

氨气和沼气耦合下农村产业园综合能源系统 低碳调度

韩飞燕^{1,2}, 韩凤舞², 赵云龙²

(1. 忻州师范学院经济管理学系, 忻州 034000; 2. 华北电力大学(保定)经济管理学系, 保定 071003)

摘 要: 针对农村产业园区以化石能源为主的用能方式效率低、污染高问题, 基于农村园区源荷特征, 构建农村产业园区综合能源系统(PIES)模型。为促进可再生能源消纳和生物质利用, 在PIES中引入并精细建模电制氨系统(P2A)和生物质厌氧发酵制气系统(AF)。考虑到厌氧发酵温度对产气速率的影响, 将P2A的余热输送至AF构建P2A-AF耦合系统, 提升了系统能效和经济性。在此基础上, 对PIES主要用能过程进行精细碳排放建模, 并纳入碳排放成本, 建立了以总成本最小为目标的优化调度模型。仿真结果表明: 相较于完全依赖上级能源市场购能的传统供能方案, 所提PIES优化调度模型可使系统总运行成本降低31.56%, 可再生能源本地消纳率提高34.92%, 总碳排放降低3.58%。

关键词: 可再生能源; 生物质; 调度; 农村产业园区; 综合能源生态

中国分类号: TM73

文献标志码: A

0 引 言

农村是中国清洁能源开发建设的主战场, 大力推进农村能源革命将为“双碳”目标和乡村振兴的落实提供重要抓手^[1]。而建设现代农业产业园已经成为加快农业农村现代化、全面推进乡村振兴的重要举措, 开始出现以“园区化”引领农村“现代化”趋势^[2]。在能源利用方面, 农村的产业园区通常存在多类型且较集中的负荷需求, 但目前的能源消费结构仍存在化石能源占比过高、对农村丰富的可再生能源利用不足等问题^[3]。因此, 亟需结合农村地区的产业园区发展现状和源荷特征, 构建新型能源系统来促进农村地区能源转型升级。

先前已有较多研究针对农村地区的能源系统开展研究, 文献[4-6]都构建了村庄级别的综合能源系统(integrated energy system, IES)来改善农村地区能源利用效率低、化石能源占比高等问题。但随着大量现代产业逐渐向农村地区转移, 村庄级别结构较为简单的农村综合能源系统在面对现代产业园区多元化、特征独特的负荷需求时易出现源荷不匹配、供能可靠性差等问题。随着分布式能源的快速发展, 园区综合能源系统(park integrated energy system, PIES)由于易于与分布式资源整合、灵活性高以及可以整合多种形式的能源等优势, 开始作为高效满足特定园区能源需求的措施^[7]。目前已有不少学者针对农村地区的园区, 构建PIES来根据用户的实际需求整合电、热、气等多种形式的能源, 实现能源

的精准供应和高效利用。文献[8]研究构建了电-热-气农村产业园区综合能源系统, 有效发挥分布式清洁能源之间的互补特性, 提高了园区用能经济性, 同时提供了环境效益和社会效益; 文献[9]考虑农村养殖园区特征建立了农村养殖园区综合能源系统模型, 通过模拟分析验证了所提新型PIES模型相较传统用能模式可充分整合农村资源, 显著降低日常运营成本和碳排放, 为农村产业结构调整 and 能源转型提供了理论支撑。

生物质能作为农村地区另一种丰富的资源, 其高效利用已成为推动加快农村现代化的重要手段, 已有学者在农村地区能源系统引入生物质发酵制气进行研究。文献[10-11]考虑沼气发酵动力学模型构建包含沼气发酵的综合能源系统模型, 实现了系统的可靠、经济运行并验证了沼气发酵对系统经济性的提升; 文献[12]针对北方农村地区提出一种考虑温控生物质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, 仿真分析验证了所提模型可实现系统碳排放量和运行成本的降低。上述研究均表明在IES中引入生物质发酵制气可为系统提供气源提升系统经济性。但在实际发酵过程中, 发酵温度对产气速率影响明显, 上述研究均未考虑在IES中复杂的能源耦合关系中如何提升厌氧发酵池的发酵温度来促进生物质能源的利用。

此外, 随着PIES内分布式可再生能源的高比例接入, 其波动性与随机性带来的消纳问题给能源系统的稳定运行带来挑战。传统结构简单的IES会导致可再生能源资源利用不

收稿日期: 2025-06-20

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(25YJA790024); 河北省社会科学发展研究课题(20230202036)

通信作者: 韩凤舞(1979—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力系统优化与智能控制方面的研究。hanfengwu@126.com

足,从而影响系统的运行效率。电制氨(power-to-ammonia, P2A)技术通过电解水制氢并与空分获得的氮气在高温高压下合成氨,可将富余电能转化为绿氨,是目前极具前景的解决方案。与氢能相比,氨气可在常压下 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或常温下9个大气压下液化同时爆炸范围较窄,作为能源载体优势远远超过氢^[13]。此外,氨拥有更成熟的国际贸易基础设施与供应链,其储运成本相较于氢可降低一个数量级,经济性优势更加明显。文献[14]提出将电转氨引入农村化工园区综合能源系统,通过利用富余可再生资源产生绿氨,降低了园区碳排放及运行成本。

综上,当前针对农村地区的能源系统的优化调度问题已取得较多成果,但仍然存在以下问题:1)当前针对农村地区IES的研究多集中在村庄的大型IES,对考虑特色化的农村产业园区源荷特征的PIES研究较少;2)现有研究大多考虑在农村PIES中通过电制氢来促进可再生能源的消纳,在PIES内引入P2A的研究较少,且缺乏对P2A过程的精细化建模;3)针对在PIES中的生物质发酵制气,较少研究考虑通过IES内部的能量耦合来提升生物质发酵制气水平,对生物质发酵制气在PIES中的高效利用研究不足。

针对以上问题,本文首先结合现代农村产业园区的源荷特征,构建了农村产业园区PIES模型;之后在PIES内引入P2A来促进可再生能源的消纳同时满足园区内的氨负荷,并对P2A系统进行了精细化建模;随后对园区内的生物质发酵制气系统进行精细化建模,并通过将P2A过程中产生的余热输送至生物质厌氧发酵制气系统(anaerobic fermentation, AF)中,构建了P2A-AF系统,来提升AF发酵制气速率,实现PIES整体用能效率和经济性的提升;之后又考虑PIES内主要的能量使用过程,构建了精细化碳排放模型;在前述基础上,考虑碳排放成本构建了总成本最小为目标的农村产业PIES优化调度模型,最后通过仿真分析验证了本文所提模型的有效性。

1 计及P2A和生物质制气耦合的农村PIES模型

本文结合农村产业园区的发展现状和源荷特征,构建了农村PIES模型。PIES可整合多种形式的能源及分布式供电设备,满足多元负荷需求。在本文的PIES源侧引入风力机和光伏发电,以充分利用农村丰富的风能和太阳能资源,从而提供大量的绿色能源。但由于可再生能源出力具有波动性和随机性,为了实现稳定的能源供应,系统内还引入了热电联产(combined heat and power, CHP)机组来提供电、热能源。同时由于风电出力高峰常出现在夜间,与负荷高峰存在明显时间差,为提高可再生能源的利用率,本研究将氨系统引入PIES来实现绿P2A。此外,农村地区还拥有大量的生物质资源,因此在PIES内设置了生物质厌氧发酵系统来实现农村地区的生物质废能转换,同时为系统提供沼气供应。

气储能和氨储能也被引入PIES来提升系统用能效率和灵活性。在负荷侧,PIES内涉及电、热、气3类常规负荷,以及用于农业制肥的原料氨负荷。农村产业园区PIES的能流及设备耦合关系如图1所示。

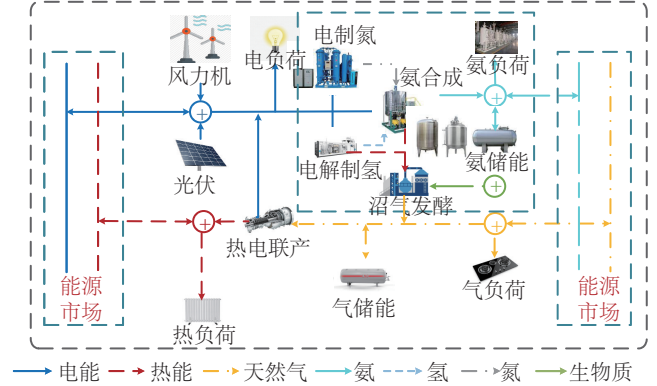


图1 农村产业园区PIES能源结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PIES energy structure in rural industrial parks

