电、蓄热装置以及 P2G 设备以减少弃风、弃光。根据具体政策,系统对外购电考虑分时电价,且对外售电。以低碳经济运行为主要指标同时考虑碳排放的交易价格对系统运行的影响,并引入弃光、弃风惩罚减少可再生能源的弃用。为验证系统长期运行的有效性,对其进行约 168 h 的周运行模拟。

## 1 电-气-热-冷综合能源系统建模

针对用户多样化的需求,建立如图 1 所示的综合能源系统,可提供电、气、热、冷 4 种负荷。

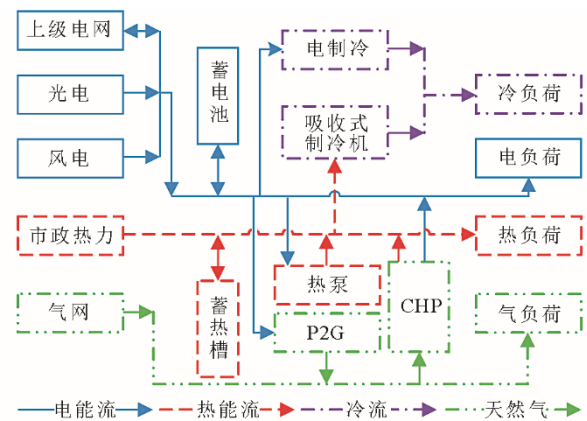


图 1 综合能源系统结构

Fig.1 The structure of integrated energy system

### 1.1 供能侧设备模型

#### 1.1.1 热电联产机组模型

热电联产机组 CHP(combined heat and power)机组消耗天然气同时可对外产出电力和热能,其数学模型如下:

$$\begin{cases} Q_{\text{CHP,e}}(t) = P_{\text{CHP,e}}(t)\Delta t = \eta_{\text{CHP,e}}\lambda_{\text{Gas}}V_{\text{CHP}}(t)\Delta t \\ Q_{\text{CHP,h}}(t) = P_{\text{CHP,h}}(t)\Delta t = \eta_{\text{CHP,h}}\lambda_{\text{Gas}}V_{\text{CHP}}(t)\Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{CHP,e}}(t)$ 、 $Q_{\text{CHP,h}}(t)$ 分别为单位时间  $\Delta t$  内输出的电量和热量, kW·h;  $P_{\text{CHP,e}}(t)$ 、 $P_{\text{CHP,h}}(t)$ 分别为  $t$  时刻输出的电功率和热功率, kW;  $\eta_{\text{CHP,e}}$ 、 $\eta_{\text{CHP,h}}$ 分别为 CHP 机组的发电效率和产热效率;  $V_{\text{CHP}}(t)$ 为  $t$  时刻 CHP 机组的天然气进气量, m<sup>3</sup>;  $\lambda_{\text{Gas}}$ 为天然气热值,取 9.78 (kW·h)/m<sup>3</sup>。

### 1.1.2 光伏发电模型

太阳能电池板在单位时间内输出的电量为  $Q_{PV}(t)$ ，其计算公式如下<sup>[16]</sup>：

$$\begin{cases} Q_{PV}(t) = P_{PV}(t)\Delta t = \frac{\eta_{PV}G(t)A_{PV}}{1000}\Delta t \\ \eta_{PV} = \eta_{PV,ref}[1 + \gamma(T_c - T_{ref})] \\ T_c = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20}{800}G(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{PV}(t)$ 为  $t$  时刻光伏电池板输出功率，kW； $G(t)$ 为  $t$  时刻电池板受到的阳光辐照量， $W/m^2$ ； $\eta_{PV}$ 为光伏组件发电效率； $A_{PV}$ 为光伏组件面积， $m^2$ ； $\eta_{PV,ref}$ 为光伏板在标准状况下的发电效率； $\gamma$ 为光伏板的温度系数，对于晶硅电池，一般为 $-0.4\%/K$ ； $T_c$ 、 $T_a$ 分别为光伏板温度和环境温度， $^{\circ}C$ ； $T_{ref}$ 为标准状态下电池片温度，取 $25^{\circ}C$ ； $T_{NOCT}$ 为电池片标称工作温度，晶硅电池可取 $45^{\circ}C$ 。

### 1.1.3 风电机组模型

风电可作为一种补充纳入综合能源系统中，其模型如下<sup>[17]</sup>：

$$\begin{cases} Q_{WP}(t) = P_{WP}(t)\Delta t \\ P_{WP}(t) = \begin{cases} 0 & v_{co} \leq v(t) < v_{ci} \\ \frac{v(t) - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} P_r & v_{ci} \leq v(t) < v_r \\ P_r & v_r \leq v(t) \leq v_{co} \end{cases} \end{cases} \quad (3) \quad (4)$$

