

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231267

计及温控厌氧发酵和阶梯碳交易的农村综合能源 低碳经济调度

王守文¹, 叶金根², 徐丽洁³, 李国祥², 袁莹超², 朱兆彬⁴

(1. 三峡大学法学与公共管理学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 浙江华电器材检测研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 针对北方农村地区冬季清洁取暖造成局部供电、供气紧张的问题, 提出一种计及温控厌氧发酵和阶梯碳交易的农村综合能源低碳经济调度模型。首先, 基于沼气厌氧发酵池的热力学模型和温度与产气率的关系, 构建沼气发酵的温控模型。然后, 采用变压吸附设备提纯分离沼气中的甲烷和二氧化碳, 引入电转气消纳其中的二氧化碳, 产生甲烷回馈系统。同时考虑农村用户参与碳市场, 采用阶梯碳价, 分析碳交易基价和价格增长率对农村用能成本和碳排放的影响。最后, 以系统运行成本最低为目标函数进行优化求解。仿真分析表明, 所提模型可实现系统碳排放量降低 157.27 kg, 运行成本降低 11.57%。

关键词: 厌氧发酵; 变压吸附; 生物质燃气; 阶梯碳交易

Rural comprehensive energy low-carbon economic dispatch taking into account temperature-controlled anaerobic fermentation and ladder carbon trading

WANG Shouwen¹, YE Jingen², XU Lijie³, LI Guoxiang², YUAN Yingchao², ZHU Zhaobin⁴

(1. School of Law and Public Administration, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Economics & Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Zhejiang Huadian Equipment Testing and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: There is a problem of local power and gas supply shortage caused by clean heating in winter in northern rural areas. Thus a low-carbon economic dispatch of rural comprehensive energy that takes into account temperature controlled anaerobic fermentation and ladder carbon trading is proposed. First, based on the thermodynamic model of an anaerobic biogas fermentation tank and the relationship between temperature and gas production rate, a temperature control model for biogas fermentation is constructed. Then, pressure swing adsorption equipment is used to purify and separate methane and carbon dioxide from biogas, and electric conversion gas is introduced to absorb the carbon dioxide, generating a methane feedback system. At the same time, considering the participation of rural users in the carbon market, a ladder carbon price is adopted to analyze the impact of carbon trading base price and price growth rate on rural energy costs and carbon emissions. Finally, the problem is optimized and solved with the objective function of minimizing system operating costs. Simulation analysis shows that the proposed model reduces system carbon emissions by 157.27 kg and reduces operating costs by 11.57%.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877122).

Key words: anaerobic fermentation; pressure swing adsorption; bio natural gas; ladder carbon trading

0 引言

冬季清洁取暖是我国能源消费革命、农村生活

方式革命的重要内容^[1]。与城市相比, 农村地域特征明显, 拥有丰富的分布式风、光、沼气等可再生能源^[2-3]。因此, 就地利用可再生能源是解决冬季供暖, 缓解局部电网和燃气供应压力的可行思路。考虑到北方农村地区冬季寒冷, 生物质沼气产气率较低, 如何避免低温影响是解决这一问题的关键。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877122); 湖北省智力成果采购项目资助(2022HB-ZLCC-06)

目前, 沼气参与多能耦合的研究已相对成熟。其中, 文献[4]将生物质能与综合能源系统相结合, 构建含有沼气发电系统的能量管理模型, 为经济电网提供新的能源保障。文献[5]专为小型农村社区构建基于沼气的混合能源系统, 相比普通系统经济优势明显。文献[6]提出厌氧发酵与焚烧固废耦合系统, 使得固废的利用更加清洁并显著提高了机组的净发电量。以上研究充分探讨了沼气参与综合能源的多能耦合的积极作用, 然而鲜有研究考虑温度对沼气产量的影响。

文献[7-8]验证了主动加热厌氧发酵池(anaerobic digester, AD)能够降低系统成本, 减少弃风、弃光现象。文献[9]对 AD 加热系统进行设计, 证明了主动加热厌氧发酵池能够带来经济价值。文献[10]采用地源热泵加热 AD, 在冬季和过渡季节为用户提供沼气, 提高了系统一次能源利用率。以上研究逐步精细化沼气厌氧发酵过程的模型, 解决了低温的不利影响, 但 AD 温度控制仅在小范围内变化, 对 AD 参与系统的气、热耦合未作探讨。

在“双碳”目标持续推进背景下, 碳交易机制能够优化系统资源配置、促进节能减排, 因此广泛应用于综合能源系统^[11-13]。文献[14]采用变压吸附设备(pressure swing adsorption, PSA)提纯分离沼气中的 CH_4 和 CO_2 , 耦合电转气(power to gas, P2G)实现了 CO_2 综合利用。文献[15]建立了考虑梯级碳交易机制和 P2G 两阶段运行的 IES 低碳经济调度模型, 具有较高的经济性、低碳性和风光消纳能力。文献[16]考虑动态碳交易价格, 实现综合能源系统的低碳经济运行; 文献[17]验证了多时间尺度阶梯碳交易的低碳经济性。然而, 以上研究只考虑系统成本和碳减排对碳交易基价的单一敏感性, 并没有考虑对碳交易价格增长率和基价同时变动的综合敏感性。文献[18]将碳交易基价和价格增长率作为博弈策略, 在最优策略下验证了阶梯碳交易机制对博弈各方参与碳减排的积极作用; 文献[19]提出改进阶梯碳交易机制与热电联产(combined heat and power, CHP)机组灵活输出协同优化策略, 所提策略在扩展了 CHP 机组灵活性的同时降低了碳排放量。借鉴以上研究思路, 可分析碳交易机制对温控 AD 参与系统耦合的影响。

综上, 本文提出一种在阶梯碳交易机制下, 考虑改进温控厌氧发酵的农村综合能源系统低碳经济优化调度模型。首先, 建立 AD 的热力学模型, 在产气率可预测的温度范围内, 精确计算 AD 的热损失, 根据温度与产气率曲线输入热量, 实现厌氧发酵的温度控制, 提高低温环境下 AD 的沼气产量。

其次, 引入沼气 PSA 提纯设备, 将产生的沼气分离提纯成高品质的生物质燃气(bio natural gas, BNG)和 CO_2 , 耦合 P2G 生成 CH_4 , 实现生物质 CO_2 的就地利用。最后, 以系统运行成本最低为目标函数, 建立系统的低碳经济调度模型。算例仿真表明, 所提模型能够灵活控制 AD 温度参与系统耦合, 同时降低系统总成本和碳排放。