1.1 P2A与生物质制气耦合系统建模

为提高可再生能源消纳量减少对电网的冲击,本文在PIES中引入P2A技术,在制氢后通过氨合成将电能转化为氨,有效解决了储氢难题,促进了可再生能源的消纳。同时引入生物质发酵制气来利用农村地区的生物质资源,为PIES提供补充能源。此外,将P2A过程中产生的热能输送到AF构建了P2A-AF耦合系统,提升系统整体效率。本节将分别介绍P2A和AF系统模型及P2A-AF子系统耦合机理。

1.1.1 P2A两阶段精细化建模

如果RIES的可再生能源过剩,则过剩的能源将被P2A系统利用,生产出的氨作为农业制肥等原材料。本文将P2A分为两阶段运行,共3个模块:第1阶段为电解水制氢模块(alkali electrolyzer, AE)以及变压吸附设备制氮模块(pressure swing adsorption, PSA);第2阶段是将制得的氢气和氮气输送到氨合成模块(ammonia reactor, AR)中,合成所需氨气。以这种方式组成的P2A系统的效率可达72%^[15]。3个模块的具体建模如下:

1) AE模块

在各种电解技术中,质子交换膜技术可达到80%。它具有适用性广、成本低等优点,生产的氢气符合大多数工业应用的标准。本研究即采用质子交换膜技术,简化数学模型如下所示:

$$H^{\text{AE}}(t) = \frac{\eta_{\text{H}_2}^{\text{AE}} P_{\text{H}_2}^{\text{AE}}(t)}{q_{\text{H}_2}} \quad (1)$$

$$Q^{\text{AE}}(t) = \eta_Q^{\text{AE}} H^{\text{AE}}(t) \quad (2)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{AE}} \leq P^{\text{AE}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{AE}} \quad (3)$$

式中: $\eta_{\text{H}_2}^{\text{AE}}$ ——电解制氢的效率; η_Q^{AE} ——热电转换效率; $P^{\text{AE}}(t)$ ——AE在 t 时刻的耗电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; q_{H_2} ——氢气的高热

值, $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$; $Q^{\text{AE}}(t)$ ——AE 在 t 时刻的产热量, $\text{kW}\cdot\text{h}$;
 $H^{\text{AE}}(t)$ ——AE 在 t 时刻产生的氢气体积, m^3 ; $P_{\text{min}}^{\text{AE}}, P_{\text{max}}^{\text{AE}}$ ——AE
 输入和输出的电能上下限, $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

2) PSA 模块

变压吸附技术采用选择性渗透的概念, 允许氮气通过, 同时将氧气吸附在膜上。随后, 对该膜层进行减压以释放氧气。PSA 能以较低的能量输入提供所需的氮气体积。设备反应过程的数学模型如式(4)^[16], 式(4)说明了 PSA 功率容纳与输入空气和输出氮气体积和温度的耦合关系。

$$P^{\text{PSA}}(t) = \frac{m_t^{\text{air}}(t)}{\eta_m \eta_{\text{ise, PSA}}} T^{\text{PSA}} R_g \ln \frac{p_{\text{N}_2}}{p_{\text{air}}} \quad (4)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{PSA}} \leq P^{\text{PSA}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{PSA}} \quad (5)$$

式中: $P^{\text{PSA}}(t)$ —— t 时刻 PSA 的耗电功率, kW ; $m_t^{\text{air}}(t)$ ——空气的质量流量, kg/s ; $\eta_m, \eta_{\text{ise, PSA}}$ ——PSA 的蒸汽利用系数、等熵效率; T^{PSA} ——PSA 的工作温度, $^{\circ}\text{C}$; R_g ——动力学常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; $p_{\text{air}}, p_{\text{N}_2}$ ——PSA 的空气输入量、 N_2 输出量, m^3 ; $P_{\text{min}}^{\text{PSA}}, P_{\text{max}}^{\text{PSA}}$ ——制氮功率上限和下限, kW 。

3) AR 模块

最常用的合成 NH_3 技术是哈伯-博施法。在该工艺中, 氢气和氮气在高压和高温下结合, 产生放热反应, 放热量为 $2.6 \text{ MJ}/\text{kg} \text{ NH}_3$ ^[17]。式(6)描述了氨反应过程中氨产量与输入氢气和氮气压力之间的关系, 式(7)是预设因子的计算公式, 式(8)表示氨反应过程中产热量与产氨量之间的关系。反应过程数学模型如下:

$$A^{\text{AR}}(t) = \frac{2f}{\rho_{\text{cat}}} \left(k_1 \frac{p_{\text{N}_2} p_{\text{H}_2}^{1.5}}{p_{\text{NH}_3}} - k_{-1} \frac{p_{\text{NH}_3}}{p_{\text{H}_2}^{1.5}} \right) \quad (6)$$

$$k_1 = 1.79 \times 10^4 e^{-87090/RT} \quad (7)$$

$$k_{-1} = 2.75 \times 10^{16} e^{-198464/RT} \quad (8)$$

$$Q^{\text{AR}}(t) = \eta^{\text{AR}} A^{\text{AR}}(t) \quad (9)$$

$$A_{\text{min}}^{\text{AR}} \leq A^{\text{AR}}(t) \leq A_{\text{max}}^{\text{AR}} \quad (10)$$

式中: $A^{\text{AR}}(t)$ —— t 时刻的氨气产量, m^3 ; p_i ——各类气体分压; ρ_{cat} ——催化剂体积密度, kg/m^3 ; f ——修正系数, 4.75; k_1, k_{-1} ——正向和逆向反应路径的预设指数因子; R_T ——室温, 数值为 25°C ; $1.79 \times 10^4 e^{-87090/RT}, 2.75 \times 10^{16} e^{-198464/RT}$ ——先前研究得出的计算结果; $Q^{\text{AR}}(t)$ —— t 时刻合成氨所释放的热量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; η^{AR} ——产氨量和产热量的比例系数; $A_{\text{max}}^{\text{AR}}, A_{\text{min}}^{\text{AR}}$ ——产氨量的上下限, m^3 。

1.1.2 生物质发酵制气建模

农村地区由于农村地区丰富的生物质能源, 在产业园区内引入集中式沼气发酵装置(AF), 采用厌氧发酵方式将生产生活产生的有机废物进行发酵制气, 为 PIES 提供气源。式(10)为厌氧发酵沼气产量计算公式, 式(11)和式(12)为厌氧发酵过程中的动力学常数和微生物生长速率的计算公式, 式(13)为沼气池温度的表达式, 式(14)为发酵池散热量的计算公式, 式(15)和式(16)对沼气产量和发酵温度的上下限进行了限制。发酵制气环节的数学模型如下^[18]:

$$G^{\text{AF}}(t) = \frac{BS_0}{\theta} = \frac{B_0 S_0}{\theta} \left(1 - \frac{K}{\theta \mu_{\text{max}} - 1 + K} \right) \quad (10)$$

$$K = 0.8 + 0.0016e^{0.06S_0} \quad (11)$$

$$\mu_{\text{max}} = 0.013T_{\text{AF}} - 0.129 \quad (12)$$

$$T^{\text{AF}}(t+1) = T^{\text{AF}}(t) + \frac{Q_{\text{sup}}^{\text{AF}}(t) - Q_{\text{loss}}^{\text{AF}}(t)}{c_m \rho_m V_{\text{AF}}} \quad (13)$$

$$Q_{\text{loss}}^{\text{AF}}(t) = \sum_{i=1}^I n_i A_i (T^{\text{AF}}(t) - T^{\text{soil}}(t)) \quad (14)$$

$$G_{\text{min}}^{\text{AF}} \leq G^{\text{AF}}(t) \leq G_{\text{max}}^{\text{AF}} \quad (15)$$

$$T_{\text{min}}^{\text{AF}} \leq T^{\text{AF}}(t) \leq T_{\text{max}}^{\text{AF}} \quad (16)$$

