

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230895

低碳矿区综合能源系统经济运行优化研究

负保记^{1,2}, 赵文¹, 王建学³, 负鑫哲¹

(1. 西安科技大学, 陕西 西安 710054; 2. 西安西瑞控制技术有限公司, 陕西 西安 710077;
3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对煤矿开采过程中碳排放量高以及乏风、瓦斯、矿井涌水等伴生能源得不到及时有效利用的问题, 提出一种低碳经济运行的矿区综合能源系统(coal mine integrated energy system, CMIES)。首先, 为使矿区伴生能源得到充分利用, 搭建了一个包含燃气轮机、乏风氧化发电单元、水源热泵等设备的 CMIES 模型。其次, 为降低矿区碳排放量, 在 CMIES 中加入光伏、风电、电转气与氢燃料电池等设备。同时, 引入阶梯式碳交易机制与绿色证书交易机制(green certificate trading, GCT), 通过“双机制”模型来约束系统碳排放、激励新能源设备出力。最后, 调用 CPLEX 商业求解器, 以购能成本、新能源设备运行成本、碳排放成本最小为目标函数进行求解。结果表明: 优化后的 CMIES 碳排放量显著降低, 运行成本大幅减少。

关键词: 矿区综合能源系统; 伴生能源; 低碳经济; 阶梯式碳交易; 绿证交易机制

Economic operation optimization of an integrated energy system in low carbon mining area

YUN Baoji^{1,2}, ZHAO Wen¹, WANG Jianxue³, YUN Xinzhe¹

(1. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xi'an Xirui Control Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: There are problems of high carbon emission in the process of coal mining and the lack of timely and effective use of associated energy such as that from a ventilation air meter, coal mine gas and mine gushing water. Thus a coal mine integrated energy system (CMIES) with low carbon and economic operation is proposed. First, to make full use of the associated energy in the mining area, a CMIES model including gas turbine, exhaust air oxidation power generation unit, water source heat pump and other equipment is built. Secondly, in order to reduce the carbon emissions, equipment such as photovoltaic, wind power, power-to-gas and hydrogen fuel cells are added to the CMIES. At the same time, stepwise carbon and green certificate trading mechanisms are introduced to constrain the system's carbon emissions and stimulate the output of new energy equipment through the 'dual mechanism' model. Finally, the CPLEX commercial solver is used to solve the objective function with the minimum energy purchase, new energy equipment operation and carbon emission costs. The results show that the optimized CMIES carbon emissions are significantly reduced and the operating costs are greatly lowered.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777155).

Key words: CMIES; associated energy; low-carbon economy; stepwise carbon trading; GCT

0 引言

国家统计局公布数据显示, 2022 年我国煤炭消费总量为 44.9 亿 t, 同比增长 9%, 我国能源消费仍以煤炭为主。在煤炭生产过程中, 将伴随着乏风、瓦斯、矿井涌水等伴生能源的产生, 这些伴生能源

里蕴含着大量可以回收利用的能量, 如果未得到及时有效利用, 不仅造成资源浪费, 也会对周围环境形成污染, 需要进行额外的环境治理^[1]。

综合能源系统(integrated energy system, IES)是以电力系统为核心、通过能量转换设备和存储设备来实现多种能源的协同规划和运行的新型能源系统, 近年来已经成为应对能源和环境问题的重要手段^[2]。目前, 许多学者针对 IES 的规划与运行进行

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777155)

了研究。为了提高能源利用率,文献[3]将冷能回收设备与系统中其他供能设备协同调度,实现了系统内多种能源的梯级利用。文献[4]在 IES 规划阶段通过合理配置设备容量以降低建设成本,并在运行阶段提出了一种非线性动态氢定价机制。上述文献重点考虑了如何提高传统能源的利用效率和激励氢能源的利用,从而实现成本的优化,但对碳排放问题以及多种能源间的耦合较少讨论。文献[5]为挖掘 IES 在低碳环保方面的潜力,引入碳交易市场对系统碳排放进行制约。文献[6]通过研究氢气作为季节性储能的制-储-用过程,选择燃氢轮机替换常规燃料电池作为氢-电转换的方式,为控制系统碳排放量,提出了期货式碳交易机制。文献[7]将电转气(power to gas, P2G)细化成两个阶段运行,考虑了电解槽、甲烷反应器的实际运行特性以及氢能源的充放过程,从而替换传统的 P2G。文献[8]则对电解槽、氢燃料电池进行了精细化建模,提出了一种考虑热动态平衡且考虑氢储能的 IES 模型。文献[9]综合考虑了园区内冷、热、电的储能,对储能设备进行了优化建模,并通过算例分析了不同储能设备对系统经济运行的影响。但上述文献均未考虑对新能源发电的激励,且新能源消纳问题未得到良好解决。为解决可再生能源的消纳问题,文献[10]在综合能源系统的研究中,将电网、气网、热网与清洁能源协同交互,进而激励清洁能源的发展。由于新能源并网会导致电网调度的灵活性不足,文献[11]提出了灵活性资源参与风光消纳的调控方法,建立“规划-运行”的双层模型对新能源消纳问题进行优化。文献[12]提出了一种绿证和碳联合交易市场的模式,将绿色发电企业与传统化石能源发电企业联系起来,激励新能源发电,减少碳排放,推动能源转型。文献[13]建立了适用于乡村地区的沼气-风能-太阳能综合能源系统两阶段优化模型,其中第一阶段优化模型用于优化设备容量配置,第二阶段优化模型用于优化调度策略。文献[14]建立了电-气-热-冷四联供综合能源系统,从降低系统运维成本、减少碳排放量和新能源弃用等方面进行了多目标优化研究。

上述文献介绍了 IES 的研究现状,总结了近年来 IES 在规划与运行方面的优化发展,但其应用场景大多是工业园区,并未考虑到将综合能源系统的能源协同与低碳环保的特性应用在矿区。文献[15]介绍了超低浓度瓦斯蓄热氧化利用技术的研究现状,指出可以利用低浓度瓦斯产生的高温烟气,根据热逆流氧化原理进行发电、供热。文献[16]通过分析矿井涌水的特点,根据热量交换原理,将其作

为水源热泵的理想冷热源,使矿井涌水得到了良好的利用。文献[17]在双碳背景下提出了一种集约型“煤-水-热”多资源协同共采的理论与技术构想,并以陕西榆林某矿区为案例进行了分析。文献[18]根据矿区乏风、瓦斯、矿井涌水等伴生能源的赋存特点、抽排方式及利用现状,构建了基于伴生能源利用的综合能源拓扑结构,并采用两阶段鲁棒优化对系统进行运行优化。结果表明,该文献提出的运行策略鲁棒性良好,对伴生能源的消纳效果较好。但上述文献仅考虑了伴生能源的利用,未考虑矿区碳排放及新能源的利用问题,低碳目标有待进一步挖掘。

综上所述,本文在现有研究的基础上,提出在矿区建立矿区综合能源系统(coal mine integrated energy system, CMIES)。该系统在绿色证书交易机制(green certificate trading, GCT)与阶梯式碳交易机制的“双机制”激励下,充分利用新能源发电,并将煤矿开采过程中产生的伴生能源加以采集利用,进而达到矿区低碳经济运行的目的。在满足系统内矿区典型日前各负荷预测的约束平衡的条件下,构建了以上级购能成本、新能源设备运行成本、碳排放成本最小的低碳经济运行模型。本文将各设备数学模型转换为混合整数线性问题,利用 Matlab 仿真软件,采用 Yalmip 工具箱搭建日前优化运行模型,调用 CPLEX 商业求解器进行求解,并通过对比分析各种不同运行情景,验证了所提方案的有效性。