式中： $Q_{WP}(t)$ 为风电机组在单位时间内输出的电量， $kW \cdot h$ ； $P_{WP}(t)$ 为  $t$  时刻风电机组输出功率，kW； $v(t)$ 为  $t$  时刻实际风速， $m/s$ ； $v_{ci}$ 为切入风速， $m/s$ ； $v_r$ 为额定运行时的风速， $m/s$ ； $v_{co}$ 为切出风速<sup>[18]</sup>， $m/s$ 。估算风机功率时需要先将测量风速换算至风机高度的风速，换算公式如下：

$$v(t) = v_{ref}(t) \left( \frac{H}{H_{ref}} \right)^{\alpha} \quad (5)$$

式中： $v_{ref}(t)$ 为测量所得风速， $m/s$ ； $\alpha$ 为地表粗糙程度描述因数，取 $1/7$ ； $H$ 、 $H_{ref}$ 分别为风机实际安装高度和风速测量给定高度<sup>[19]</sup>， $m$ 。

## 1.2 多能互补系统设备模型

### 1.2.1 热泵模型

热泵在 $\Delta t$ 时间内输出的热量  $Q_{HP}(t)$ 为：

$$Q_{HP}(t) = P_{HP}(t)\Delta t = \eta_{HP}P_{HP,e}(t)\Delta t \quad (6)$$

式中： $P_{HP}(t)$ 为热泵在  $t$  时刻对外输出的热功率，kW； $\eta_{HP}$ 为热泵效率； $P_{HP,e}(t)$ 为热泵在  $t$  时刻对外输出热量所需要消耗的电功率，kW。

### 1.2.2 电制冷机模型

电制冷机在 $\Delta t$ 时间内输出的冷量  $Q_{EC}(t)$ 为：

$$Q_{EC}(t) = P_{EC}(t)\Delta t = \eta_{EC}P_{EC,e}(t)\Delta t \quad (7)$$

式中： $P_{EC}(t)$ 为电制冷机在  $t$  时刻输出的冷量功率，kW； $\eta_{EC}$ 为电制冷机效率； $P_{EC,e}(t)$ 为电制冷机在  $t$  时刻对外输出冷量所需要消耗的电功率，kW。

### 1.2.3 吸收式制冷机模型

吸收式制冷机与燃气轮机组合共同构成 CCHP 系统对外供能<sup>[20]</sup>，吸收式制冷机在 $\Delta t$ 时间内的输出  $Q_{AC}(t)$ 为：

$$Q_{AC}(t) = P_{AC}(t)\Delta t = \eta_{AC}P_{AC,h,in}(t)\Delta t \quad (8)$$

式中： $P_{AC}(t)$ 为吸收式制冷机在  $t$  时刻输出的冷量功率，kW； $\eta_{AC}$ 为吸收式制冷机效率； $P_{AC,h,in}(t)$ 为吸收式制冷机  $t$  时刻对外输出冷量所需要吸收的热量功率，kW。

### 1.2.4 P2G 模型

P2G 技术主要包括 2 个过程：通过电解反应将水分解成氧气和氢气；通过反应将氢气和二氧化碳合成甲烷<sup>[21]</sup>。P2G 设备建模如下：

$$V_{P2G}(t) = \frac{\eta_{P2G}P_{P2G}(t)}{\lambda_{Gas}}\Delta t \quad (9)$$

式中： $V_{P2G}(t)$ 为 $\Delta t$ 内由 P2G 设备产生的天然气体积， $m^3$ ； $\eta_{P2G}$ 为电转气过程的效率； $P_{P2G}(t)$ 为  $t$  时刻 P2G 设备所需要消耗的电功率，kW。

## 1.3 储能侧设备模型

### 1.3.1 蓄电池模型

蓄电池充放能数学模型见式(10)：

$$\begin{cases} Q_{ES}(t) = Q_{ES}(t-1) + \eta_{ES,ch}P_{ES,ch}(t)\Delta t - \frac{P_{ES,dis}(t)\Delta t}{\eta_{ES,dis}} \\ Q_{ES,min} \leq Q_{ES}(t) \leq Q_{ES,max} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_{ES,dis}(t)$ 、 $P_{ES,ch}(t)$ 分别为  $t$  时刻蓄电池放电功率和充电功率，功率上限不超过充电和放电的最大功率，且同一时间仅有充电或放电 1 种状态，kW； $\eta_{ES,dis}$ 、 $\eta_{ES,ch}$ 分别为放电和充电效率； $Q_{ES}(t)$ 为  $t$  时刻蓄电池中储存的电量， $kW \cdot h$ 。

### 1.3.2 蓄热槽模型

蓄热槽充放能数学模型见式(11)：

$$\begin{cases} Q_{HS}(t) = Q_{HS}(t-1) + \eta_{HS,ch}P_{HS,ch}(t)\Delta t - \frac{P_{HS,dis}(t)\Delta t}{\eta_{HS,dis}} \\ Q_{HS,min} \leq Q_{HS}(t) \leq Q_{HS,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $P_{HS,dis}(t)$ 、 $P_{HS,ch}(t)$ 分别为  $t$  时刻蓄热槽放热功率和蓄热功率，功率上限不超过最大功率，且同一时间仅有蓄热或放热 1 种状态，kW； $\eta_{HS,dis}$ 、 $\eta_{HS,ch}$  分别为放热和蓄热效率； $Q_{HS}(t)$ 为  $t$  时刻蓄热槽中储存的热量，kW·h。