式中: $G^{\text{AF}}(t)$ —— t 时刻发酵池的沼气产量, m^3 ; B ——有机废物甲烷产量, m^3 ; B_0 ——有机废物限制甲烷产量, m^3 ; S_0 ——挥发性固体物质浓度; θ ——水力停留时间; μ_{max} ——厌氧发酵过程最大微生物增长率; K ——动力学常数; $0.8 + 0.0016e^{0.06S_0}$ 和式(12)中 $0.013T_{\text{AF}} - 0.129$ ——先前研究得出的计算方法; $T^{\text{AF}}(t)$ ——厌氧发酵池的温度, $^{\circ}\text{C}$; $Q_{\text{sup}}^{\text{AF}}(t), Q_{\text{loss}}^{\text{AF}}(t)$ ——厌氧发酵池外界输入的热量、散热量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; c_m, ρ_m ——发酵池中固体物质的比热容、密度, $\text{kW}\cdot\text{h}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}), \text{kg}/\text{m}^3$; V_{AF} ——发酵池的体积, m^3 ; $\eta_{\text{loss}}^{\text{AF}}$ ——发酵池的热损失系数; n_i, A_i ——AF 第 i 个表面的导热系数($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), 第 i 个表面的面积(m^2); $G_{\text{max}}^{\text{AF}}, G_{\text{min}}^{\text{AF}}$ ——AF 产气量的上下限, m^3 ; $T_{\text{max}}^{\text{AF}}, T_{\text{min}}^{\text{AF}}$ ——沼气池发酵温度的上下限, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.3 P2A 与生物质制气耦合系统机理

在 P2A 系统中, AE 和 AR 模块的生产过程为放热反应, 反应释放的热量约占整个 P2A 过程输入能量 7.9%^[19]; 而由 1.1.2 节可知, 产生沼气所需的厌氧发酵微生物生长率与厌氧发酵温度密切相关。当在合理范围内发酵温度越高, 沼气产量越高。因此本文在 P2A 过程中引入余热回收, 将氨反应过程中的热量供应给厌氧发酵池, 构建 P2A-AF 耦合系统, 从而提高池内发酵温度, 增加微生物的生长速率, 进一步提升产气量, 促进系统整体效率的提升。P2A-AF 耦合系统的运行机理如图 2 所示。

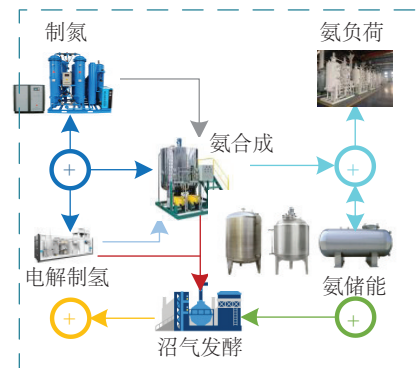


图2 P2A-AF耦合系统示意

Fig. 2 Schematic diagram of P2A-AF coupling system

其中 P2A 系统的产热量如式(17)所示:

$$Q_{\text{P2A}}(t) = Q_{\text{EC}}(t) + Q_{\text{AR}}(t) \quad (17)$$

在将余热输送至 AF 过程中会存在热损失,因此,提供给 AF 的热能如式(18)所示:

$$Q^{\text{sup}}(t) = \eta_{\text{loss}} Q_{\text{P2A}}(t) \quad (18)$$

式中: $Q^{\text{sup}}(t)$ ——提供给 AF 的热量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; η_{loss} ——传输过程中的损失系数。

1.2 系统其余设备建模

1.2.1 PV 及 WT 模型

在农村多类型 RIES 中,风力发电和光伏发电是重要的分布式发电设备,利用可再生能源产生大量的绿色能源满足负荷。其中,屋顶光伏的出力受到光伏机组的面板安装面积、额定功率、太阳照强度和环境温度等因素影响。其实际输出功率可由其标准测试条件下的额定装机容量、太阳辐照度、环境温度等与实际工作条件下的实际数值计算得出,具体模型如下^[20]:

$$P^{\text{PV}}(t) = \eta^{\text{PV}} A_i^{\text{PV}} I^{\text{PV}}(t) \quad (19)$$

$$\eta^{\text{PV}}(t) = \frac{\hat{P}^{\text{PV}}}{I_{\text{ref}}^{\text{PV}}} [1 - \alpha(T(t) - T_{\text{ref}})] \quad (20)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{PV}} \leq P^{\text{PV}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{PV}} \quad (21)$$

式中: $P^{\text{PV}}(t)$ ——光伏在 t 时刻的出力状况, kW ; A_i^{PV} ——光伏组件装机面积, m^2 ; $I^{\text{PV}}(t)$ —— t 时刻光伏电站平均辐照度, kW/m^2 ; $\eta^{\text{PV}}(t)$ ——光伏组件能量转换效率; $I_{\text{ref}}^{\text{PV}}$ ——光伏组件额定辐照度, kW/m^2 ; $\hat{P}^{\text{PV}}$ ——光伏的额定装机容量, kW ; α ——温度影响系数; $T(t)$ 、 T_{ref} ——面板环境温度、额定温度, $^{\circ}\text{C}$; $P_{\text{max}}^{\text{PV}}$ 、 $P_{\text{min}}^{\text{PV}}$ ——光伏出力上下限, kW 。

风力机将机械能转换为电能,其出力受风速变化而变化,风速变化具有明显的不确定性和波动性,因此风力机的出力也同样具有不确定性和波动性。现有研究大多使用分段函数近似刻画不同风速下的输出功率:

$$P^{\text{WT}}(t) = \begin{cases} 0, & v^{\text{W}}(t) < v_{\text{cin}}^{\text{W}}, v^{\text{W}}(t) \geq v_{\text{out}}^{\text{W}} \\ \frac{\hat{P}_i^{\text{WT}}(v^{\text{W}}(t))^3}{(v_r^{\text{W}})^3 - (v_{\text{cin}}^{\text{W}})^3} - \frac{\hat{P}_i^{\text{WT}}(v_{\text{cin}}^{\text{W}})^3}{(v_r^{\text{W}})^3 - (v_{\text{cin}}^{\text{W}})^3}, & v_{\text{cin}}^{\text{W}} \leq v^{\text{W}}(t) < v_r^{\text{W}} \\ \hat{P}_i^{\text{WT}}, & v_r^{\text{W}} \leq v^{\text{W}}(t) < v_{\text{out}}^{\text{W}} \end{cases} \quad (22)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{WT}} \leq P^{\text{WT}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{WT}} \quad (23)$$

式中: $P^{\text{WT}}(t)$ —— t 时刻风力机出力, MW ; $v^{\text{W}}(t)$ —— t 时刻风力机轮毂处风速, m/s ; $v_{\text{cin}}^{\text{W}}$ 、 $v_{\text{out}}^{\text{W}}$ ——风力机轮毂处额定、切入、切出风速, m/s ; $\hat{P}_{\text{max}}^{\text{WT}}$ 、 $\hat{P}_{\text{min}}^{\text{WT}}$ ——风力机出力上下限, MW 。

1.2.2 CHP 机组模型

CHP 是一种高效灵活的能源利用技术,可同时生产电能和热能,可作为灵活性资源调节 RIES 内部能量平衡。机组的运行数学模型如下:

首先考虑 CHP 设备受设备特性限制不能同时启停,本研究引入辅助 0-1 变量刻画机组启停状态和启停选项间线性约束,约束如下:

$$-u_{\text{CHP}}^{\text{shut}}(t) \leq u_{\text{CHP}}^{\text{CHP}}(t) - u_{\text{CHP}}^{\text{CHP}}(t) \leq u_{\text{CHP}}^{\text{start}}(t) \quad (24)$$

$$0 \leq u_{\text{CHP}}^{\text{shut}}(t) + u_{\text{CHP}}^{\text{start}}(t) \leq 1 \quad (25)$$

式中: $u_{\text{CHP}}^{\text{CHP}}(t)$ ——CHP 机组 t 时刻的启停状态; $u_{\text{CHP}}^{\text{start}}(t)$ 、 $u_{\text{CHP}}^{\text{shut}}(t)$ ——CHP 机组开启和关闭。

此外,为了保护发电机组的机械设备,CHP 机组需要满足最短启停时间约束,具体模型如下:

$$T_{\text{CHP}}^{\text{u,MIN}} u_{\text{CHP}}^{\text{start}}(t) \leq \sum_{h=t}^{t+T_{\text{CHP}}^{\text{u,MIN}}-1} u_{\text{CHP}}^{\text{CHP}}(h), \forall t \leq T - T_{\text{CHP}}^{\text{u,MIN}} + 1 \quad (26)$$

$$T_{\text{CHP}}^{\text{d,MIN}} u_{\text{CHP}}^{\text{shut}}(t) \leq \sum_{h=t}^{t+T_{\text{CHP}}^{\text{d,MIN}}-1} u_{\text{CHP}}^{\text{CHP}}(h), \forall t \leq T - T_{\text{CHP}}^{\text{d,MIN}} + 1 \quad (27)$$

$$-r_{\text{down}}^{\text{CHP}} \leq P^{\text{CHP}}(t) - P^{\text{CHP}}(t-1) \leq r_{\text{up}}^{\text{CHP}} \quad (28)$$