1 系统的基本结构和模型构建

系统结构如图 1 所示。系统负荷包括电负荷、热负荷、气负荷; AD 为系统主要产气设备; 风机(wind turbine, WT)、光伏(photo voltaic, PV)为新能源电力来源; 能源转换设备包括 CHP、燃气锅炉(gas boiler, GB)、电锅炉(electric boiler, EB)、P2G 设备; 储能设备包括电储(electric energy storage, EES)、热储(thermal energy storage, TES)、气储(gas energy storage, GES); 供电公司作为系统外部电源; 燃气公司作为系统外部气源。

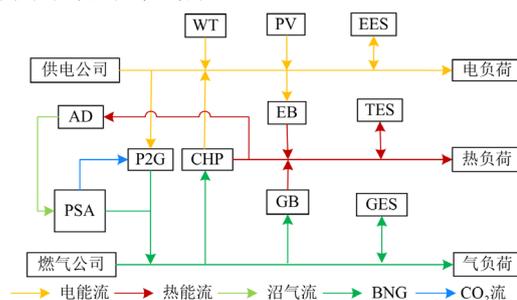


图 1 农村综合能源系统结构图

Fig. 1 Rural IES structure diagram

1.1 改进温控沼气厌氧发酵模型

AD 是生产沼气的核心装置, 温度是影响沼气生产速率的关键因素。普通沼气池的发酵温度受环境温度影响较大, 冬季利用率低^[20]。因此, 有必要对沼气厌氧发酵环境进行改造。根据热力学效应, 计算 AD 内部目标温度与外界环境温度差产生的热量流失, 控制输入 AD 的热量, 对流失量进行补充以维持目标温度, 实现温控厌氧发酵。在适宜温度下 AD 沼气产量上升, 经分离提纯成 BNG 供应系统耗气设备和气负荷。AD 参与系统气、热耦合过程如图 2 所示。

1.1.1 AD 热力学模型

精确计算 AD 负荷, 有利于将加温系统与发酵池匹配, 探索出加温系统的最佳运行策略^[21]。在模型构建之前引入以下几个基本前提, 简化 AD 内外壁之间的热传导分析: 1) 在厌氧发酵过程中, 会产生小部分热量, 这部分热量忽略; 2) 假设 AD 内厌氧发

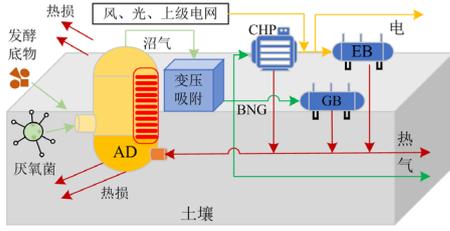


图2 AD参与系统耦合

Fig. 2 AD participates in system coupling

酵温度与周围土壤温度均匀；3) 忽略AD发酵原料进料对温度的影响；4) 忽略沼气流出现热损耗^[22]。AD发酵温度、热损以及补充热量的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} T_{AD}(t+1) = T_{AD}(t) + \frac{H_{AD}(t) - H_{AD}^{loss}(t)}{c_m \delta_m V_{AD}} \\ H_{AD}(t) = (1 - \beta_{loss}) H_{AD}^in(t) \\ H_{AD}^{loss}(t) = \sum_{l=1}^2 k_l S_l (T_{AD}(t) - T_l(t)) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $T_{AD}(t+1)$ 、 $T_{AD}(t)$ 为 $t+1$ 时段和 t 时段AD内部发酵均温； $H_{AD}(t)$ 为 t 时段输入AD的热量； $H_{AD}^{loss}(t)$ 为 t 时段AD与环境之间的热损失； c_m 为发酵底物的热容； δ_m 为AD内部厌氧发酵底物密度； V_{AD} 为AD的体积； β_{loss} 为输入热流平均热损系数； $H_{AD}^in(t)$ 为 t 时段系统流向AD的热功率； k_l 为AD第 l 个热损失面导热系数， $l = \{1, 2\}$ ， $l=1$ 、 $l=2$ 分别表示AD外壁与空气、土壤接触部分； S_l 为AD第 l 个热损失面的面积； $T_l(t)$ 为 t 时段AD第 l 个热损失面的外界温度。

1.1.2 沼气产量与温度的关系

厌氧菌与发酵底物之间存在一段相互作用的反应时间 L ，即水力滞留期，根据文献^[22]的研究，厌氧发酵的水力滞留期为40天。不同类型的厌氧发酵底物有着不同的生物甲烷势(biochemical methane potential, BMP)，产生沼气的甲烷含量也不同。在确定水力滞留期的前提之下，以禽畜粪污为厌氧发酵底物时，温度变化与沼气产量预测精度最高，故本文选用其为厌氧发酵底物的主要成分。产气率与发酵温度的非线性模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} G_{bio}(t) = \frac{M_0 S_0 V_{ADm}}{24 \cdot L} \left(1 - \frac{K}{L \cdot \sigma_{AD}(t) - 1 + K} \right) \\ M_{biomass} \geq \alpha V_{ADm} \sum_{t=1}^T G_{bio}(t) \\ K = \rho_{11} e^{\rho_{12} S_0} + \rho_{13} \\ \sigma_{AD}(t) = \begin{cases} \varpi_{11} e^{\varpi_{12} T_{AD}(t)}, & T_0 \leq T_{AD}(t) < T_1 \\ \varpi_{21} T_{AD}(t) - \varpi_{22}, & T_1 \leq T_{AD}(t) < T_2 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $G_{bio}(t)$ 为 t 时段单位发酵底物的产气速率； M_0 为发酵底物的BMP； S_0 为挥发性固体浓度常数； V_{ADm} 为AD内有效发酵底物体积； K 为一个动力学常数，与厌氧发酵稳定性以及发酵速率有关； $\sigma_{AD}(t)$ 为 t 时段AD内部厌氧发酵微生物的最大比生长率； $M_{biomass}$ 为AD内发酵底物量； α 为生物质消耗系数； ρ_{11} 、 ρ_{12} 、 ρ_{13} 、 ϖ_{11} 、 ϖ_{12} 、 ϖ_{21} 、 ϖ_{22} 、 T_0 、 T_1 和 T_2 为通过一系列厌氧发酵实验获得的系数^[23]。