### 1.3.3 储能侧运行策略

选择以电定热为储能侧运行策略，依据当前可再生发电总功率与用户电负荷大小调度蓄电池和蓄热槽运行，系统运行过程中优先满足用户电负荷，运行逻辑框图如图 2 所示。

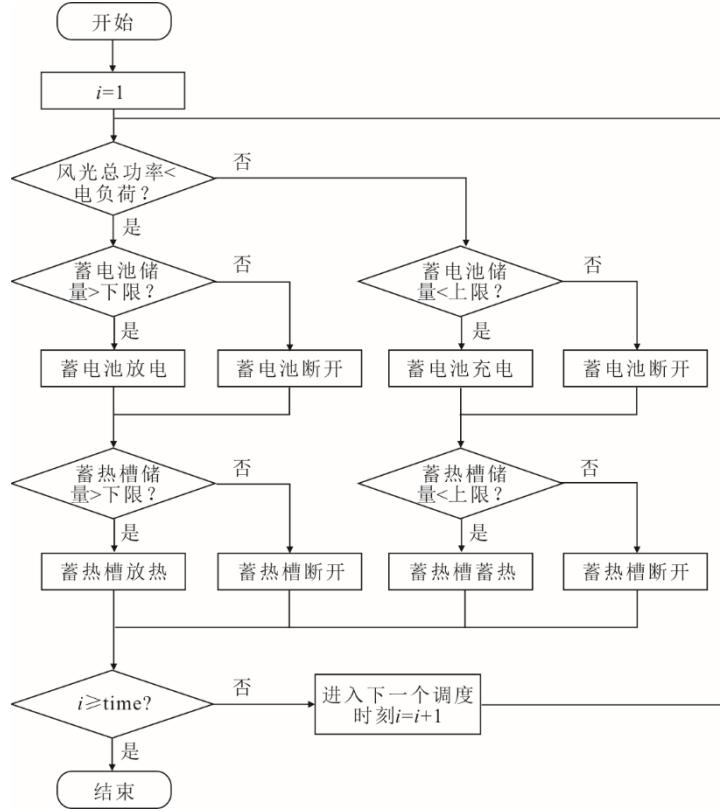


图 2 储能侧运行策略  
Fig.2 The strategy of energy storage equipment

## 2 优化调度模型

### 2.1 等式约束

负荷平衡约束条件如式(12)一式(15)所示。

用电平衡：

$$\begin{aligned}
 &P_{e,buy}(t) - P_{e,sell}(t) + P_{CHP,e}(t) - P_{P2G}(t) - \\
 &P_{EC,e}(t) - P_{HP,e}(t) + P_{WP}(t) + P_{PV}(t) + \\
 &P_{ES,dis}(t)/\eta_{ES,dis} - \eta_{ES,ch}P_{ES,ch}(t) = L_e(t)
 \end{aligned} \tag{12}$$

式中： $P_{e,buy}(t)$ 、 $P_{e,sell}(t)$ 分别为从电网购电功率和 IES 对外售电功率，同一时刻仅存在购电或售电 1 种情况，kW； $L_e(t)$ 为  $t$  时刻用户电负荷需求，kW。

供热平衡：

$$\begin{aligned}
 &P_{h,buy}(t) + P_{CHP,h}(t) + P_{HP}(t) - P_{AC,h,in}(t) - P_{h,waste}(t) + \\
 &P_{HS,dis}(t)/\eta_{HS,dis} - \eta_{HS,ch}P_{HS,ch}(t) = L_h(t)
 \end{aligned} \tag{13}$$

式中： $P_{h,buy}(t)$ 为市政热网购热功率，kW；考虑到热网的稳定性，IES 对外不售热； $P_{h,waste}(t)$ 为系统无法消纳的热量对外排出，kW； $L_h(t)$ 为  $t$  时刻用户热负荷需求，kW。

冷平衡：

$$P_{AC}(t) + P_{EC}(t) = L_c(t) \tag{14}$$

式中： $L_c(t)$ 为  $t$  时刻用户冷负荷需求，kW。

供气平衡：

$$V_{g,buy}(t) + \frac{\eta_{P2G}P_{P2G}(t)}{\lambda_{Gas}} - \frac{P_{CHP,e}(t)}{\eta_{CHP,e}\lambda_{Gas}} = L_g(t) \tag{15}$$