式中: $T_{\text{CHP}}^{\text{u,MIN}}$ 、 $T_{\text{CHP}}^{\text{d,MIN}}$ ——CHP 机组的最短正常运行时间和停机时间, h ; $u_{\text{CHP}}^{\text{CHP}}(t)$ ——CHP 机组的开关状态; $r_{\text{up}}^{\text{CHP}}$ 、 $r_{\text{down}}^{\text{CHP}}$ ——CHP 机组的最大爬坡上下限, MW 。

机组输出功率及输入天然气量约束如式(29):

$$X_{\text{min}}^{\text{CHP}} \leq X^{\text{CHP}}(t) \leq X_{\text{max}}^{\text{CHP}} \quad (29)$$

式中: X^{CHP} —— t 时刻输出的电热功率及天然气输入, $X^{\text{CHP}} = [P^{\text{CHP}}, Q^{\text{CHP}}, G^{\text{CHP}}]^T$, MW ; $X_{\text{min}}^{\text{CHP}}$ 、 $X_{\text{max}}^{\text{CHP}}$ ——输入和输出的上下限, MW 。

CHP 机组电热耦合关系及出力与天然气消耗量关系如下式:

$$Q^{\text{CHP}}(t) = \frac{P^{\text{CHP}}(t)(1 - \eta_{\text{E}}^{\text{CHP}} - \eta_{\text{loss}}^{\text{CHP}})}{\eta_{\text{E}}^{\text{CHP}}} C_{\text{h}} \quad (30)$$

$$G^{\text{CHP}}(t) = \frac{1}{L_{\text{ng}} \eta_{\text{E}}^{\text{CHP}}} P^{\text{CHP}}(t) \quad (31)$$

式中: $\eta_{\text{E}}^{\text{CHP}}$ 、 $\eta_{\text{loss}}^{\text{CHP}}$ ——CHP 机组的产电效率、损耗率; L_{ng} ——天然气的热值, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; C_{h} ——CHP 机组的效率。

1.2.3 储能设备模型

本文中储能系统包括天然气储能和氨储能。为减少重复建模,使用如下通用数学模型进行储能系统模型构建:

$$u_{\text{C}}^{\text{ES}}(t) + u_{\text{D}}^{\text{ES}}(t) \in (0, 1) \quad (32)$$

$$u_{\text{C}}^{\text{ES}} E_{\text{C,min}} \leq E_{\text{C}} \leq u_{\text{C}}^{\text{ES}} E_{\text{C,max}} \quad (33)$$

$$u_{\text{D}}^{\text{ES}} E_{\text{D,min}} \leq E_{\text{D}} \leq u_{\text{D}}^{\text{ES}} E_{\text{D,max}} \quad (34)$$

$$S^{\text{ES}}(t) = (1 - \gamma^{\text{ES}}) S^{\text{ES}}(t-1) + \left[E_{\text{C}}(t) \eta_{\text{ESC}} - \frac{E_{\text{D}}(t)}{\eta_{\text{ESD}}} \right] \Delta t \quad (35)$$

$$S_{\text{min}}^{\text{ES}} \leq S^{\text{ES}}(t) \leq S_{\text{max}}^{\text{ES}} \quad (36)$$

$$\forall E = \{E|G_i^{\text{GES}}, A_i^{\text{AES}}\} \quad (37)$$

式中: $u_{\text{C}}^{\text{ES}}(t)$ 、 $u_{\text{D}}^{\text{ES}}(t)$ ——储能设备的充放状态; $E_{\text{C}}(t)$ 、 $E_{\text{D}}(t)$ ——储能设备 t 时刻的充放电功率, MW ; $S^{\text{ES}}(t)$ ——储能设备的储能状态; η_{ESC} 、 η_{ESD} 、 γ^{ES} ——储能设备的充放转换系数及自损率。式(37)说明式(32)~式(36)是储能设备运行的一般数学形式,包括本研究中的两种储能形式。

2 PIES 灵活需求响应及碳排放核算模型

2.1 PIES 需求响应模型

基于 PIES 的负荷特征分析将负荷类型分为刚性负荷、

可转移负荷和可削减负荷。之后,考虑现有电力市场规则建立 PIES 能量需求响应模型。

其中,电负荷包括可转移负荷和可削减负荷两类,具体需求响应模型如下:

$$\sum_{i=1}^T P^{\text{trans}}(t) = 0 \quad (38)$$

$$-\eta^{\text{trans}} P^{\text{L}}(t) \leq P^{\text{trans}}(t) \leq \eta^{\text{trans}} P^{\text{L}}(t) \quad (39)$$

$$0 \leq P^{\text{cut}}(t) \leq \eta^{\text{Pcut}} P^{\text{L}}(t) \quad (40)$$

式中: $P^{\text{trans}}(t)$ 、 $P^{\text{cut}}(t)$ ——可转移负荷、可削减负荷电功率, kW; $P^{\text{L}}(t)$ —— t 时刻的电负荷, kW; η^{trans} ——可转移功率比例系数; η^{Pcut} ——可削减电负荷的比例系数。

而热负荷及天然气负荷较为特殊,现有市场的需求响应机制还不完善,因此仅考虑刚性负荷和可削减负荷,氨负荷由于其工艺制备的连续性,不考虑需求响应。热负荷和天然气负荷的需求响应模型如下:

$$0 \leq Q^{\text{cut}}(t) \leq \eta^{\text{Qcut}} Q^{\text{L}}(t) \quad (41)$$

$$0 \leq G^{\text{cut}}(t) \leq \eta^{\text{Gcut}} G^{\text{L}}(t) \quad (42)$$

式中: $Q^{\text{L}}(t)$ 、 $Q^{\text{cut}}(t)$ ——热负荷、可削减热负荷, kW; $G^{\text{L}}(t)$ 、 $G^{\text{cut}}(t)$ ——天然气负荷、可削减天然气负荷, m^3 ; η^{Pcut} 、 η^{Gcut} ——可削减热负荷、可削减天然气负荷的比例系数。

2.2 PIES 碳排放模型

为促进农村地区的减排,对 PIES 的碳排放进行精细化核算并计算其碳排放成本。其中碳排放来源主要为燃气生产和利用过程,以及向能源市场购能的间接碳排放。除此之外,由于风电和光伏属于清洁能源,为鼓励对分布式光伏和风电的应用和发展,将为光伏和风力发电建立减碳核算机制。因此 PIES 的总碳排放由实际碳排放减去减排量得到。

PIES 沼气利用的碳排放主要由生产输送过程中泄漏燃气的 CO_2 当量、燃气中的 CO_2 量及燃烧产生的 CO_2 量构成。假设整个传输过程中沼气泄露量为 5%^[21]。通过核算 PIES 使用的总燃气体量,计算整个过程所释放的 CO_2 量。

$$G(t) = G_{\text{buy}}(t) + G_{\text{CHP}}(t) - G_{\text{sell}}(t) \quad (43)$$

$$V_1 = \frac{G(t)}{1 - 0.05} \times 0.05 \times \varphi_{\text{CH}_4} \times \rho \times G_{\text{WPCH}_4} \quad (44)$$

$$V_2 = \frac{G(t)}{0.95} \times \varphi_{\text{CO}_2} \times 0.00196 \quad (45)$$

$$V_3 = G(t) \varphi_{\text{CH}_4} N_{\text{CV}} C_{\text{CCH}_4} O_{\text{FCH}_4} \frac{44}{12} \quad (46)$$

$$V_{\text{gas}-\text{CO}_2} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (47)$$

式(43)计算了系统总的燃气用量,包括 AF 发酵产生的沼气向能源市场购买的天然气。式(44)~式(46)分别表示传输管道传输气过程中泄露的燃气的 CO_2 当量、燃气使用中无法燃烧的 CO_2 量、沼气燃烧使用过程产生的 CO_2 量。式(47)表示整个燃气使用过程的总碳排放量。式(45)中 0.00196 和式(46)中 44/12 分别表示折算系数和二氧化碳与碳的相对分子质量比值。式(48)~式(52)表示向上级能源市场购买各类能源的间接碳排放量和总间接碳排放量。

$$V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{E}} = \sum_{t=1}^T [(P_{\text{buy}}(t) F_{\text{Fe}}) - (P_{\text{sell}}(t) F_{\text{Fe}})] \quad (48)$$

$$V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{Q}} = \sum_{t=1}^T [(Q_{\text{buy}}(t) F_{\text{Fq}}) - (Q_{\text{sell}}(t) F_{\text{Fq}})] \quad (49)$$

$$V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{G}} = \sum_{t=1}^T [(G_{\text{buy}}(t) F_{\text{Fg}}) - (G_{\text{sell}}(t) F_{\text{Fg}})] \quad (50)$$

$$V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{A}} = \sum_{t=1}^T [(A_{\text{buy}}(t) F_{\text{Fa}}) - (A_{\text{sell}}(t) F_{\text{Fa}})] \quad (51)$$

$$V_{\text{grid}-\text{CO}_2} = V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{P}} + V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{Q}} + V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{G}} + V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{A}} \quad (52)$$