1 低碳目标下的 CMIES 框架

本文所提出的矿区综合能源拓扑结构^[19-20]主要由 4 个单元组成,分别是能源供给单元、能量耦合单元、储能单元和负荷单元。

能源供给单元主要由可再生能源部分、矿区伴生能源综合利用部分、外部供能部分组成。同时,为降低碳排放、激励新能源设备出力,引入 GCT 和阶梯式碳交易机制,使得系统优先考虑风、光伏发电及低碳机组出力。矿区伴生能源综合利用系统则是通过瓦斯抽采泵、矿井通风机、涌水排水泵来收集矿区的伴生能源供给到燃气轮机、乏风氧化发电单元、水源热泵,进而为整个系统提供能量。

能量耦合单元主要由余热锅炉、燃气锅炉、P2G 机组、吸收式制冷机、电制冷机、氢燃料电池组成。储能单元主要是对多余的热、电、氢进行存储,根据负荷侧的变化,进行灵活调度。负荷单元主要包括煤矿生产及矿区生活办公的电、气、热、冷负荷。上述低碳矿区综合能源系统框架如图 1 所示。

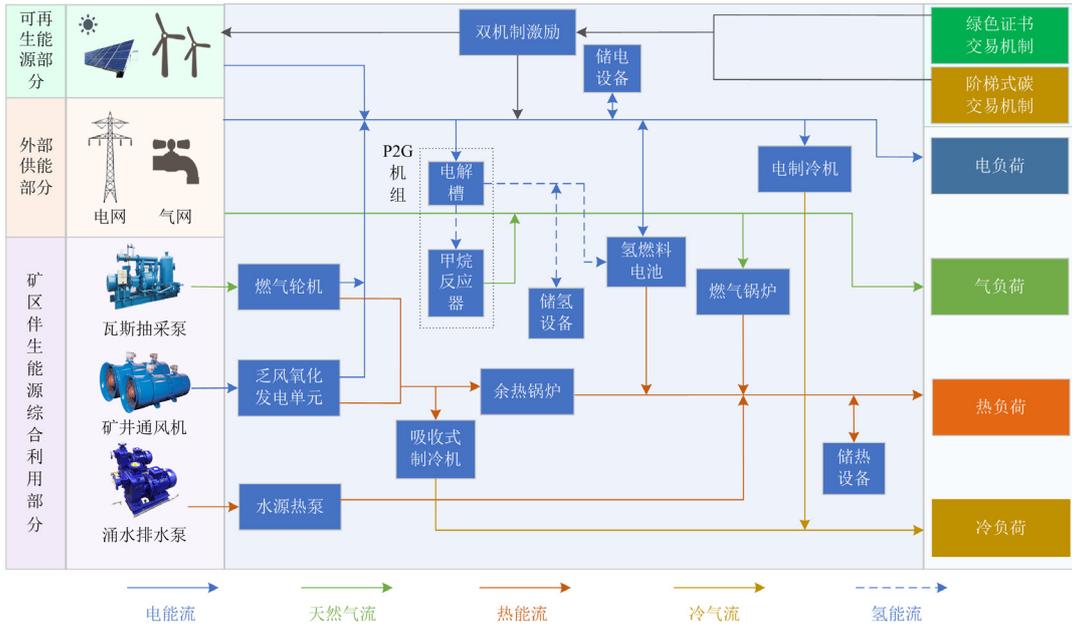


图 1 低碳目标下的 CMIES 框架

Fig. 1 Structure of CMIES under low carbon target

1.1 阶梯式碳交易机制

碳交易机制是一项激励系统减少碳排放的重要措施, 该措施通过将碳排放的权力合法化, 由相关部门对碳排放权进行科学分配, 各生产商结合自身获取的碳配额制定合理的生产与碳排放计划^[21]。本文考虑国家免费配额制, 阶梯式碳交易机制模型主要包含碳排放配额模型、实际碳排放模型和阶梯式碳排放交易模型^[5]。

1) 碳排放配额模型

本文中 CMIES 的碳排放主要来自网上购电、燃气轮机、乏风蓄热氧化装置、燃气锅炉。此处网上购电量均来自于燃煤火电机组。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{CMIES}}^* = E_{\text{e-buy}}^* + E_{\text{GT}}^* + E_{\text{RTO}}^* + E_{\text{GB}}^* \\ E_{\text{e-buy}}^* = \sum_{t=1}^{24} \tau_c^* P_{\text{e-buy}}(t) \\ E_{\text{GT}}^* = \sum_{t=1}^{24} \tau_c^* P_{\text{GT-c}}(t) + \tau_g^* P_{\text{GT-h}}(t) \\ E_{\text{RTO}}^* = \sum_{t=1}^{24} \tau_c^* P_{\text{RTO-c}}(t) + \tau_g^* P_{\text{RTO-h}}(t) \\ E_{\text{GB}}^* = \sum_{t=1}^{24} \tau_g^* P_{\text{GB-h}}(t) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: E_{CMIES}^* 为系统碳排放配额; $E_{\text{e-buy}}^*$ 为购电燃煤火电机组碳配额; E_{GT}^* 为燃气轮机碳配额; E_{RTO}^* 为

乏风蓄热氧化装置碳配额; E_{GB}^* 为燃气锅炉碳配额; τ_c^* 为单位发电量碳排放配额; τ_g^* 为单位供热量碳排放配额; $P_{\text{e-buy}}(t)$ 为 t 时段系统网上购电量; $P_{\text{GT-c}}(t)$ 为 t 时段燃气轮机产电功率; $P_{\text{GT-h}}(t)$ 为 t 时段燃气轮机高温烟气热功率; $P_{\text{RTO-c}}(t)$ 为 t 时段乏风蓄热氧化装置输出电功率; $P_{\text{RTO-h}}(t)$ 为 t 时段乏风蓄热氧化装置高温烟气热功率; $P_{\text{GB-h}}(t)$ 为 t 时段燃气锅炉产热量。

2) 实际碳排放模型

系统实际运行时, P2G 机组在氢气甲烷化的过程中将消耗一部分 CO_2 , 故系统实际的碳排放模型如式(2)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{CMIES}} = E_{\text{e-buy}} + E_{\text{GT}} + E_{\text{RTO}} + E_{\text{GB}} - E_{\text{MR}} \\ E_{\text{MR}} = \sum_{t=1}^{24} \sigma_{\text{CO}_2} P_{\text{g-MR}}(t) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: E_{CMIES} 为系统实际碳排放总量; $E_{\text{e-buy}}$ 为购电燃煤火电机组实际碳排放量; E_{GT} 为燃气轮机实际碳排放量; E_{RTO} 为乏风蓄热氧化装置实际碳排放量; E_{GB} 为燃气锅炉实际碳排放量; E_{MR} 为 P2G 机组甲烷反应器吸收的 CO_2 量; σ_{CO_2} 为消耗 CO_2 系数; $P_{\text{g-MR}}(t)$ 为甲烷化产气量。