式中： $L_g(t)$ 为  $t$  时刻用户天然气负荷需求，m<sup>3</sup>。

### 2.2 不等式约束条件

构建如式(16)所示的不等式约束，从式(16)可以看到，每一时刻储能装置储能不能超过其最大储能上限且不能低于其最小储能下限。

$$\begin{cases} Q_{ES,\min} \leq Q_{ES}(0) - \frac{P_{ES,\text{dis}}}{\eta_{ES,\text{dis}}} + \eta_{ES,\text{ch}} P_{ES,\text{ch}} \leq Q_{ES,\max} \\ Q_{HS,\min} \leq Q_{HS}(0) - \frac{P_{HS,\text{dis}}}{\eta_{HS,\text{dis}}} + \eta_{HS,\text{ch}} P_{HS,\text{ch}} \leq Q_{HS,\max} \end{cases} \quad (16)$$

### 2.3 系统运行参数及设备容量

IES 在运行时各设备对外输出功率不应超过各自最大功率。IES 对外购电、购热、购气也不应超过能量管道输送的上限，对应于线性规划中描述为相应的自变量取值范围，设备等参数见表 1—表 3。

表 1 分时电价  
Tab.1 The time-of-use tariff

时段	时间划分	价格/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )
峰段	08:00—11:00, 18:00—23:00	0.657 4
平段	07:00—08:00, 11:00—18:00	0.415 7
谷段	23:00—07:00	0.174 0

表 2 能源交易价格  
Tab.2 Energy price

能源种类	价格
电	0.262 元/(kW·h)
热	0.098 元/(kW·h)
燃气	2.5 元/m <sup>3</sup>

表 3 IES 内各设备参数  
Tab.3 Equipment parameters within the IES

设备	容量	效率	运维费用/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )
燃气轮机	1 000 kW	0.330 (电) 0.470 (热)	0.130 0
P2G	1 000 kW	0.640	0.014 0
电制冷机	300 kW	3.500	0.030 0
热泵	500 kW	4.000	0.030 0
吸收式制冷机	200 kW	1.200	0.029 6
太阳能电池板	1 000 m <sup>2</sup>	式(2)	0.030 0
风机	1 500 kW	0.593	0.030 0
蓄电池	1 000 kW	0.970	0.035 0
蓄热槽	1 000 kW	0.950	0.031 0

此外，购电功率限制为 0~1 000 kW，售电功率为 0~1 000 kW，天然气购买限制为 0~100 m<sup>3</sup>，购热功率为 0~200 kW，蓄电池最大储能上限为 0.8、最小放能下限为 0.2，蓄热槽最大储能上限为 0.9、最小放能下限为 0.1。

## 2.4 目标函数

### 2.4.1 经济性调度指标

经济性调度指标如下，主要由购能费用售能收益和设备运维费用组成。

$$\min y_1 = y_{\text{buy}} - y_{\text{sell}} + y_{\text{cost}}$$

$$\begin{cases} y_{\text{buy}} = (m_{e,\text{buy}} P_{e,\text{buy}} + m_{h,\text{buy}} P_{h,\text{buy}} + m_{g,\text{buy}} P_{g,\text{buy}}) \Delta t \\ y_{\text{sell}} = m_{e,\text{sell}} P_{e,\text{sell}} \Delta t \\ y_{\text{cost}} = (m_{\text{CHP}} P_{\text{CHP}} + m_{\text{P2G}} P_{\text{P2G}} + m_{\text{EC}} P_{\text{EC}} + \\ m_{\text{HP}} P_{\text{HP}} + m_{\text{AC}} P_{\text{AC}} + m_{\text{WP}} P_{\text{WP}} + m_{\text{PV}} P_{\text{PV}} + \\ m_{\text{ES}} (P_{\text{ES},\text{dis}} + P_{\text{ES},\text{ch}}) + m_{\text{HS}} (P_{\text{HS},\text{dis}} + P_{\text{HS},\text{ch}})) \Delta t \end{cases} \quad (17)$$

式中： $y_{\text{buy}}$  为对外购能花费，元； $y_{\text{sell}}$  为对外售能收益，在该 IES 中为售电收益； $y_{\text{cost}}$  为 IES 内设备运维费用，元； $m_i$  为各设备运维价格，元/(kW·h)，具体数值见表 1—表 3。

### 2.4.2 二氧化碳减排指标

二氧化碳减排指标如下，主要考虑了火力发电以及天然气燃烧产生的排放和电转气设备所能吸收的二氧化碳。

$$\min y_2 = (\mu_{e,\text{buy}} P_{e,\text{buy}} + \mu_{g,\text{buy}} P_{g,\text{buy}} + \mu_{h,\text{buy}} P_{h,\text{buy}} + \mu_{\text{CHP}} P_{\text{CHP}} - \mu_{\text{P2G}} P_{\text{P2G}}) \Delta t \quad (18)$$