1.2 PSA提纯与P2G耦合模型

目前主流的生物质天然气工程广泛采用变压吸附法和膜分离法(membrane separation processes, MSP)对沼气进行提纯，相比于MSP，PSA具有更高提纯效能和经济性^[24-25]，沼气分离提纯得到高纯度BNG和 CO_2 ，再结合P2G的电解槽水解制氢，利用甲烷产生器将二氧化碳制成可供使用的天然气，降低购气成本。

1.2.1 PSA的沼气提纯分离模型

$$\begin{cases} G_{BNG}(t) = \lambda_{CH_4,i} \theta_{CH_4} V_{ADm} G_{bio}(t) \\ G_{CO_2}(t) = \frac{\theta_{CO_2} G_{BNG}(t) (1 - \lambda_{CO_2,i})}{\lambda_{CH_4,i} V_{CO_2}} \\ P_{BNG2}(t) = P_{BNG1}(t) + P_{BNG}^{add}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $G_{BNG}(t)$ 为 t 时段提纯的BNG量； $\lambda_{CH_4,i}$ 为甲烷提纯效率， $i = \{1, 2\}$ ，其中 $\lambda_{CH_4,1}$ 、 $\lambda_{CH_4,2}$ 分别为PSA第一、二阶段的提纯效率； θ_{CH_4} 为沼气中甲烷含量百分比； $G_{CO_2}(t)$ 为 t 时段提纯的 CO_2 量； θ_{CO_2} 为沼气中 CO_2 的含量百分比； $\lambda_{CO_2,i}$ 为 CO_2 的损失率， $i = \{1, 2\}$ ，其中 $\lambda_{CO_2,1}$ 、 $\lambda_{CO_2,2}$ 分别为PSA第一、二阶段的 CO_2 损失率； V_{CO_2} 为 CO_2 常温常压下体积参数； $P_{BNG1}(t)$ 、 $P_{BNG2}(t)$ 分别为 t 时段第一、二阶段提纯的耗电量； $P_{BNG}^{add}(t)$ 为 t 时段第二阶段提纯相较于第一阶段增加的耗电量。

1.2.2 PSA与P2G耦合模型

$$\begin{cases} G_{CO_2}(t) = G_{CO_2}^{PSAtoP2G}(t) + G_{CO_2}^S(t) \\ \begin{cases} G_{CO_2}^{P2G}(t) = G_{CO_2}^{PSAtoP2G}(t) + G_{CO_2}^{buy}(t) \\ P_{P2G}(t) = G_{CO_2}^{P2G}(t) / \varphi \eta_{CH_4} \\ G_{CH_4}^{P2G}(t) = 3.6 \eta_{CH_4} P_{P2G}(t) / g_{CH_4} \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $G_{CO_2}^{PSAtoP2G}(t)$ 为 t 时段PSA向P2G输送的 CO_2 量； $G_{CO_2}^S(t)$ 为 t 时段 CO_2 封存量； $G_{CO_2}^{P2G}(t)$ 为 t 时段P2G消耗的 CO_2 量； $G_{CO_2}^{buy}(t)$ 为 t 时段购买的 CO_2 量； φ 为甲烷化的耗碳系数； η_{CH_4} 为P2G甲烷化效率；

$P_{P2G}(t)$ 为 t 时段 P2G 耗电量; $G_{CH_4}^{P2G}(t)$ 为 t 时段 CH_4 生成量; g_{CH_4} 为 CH_4 热值。

1.3 系统碳交易模型

1.3.1 碳交易配额和碳排放强度

碳交易配额根据政府制定, 系统实际碳排放量超过政府规定的配额量, 需向碳市场购买碳排放配额, 若低于配额则可将多余的配额在碳交易市场上出售, 赚取收益^[26]。本文的碳排放来源于沼气 PSA 未捕获的 CO_2 、CHP 和 GB 设备的燃气排碳量以及从上级电网购电等效的碳排放量, 如式(6)~式(8)所示。

$$U_{CO_2}^P(t) = \xi_{grid}^P P_{buy}(t) + \sum_{i=1}^2 \xi_H^P H_i(t) \quad (6)$$

$$U_{CO_2}^E(t) = \xi_{grid}^E P_{buy}(t) + \sum_{i=1}^2 \xi_H^E H_i(t) + G_{CO_2}^{loss}(t) \quad (7)$$

$$G_{CO_2}^{loss}(t) = \frac{\theta_{CO_2} G_{BNG}(t) \lambda_{CO_2,2}}{\lambda_{CH_4,2} V_{CO_2}} \quad (8)$$

式中: $U_{CO_2}^P(t)$ 为 t 时段总的碳配额量; ξ_{grid}^P 为电网单位功率碳配额系数; $P_{buy}(t)$ 为 t 时段向上级电网购电量; ξ_H^P 为系统热功率碳排放配额系数, 由国家发展改革委规定的“2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子”确定^[11]; $H_i(t)$ 为系统中碳排放设备热输出功率, $i = \{1, 2\}$, 其中 $H_1(t)$ 、 $H_2(t)$ 分别表示 CHP 和 GB 的热输出功率; $U_{CO_2}^E(t)$ 为 t 时段系统的碳排放强度; ξ_{grid}^E 为电网的碳排放强度系数; ξ_H^E 为热功率碳排放强度系数; $G_{CO_2}^{loss}(t)$ 为 t 时段 PSA 提纯分离过程中 CO_2 损失量。

系统参与碳市场的交易量为系统碳配额与排放强度的差值, 如式(9)所示。

$$E_{CO_2}(t) = U_{CO_2}^E(t) - U_{CO_2}^P(t) \quad (9)$$

式中, $E_{CO_2}(t)$ 为 t 时段碳排放配额与碳排放强度的差值, 表示系统参与碳市场的 CO_2 交易量。

1.3.2 碳排放成本模型

$$C_{CO_2}(t) =$$

$$\begin{cases} \zeta E_{CO_2}(t), & E_{CO_2}(t) \leq \lambda \\ \zeta \lambda + \zeta(1+\mu)(E_{CO_2}(t) - \lambda), & \lambda < E_{CO_2}(t) \leq 2\lambda \\ \zeta(2+\mu)\lambda + \zeta(1+2\mu)(E_{CO_2}(t) - 2\lambda), & 2\lambda < E_{CO_2}(t) \leq 3\lambda \\ \zeta(3+3\mu)\lambda + \zeta(1+3\mu)(E_{CO_2}(t) - 3\lambda), & 3\lambda < E_{CO_2}(t) \leq 4\lambda \\ \zeta(4+6\mu)\lambda + \zeta(1+4\mu)(E_{CO_2}(t) - 4\lambda), & E_{CO_2}(t) > 4\lambda \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_{CO_2} 为碳交易成本; ζ 为碳市场交易基价;