3) 阶梯式碳排放交易模型

通过上述碳配额及碳排放模型的构建, 可以求

得本系统实际参与到碳交易市场的碳排放量为

$$E = E_{\text{CMIES}} - E_{\text{CMIES}}^* \quad (3)$$

为进一步约束碳排放, 本文采用阶梯式定价机制。与阶梯式电价类似, 碳排放量越多, 所需要购买的碳配额价钱越高。阶梯式碳交易数学模型为

$$C_{\text{CET}} = \begin{cases} \lambda E, E \leq l \\ \lambda(1+\alpha)(E-l) + \lambda l, l < E \leq 2l \\ \lambda(1+2\alpha)(E-2l) + \lambda(2+\alpha)l, 2l < E \leq 3l \\ \lambda(1+3\alpha)(E-3l) + \lambda(3+3\alpha)l, 3l < E \leq 4l \\ \lambda(1+4\alpha)(E-4l) + \lambda(4+6\alpha)l, E > 4l \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_{CET} 为阶梯式碳交易成本; λ 为碳交易基价; l 为碳排放量区间长度; α 为价格增长率。

1.2 绿色证书交易机制

参与碳排放权交易的同时建立绿色证书交易市场, 能够有效解决可再生能源消纳问题^[22]。

系统持有绿证表示该系统中部分电能是由新能源设备提供的。GCT 与碳交易机制类似, 当系统利用新能源发电量换取的绿证数量大于绿证配额指标时, 可在绿证市场上出售多余绿证获得收益; 反之, 则须购买绿证以满足配额指标。

$$C_{\text{GCT}} = \lambda_g \left(\alpha_g \sum_{i=1}^{24} P_{\text{load-e}} - k_g \sum_{i=1}^{24} P_{\text{wind,sun}} \right) \quad (5)$$

式中: C_{GCT} 为系统绿证交易成本; λ_g 为绿证交易价格; α_g 为系统绿证配额系数; k_g 为可再生能源发电量转换为绿证数量的转换系数; $P_{\text{load-e}}$ 为系统电能总需求量; $P_{\text{wind,sun}}$ 为系统风、光出力。

2 低碳 CMIES 设备数学模型

本文在考虑伴生能源及氢能源利用的基础上, 加入可再生能源和储能设备, 实现矿区综合能源系统的低碳经济运行。通过对各典型设备的数学建模, 可以清楚地展示出能量转换的耦合过程。

2.1 光伏与风力发电设备模型

光伏、风力发电系统建设时需考虑征地问题, 目前我国征地费用较高, 因此利用矿区土地资源进行新能源发电系统建设的方案应运而生^[23]。本文所建立的光伏与风力发电设备数学模型^[11]如下所述。

光伏发电设备数学模型为

$$P_{\text{sun}}(t) = \eta_{\text{PV}} S_{\text{PV}} T_{\text{solar}}(t) \quad (6)$$

式中: $P_{\text{sun}}(t)$ 为光伏发电输出功率; η_{PV} 为光伏发电效率; S_{PV} 为光伏面积; $T_{\text{solar}}(t)$ 为光照强度。

风力发电设备数学模型为

$$P_{\text{wind}}(t) = \begin{cases} 0, v < v_{\text{in}} \\ P_c \frac{v - v_{\text{in}}}{v_c - v_{\text{in}}}, v_{\text{in}} \leq v < v_c \\ P_c, v_c \leq v < v_{\text{out}} \\ 0, v \geq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{\text{WT}}(t) = N \cdot P_{\text{wind}}(t) \quad (8)$$

式中: $P_{\text{wind}}(t)$ 为 t 时段单台风力发电设备输出功率; P_c 为单台风力发电设备输出额定功率; $P_{\text{WT}}(t)$ 为 t 时段风力发电总输出功率; N 为装设风机数量; v 、 v_{in} 、 v_c 、 v_{out} 分别为场景实际风速、设备切入风速、设备额定风速、设备切出风速, 单位为 m/s。

2.2 伴生能源利用设备模型

1) 燃气轮机设备模型

本文将矿区伴生能源抽采泵收集的瓦斯气体作为燃气轮机的燃料来源。其数学模型如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{eq-g}}(t) = v_{\text{gas}}(t) \delta_{\text{gas}}(t) \varepsilon_{\text{gas}} \\ P_{\text{GT-e}}(t) = \eta_{\text{GT-e}} P_{\text{eq-g}}(t) \\ P_{\text{GT-h}}(t) = \eta_{\text{GT-h}} P_{\text{eq-g}}(t) \\ v_{\text{gas}}^{\min} \leq v_{\text{gas}}(t) \leq v_{\text{gas}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{eq-g}}^{\min} \leq P_{\text{eq-g}}(t+1) - P_{\text{eq-g}}(t) \leq \Delta P_{\text{eq-g}}^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{eq-g}}(t)$ 为 t 时段抽排出的瓦斯等效热功率; $\eta_{\text{GT-e}}$ 、 $\eta_{\text{GT-h}}$ 分别为燃气轮机的产电、产热效率; $v_{\text{gas}}(t)$ 为 t 时段通入燃气轮机的瓦斯流量; $v_{\text{gas}}^{\max}(t)$ 、 $v_{\text{gas}}^{\min}(t)$ 分别为 t 时段通入燃气轮机瓦斯流量的上下限; $\delta_{\text{gas}}(t)$ 为 t 时段煤矿瓦斯中的甲烷浓度; ε_{gas} 为天然气热值, 取 9.7 kWh/m³^[5]; $\Delta P_{\text{eq-g}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{eq-g}}^{\min}$ 分别为燃气轮机的爬坡上下限。

2) 乏风蓄热氧化装置模型

煤矿乏风蓄热氧化技术利用热逆流氧化原理, 将反应产生的大部分热量在热流转反应器搭配的汽轮机装置中进行发电、发热, 其数学模型如式(10)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{eq-v}}(t) = v_{\text{vam}}(t) \delta_{\text{vam}}(t) \varepsilon_{\text{gas}} \\ P_{\text{RTO-e}}(t) = \eta_{\text{RTO-e}} P_{\text{eq-v}}(t) \\ P_{\text{RTO-h}}(t) = \eta_{\text{RTO-h}} P_{\text{eq-v}}(t) \\ v_{\text{vam}}^{\min} \leq v_{\text{vam}}(t) \leq v_{\text{vam}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{eq-v}}^{\min} \leq P_{\text{eq-v}}(t+1) - P_{\text{eq-v}}(t) \leq \Delta P_{\text{eq-v}}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{eq-v}}(t)$ 为 t 时段抽排出的乏风瓦斯等效热功率; $\eta_{\text{RTO-e}}$ 、 $\eta_{\text{RTO-h}}$ 分别为乏风蓄热氧化装置的产电、产热效率; $v_{\text{vam}}(t)$ 为 t 时段通入装置的乏风流量;

$v_{\text{vam}}^{\max}(t)$ 、 $v_{\text{vam}}^{\min}(t)$ 分别为 t 时段通入装置乏风流量的上下限; $\delta_{\text{vam}}(t)$ 为 t 时段乏风中的甲烷浓度; $\Delta P_{\text{eq-v}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{eq-v}}^{\min}$ 分别为乏风蓄热氧化装置的爬坡上下限。