式中： $\mu_{e,\text{buy}}$  为火电产生的 CO<sub>2</sub> 排放，取 0.75 kg/(kW·h)； $\mu_{g,\text{buy}}$  为购买的天然气燃烧所产生的 CO<sub>2</sub> 排放，取 2.75 kg/m<sup>3</sup>； $\mu_{h,\text{buy}}$  为购买外部热力所产生的 CO<sub>2</sub> 排放，取 0.301 kg/(kW·h)； $\mu_{\text{CHP}}$  为燃气轮机工作所产生的 CO<sub>2</sub> 排放，取 0.255 kg/(kW·h)； $\mu_{\text{P2G}}$  为电转气设备工作所减少的大气中 CO<sub>2</sub> 量，取 0.18 kg/(kW·h)<sup>[21-25]</sup>。

### 2.4.3 可再生能源弃用惩罚指标

可再生能源弃用惩罚指标用于降低系统风电光伏弃用功率。

$$\min y_3 = v(P_{\text{WP,waste}} + P_{\text{PV,waste}}) \quad (19)$$

式中： $P_{\text{WP,waste}}$ 、 $P_{\text{PV,waste}}$  分别为风电和光伏弃用功率，kW； $v$  为可再生能源弃用惩罚价格，根据文献[20]选取为 1.7 元/kW。

### 2.4.4 综合性调度指标

为避免一般的数据归一化处理后抹杀各指标变异程度上的差异，本文选择将所有指标统一单位为价格，对 CO<sub>2</sub> 排放指标选择用碳排放交易市场上的碳价将其单位化为价格，最后对所有指标进行累加构成如式(20)所示的综合性评价指标，这是一种包含碳价的经济运行成本。

$$\min Y = \sum_{t=1}^{\text{time}} (y_1(t) + k_c y_2(t) + y_3(t)) \quad (20)$$

式中： $k_c$  为碳价，取 0.04 元/kg。该指标综合考虑了低碳经济性和可再生能源消纳。

### 3 算例分析

借助 Energyplus 软件, 模拟乌鲁木齐天气环境下, 某 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> 大型商业建筑全年能耗, 根据历史天气数据模拟结果如图 3 所示。

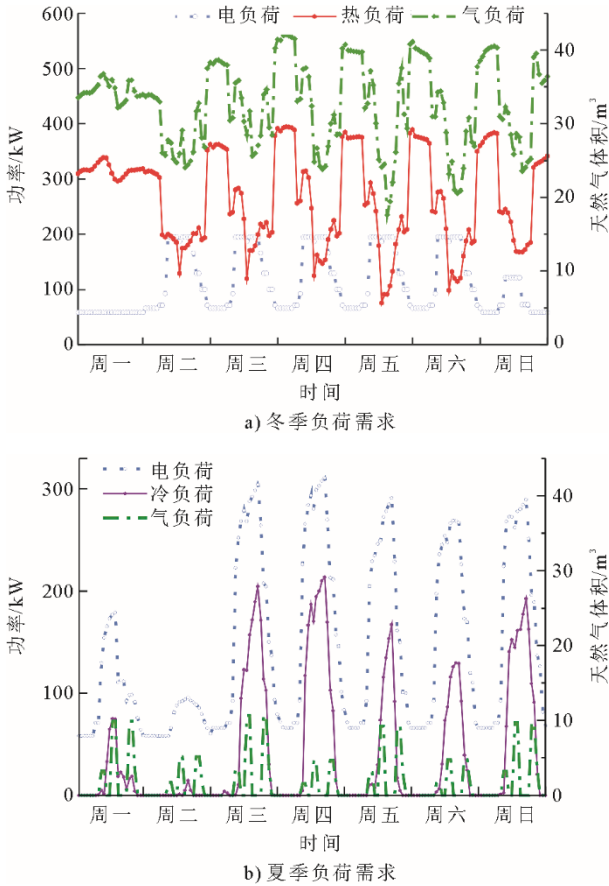


图 3 用户负荷数据  
Fig.3 The user load data

#### 3.1 不同指标调度运行结果对比

##### 3.1.1 全周期运行成本及 CO<sub>2</sub> 排放对比

选取冬季负荷数据, 使用线性规划求解器 Gurobi 求解系统调度结果, 调度时长为 1 周 (168 h), 结果见表 4。

表 4 优化结果对比  
Tab.4 Comparison of optimization results

优化目标	运行成本 (不含碳价)/元	CO <sub>2</sub> 排放/kg	含碳价运行 成本/元
y <sub>1</sub>	15 197.44	25 170.45	16 204.26
y <sub>2</sub>	18 126.90	17 212.47	18 814.40
y <sub>3</sub>	17 134.16	31 736.12	18 404.60
Y	15 230.25	21 580.74	16 093.48

以最低运行成本为调度策略会产生大量碳排放, 以减少碳排放为调度指标可以大大减少碳排放, 然而运维成本偏高; 仅以可再生能源弃用惩罚

为调度指标, 会使系统中高碳排放设备失去限制导致碳排放大量增加, 并且其运行成本也较高; 而以综合性指标调度的策略兼顾了碳排放和运维成本, 同时可以减少可再生能源的弃用。