λ 为碳排放区间长度; μ 为碳交易价格增长率。

2 农村综合能源系统优化调度模型

本文将沼气的厌氧发酵过程与能源系统进行热、气耦合, AD 除了作为系统气源, 还具有能源转换作用, 所提优化调度模型在低碳经济调度过程中需要考虑各设备机组的运行维护成本、购电购气成本、碳交易成本、弃风光成本等。在满足安全约束的前提下实现整体经济最优。

2.1 目标函数

$$\min C = C_{BUY} + C_{CO_2} + C_{PW} + C_{OP} \quad (11)$$

式中: C 为 IES 日运行总成本; C_{BUY} 为购电、购气成本; C_{PW} 为弃风光成本; C_{OP} 为机组运行维护成本。

$$C_{BUY} = \sum_{t=1}^T (c_e P_{buy}(t) + (\rho + c_g) G_{buy}(t)) \quad (12)$$

式中: T 为 IES 一个运行周期的 24 个时段; c_e 为购电单位成本系数; ρ 为农村用气的运输成本系数; c_g 为购气的单位成本系数; $G_{buy}(t)$ 为 t 时段购气量。

$$C_{PW} = \sum_{t=1}^T \partial (P_{PV}^a(t) + P_{WT}^a(t)) \quad (13)$$

式中: ∂ 为弃风光单位成本系数; $P_{PV}^a(t)$ 、 $P_{WT}^a(t)$ 分别为弃风、光量。

机组运维成本 C_{OP} 为

$$C_{OP} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^8 \omega_j P_j(t) \quad (14)$$

式中: $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, 分别表示 CHP、GB、PV、WT、EES、TES、GES、PSA 设备; ω_j 为设备 j 的运维系数; $P_j(t)$ 为设备 j 在 t 时段的输出功率。

2.2 约束条件

2.2.1 电负荷功率平衡

风、光、CHP 和上级电网为系统主要电力来源, 除电负荷外, PSA 提纯获得 BNG 消耗电能, EB、P2G 将电能转换成热能和燃气。

$$P_{CHP}(t) + P_{WT}^S(t) + P_{PV}^S(t) + P_{buy}(t) + P_{EES}^{dis}(t) = \quad (15)$$

$$P_{EES}^{char}(t) + P_{load}(t) + P_{BNG2}(t) + P_{P2G}(t) + P_{EB}(t)$$

式中: $P_{CHP}(t)$ 为 t 时段 CHP 上网功率; $P_{WT}^S(t)$ 、 $P_{PV}^S(t)$ 分别为 t 时段风、光上网功率; $P_{EES}^{char}(t)$ 、 $P_{EES}^{dis}(t)$ 分别为 t 时段 EES 充放电功率; $P_{load}(t)$ 为 t 时段电负荷; $P_{EB}(t)$ 为 t 时段 EB 消耗的电功率。

2.2.2 热、气负荷功率平衡

系统产热源于 CHP、EB、GB 以及 TES，除热负荷以外，AD 将消耗部分热量帮助产气。系统气源来自沼气提纯的 BNG 和外部购气，除气负荷外，CHP 和 GB 消耗燃气对系统供热、供电。

$$\begin{cases} H_{\text{CHP}}(t) + H_{\text{EB}}(t) + H_{\text{GB}}(t) + H_{\text{TES}}^{\text{dis}}(t) = \\ H_{\text{TES}}^{\text{char}}(t) + H_{\text{AD}}^{\text{in}}(t) + H_{\text{hload}}(t) \\ G_{\text{BNG}}(t) + G_{\text{CH}_4}^{\text{P2G}}(t) + G_{\text{buy}}(t) + G_{\text{GES}}^{\text{dis}}(t) = \\ G_{\text{GES}}^{\text{char}}(t) + G_{\text{GB}}(t) + G_{\text{CHP}}(t) + G_{\text{gload}}(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中： $H_{\text{CHP}}(t)$ 为 t 时段 CHP 的热输出功率； $H_{\text{EB}}(t)$ 为 EB 输出热功率； $H_{\text{GB}}(t)$ 为 t 时段 GB 输出热功率； $H_{\text{TES}}^{\text{char}}(t)$ 、 $H_{\text{TES}}^{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时段热储能的充、放热功率； $H_{\text{hload}}(t)$ 为 t 时段热负荷； $G_{\text{GES}}^{\text{char}}(t)$ 、 $G_{\text{GES}}^{\text{dis}}(t)$ 分别为 t 时段 GES 的充、放天然气量； $G_{\text{GB}}(t)$ 为 t 时段 GB 耗气量； $G_{\text{CHP}}(t)$ 为 t 时段 CHP 耗气量； $G_{\text{gload}}(t)$ 为 t 时段气负荷。

储能设备约束、CHP 约束、GB 约束、EB 约束以及 P2G 约束参考文献[27-28]。

2.3 模型线性化处理

针对 $G_{\text{bio}}(t) = f(T_{\text{AD}}(t))$ 非线性问题，如图 3 所示，对于任意时段 t ，在 15~50 °C 的范围内，添加 m 个断点 $T_{\text{AD},0}(t)$ 、 $T_{\text{AD},1}(t)$ 、 \dots 、 $T_{\text{AD},m}(t)$ ，将曲线分成 $m+1$ 段，引入 m 个 0-1 变量 $k_i(t)$ 和特殊序列 2 型(special ordered sets 2, SOS2)变量 $\varepsilon_i(t)$ ，在 SOS2 变量组中，有且只有相邻两个 0-1 变量不为 0。最终温度与产气率关系满足的线性约束如式(17)所示。

$$\begin{cases} G_{\text{bio}}(t) = f(T_{\text{AD}}(t)) \approx \sum_{i=0}^m \varepsilon_i(t) f(T_{\text{AD},i}(t)) \\ T_{\text{AD}}(t) = \sum_{i=0}^m \varepsilon_i(t) T_{\text{AD},i}(t) \\ T_{\text{AD},0}(t) < T_{\text{AD},1}(t) < \dots < T_{\text{AD},m}(t) \\ \begin{cases} \varepsilon_0(t) \leq k_0(t) \\ \varepsilon_i(t) \leq k_{i-1}(t) + k_i(t) \\ \varepsilon_m(t) \leq k_{m-1}(t) \end{cases} \quad \forall t \\ i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{i=0}^m \varepsilon_i(t) = 1 \\ \sum_{i=0}^m k_i(t) = 1 \end{cases} \quad (17)$$