3) 余热锅炉模型

在 CMIES 中, 余热锅炉将燃气轮机、乏风蓄热氧化装置排出的高温烟气进行余热回收。其数学模型如式(11)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{WHB}}(t) = \eta_{\text{WHB}} P_{\text{WHB-in}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{WHB-in}}(t) \leq P_{\text{WHB-in}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{WHB}}^{\min} \leq P_{\text{WHB}}(t+1) - P_{\text{WHB}}(t) \leq \Delta P_{\text{WHB}}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{WHB}}(t)$ 为 t 时段余热锅炉产热功率; η_{WHB} 为余热锅炉产热效率; $P_{\text{WHB-in}}(t)$ 为 t 时段输入余热锅炉的热功率; $P_{\text{WHB-in}}^{\max}$ 为输入功率上限; $\Delta P_{\text{WHB}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{WHB}}^{\min}$ 分别为余热锅炉爬坡上下限。

4) 水源热泵设备模型

矿区采煤过程中, 会有大量涌水被直接排放到外界, 不仅对环境造成了严重破坏, 还浪费了热源。矿井涌水在冬夏季节的典型日中水温与环境温差明显, 是水源热泵的理想冷热源^[24]。其制热数学模型如式(12)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{WSHP-h}}(t) = \eta_{\text{WSHP-h}} P_{\text{WSHP}}(t) + P_1 V_{\text{WSHP}} + P_2 \\ \eta_{\text{WSHP-h}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \\ P_{\text{WSHP}}^{\min} \leq P_{\text{WSHP}}(t) \leq P_{\text{WSHP}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{WSHP}}^{\min} \leq P_{\text{WSHP}}(t+1) - P_{\text{WSHP}}(t) \leq \Delta P_{\text{WSHP}}^{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{WSHP-h}}(t)$ 为 t 时段水源热泵的输出功率; $P_{\text{WSHP}}(t)$ 为 t 时段水源热泵消耗电功率; $\eta_{\text{WSHP-h}}$ 为水源热泵制热效率; V_{WSHP} 为矿区地下涌水的水流量; P_1 、 P_2 为制热状态下的拟合系数; T_1 为低温热源温度; T_2 为高温热源温度; P_{WSHP}^{\max} 、 P_{WSHP}^{\min} 分别为水源热泵的输入功率上下限; $\Delta P_{\text{WSHP}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{WSHP}}^{\min}$ 分别为水源热泵爬坡上下限。

2.3 精细化电转气设备模型

精细化 P2G 机组运行过程如图 2 所示。

电解槽(electrolyzer, EL)设备数学模型如式(13)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{H}_2\text{-EL}}(t) = \eta_{\text{EL}} P_{\text{EL}}(t) \\ P_{\text{EL}}^{\min} \leq P_{\text{EL}}(t) \leq P_{\text{EL}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{EL}}^{\min} \leq P_{\text{EL}}(t+1) - P_{\text{EL}}(t) \leq \Delta P_{\text{EL}}^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{H}_2\text{-EL}}(t)$ 为 t 时段 EL 产氢功率; η_{EL} 为 EL 产氢效率; $P_{\text{EL}}(t)$ 为 t 时段 EL 的耗电功率; P_{EL}^{\max} 、 P_{EL}^{\min}

分别为 EL 的输入功率上下限; $\Delta P_{\text{EL}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{EL}}^{\min}$ 分别为 EL 的爬坡上下限。

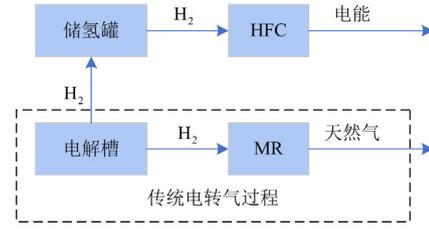


图 2 精细化电转气运行过程

Fig. 2 Operation process of refining the P2G

甲烷反应器(methane reactor, MR)设备数学模型如式(14)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{g-MR}}(t) = \eta_{\text{MR}} P_{\text{MR}}(t) \\ P_{\text{MR}}^{\min} \leq P_{\text{MR}}(t) \leq P_{\text{MR}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{MR}}^{\min} \leq P_{\text{MR}}(t+1) - P_{\text{MR}}(t) \leq \Delta P_{\text{MR}}^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{g-MR}}(t)$ 为 t 时段 MR 产气功率; η_{MR} 为 MR 产气效率; $P_{\text{MR}}(t)$ 为 t 时段 MR 的耗氢功率; P_{MR}^{\max} 、 P_{MR}^{\min} 分别为 MR 的输入功率上下限; $\Delta P_{\text{MR}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{MR}}^{\min}$ 分别为 MR 的爬坡上下限。

氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)的数学模型如式(15)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{HFC-e}}(t) = \eta_{\text{HFC-e}} P_{\text{HFC}}(t) \\ P_{\text{HFC}}^{\min} \leq P_{\text{HFC}}(t) \leq P_{\text{HFC}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{HFC}}^{\min} \leq P_{\text{HFC}}(t+1) - P_{\text{HFC}}(t) \leq \Delta P_{\text{HFC}}^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{HFC-e}}(t)$ 为 t 时段 HFC 产电功率; $\eta_{\text{HFC-e}}$ 为 HFC 产电效率; $P_{\text{HFC}}(t)$ 为 t 时段 HFC 的耗氢功率; P_{HFC}^{\max} 、 P_{HFC}^{\min} 分别为 HFC 的输入功率上下限; $\Delta P_{\text{HFC}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{HFC}}^{\min}$ 分别为 HFC 的爬坡上下限。

2.4 制冷机组设备模型

CMIES 中的冷负荷由制冷机组供给。其中, 吸收式制冷机是主要的供能设备。其数学模型如式(16)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{AC}}(t) = \eta_{\text{AC}} P_{\text{AC-in}}(t) \\ P_{\text{AC-in}}^{\min} \leq P_{\text{AC-in}}(t) \leq P_{\text{AC-in}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{AC-in}}^{\min} \leq P_{\text{AC-in}}(t+1) - P_{\text{AC-in}}(t) \leq \Delta P_{\text{AC-in}}^{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{\text{AC}}(t)$ 为 t 时段吸收式制冷机制冷功率; η_{AC} 为制冷系数; $P_{\text{AC-in}}(t)$ 为 t 时段吸收式制冷机输入高温烟气功率; $P_{\text{AC-in}}^{\max}$ 、 $P_{\text{AC-in}}^{\min}$ 分别为吸收式制冷机的输入功率上下限; $\Delta P_{\text{AC-in}}^{\max}$ 、 $\Delta P_{\text{AC-in}}^{\min}$ 分别为吸收式制冷机的爬坡上下限。

电制冷机的数学模型如式(17)所示。

$$\begin{cases} P_{EC}(t) = \eta_{EC} P_{EC-in}(t) \\ P_{EC-in}^{\min} \leq P_{EC-in}(t) \leq P_{EC-in}^{\max} \\ \Delta P_{EC-in}^{\min} \leq P_{EC-in}(t+1) - P_{EC-in}(t) \leq \Delta P_{EC-in}^{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{EC}(t)$ 为 t 时段电制冷机制冷功率; η_{EC} 为电制冷机制冷效率; $P_{EC-in}(t)$ 为 t 时段电制冷机消耗电功率; P_{EC-in}^{\max} 、 P_{EC-in}^{\min} 分别为电制冷机的输入功率上下限; ΔP_{EC-in}^{\max} 、 ΔP_{EC-in}^{\min} 分别为电制冷机爬坡上下限。