##### 3.1.2 模拟碳价及运维成本变化对调度结果的影响

基础碳价选 0.04 元/kg, 碳价及运维成本各增长 10%, 选择冬季用户负荷数据进行计算, 模拟结果如图 4 所示。综合性指标随运维成本增长呈增加趋势且增幅较大。综合性调度受碳价影响, 随着碳交易价格的增长, 其综合性指标数值呈增加趋势但并没有随运维成本变化显著。

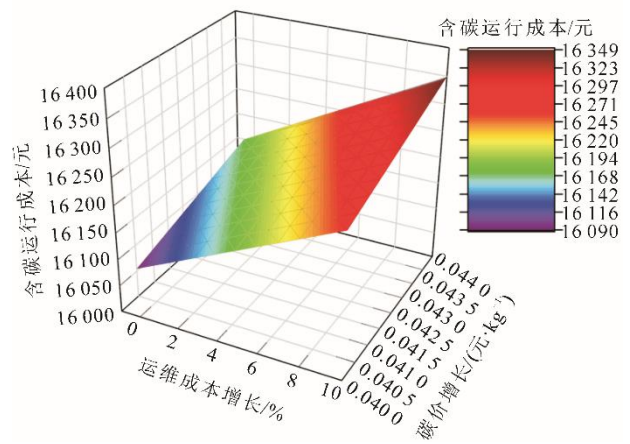


图 4 模拟价格变化对调度结果影响  
Fig.4 The influence of price change on dispatching results

#### 3.2 综合性指标运行调度

对系统按综合指标进行调度。1~3 月供暖期典型气象周绘制调度结果如图 5 所示。供暖期, 用户无冷负荷, 则系统中电制冷机和吸收式制冷机不工作。电负荷主要由风电和光电提供, 不足部分由电网购电。当可再生能源产出过多时, 由蓄电池储存电能, 蓄电池满额后由热泵消耗多余的电能产热, 将热能储存在蓄热槽中。考虑到低碳运行经济指标, 部分可再生能源发电量由 P2G 设备消纳。热调度中系统热负荷由热泵、燃气轮机和蓄热槽提供, 不足部分由系统从市政热网购买热量补足。天然气消耗包括 2 部分: 用户天然气消耗和燃气轮机工作消耗。天然气供应主要由综合能源系统从天然气网络中购气, 当可再生能源发电量过剩时, 由 P2G 设备消纳该部分电能并产生天然气供给用户消耗。

7~9 月的 IES 运行结果如图 6 所示。夏季天气条件下用户有冷负荷需求无热负荷需求, 系统中电制冷机和吸收式制冷机组开始工作。夏季工况电调度下, 光伏发电功率明显大于冬季, 可再生能源发

电量大量出售给上级电网。此时为消纳可再生能源，P2G和储能设备工作时间明显长于冬季工况。当出现用户电负荷峰值时，由燃气轮机消耗P2G所产天然气，发电补足用电负荷缺口。燃气轮机工作所产生的多余热量储存在蓄热槽中，当蓄热槽储满后剩余热量作为废热排出。夏季供冷调度，冷量由

吸收式制冷机组和电制冷机提供。其中，吸收式制冷机组所需热量主要由热泵以及燃气轮机提供，蓄热槽在其中起到热量的时间平移作用保证在产热装置不工作时仍提供热量保证制冷机工作。如图6所示，其中用气量和制冷需求遵从日常工作时间规划，故在凌晨无冷-气负荷需求。