2.4 模型验证

最终该模型以式(11)为目标函数，约束条件包

括 AD 热力学约束式(1)、沼气产气率与温度线性约束式(17)、沼气两阶段提纯分离与 P2G 耦合约束式(3)一式(5)、碳交易约束式(6)一式(10)、功率平衡约束式(15)一式(16)以及设备运行约束，形成混合整数线性规划问题，适用于 Gurobi 求解器。本文在 Matlab R2022a 平台建立调度模型，可利用 Yalmip 工具箱和 Gurobi 求解器直接求解。

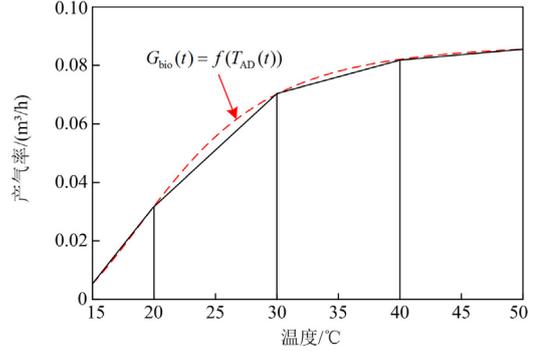


图 3 产气率与温度的关系

Fig. 3 Relationship between gas production rate and temperature

3 算例分析

3.1 算例背景

为验证本文提出方法的有效性，选用兰州某沼气工程冬季典型日实际气温和土壤均温数据。系统以 24 h 为一个调度周期，步长为 1 h。一台 300 kW 风机和 600 kW 光伏机组。风光出力、电、热、气负荷曲线见图 4、图 5，设备参数见表 1，分时电价、气价、PSA 二阶参数见文献[14]。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 场景设置及分析

针对温控 AD 厌氧发酵提纯沼气与 P2G 的耦合模型，构建了 4 个不同的基本场景。AD 厌氧发酵初始温度与土壤均温相同。

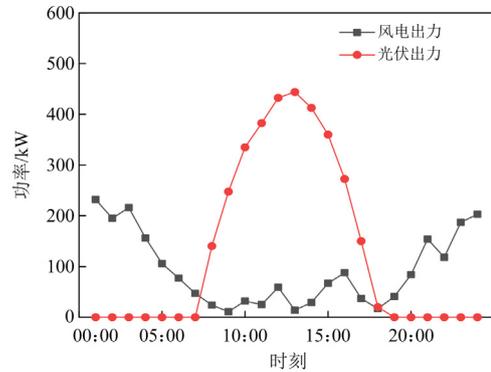


图 4 风光出力曲线

Fig. 4 Wind and solar output curve

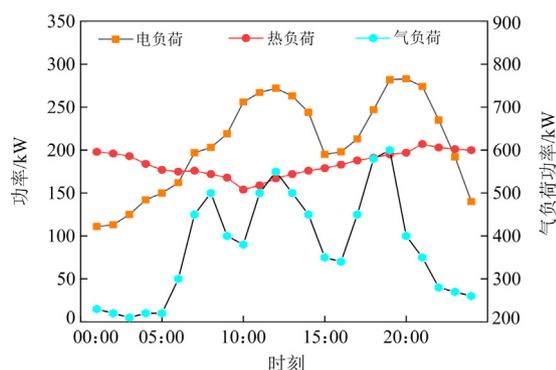


图5 负荷曲线

Fig. 5 Load curve

表1 系统各机组参数

Table 1 System unit parameters

参数类型	CHP	P2G	GB	EB	EES/TES	GES
功率上限/kW	300	300	150	100	90/60	60
功率下限/kW	0	0	0	0	0	0
爬坡速率/(kW/h)	100	200	100	100	—	—
容量/kW	—	—	—	—	300/200	200
运行效率	—	0.6	0.9	0.93	—	—
充放效率	—	—	—	—	0.90/0.95	0.95
自损率	—	—	—	—	0.001/0.01	0.01
电热比	0.35/0.4	—	—	—	—	—

表2 场景1—场景4优化调度结果对比

Table 2 Comparison of optimization scheduling results for scenarios 1-4

场景	场景1	场景2	场景3	场景4
碳排放成本/元	154.57	203.30	282.32	220.80
购电成本/元	74.00	77.31	32.85	74.67
购气成本/元	3733.34	3082.58	3480.21	2408.25
弃风光成本/元	140.29	154.07	0	0
购碳成本/元	0	0	28.43	0
碳封存成本/元	0	264.51	0	223.59
设备运维成本/元	540.42	781.22	732.63	1170.68
总成本/元	4634.39	4553.97	4556.46	4098.01
BNG产量/m ³	151.37	1005.56	151.37	1128.63

3.2.2 各场景在不同风光出力情况下的总成本分析

考虑到未来我国风、光等绿电发电量占比越来越高,为验证本文所提模型在接入高比例绿电时的成本控制力,做如下分析。如图6所示,以图4的风光出力数据为基准(设定其出力倍数为1.0),4个场景的总成本在基准数据下,从高到低分别为场景1、场景2、场景3、场景4。随着风光出力增高,场景1、2成本升高,因为在1.0倍出力时,场景1、2已经出现弃风光现象,出力增加,系统弃风光惩罚成本继续上升,总成本升高。场景3、4总成本随

场景1:仅考虑普通AD厌氧发酵的农村综合能源系统优化调度。

场景2:考虑温控AD厌氧发酵提纯沼气的农村综合能源系统优化调度。

场景3:考虑普通AD厌氧发酵与P2G耦合的农村综合能源系统优化调度。

场景4:考虑温控AD厌氧发酵提纯沼气与P2G耦合的农村综合能源系统优化调度。

不同场景的优化调度运行成本如表2所示。

场景1、3使用普通AD厌氧发酵系统,由于缺乏增温措施,厌氧菌活性受到抑制,沼气产量低。场景4的沼气产量比前3个场景分别高977.26 m³、123.07 m³、977.26 m³。因此,采用温控AD厌氧发酵场景的购气成本明显低于普通厌氧发酵场景。然而,场景4的碳排放成本要比场景1高,因为场景4需要为AD产气提供热量,提高CHP和GB输出功率,增加碳排放量和运维成本。场景4得益于较低的购气成本,总成本比前3个场景分别低11.57%、10.01%、10.06%。