式中: $V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{E}}$ 、 $V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{Q}}$ 、 $V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{G}}$ 、 $V_{\text{grid}-\text{CO}_2}^{\text{A}}$ ——购买电、热、气、氨的间接碳排放, t; $V_{\text{grid}-\text{CO}_2}$ ——总间接碳排放量, t; F_{Fe} ——各类能源的间接碳排放因子。

2.3 可再生能源减排模型

光伏和风力发电属于可再生能源发电,供能过程中不存在碳排放,为鼓励居民对清洁能源的使用,此处计算其减排量。此外在向电网购电过程中,存在间接碳排放。式(53)和式(54)分别表示可再生能源发电的减排量以及电网基准线排放因子的计算方法。

$$V_{\text{red}-\text{CO}_2} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t)) E_{\text{F}} \quad (53)$$

$$E_{\text{F}} = 75\% \times E_{\text{FOM}} + 25\% \times E_{\text{FBM}} \quad (54)$$

式中: E_{FOM} 、 E_{FBM} ——电量边际排放因子、容量边际排放因子, $\text{元}/\text{m}^3$ 。

3 PIES 优化调度模型

3.1 目标函数

本文以农村 PIES 的总运行成本最小为目标,同时考虑能量供需平衡与碳排放约束,从而在满足负荷需求的前提下实现成本与碳排放的协调优化。包括设备运维成本、需求响应成本、与能源市场进行能量交易成本和碳排放成本,具体如式(55):

$$C^{\text{PIES}} = C^{\text{OM}} + C^{\text{Re}} + C^{\text{Grid}} + C^{\text{CO}_2} \quad (55)$$

式中: C^{PIES} ——PIES 的总成本, 元; C^{OM} ——运维成本, 元; C^{Re} ——需求响应成本, 元; C^{Grid} ——与能源市场交互成本, 元; C^{CO_2} ——碳排放成本, 元。各类成本的具体构成如下:

设备运维成本由调度周期内设备运行功率与相应单位成本乘积和构成。主要包含光伏 (photovoltaic, PV)、风力机 (wind turbine, WT)、P2A、AF、气储能设备 (gas energy storage, GES) 和氨储能设备 (ammonia energy storage, AES) 设备的运维成本。

$$C^{\text{OM}} = \sum_{t=1}^T [\pi^{\text{PV}} P^{\text{PV}}(t) + \pi^{\text{WT}} P^{\text{WT}}(t) + \pi^{\text{CHP}} P^{\text{CHP}}(t)] +$$

$$\sum_{t=1}^T [\pi^{\text{P2A}} P^{\text{P2A}}(t) + \pi^{\text{AES}} (A_{2,\text{C}}^{\text{AES}}(t) + A_{2,\text{D}}^{\text{AES}}(t))] + \quad (56)$$

$$\sum_{t=1}^T [\pi^{\text{AF}} G_2^{\text{AF}}(t) + \pi^{\text{GES}} (G_{2,\text{C}}^{\text{GES}}(t) + G_{2,\text{D}}^{\text{GES}}(t))]$$

需求响应成本由调度周期内相应功率与对应时间需求响应价格乘积和构成。包括可转移电负荷成本,可削减电负荷、热负荷、天然气负荷成本。

$$C^{\text{Re}} = \sum_{t=1}^T (\pi_p^{\text{trans}} |P^{\text{trans}}(t)| + \pi_p^{\text{cut}} P^{\text{cut}}(t)) + \sum_{t=1}^T (\pi_Q^{\text{cut}} Q^{\text{cut}}(t) + \pi_G^{\text{cut}} G^{\text{cut}}(t)) \quad (57)$$

与能源市场交互成本由调度周期内所有能源购买成本与出售收入之差构成。由电、热、天然气和氨的购买成本以及电、热、天然气和氨出售收入之差构成。

$$C^{\text{Grid}} = \sum_{t=1}^T (\pi_{\text{buy}}^{\text{GridP}} P_{\text{buy}}^{\text{Grid}}(t) + \pi_{\text{buy}}^{\text{GridQ}} Q_{\text{buy}}^{\text{Grid}}(t) + \pi_{\text{buy}}^{\text{GridG}} G_{\text{buy}}^{\text{Grid}}(t)) + \sum_{t=1}^T (\pi_{\text{buy}}^{\text{GridA}} A_{\text{buy}}^{\text{Grid}}(t) - \pi_{\text{sell}}^{\text{GridP}} P_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t) - \pi_{\text{sell}}^{\text{GridQ}} Q_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t)) - \sum_{t=1}^T (\pi_{\text{sell}}^{\text{GridG}} G_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t) - \pi_{\text{sell}}^{\text{GridA}} A_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t)) \quad (58)$$

碳排放成本由调度周期内 RIES 整体碳排放量和单位排放价格乘积构成。碳排放成本由 CHP 机组排放成本、用气碳排放成本、向外界购电和热的间接排放成本减去风力机发电产生的碳资产收益构成。

$$C^{\text{CO}_2} = \pi^{\text{CO}_2} (V_{\text{gas}} - \text{CO}_2 + V_{\text{grid}} - \text{CO}_2 - V_{\text{red}} - \text{CO}_2) \quad (59)$$

式中: π^* ——相应功率、能量或碳排放量的单位价格,单位随对应变量确定。

3.2 约束条件

本文的优化模型不仅要满足 1.1 和 1.2 节中的设备运行约束条件,还要满足能量传输约束和系统能量平衡约束条件。

与上级能源市场交易需考虑能量网络的双向传输约束,具体如下:

$$0 \leq P^{\text{Grid}}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{Grid}} \quad (60)$$

$$0 \leq Q^{\text{Grid}}(t) \leq Q_{\text{max}}^{\text{Grid}} \quad (61)$$

$$0 \leq G^{\text{Grid}}(t) \leq G_{\text{max}}^{\text{Grid}} \quad (62)$$

$$0 \leq A^{\text{Grid}}(t) \leq A_{\text{max}}^{\text{Grid}} \quad (63)$$

式中: $P^{\text{Grid}}(t)$ 、 $Q^{\text{Grid}}(t)$ 、 $G^{\text{Grid}}(t)$ 和 $A^{\text{Grid}}(t)$ —— t 时刻各 RIES 与上级能源市场交互的电、热、气和氨量, kW、kW、 m^3 、 m^3 ; $P_{\text{max}}^{\text{Grid}}$ 、 $Q_{\text{max}}^{\text{Grid}}$ 、 $G_{\text{max}}^{\text{Grid}}$ 、 $A_{\text{max}}^{\text{Grid}}$ ——向上级能源市场传输上限, kW、kW、 m^3 、 m^3 。

系统的能量平衡约束包括电、热、气、氨子系统的平衡约束。其中,系统电功率平衡约束为:

$$P^{\text{PV}}(t) + P^{\text{WT}}(t) + P^{\text{CHP}}(t) + P^{\text{cut}}(t) + P^{\text{trans}}(t) + P_{\text{buy}}^{\text{Grid}}(t) = P^{\text{L}}(t) + P^{\text{P2A}}(t) + P_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t) \quad (64)$$

系统热功率平衡如下:

$$Q^{\text{P2A}}(t) + Q^{\text{CHP}}(t) + Q_{\text{buy}}^{\text{Grid}}(t) + Q^{\text{cut}}(t) = Q^{\text{L}}(t) + Q^{\text{AF}}(t) + Q_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t) \quad (65)$$

天然气平衡约束为:

$$G^{\text{AF}}(t) + G_{\text{D}}^{\text{GES}}(t) + G_{\text{buy}}^{\text{Grid}}(t) + G_t^{\text{cut}}(t) = G_t^{\text{L}}(t) + G_t^{\text{GES}}(t) + G_t^{\text{CHP}}(t) + G_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t) \quad (66)$$