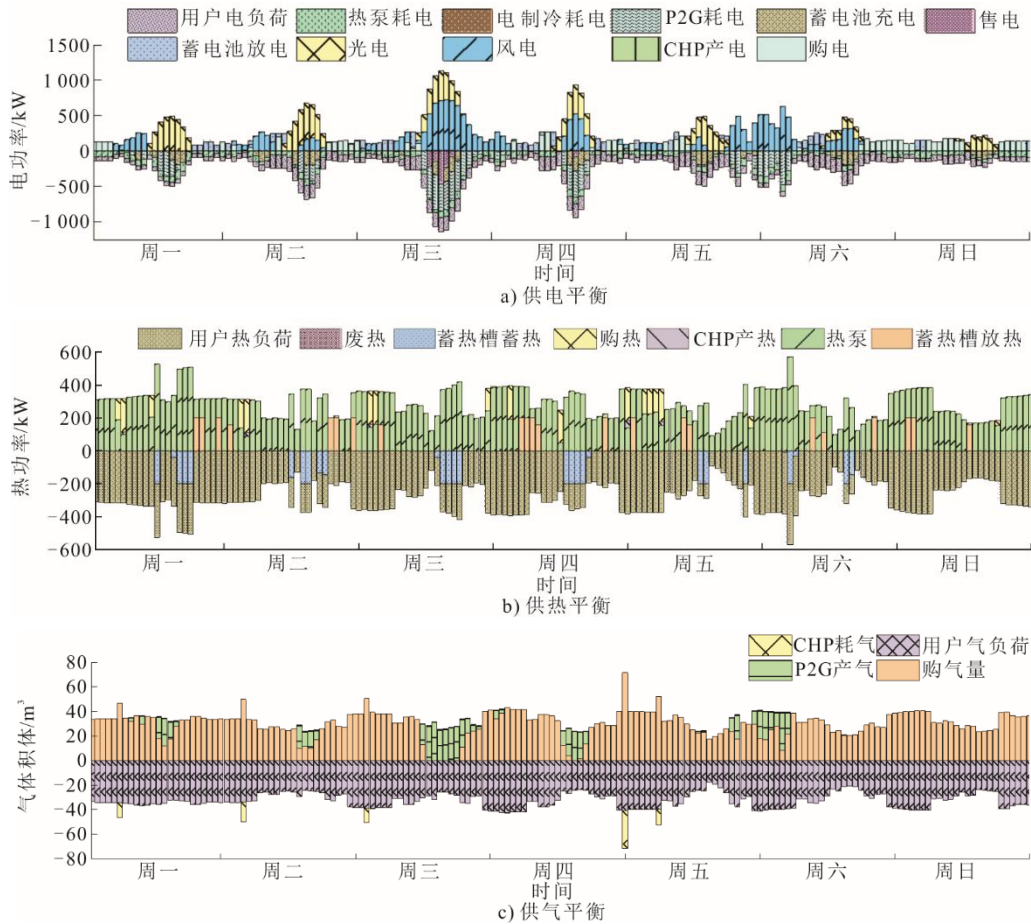
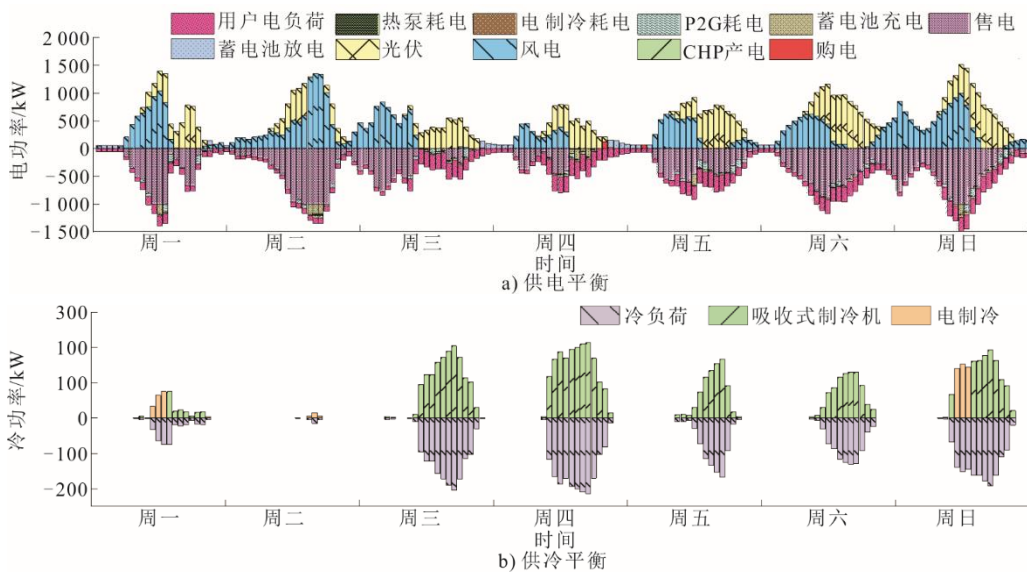


图5 冬季 IES 调度源-荷匹配图  
Fig.5 IES operation source-load balance in winter



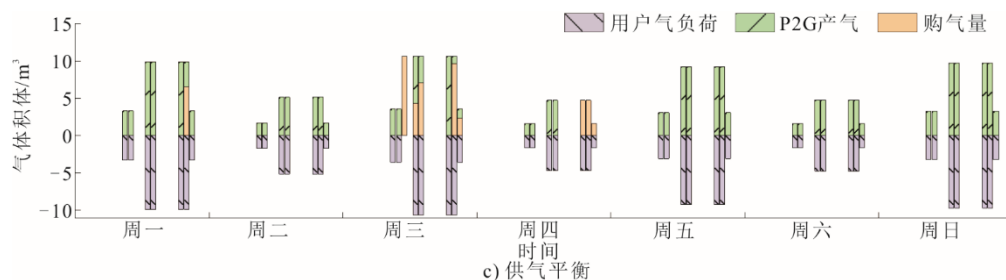


图6 夏季 IES 调度源-荷匹配图

Fig.6 IES operation source-load balance in summer

## 4 结 论

1) 经济性调度指标的碳减排效果劣于综合性指标, 综合性指标的调度结果优与其他指标, 可以同时实现 CO<sub>2</sub> 减排和降低系统运行成本。

2) 仅以碳减排为目标的调度会导致系统本身的运行成本较高, 只考虑可再生能源消纳的调度指标不能限制燃气轮机等高 CO<sub>2</sub> 排放设备的运行, 导致系统运行成本更高, 碳排放量更大。