2.5 燃气锅炉设备模型

燃气锅炉作为 CMIES 的供热设备之一, 输出的热功率由天然气提供, 模型^[1]如式(18)所示。

$$\begin{cases} P_{GB-h}(t) = \eta_{GB} \varepsilon_{gas} V_{g-GB}(t) \\ V_{g-GB}^{\min} \leq V_{g-GB}(t) \leq V_{g-GB}^{\max} \\ \Delta V_{g-GB}^{\min} \leq V_{g-GB}(t+1) - V_{g-GB}(t) \leq \Delta V_{g-GB}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{GB-h}(t)$ 为 t 时段燃气锅炉输出功率; η_{GB} 为燃气锅炉制热效率; $V_{g-GB}(t)$ 为 t 时段燃气锅炉耗气量; V_{g-GB}^{\max} 、 V_{g-GB}^{\min} 分别为天然气的输入上下限;

ΔV_{g-GB}^{\max} 、 ΔV_{g-GB}^{\min} 分别为燃气锅炉爬坡上下限。

2.6 储能设备模型

从能量流动的角度分析, 各类储能设备模型具有相似性^[25]。因此, 本文对储电、储热、储氢设备进行统一建模。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES-i}^{chr}(t) \leq B_{ES-i}^{chr}(t) P_{ES-i}^{\max} \\ 0 \leq P_{ES-i}^{dis}(t) \leq B_{ES-i}^{dis}(t) P_{ES-i}^{\max} \\ Z_{ES-i}(t+1) = Z_{ES-i}(t) + \eta_{ES-i}^{chr} P_{ES-i}^{chr}(t) - P_{ES-i}^{dis}(t) / \eta_{ES-i}^{dis} \\ Z_{ES-i}^{\min} \leq Z_{ES-i}(t) \leq Z_{ES-i}^{\max} \\ B_{ES-i}^{chr}(t) + B_{ES-i}^{dis}(t) = 1 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{ES-i}^{chr}(t)$ 、 $P_{ES-i}^{dis}(t)$ 分别为第 i 种储能装置 t 时段的充、放功率; P_{ES-i}^{\max} 为第 i 种储能装置的单次充放最大功率; $B_{ES-i}^{chr}(t)$ 、 $B_{ES-i}^{dis}(t)$ 均为二进制变量, 表示第 i 种储能装置的充放状态; $Z_{ES-i}(t)$ 为第 i 种储能装置的容量; $Z_{ES-i}^{\max}(t)$ 、 $Z_{ES-i}^{\min}(t)$ 分别为第 i 种储能装置的容量上下限; $\eta_{ES-i}^{chr}(t)$ 、 $\eta_{ES-i}^{dis}(t)$ 分别为第 i 种储能装置的充能、放能效率。

3 CMIES 低碳经济优化模型

3.1 目标函数

低碳矿区综合能源系统经济运行模型的总成本

C_{cost} 包括向上级购能成本 C_{buy} 、风、光发电运行成本 C_m 、阶梯式碳交易成本 C_{CET} 和绿色证书交易成本 C_{GCT} , 目标函数如式(20)所示。

$$\min C_{cost} = C_{buy} + C_m + C_{CET} + C_{GCT} \quad (20)$$

1) 向上级购能成本

$$C_{buy} = \sum_{t=1}^{24} P_{e-buy}(t) \cdot C_{e-price} + \sum_{t=1}^{24} V_{g-buy}(t) \cdot C_{g-price} \quad (21)$$

式中: $V_{g-buy}(t)$ 为 t 时段系统向上级购气量; $C_{e-price}$ 、 $C_{g-price}$ 分别单位电价、单位天然气价。

2) 风、光发电运行成本

$$C_m = \theta_{sun1} S_{pv} + \theta_{sun2} \sum_{t=1}^{24} P_{sun}(t) + \theta_{wind} P_{WT}(t) \quad (22)$$

式中: θ_{sun1} 、 θ_{sun2} 分别为固定成本系数、可变成本系数; θ_{wind} 为风电成本系数。

3) 阶梯式碳交易成本

阶梯式碳交易成本 C_{CET} 见式(4)。

4) 绿证交易成本

绿色证书交易成本 C_{GCT} 见式(5)。

3.2 约束条件

1) 各设备运行约束条件

约束条件见式(9)一式(19)。

2) 冷功率平衡约束

$$P_{AC}(t) + P_{EC}(t) = P_{load-c}(t) \quad (23)$$

式中, $P_{load-c}(t)$ 为 t 时段系统冷负荷。

3) 热功率平衡约束

$$P_{WHB}(t) + P_{WSPH-h}(t) + P_{GB-h}(t) + P_{ES-h}^{dis}(t) - P_{ES-h}^{chr}(t) - P_{AC-in}(t) = P_{load-h}(t) \quad (24)$$

式中: $P_{ES-h}^{chr}(t)$ 、 $P_{ES-h}^{dis}(t)$ 分别为储热装置 t 时段的充、放功率; $P_{load-h}(t)$ 为 t 时段系统热负荷。

4) 电功率平衡约束

$$P_{sun}(t) + P_{WT}(t) + P_{GT-e}(t) + P_{RTO-e}(t) + P_{HFC-e}(t) + P_{e-buy}(t) + P_{ES-e}^{dis}(t) - P_{ES-e}^{chr}(t) - P_{WSPH}(t) - P_{EL}(t) - P_{EC-in}(t) = P_{load-e}(t) \quad (25)$$

式中: $P_{ES-e}^{chr}(t)$ 、 $P_{ES-e}^{dis}(t)$ 分别为储电装置 t 时段的充、放功率; $P_{load-e}(t)$ 为 t 时段系统电负荷。

5) 气功率平衡约束

$$V_{g-buy}(t) + P_{g-MR}(t) - V_{g-GB}(t) = V_{load-g}(t) \quad (26)$$

式中, $V_{load-g}(t)$ 为 t 时段系统气负荷。

6) 氢功率平衡约束

$$P_{H_2-EL}(t) + P_{ES-H_2}^{dis}(t) - P_{ES-H_2}^{chr}(t) - P_{HFC}(t) = P_{MR}(t) \quad (27)$$

式中, $P_{ES-H_2}^{chr}(t)$ 、 $P_{ES-H_2}^{dis}(t)$ 分别为储氢装置 t 时段的充、放功率。

4 算例分析

4.1 算例基础数据

本文基于文献[15-18]中的仿真数据并结合西北某矿区实际情况, 利用 Yalmip 工具箱搭建以单日 24 h 为一个周期、步长为 1 h 的日前优化运行模型, 调用 CPLEX 商业求解器进行求解。系统中各类型负荷^[1]及风光发电预测出力情况^[11]如图 3 所示, 矿区各伴生能源流量^[15-18]如图 4 所示。CMIES 内设备参数见表 1, 天然气价格为 2.7 元/m³^[5], 分时电价见表 2, 储能设备参数见表 3。碳交易基价 λ 取 0.25 元/kg, 碳排放区间长度 l 取 2000 kg; 价格增长率 α 取 25%^[26]。系统绿证交易价格 λ_g 取 220 元/本, 绿证配额系数 α_g 取 0.0002, 转换系数 k_g 取 1000 kWh/本^[12]; 单位发电量碳排放配额 τ_e^* 取 0.728 kg/kWh, 单位供热量碳排放配额 τ_g^* 取 0.224 kg/kWh^[27]。