氨能源平衡约束为:

$$A^{\text{P2A}}(t) + A_{\text{D}}^{\text{AES}}(t) + A_{\text{buy}}^{\text{GridA}}(t) = A^{\text{L}}(t) + A^{\text{P2A}}(t) + A_{\text{sell}}^{\text{Grid}}(t) \quad (67)$$

结合上述目标函数和约束条件建立农村 PIES 调度优化模型。

3.3 风光不确定性

PIES 系统内包含可再生能源供电,但其随机性和波动性会对系统稳定运行带来冲击。可再生能源出力与多元负荷均具有随机性和波动性,使系统存在源荷双侧不确定性。在源侧涉及到风电和光伏的波动性和随机性,在负荷侧同样涉及到电、热、气、氨 4 类负荷的不确定性。因此本文考虑 PIES 源荷双侧不确定性,通过拉丁超立方抽样生成 300 个原始场景,之后利用 K -均值场景削减得到 3 个典型的风光出力场景及对应概率,具体场景见附录。

4 算例分析

4.1 算例数据

本文选取华北地区某农村产业园区为研究对象进行算例分析。PIES 园区内部各设备参数如附录中表 A1 所示。与上级能源市场交易的能源价格如图 3,本文所使用的光风出力及负荷典型场景见附录图 A1、图 A2。

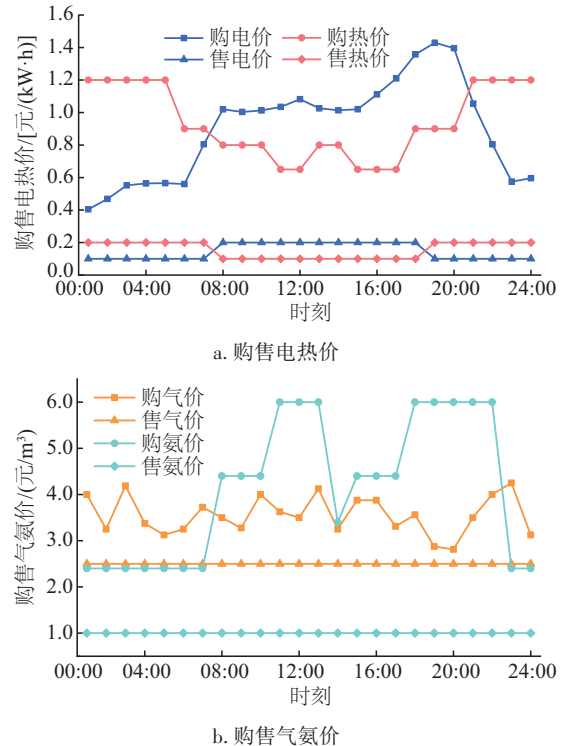


图3 PIES购售能价格

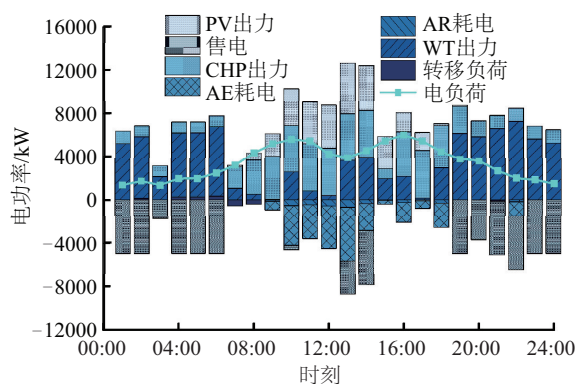
Fig. 3 Purchase and sale prices of PIES

4.2 PIES调度策略分析

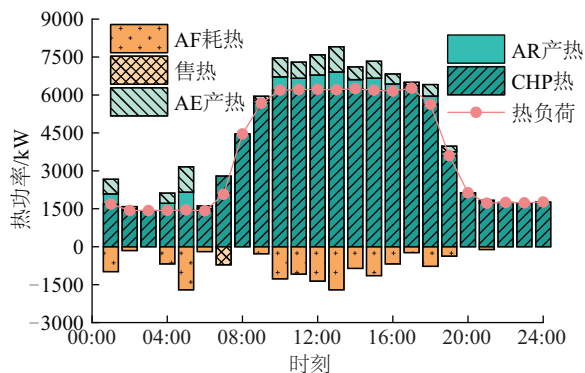
基于本文所提优化模型所得的产业园区 PIES 优化调度结果如下图所示。图 4 分别为 PIES 内电、热、气及氨系统的运行情况。

从需求量范围来看,典型日内电负荷需求在 1861~6122 kW 内波动,热负荷需求在 1421~6110 kW 内波动、气负荷在 0~1988 m³ 内波动、氨负荷在 0~2273 m³ 内波动。

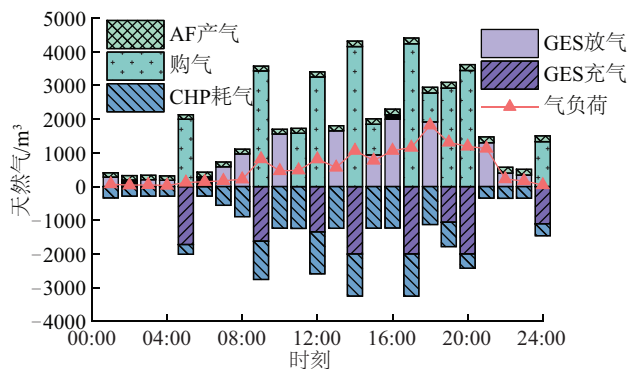
对于电系统,由图 4a 可知,WT、PV 和 CHP 机组是主要的能量来源。PIES 内电负荷主要集中在日间 07:00—19:00,负荷占单日总负荷的 73.40%。此时优先调用 CHP 机组满足负荷,CHP 机组共输出 48762.78 kW·h 电能满足了该时段 79.48% 的负荷。同样在 07:00—19:00,此时段内光照充足,PIES 内的 PV 出力达 29653.63 kW·h。PV 配合 WT 来将盈余电能供给 P2A 子系统来进行氨气生产,此时段 P2A 系统共



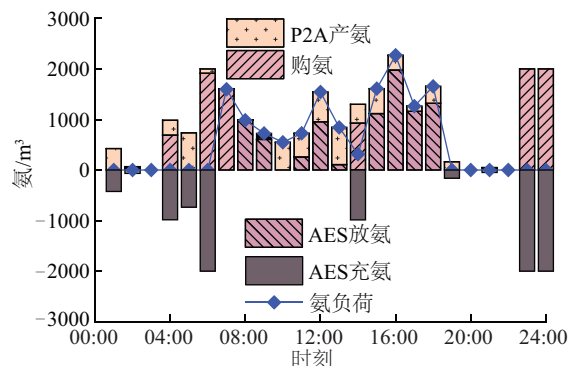
a. 电系统调度结果



b. 热系统调度结果



c. 气系统调度结果



d. 氨系统调度结果

图 4 PIES 优化调度结果

Fig. 4 Results of PIES optimized scheduling

消耗了 57.03% 的 PV 和 WT 产生的清洁电能,有效促进了可再生能源的本地消纳,剩余的电能则出售给上级电网。在夜间,PIES 系统内电负荷较低,而夜间风力较大,WT 出力大,在 20:00—06:00 WT 出力占其总出力的 72.68%,此时的负荷完全由 WT 出力满足,17.56% 的风电在夜间 01:00 和 05:00 等时段输送至 P2A 系统制取氨气。而剩余的风电选择向上级电网出售获取收益,来提升系统整体经济性。

对于热系统,依据图 4b 可知,PIES 内的热负荷主要集中在日间,CHP 机组的产热是系统的主要热源。在日间 07:00—19:00,系统热负荷共 67521.75 kW·h,占总热负荷 75.81%,而夜间的热负荷仅占 24.19%。PIES 内 P2A 子系统中 AE 和 AR 模块所释放的热量全部输送至 AF 内提升发酵温度,共将 13607.56 kW·h 的生产余热输送至 AF,实现了两个单元的耦合运行。在 07:00 时,CHP 机组依据价格信息同时兼顾电、热出力,产热量大于负荷,将盈余 717.63 kW·h 的热能出售给上级电网来赚取收益。