3) 在设计能源系统的运行调度指标时, 除了实现系统运行成本最低外, 还必须同时兼顾可再生能源消纳与碳排放指标, 避免系统中的高污染设备产生高排放。

### 【参 考 文 献】

- [1] 崔杨, 曾鹏, 王铮, 等. 计及电价型需求侧响应含碳捕集设备的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 447-461.  
CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system with carbon capture equipment considering price-based demand response[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 447-461.
- [2] 夏明超, 花志浩, 陈奇芳, 等. 考虑热环网时延的区域 IES 分层分布式优化方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 470-480.  
XIA Mingchao, HUA Zhihao, CHEN Qifang, et al. Distributed hierarchical optimization for area integrated energy systems considering heat transmission delay of thermal loop network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 470-480.
- [3] 顾文波, 李雨桐, 陈益明, 等. 公共机构建筑多源冷热电联供系统优化调度研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(4): 330-336.  
GU Wenbo, LI Yutong, CHEN Yiming, et al. Research on optimal scheduling of multi-source cooling, heating and power cogeneration systems for public buildings and institutions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(4): 330-336.
- [4] GEIDL M, KOEPEL G, FAVREPERROD P, et al. Energy hubs for the future[J]. Power & Energy Magazine IEEE, 2007, 5(1): 24-30.
- [5] CHICCO G, MANCARELLA P. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization[J]. Energy, 2009, 34(3): 261-273.
- [6] WANG Y, ZHANG N, KANG C, et al. Standardized matrix modeling of multiple energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 257-270.
- [7] 陈瑜玮, 孙宏斌, 郭庆来. 综合能源系统分析的统一能路理论(五): 电-热-气耦合系统优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7928-7937.  
CHEN Yuwei, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (V): integrated electricity-heat-gas dispatch[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7928-7937.
- [8] 尹冠雄, 陈彬彬, 孙宏斌, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(四): 天然气网动态状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5827-5836.  
YIN Guanxiong, CHEN Binbin, SUN Hongbin, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (IV): dynamic state estimation of the natural gas network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5827-5836.
- [9] 陈彬彬, 孙宏斌, 吴文传, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(三): 稳态与动态潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4820-4830.  
CHEN Binbin, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (III): steady and dynamic energy flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4820-4830.
- [10] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142.  
CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142.
- [11] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 436-443.  
CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis (I): gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443.
- [12] 顾文波, 李雨桐, 马涛. 寒冷地区公共机构建筑多能源系统优化模型研究[J]. 制冷技术, 2019, 39(5): 9-14.  
GU Wenbo, LI Yutong, MA Tao. Study on optimization model of hybrid energy system for public buildings in cold regions[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2019, 39(5): 9-14.
- [13] XIA M, HUA Z, CHEN Q, et al. Distributed optimal scheduling of multi-region integrated energy systems considering regional heating network[C]//2020 IEEE

- Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2020.
- [14] 赵冬梅, 夏轩, 陶然. 含电转气的热电联产微电网/热综合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 46-54.  
ZHAO Dongmei, XIA Xuan, TAO Ran. Optimal configuration of electric/thermal integrated energy storage for combined heat and power microgrid with power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 46-54.
- [15] WANG Y, HUANG F, TAO S, et al. Multi-objective planning of regional integrated energy system aiming at exergy efficiency and economy[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118120.
- [16] LI M, ZHONG D, MA T, et al. Photovoltaic thermal module and solar thermal collector connected in series: energy and exergy analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 206: 112479.
- [17] 张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 34-39.  
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, HU Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 34-39.
- [18] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.  
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.
- [19] BELFKIRA R, NICHITA C, REGHEM P, et al. Modeling and optimal sizing of hybrid renewable energy system[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th. IEEE, 2008.
- [20] 杨昭, 艾欣. 考虑电能共享的综合能源楼宇群分布式优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3769-3778.  
YANG Zhao, AI Xin. Distributed optimal scheduling for integrated energy building clusters considering energy sharing[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3769-3778.
- [21] LI Y, ZHANG F, LI Y, et al. An improved two-stage robust optimization model for CCHP-P2G microgrid system considering multi-energy operation under wind power outputs uncertainties[J]. Energy, 2021, 223(9): 120048.
- [22] 花志浩. 综合能源系统需求响应及分布式优化调度方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021: 13.  
HUA Zhihao. Research on demand response and distributed optimal dispatch method for integrated energy system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021: 13.
- [23] BAUMANN C, SCHUSTER R, MOSER A. Economic potential of power-to-gas energy storages[C]//European Energy Market (EEM), 2013 10th International Conference on the. IEEE, 2013.
- [24] MANUEL G, JONATHAN L, FRIEDEEMANN M, et al. Renewable power-to-gas: a technological and economic review[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 1371-1390.
- [25] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.

(责任编辑 李园)