综上分析可知,采用温控AD厌氧发酵和两阶段沼气提纯系统,外加P2G设备,能够有效降低系统对外部气源依赖,对比初始场景能够减少11.57%的运行成本。

着风光出力升高开始下降,因为场景3通过P2G进行消纳,场景4除了利用P2G产气进行消纳,还利用EB消耗风、光余电产生热量,供给AD提高沼气产量,降低购气成本。随着出力倍数上升,场景成本开始转降为增,这是因为P2G和EB已经满载,无法消耗更多的风光余电。随着出力下降,各场景总成本均有增加,因为风光出力降低,CHP机组出力增加,消耗更多燃气,增加设备运维成本和碳排放成本,导致总成本增加,但场景4得益于AD和P2G设备的灵活耦合,相比于其他场景,场景4的

总成本最低。综上分析, 场景 4 能够有效消纳风、光余电, 同时应对风光出力不足也拥有良好的成本控制能力。

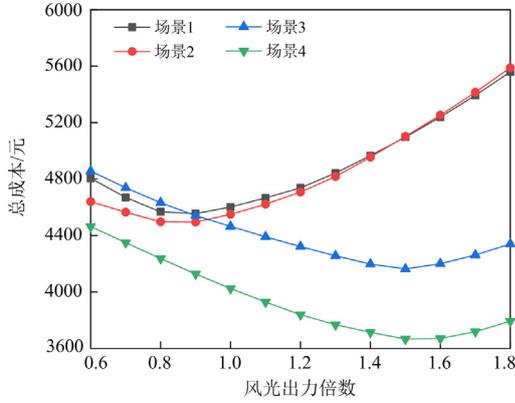


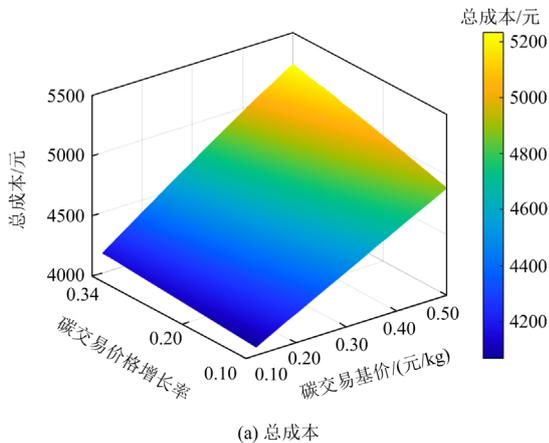
图 6 风光出力成本曲线

Fig. 6 Cost curve of wind and solar output

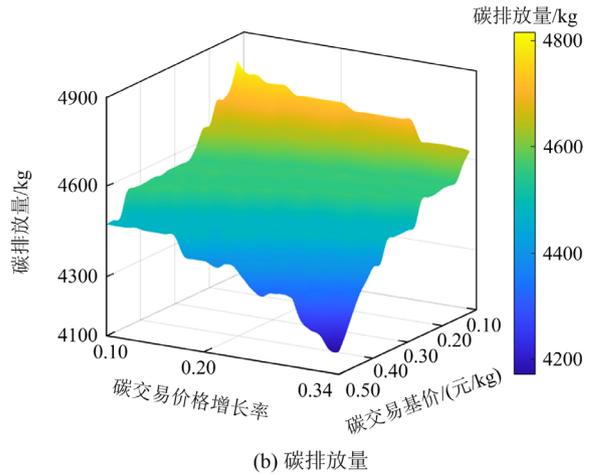
3.2.3 不同碳交易基价和价格增长率下碳排放量和总成本分析

在场景 4 的基础上, 考虑不同阶梯碳交易基价和价格增长率对系统碳排放和总成本的影响, 构建场景 5。

由图 7(a)可知, 系统总成本对碳交易基价变动更加敏感, 在固定基价上, 总成本对碳交易价格增长率变化敏感性不高。从碳减排效果看, 如图 7(b)所示, 碳交易基价变动对碳排放量的削减效果显著。碳排放基价低于 0.2 元/kg, 碳交易价格增长率对碳排放量的削减效果明显, 碳排放基价高于 0.2 元/kg, 碳交易价格增长率升高, 系统碳排量变化不大。在系统成本方面, 单位阶梯碳交易价格增长率变化带来的成本增长相比单位阶梯碳交易基价变化带来的成本上升要小。因此, 选择相对较低的阶梯碳交易基价和较高的价格增长率可使系统获得最优成本和



(a) 总成本



(b) 碳排放量

图 7 不同阶梯碳交易基价和价格增长率下系统成本和碳排放量

Fig. 7 Cost and carbon emissions under different carbon emission base prices and price growth rate

碳排量。本文最优碳交易基价为 0.16 元/kg、价格增长率为 0.30。

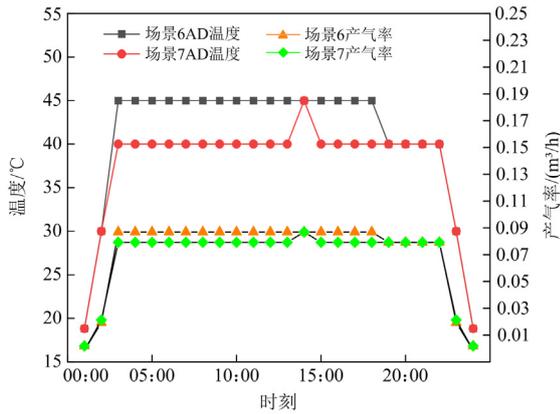
3.2.4 最优基价和价格增长率下 AD 温度和产气量分析

在场景 4 的基础之上, 考虑场景 5 得出最优阶梯碳交易基价和价格增长率, 构建场景 6、场景 7, 分析阶梯碳交易机制对温控 AD 厌氧发酵产气的影响。

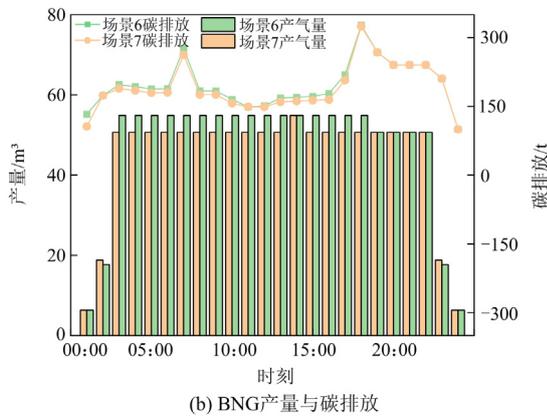
场景 6: 选择在最优交易基价的普通碳交易机制下, 考虑温控 AD 厌氧发酵农村综合能源系统优化调度。