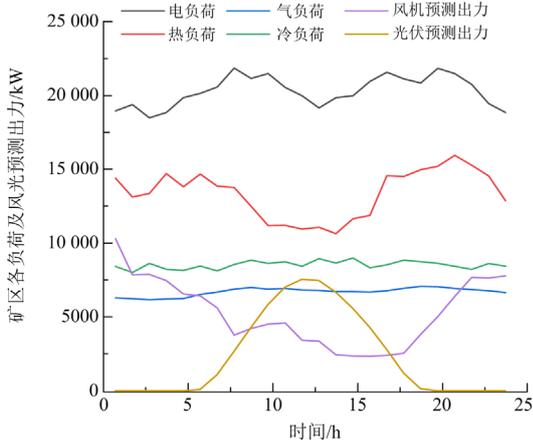


图 3 矿区各类型负荷及风光发电预测出力曲线

Fig. 3 Forecast output curves of various types of loads and wind and solar energy in mining areas

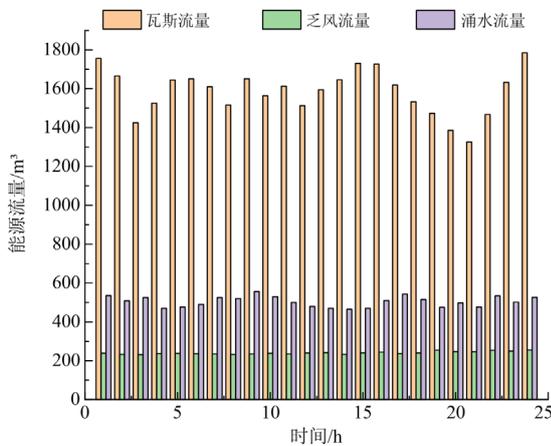


图 4 矿区伴生能源流量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of associated energy flow in mining area

表 1 CMIES 内设备运行参数

参数	数值	参数	数值
$v_{in}/(m/s)$	3	P_2	1.715
$v_c/(m/s)$	12	η_{EL}	0.85
$v_{out}/(m/s)$	20	η_{MR}	0.6
η_{GT-e}	0.31	η_{GB}	0.9
η_{GT-h}	0.432	η_{HFC-e}	0.85
η_{RTO-e}	0.31	η_{AC}	1.35
η_{RTO-h}	0.432	η_{EC}	4.03
η_{WHB}	0.8	η_{PV}	0.157
$T_1/^\circ C$	17	θ_{sun1}	0.003
$T_2/^\circ C$	25	θ_{sun2}	0.73
P_1	10.441	θ_{wind}	0.67

表 2 分时电价

Table 2 Time-of-use price

类别	时段	价格/(元/kWh)
谷时	01:00—07:00	0.456
	23:00—24:00	
平时	08:00—11:00	0.816
	15:00—18:00	
峰时	12:00—14:00	1.440
	19:00—22:00	

表 3 储能设备参数

Table 3 Parameters of energy storage equipment

设备	容量/kW	η_{ES-i}^{chr}	η_{ES-i}^{dis}
电储能	2500	0.95	0.94
热储能	2250	0.98	0.96
氢储能	2000	0.99	0.97

4.2 低碳 CMIES 经济运行分析

为验证本文所提出 CMIES 运行的可行性和经济性, 本节设置以下 7 个场景。首先对系统的优化运行结果进行分析; 然后对该系统在各场景下的碳排放量进行对比分析; 最后对引入“双机制”激励下系统新能源设备的运行进行分析。

场景 1: 不考虑碳交易且不考虑矿区伴生能源利用的综合能源系统运行。

场景 2: 不考虑碳交易, 仅考虑抽采瓦斯利用的综合能源系统运行。

场景 3: 不考虑碳交易, 考虑瓦斯、乏风利用的综合能源系统运行。

场景 4: 不考虑碳交易, 考虑瓦斯、乏风、地下涌水利用的综合能源系统运行。

场景 5: 在场景 4 的基础上, 考虑传统碳交易

机制的综合能源系统运行。

场景 6: 在场景 4 的基础上, 考虑阶梯式碳交易机制的综合能源系统运行。

场景 7: 在场景 4 的基础上, 考虑阶梯式碳交易机制与绿色证书交易机制的“双机制”激励下的

综合能源系统运行。

场景 1—7 的 CMIES 运行结果如表 4 所示; 场景 7 的电功率、热功率、冷功率、气功率平衡如图 5—图 8 所示; 场景 6 与场景 7 的风光实际出力曲线如图 9 所示。

表 4 不同场景下的 CMIES 运行结果

Table 4 CMIES operation results in different scenarios

参数	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6	场景 7
碳排放量/kg	561 468.23	472 997.34	461 794.21	434 707.56	433 958.34	433 123.91	358 951.82
风光出力/kW	114 361.54	114 361.54	114 361.54	114 361.54	114 361.54	114 361.54	183 039.40
风光运行成本/元	80 071.08	80 071.08	80 071.08	80 071.08	80 071.08	80 071.08	128 145.58
碳交易成本/元	—	—	—	—	26 668.87	51 699.23	39 611.93
绿证交易成本/元	—	—	—	—	—	—	-18 835.96
购能成本/元	851 646.56	704 721.28	683 331.08	637 460.58	637 527.30	637 903.25	606 586.14
总成本/元	931 717.64	784 792.36	763 402.16	717 531.66	744 267.26	769 673.56	755 507.69