对于气系统,由图 4c 可知,气负荷同样集中在日间。由于气系统中 AF 的产气能力有限,系统内的主要燃气需求由向上级市场购气满足。AF 制气与 WT 及 PV 不同,在整个调度周期内均可产气,AF 共制取沼气 3662.04 m³,满足了 26.27% 的气负荷。除气负荷外,PIES 内另一大燃气需求为 CHP 耗气,剩余 73.73% 的气负荷以及 CHP 燃气需求均由外界购气满足。由于气系统中配置了 GES 设备,这使得气系统可以依据市场气价,灵活选择购售气,配合 GES 设备满足燃气需求。在 12:00、14:00、17:00 等气价较低时刻,系统大量购入燃气,在满足燃气需求后,将 49.81% 购入的燃气储存在 GES 中,当气价较高时放出满足气需求。通过 GES 依据价格信息实现了气系统的合理调度,提升了系统运行的灵活性和经济性。

对于氨系统,由图 4d 可知,氨负荷集中在 06:00—19:00,由 PIES 内 P2A 所制氨气和外界购氨共同满足。P2A 制气主要在 WT 和 PV 产电盈余时进行,用于促进可再生能源的消纳同时满足部分氨负荷,由可再生能源所制取的氨气共

5865.33 m³,满足了系统 41.65% 的氨负荷。与气系统类似,氨系统也配置了 AES 设备,可以依据氨价格信息进行氨的购售,在 06:00、23:00 和 24:00 等氨价较低时刻大量购氨,共将 9408.39 m³ 存入 AES,在氨负荷较高时放出,实现了氨系统的灵活调度。

由上述分析可得,在本文所提的产业园区 PIES 优化模型下,电、热、气、氨 4 个子系统实现了协同优化。在满足多元负荷需求下,系统以成本最低为目标实现了灵活调度,其中电、热、气、氨的负荷最大值分别为 6122.31 kW、6110.44 kW、1988 m³、2273 m³,均得到有效满足。本文以系统总运行成本表征园区用能经济性。相较于完全依赖上级能源市场购能的传统供能方案,所构建的 PIES 优化调度模型可使系统总运行成本降低 31.56%。P2A 系统的加入也使得 PIES 内的可再生能源本地消纳率提升了 34.92%,降低了对电网的冲击,同时利用可再生能源制取氨气减少外购氨气,使得系统成本减少了 25970.35 元,验证了本文所提 PIES 优化模型的有效性。

4.3 P2A-AF 耦合系统有效性分析

为验证本文提出的 P2A-AF 耦合子系统的有效性,首先对比了 P2A 与 AF 是否耦合的两种场景下 AF 发酵温度、沼气产量。具体对比情况如图 5 所示。

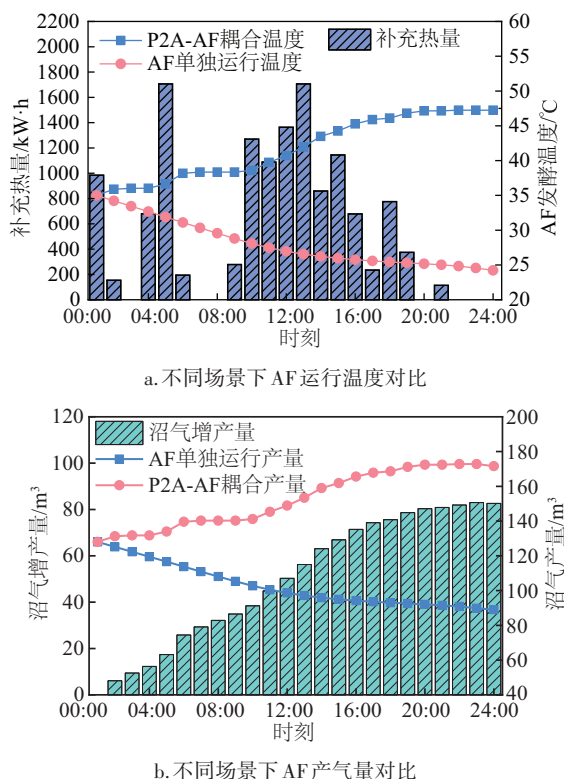


图 5 不同耦合场景下 AF 系统运行特性对比

Fig. 5 Comparison of operating characteristics of AF system under different coupling scenarios

由图 5a 可看出,在调度日开始 01:00 时,AF 内的预设发

酵温度均为 35 ℃。当系统内 P2A 单元生产过程中的余热不输送到 AF 中,两个单元独立运行时,AF 由于向外散热,导致内部发酵温度呈下降趋势,在经过 24 h 后,发酵温度已从 35 ℃下降至 24.23 ℃。而当 P2A 将余热输送至 AF 实现耦合运行时,由图可以看出,在夜间 01:00—05:00 风电充足以及日间 10:00—16:00 光伏出力充足等时段,清洁电能输送至 P2A 进行生产,此时 P2A 过程的产热量也大幅增加,共将 13607.56 kW·h 的热量输送至 AF,使得 AF 的发酵温度持续呈上升趋势,仅在少量无热源补充的时段出现温度短暂下降。在 24 h 后,发酵温度达到 47.25 ℃,相较 P2A 与 AF 单独运行时,各时段发酵温度均有显著提升,可促进 AF 的沼气生产。

由上述分析可知,P2A-AF 的耦合运行可提升 AF 的发酵温度,而发酵温度又是影响 AF 产气量的关键因素,图 5b 反映了两种情形下的沼气量以及沼气增产量。

由图 5b 可知,AF 单独运行时由于发酵温度持续下降,因此产气量也是呈下降趋势,从 01:00 时 128 m³/h 的产期速率,持续下降到 24:00 时的 89 m³/h。而在 P2A-AF 耦合运行时,AF 发酵温度提升使得产气量也显著提升,在整个调度周期内都呈上升趋势,产气量从第一小时内的 128 m³ 逐步增加至 171.61 m³。相较 AF 单独运行,整个调度周期内的沼气产量共增加了 1113.30 m³,总产量提升了 43.68%,P2A-AF 的耦合运行显著提升了 AF 的沼气产量。

AF 的产量会影响 PIES 整体的运行成本,且通过影响 PIES 的购气量等因素对系统碳排放产生影响,图 7 为两种场景下的系统总成本和碳排放量对比情况。

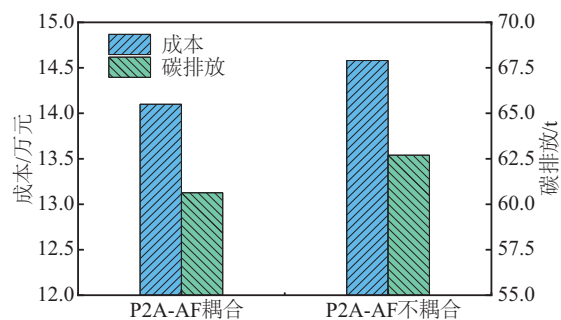


图 6 不同场景下系统成本及碳排放对比

Fig. 6 Comparison of system costs and carbon emissions in different scenarios

由图 6 可看出,P2A-AF 耦合场景下的成本和碳排放相较不耦合场景下均有所下降。P2A-AF 耦合可通过补充热量提升 AF 沼气产量,这使得 PIES 减少了向外部购气。耦合下的 AF 增产了 1113.30 m³,相较单独运行,系统总成本由 14.58 万元下降至 14.10 万元,整体成本下降了 3.30%。而碳排放则从 62.88 t 下降至 60.63 t,总碳排放下降了 3.58%。

由上述分析可得,通过 P2A 与 AF 的耦合,AF 的沼气产

量显著增加,从而提升了 PIES 运行的经济性和低碳性,验证了本文所提 P2A-AF 耦合系统的有效性。

4.4 敏感性分析

在本文的 PIES 模型中,P2A-AF 系统是新引入的子系统目的是进一步提高系统的可再生能源吸收能力和运行效率。由于在外部热源固定的情况下,AF 的容量会影响发酵温度,进而影响气体产量和系统成本等因素,因此在假设发酵物充足和条件允许情况下,对 AF 的容量进行了敏感性分析。