场景 7: 选择在最优阶梯碳交易基价和价格增长率的阶梯碳交易机制下, 考虑温控 AD 厌氧发酵农村综合能源系统优化调度。

在不同碳交易机制下, AD 的发酵温度不同。如图 8(a)所示, 场景 6 的发酵温度在 03:00—18:00 时段保持在 45 °C, 场景 7 在大部分时间温度保持在 40 °C。从产气率看, 场景 7 的产气率仅比场景 6 的产气率低 0.01 m³/h。如图 8(b)所示, 两个场景每个时段沼气产量相差不明显, 场景 7 总产气量仅比场景 6 低 65.11 m³ (具体参考图 3), 所以在普通碳交易机制下, 农村综合能源系统为了提高沼气产量, 加大供热机组的出力, 将 AD 内部温度维持在高位以获得更多产气量。在阶梯碳交易机制下, 由于系统没有碳捕集装置, 在优化时必须考虑供热机组出力升高带来的碳排放量增加和设备运维成本上升。场景 7 选择降低 AD 温度以减小机组出力, 降低碳排放量, 相比于场景 6, 总碳排放减少了 157.27 kg。



(a) 温度与产气率



(b) BNG产量与碳排放

图 8 碳交易机制对 AD 的影响

Fig. 8 Impact of carbon trading mechanism on AD

3.2.5 场景 7 调度结果分析

由图 9 可以看出, 在考虑 AD 参与系统热、气耦合的场景下, 风光高发时段(00:00—16:00), EB 全功率运行, 将电能转化成热能供给 AD 辅助产气。由图 10 可知, 在夜间用电高峰期(18:00—23:00), 风电出力有限, EB 停机, GB 消耗燃气产热供给 AD。如图 11 所示, 在光伏出力峰时段(09:00—16:00), AD 和 P2G 保持较高燃气产量, 在气价峰时段

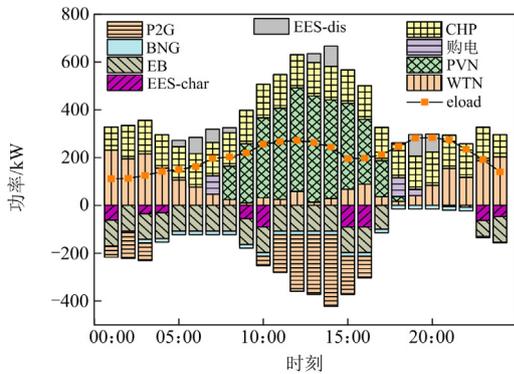


图 9 最优电负荷

Fig. 9 Optimal electrical load

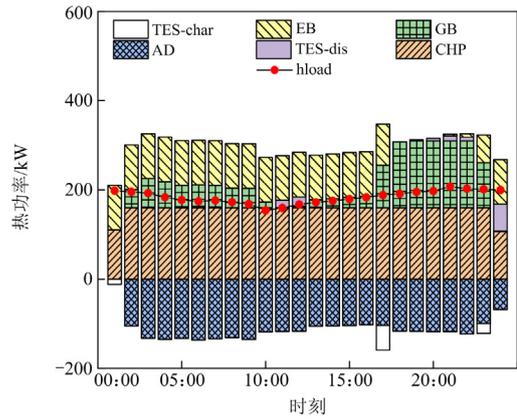


图 10 最优热负荷

Fig. 10 Optimal heat load

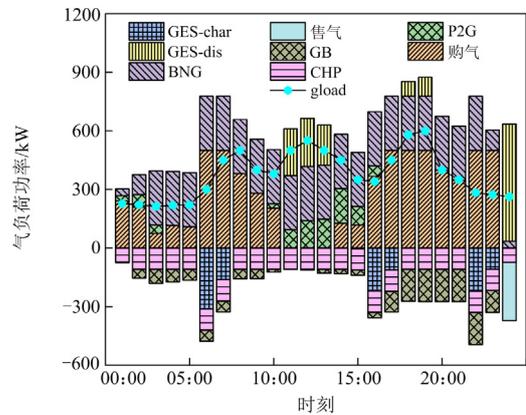


图 11 最优气负荷

Fig. 11 Optimal gas load

(11:00—13:00)除 AD 和 P2G 产气外, GES 释放存量, 实现燃气自足。

4 结论

本文针对北方农村地区冬季用能紧张的问题, 利用生物质产气, 改造发酵环境并考虑产气过程与系统热、气耦合, 建立计及温控厌氧发酵和阶梯碳交易的低碳经济调度模型, 通过多场景算例仿真分析, 得出如下结论。

1) 所提温控 AD 厌氧发酵模型能够提升沼气产量, 降低购气成本, 相比于普通厌氧发酵方式, 该模型能够降低 11.57%运行成本。

2) 所提温控 AD 厌氧发酵、沼气提纯和 P2G 模型能够应对不同风光出力场景, 在风光电力多发且不高于原始场景 1.5 倍的前提下, 出力越多, 系统运行成本越低。