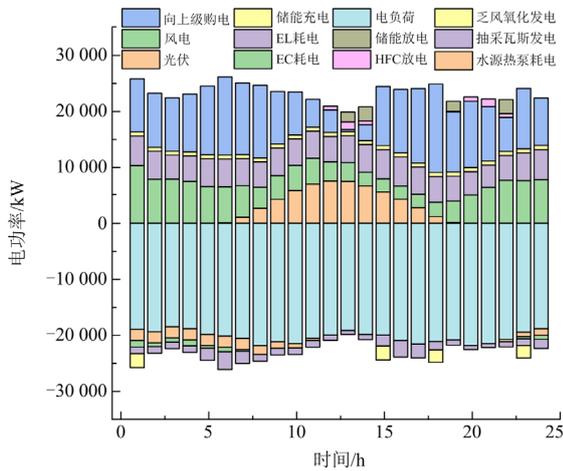


图 5 场景 7 的电功率优化运行结果

Fig. 5 Electric power optimization operation results of scenario 7

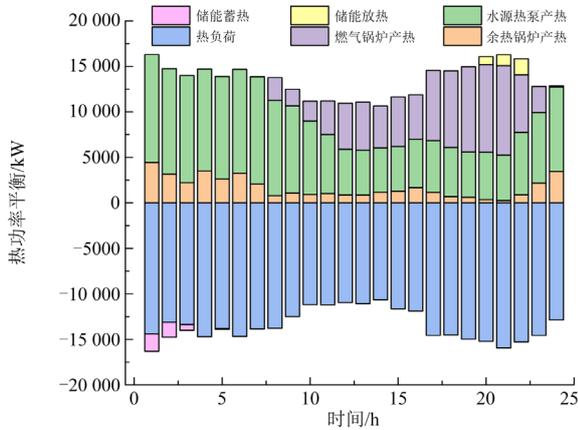


图 6 场景 7 的热功率优化运行结果

Fig. 6 Thermal power optimization operation results of scenario 7

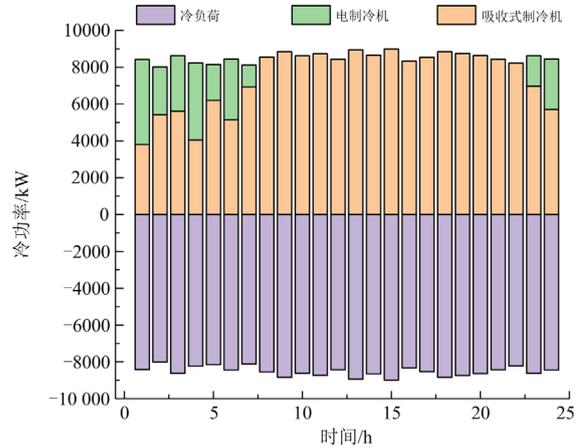


图 7 场景 7 的冷功率优化运行结果

Fig. 7 Cold power optimization operation results of scenario 7

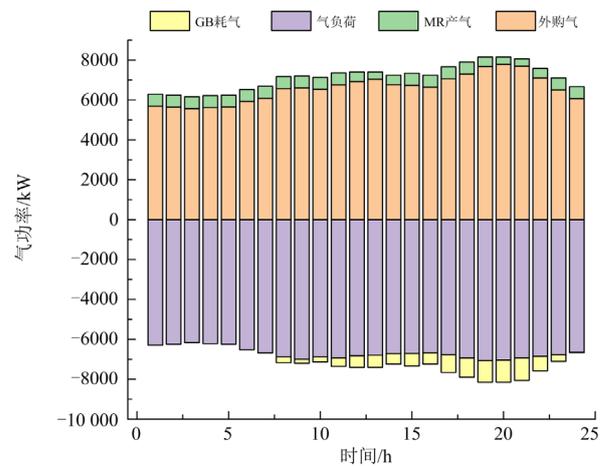


图 8 场景 7 的气功率优化运行结果

Fig. 8 Gas power optimization operation results of scenario 7

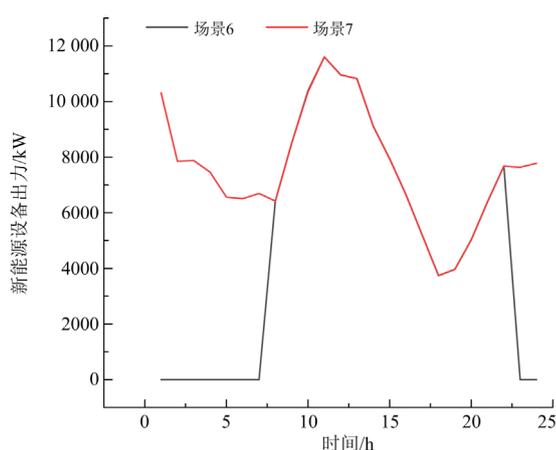


图9 新能源设备实际出力曲线

Fig. 9 Actual output curve of new energy equipment

结合表2、图5可知,在22:00—07:00时段内,恰逢电价低谷时段且风力发电设备处在额定运行状态下,系统在此时间段P2G机组电解水消耗了15987.62 kWh的电能,产生的氢气一部分引入甲烷反应器用于生产天然气,一部分存放于储氢罐中,便于在电价峰值时供给HFC使用。如图5中12:00—14:00、19:00—22:00时段内,氢燃料电池共发电5627 kWh,且未排放CO₂。结合表4、图5可知,伴生能源乏风与瓦斯的利用,为系统提供了131792.54 kWh的电能,使得系统节约了138380.48元的购电成本。系统在低电价且电负荷较低时段内进行了储电,并在13:00—15:00、19:00—20:00、22:00—23:00时段内由电储能设备放出8550 kWh的电能。

由图6可知,该系统热能主要来自于地下涌水的利用,为系统提供了190482.36 kWh的热能,减少了系统53020.86元的购气成本。在22:00—07:00低电价时段,系统热负荷处于高峰期,因此在设备容量范围内,尽可能多地通过水源热泵进行抽水供热,并将多余热量储存在储热设备中。在08:00—24:00时段,受地下涌水流量的影响,水源热泵不足以供给系统热负荷,此时燃气锅炉配合余热锅炉和水源热泵对系统进行供热。与此同时在热负荷高峰期(21:00—23:00时段)内,储热设备进行放热以减少系统从上级购买天然气进行供热的成本。

由图7可知,系统冷负荷主要由吸收式制冷机提供,结合式(9)、式(10)、式(16)可知,吸收式制冷机的输入是伴生能源瓦斯与乏风发电过程产生的高温烟气,因此系统减少了对电制冷机的依赖。对比场景1仅由电制冷机供冷的情况,场景7中的吸

收式制冷机为系统解决了179383.83 kWh的冷负荷,节约了44845.87 kWh的电能。在低电价时段(23:00—07:00)由电制冷机配合吸收式制冷机共同为系统供冷。从图8可以看出,矿区气负荷主要从上级气网进行供气。系统通过P2G机组为系统提供了13200 m³的天然气,并且减少了3550.8 kg的CO₂。

由表4可知,场景2对高浓度瓦斯进行了充分利用,使碳排放量相较于场景1有了大幅度降低;随着伴生能源利用种类的增加,场景3、场景4的碳排放量进一步降低。场景2碳排放量相较于场景1降低了15.76%。场景3在场景2的基础上,对低浓度瓦斯乏风进行收集利用,因此碳排放量再次降低了2.37%。场景4在此基础上,采集地下涌水进行供暖,减少了矿区对天然气的消耗,进而使碳排放量整体相较于场景1减少了22.58%。场景5引入传统碳交易机制,由表4可知,场景5比场景4增加了26668.87元的碳交易成本,降低了749.22 kg的碳排放量。场景6将阶梯式碳交易机制引入系统,以更高的碳交易成本来限制系统碳排放。与场景4相比,场景6的碳排放量降低了1583.65 kg。由于机制的改变,使得系统的碳交易成本相较于场景5上涨25030.36元。场景7在场景6的基础上,通过引入绿证交易机制来激励新能源设备出力。在“双机制”激励下,对比场景4,碳排放量降低了75755.74 kg,而碳交易成本仅比场景5多了12943.06元。

从图9中可知,由于新能源设备运行成本的存在,场景6的风力设备、光伏设备在23:00—08:00时段内并未启动。由表4可知,在绿证交易机制的作用下,场景7中的新能源发电设备出力比场景6的多68677.86 kWh,提升了60.1%。新能源发电不产生CO₂,因此场景7相较于场景6碳排放量降低了74172.09 kg,为系统节约了12087.3元的碳交易成本。同时,系统通过绿证交易市场获取了18835.96元的收益,使得系统减少了31317.11元的购能成本。

综上所述,伴生能源为系统提供电能、热能,为系统节约了25.15%的购能成本,同时也为系统减少了22.58%的碳排放量。场景7相较场景1,碳排放量减少了202516.41 kg;新能源发电量增加了68677.86 kWh;系统运行总成本降低了176209.95元。因此,在碳交易机制与GCT“双机制”激励下,考虑伴生能源与氢能源利用的CMIES,能够有效降低矿区的碳排放量,实现低碳矿区经济运行的目标。

5 结论

本文根据区域综合能源系统的定义,将综合能源系统应用在矿区,建立了一个考虑煤矿开采过程中伴生能源利用与“双机制”激励下的 CMIES 低碳经济运行优化模型,通过研究分析,得出以下结论。