3) 考虑 AD 参与系统热、气耦合, AD 能够灵活响应阶梯碳交易机制, 削减热需求, 降低系统碳

排量。在后续的工作中，将考虑风光和负荷的不确定性，对农村综合能源系统规划进行进一步的研究。

参考文献

- [1] 付毕安. 重视建筑节能改造, 推进我国北方农村地区清洁取暖可持续发展[J]. 中国能源, 2023, 45(增刊1): 82-90.
FU Bi'an. Pay attention to building energy-saving renovation with the aim to promoting the sustainable development of clean heating in rural areas[J]. Energy of China, 2023, 45(Z1): 82-90.
- [2] 何伟, 陈波, 曾伟, 等. 面向绿色生态乡镇的综合能源系统关键问题及展望[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 77-86, 93.
HE Wei, CHEN Bo, ZENG Wei, et al. Key problems and prospects of integrated energy system for green ecological townships[J]. Electric Power, 2019, 52(6): 77-86, 93.
- [3] 李民, 刘钦浩, 赵冠, 等. 考虑多元产业协同的乡村综合能源系统规划[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 14-22.
LI Min, LIU Qin hao, ZHAO Guan, et al. Rural integrated energy system planning considering multi-industry synergy[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 14-22.
- [4] 张政林, 张惠娟, 孙文治, 等. 基于改进旗鱼算法的综合能源系统能量管理[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 142-151.
ZHANG Zhenglin, ZHANG Huijuan, SUN Wenzhi, et al. Energy management of an integrated energy system based on an improved sailed fish optimizer algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 142-151.
- [5] PAL A, BHATTACHARJEE S. Effectuation of biogas based hybrid energy system for cost-effective decentralized application in small rural community[J]. Energy, 2020, 203: 117819.
- [6] 李云飞, 陈衡, 徐钢, 等. 厌氧发酵与焚烧耦合的固体废物发电系统综合性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 56-65.
LI Yunfei, CHEN Heng, XU Gang, et al. Comprehensive performance analysis of solid waste power generation system coupled with anaerobic fermentation and incineration[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 56-65.
- [7] 王瑞琪, 王新立, 郭光华, 等. 农村光-氢-沼储能综合能源系统建模与鲁棒优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 89-98.
WANG Ruiqi, WANG Xinli, GUO Guanghua, et al. Modeling and robust optimal dispatch of rural integrated energy system considering PV-hydrogen-methane energy storage characteristics[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 89-98.
- [8] 李守强, 刘宗歧, 王静, 等. 计及热网损耗的乡镇生物质能综合能源系统两阶段优化运行[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 24-32.
LI Shouqiang, LIU Zongqi, WANG Jing, et al. Two-stage operation optimization of rural biomass energy integrated energy system considering heat network loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 24-32.
- [9] SINGH R, SINGH R P, SINGH R. Biogas driven multigeneration integrated with simultaneous charging discharging type thermal energy storage system[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 270: 116234.
- [10] LUO L, LU L, SHEN X, et al. Energy, exergy and economic analysis of an integrated ground source heat pump and anaerobic digestion system for co-generation of heating, cooling and biogas[J]. Energy, 2023: 128220.
- [11] 魏震波, 马新如, 郭毅, 等. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 1-9.
WEI Zhenbo, MA Xinru, GUO Yi, et al. Optimized operation of integrated energy system considering demand response under carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 1-9.
- [12] 徐慧慧, 田云飞, 缪猛, 等. 计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(8): 1-7.
XU Huihui, TIAN Yunfei, MIAO Meng, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response[J]. Smart Power, 2023, 51(8): 1-7.
- [13] 郭杰, 吴杰康, 洪明志, 等. 综合能源系统碳交易优化调度模型[J]. 供用电, 2023, 40(11): 94-104.
GUO Jie, WU Jiekang, HONG Mingzhi, et al. Optimal scheduling model of carbon trading in integrated energy system[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(11): 94-104.
- [14] 王守文, 李国祥, 闫文文, 等. 计及改进生物质燃气和阶梯碳交易的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(2): 126-134, 143.
WANG Shouwen, LI Guoxiang, YAN Wenwen, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system including improved biomass gas and stepped carbon trading[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(2): 126-134, 143.
- [15] 李贵君, 赵兴勇, 刘昊炆, 等. 考虑梯级碳交易机制和电转气两阶段运行的综合能源系统优化[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(3): 331-340.
LI Guijun, ZHAO Xingyong, LIU Haoyang, et al. Integrated energy system optimization considering cascading carbon trading mechanism and two-stage operation of power-to-gas[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(3): 331-340.
- [16] CUI Y, XU Y, HUANG T, et al. Low-carbon economic

- dispatch of integrated energy systems that incorporate CCPP-P2G and PDR considering dynamic carbon trading price[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 423: 138812.
- [17] ZHU G, GAO Y. Multi-objective optimal scheduling of an integrated energy system under the multi-time scale ladder-type carbon trading mechanism[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 417: 137922.
- [18] 王金锋, 于广亮, 姜炎君, 等. 基于阶梯碳交易的多微网电能合作运行优化策略[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(11): 28-39.
WANG Jinfeng, YU Guangliang, JIANG Yanjun, et al. The optimization strategy for collaborative operation of multi-microgrids based on tiered carbon trading[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(11): 28-39.
- [19] 周伟, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度[J/OL]. *电网技术*: 1-12[2024-01-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0141>.
ZHOU Wei, SUN Yonghui, XIE Dongliang, et al. Low-carbon dispatch of park-level integrated energy system considering the improved ladder-type carbon trading and flexible output of combined heat and power unit[J/OL]. *Power System Technology*: 1-12[2024-01-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0141>.
- [20] 韩睿, 朱德锐, 李屹, 等. 发酵温度对青海农用沼气池微生物群落的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(6): 2483-2494.
HAN Rui, ZHU Derui, LI Yi, et al. The effect of temperature on the microbial community of rural household biogas digesters in Qinghai Province[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(6): 2483-2494.
- [21] 石惠娴, 徐得天, 朱洪光, 等. 沼气发酵池动态热负荷特性研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 296-303.
SHI Huixian, XU Detian, ZHU Hongguang, et al. Dynamic thermal load characteristics in anaerobic digester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 296-303.
- [22] WANG P, WANG J, JIN R, et al. Integrating biogas in regional energy systems to achieve near-zero carbon emissions[J]. *Applied Energy*, 2022, 322: 119515.
- [23] LI C, YANG H, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal planning of islanded integrated energy system with solar-biogas energy supply[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 11(4): 2437-2448.
- [24] ABD A A, OTHMAN M R, MAJDI H S, et al. Green route for biomethane and hydrogen production via integration of biogas upgrading using pressure swing adsorption and steam-methane reforming process[J]. *Renewable Energy*, 2023, 210: 64-78.
- [25] AUGELLETTI R, CONTI M, ANNESINI M C. Pressure swing adsorption for biogas upgrading — a new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 140(3): 1390-1398.
- [26] 贲保记, 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.
- [27] 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.
- [28] LIU S, ZHOU C, GUO H, et al. Operational optimization of a building-level integrated energy system considering additional potential benefits of energy storage[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(1): 55-64.

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2024-01-07

作者简介:

王守文(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力科技与电力市场、综合能源系统运行与规划研究;

叶金根(1998—), 男, 硕士研究生, 从事综合能源系统优化调度研究; E-mail: 1970026678@qq.com

徐丽洁(1997—), 女, 通信作者, 博士研究生, 从事综合能源系统优化调度研究。E-mail: 202212010011013@ctgu.edu.cn

(编辑 张颖)