1) 将矿区中的伴生能源加以采集利用,随着伴生能源利用种类的增加及利用程度的提升,优化后的 CMIES 碳排放量有较为明显的降低,且运行成本有较大幅度下降。

2) 阶梯式碳交易机制比传统碳交易机制有更强的约束力,但是由于系统需要维持矿区的正常工作与生活,系统的碳排放降低程度已无法再取得更大的突破。因此,在此基础上引入绿色证书交易机制能够更好地激励新能源发电,在“双机制”激励下,进一步降低了系统的碳排放量。

目前,本文仅考虑了供能系统、能源交换、终端用能等物理层面的问题,随着能源互联网的发展,在物理层面的基础上,考虑信息流与能量流的交互将是未来研究工作的重点。

参考文献

- [1] 任浩栋. 基于伴生能源利用的矿区综合能源系统建模与运行优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
REN Haodong. Modeling and operation optimization of coal mining integrated energy system based on associated energy utilization[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2021.
- [2] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13.
CHENG Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 2-13.
- [3] LI Qian, WANG Siyuan, ZHOU Xiaoyan, et al. Modeling and optimization of RIES based on composite energy pipeline energy supply[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-5.
- [4] 汪飞, 龚丹丹, 郭慧, 等. 计及动态氢价和不确定性的区域综合能源系统规划—运行两阶段优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 53-62.
WANG Fei, GONG Dandan, GUO Hui, et al. Two-stage optimization of regional integrated energy system planning-operation with dynamic hydrogen pricing and uncertainties[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 53-62.
- [5] 贡保记, 张恩硕, 张国, 等. 考虑综合需求响应与“双碳”机制的综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 11-19.
YUN Baoji, ZHANG Enshuo, ZHANG Guo, et al. Optimal operation of an integrated energy system considering integrated demand response and a “dual carbon” mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 11-19.
- [6] 孙子茹, 艾芊, 居来提·阿不力孜, 等. 考虑季节性氢储及期货式碳交易的综合能源系统年度规划研究[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 2-13.
SUN Zirui, AI Qian, JULAITI Abuliz, et al. Annual planning study of integrated energy system considering seasonal hydrogen storage and futures carbon trading[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 2-13.
- [7] 朱兰, 王吉, 唐陇军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 116-126.
ZHU Lan, WANG Ji, TANG Longjun, et al. Robust stochastic optimal dispatching of integrated energy systems considering refined power-to-gas model[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 116-126.
- [8] 初壮, 赵蕾, 孙健浩, 等. 考虑热能动态平衡的含氢储能的综合能源系统热电优化[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 1-12.
CHU Zhuang, ZHAO Lei, SUN Jianhao, et al. Thermoelectric optimization of an integrated energy system with hydrogen energy storage considering thermal energy dynamic balance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 1-12.
- [9] LI Guoqing, ZHANG Rufeng, JIANG Tao, et al. Optimal dispatch strategy for integrated energy systems with CCHP and wind power[J]. Applied Energy, 2017, 192(15): 408-419.
- [10] FANG Jiakun, ZENG Qing, AI Xiaomeng, et al. Dynamic optimal energy flow in the integrated natural gas and electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 188-198.
- [11] 潘超, 王锦鹏, 包钰婷, 等. 考虑源荷侧灵活性资源的风光消纳互动调控[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 1-8.
PAN Chao, WANG Jinpeng, BAO Yuting, et al. Interactive control of wind and photovoltaic power consumption considering source-load side flexible resources[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 1-8.
- [12] 冯昌森, 谢方锐, 文福拴, 等. 基于智能合约的绿证和碳联合交易市场的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 1-11.
FENG Changsen, XIE Fangrui, WEN Fushuan, et al. Design and implementation of joint trading market for green power certificate and carbon based on smart contract[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 1-11.
- [13] LI Xiaoqing, ZHANG Lizhi, WANG Ruiqi, et al. Two-stage robust optimization model for capacity configuration of biogas-solar-wind integrated energy system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 12(1): 662-675.
- [14] 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.
- [15] 高鹏飞, 孙东玲, 霍春秀, 等. 超低浓度瓦斯蓄热氧化利用技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 67-73.
GAO Pengfei, SUN Dongling, HUO Chunxiu, et al. Study progress on thermal oxidized utilization technology of ultra low concentration gas[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 67-73.
- [16] KALANTARI H, AMIRI L, GHOREISHI-MADISEH S A. Analysis of the performance of direct contact heat exchange systems for application in mine waste heat recovery[J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(1): 290-307.
- [17] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538-550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, et al. Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538-550.
- [18] 李江成, 李嘉翔, 任浩栋. 考虑伴生能源的煤矿综合能源系统两阶段运行优化[J]. 电力大数据, 2022, 25(2): 27-36.
LI Jiangcheng, LI Jiexiang, REN Haodong. Two-stage operation optimization of coal mining integrated energy system considering associated energy[J]. Power Systems and Big Data, 2022, 25(2): 27-36.
- [19] 徐成司, 董树锋, 吴金城, 等. 考虑区域综合能源系统拓扑特性的能源站和管线规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 74-82.
XU Chengsi, DONG Shufeng, WU Jincheng, et al. Planning of energy station and pipeline considering topological characteristics of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 74-82.
- [20] CAO Yang, WEI Wei, WU Lei, et al. Decentralized operation of interdependent power distribution network and district heating network: a market-driven approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5374-5385.
- [21] 檀勤良, 丁毅宏, 魏咏梅, 等. 碳交易及模糊预算下火电企业碳减排最优策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3707-3715.
TAN Qinliang, DING Yihong, WEI Yongmei, et al. Research on optimal strategy of carbon emission reduction for thermal power enterprises under carbon trading and fuzzy budget[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3707-3715.
- [22] 樊宇琦, 丁涛, 孙瑜歌, 等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1729-1752.
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752.
- [23] 吴海军, 姚海飞, 郑忠亚. 西部矿区土地损毁评价及农光互补修复技术研究[J]. 煤矿开采, 2018, 23(4): 72-76, 88.
WU Haijun, YAO Haifei, ZHENG Zhongya. Study of earth damage evaluation and agriculture and photo voltaic complementary recovery technique of western mine area[J]. Coal Mining Technology, 2018, 23(4): 72-76, 88.
- [24] 沈金山, 王春信, 李美晨, 等. 低温矿井涌水用于煤矿井下集中降温的应用研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(8): 123-125.
SHEN Jinshan, WANG Chunxin, LI Meichen, et al. Research on application of low-temperature mine gushing water for centralized cooling in underground coal mines[J]. Coal Technology, 2022, 41(8): 123-125.
- [25] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18, 369.
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18, 369.
- [26] 郝婷, 樊小朝, 王维庆, 等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 101-112.
HAO Ting, FAN Xiaochao, WANG Weiqing, et al. Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 101-112.
- [27] 瞿凯平, 黄琳妮, 余涛, 等. 碳交易机制下多区域综合能源系统的分散调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 697-707.
QU Kaiping, HUANG Linni, YU Tao, et al. Decentralized dispatch of multi-area integrated energy systems with carbon trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 697-707.

收稿日期: 2023-07-13; 修回日期: 2023-09-25

作者简介:

贡保记(1966—), 男, 硕士研究生导师, 正高级工程师, 研究方向为电力系统保护与控制技术; E-mail: yunbaoji@vip.163.com

赵文(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化运行; E-mail: 994032028@qq.com

王建学(1976—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统规划与运行、新能源与分布式发电等。E-mail: jxwang@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 周金梅)