图 7 展示了 AF 容量变化对系统技术经济指标的具体影响结果。

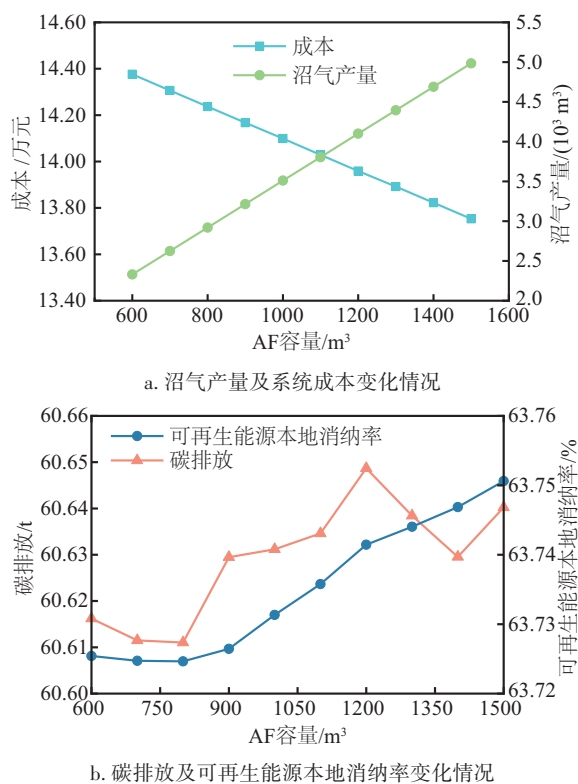


图 7 AF 容量敏感性分析结果
Fig. 7 Results of AF capacity sensitivity analysis

由图 7a 可知,当 AF 容量由 600 m³ 增至 1500 m³ 时,沼气产量由 2330.12 m³ 增至 4984.54 m³,呈持续增加趋势。尽管发酵温度有所下降,但当容量增加时,AF 可容纳更丰富的发酵物;在最佳温度范围内,发酵物的量显著影响最终的沼气产量。此外,由于系统内产生的沼气量增加,从能源市场购买天然气的需求将减少,从而导致整个系统的总运营成本降低,AF 容量从 600 m³ 增加到 1500 m³,可使得系统总成本下降 4.53%。图 7b 表明,AF 体积对系统的碳排放以及可再生能源的本地消纳影响很小。这是因为发酵过程不需要电力,也不会产生碳排放。

因此,增加 AF 体积将提高 RIES 的经济可行性,而不会影响碳排放和可再生能源的本地消纳,但应考虑在原材料充足和其他自然条件允许的情况下增加 AF 容量,这种情况更

有利于 RIES 的运行。

4.5 碳价敏感性分析

本文考虑了系统的碳排放且将碳排放成本纳入目标函数,因此碳排放的价格会影响系统的调度策略最终对系统总成本,机组调度策略等产生影响。由于 CHP 机组是 PIES 系统内主要的碳排放来源,而可再生能源又可以实现间接碳减排,因此碳价会对 CHP 机组的运行和可再生能源的本地消纳策略产生影响,因此选取这些因素进行碳价的敏感性分析。图 8 和图 9 分别为碳排放价格变化下系统 CHP 机组耗气量、可再生能源的本地消纳以及对应成本情况。

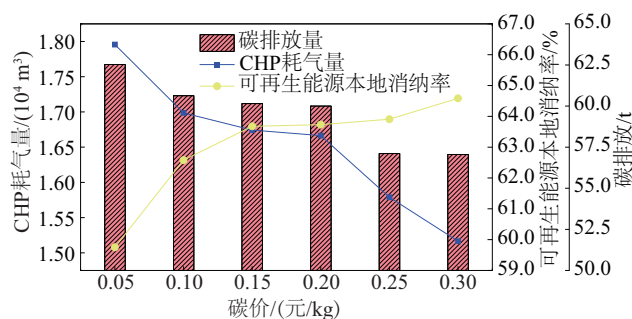


图 8 碳排放价对系统技术性指标影响分析
Fig. 8 Analysis of impact of carbon emission prices on technical indicators of system

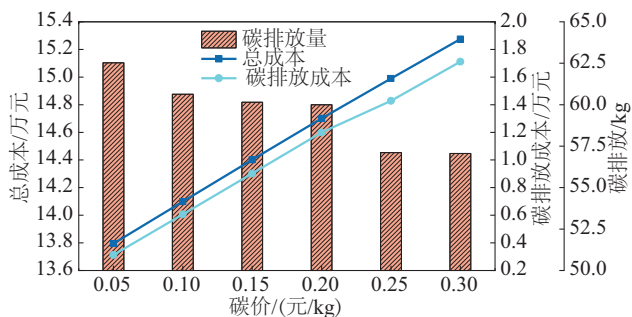


图 9 碳排放价对经济性指标影响分析
Fig. 9 Analysis of impact of carbon emission price on economic indicators

由图 8 可看出,碳排放价格上升使得系统总碳排放量和 CHP 机组的耗气量下降,而可再生能源的本地消纳率呈上升趋势。由于 CHP 机组是 PIES 系统内最主要的碳排放来源,因此在碳排放价格上升时,系统为尽量降低碳排放成本,选择通过降低 CHP 机组的出力实现减排,系统的碳排放总量随之下降。在碳排放价格从 0.05 元/kg 上升至 0.3 元/kg 时,CHP 机组的耗气量从 17956.89 m³ 下降至 15166.09 m³,单日用气量降低了 15.54%,碳排放量下降了 0.55 t。而当碳价较低时,CHP 机组出力升高,则系统内丰富的可再生能源优先向上级电网出售量增加收益而非进行本地消纳,因此在碳排放价格较低时可再生能源的本地消纳率反而最高。当碳排放价格从 0.05 元/kg 上升至 0.3 元/kg 时,PIES 内的可再生能

源本地消纳率下降了 4.83%。可看出,本文所提农村 PIES 优化模型可依据碳排放的价格实现调度策略的灵活调整。

调度策略会直接影响系统的经济性,图 9 反映了碳排放价格变化下系统成本的变化情况。由图 9 可看出,当碳排放价格上升时,碳排放量逐步下降,而系统碳排放成本和总成本均呈现上升趋势。在碳排放价格从 0.05 元/kg 上升至 0.3 元/kg 时,系统总成本和碳排放成本分别增加了 10.73% 和 347%。由于在碳排放价格上升时,CHP 机组在碳排放价格信号的驱使下,减少了机组出力来降低碳排放量。此时系统首先尽量消纳内部的可再生能源来满足负荷,则系统减少了向上级市场的售能,导致售能收益下降,从而使得系统总成本增加。此外,由于可再生能源的出力高峰与负荷高峰存在时间差,因此还需依靠增加外部购电和购热来满足负荷,同样会导致系统成本的上升。而碳价从 0.05 元/kg 上升至 0.3 元/kg,系统的碳排放量虽然减少了 0.55 t,但价格的显著增加导致碳排放成本也呈现上升趋势。当价格上涨 5 倍,碳排放成本仅增加 3.47 倍,反映了系统通过改变调度策略能够有效控制碳排放带来的成本增加,验证了系统优化策略的有效性。

综上,PIES 系统内的碳排放量,可再生能源本地消纳率和运行成本会受到碳排放价格的显著影响,因此需要合理的制定碳排放价格来促进农村 PIES 的碳减排和可再生能源本地消纳,同时保障 PIES 运营商的利益。

5 结 论

本文结合农村地区的发展趋势和源荷特征,首先提出农村产业 PIES 模型。为促进农村可再生能源消纳和能源利用效率提升,在 PIES 内引入 P2A-AF 耦合模型。之后考虑了 PIES 运行过程中的碳排放,构建了农村 PIES 低碳经济调度模型。最后通过算例分析得出如下主要结论:

1)所提 PIES 模型可实现园区电、热、气、氨系统的协同调度,高效满足了产业园区的负荷需求,且可依据能源市场价格信号实现调度策略的灵活调整。相较产业园区完全依赖向上级能源市场购能满足负荷的传统模式,PIES 模型可以使产业园区用能经济性提升 31.56%,验证了本文 PIES 模型的有效性。

2)通过在 PIES 内引入 P2A 和 AF 生产单元,实现了对传统园区能源系统结构的改进,进一步提升了 PIES 的用能经济性,同时促进了 PIES 内的可再生能源本地消纳。P2A 单元和 AF 可分别满足园区内 41.65% 的氨负荷和 26.27% 气负荷。且通过 P2A 实现清洁电能的转换,使得 PIES 可再生能源本地消纳率提升了 34.92%。

3)所提出的 P2A-AF 耦合运行模式,通过将 P2A 生产过程中的热能输送至 AF 中提高产气速率,提升了 PIES 用能效率。通过 P2A-AF 的耦合运行,AF 的产气量提升了 43.68%,系统的总碳排放量和成本分别下降了 3.58% 和 3.30%,验证了本文所提 P2A-AF 耦合运行子系统的的有效性。

4)通过敏感性分析得出,系统内 AF 的容积增加对提升沼气产量和系统经济性有益,但需考虑发酵物来源和布置条件等因素。而碳排放价格也对系统的成本和可再生能源本地消纳率有着显著影响,需要上级单位制定合理的碳排放价格保证 PIES 的利益,同时促进 PIES 的低碳运行和可再生能源消纳。

本文以农村产业园区为研究对象,基于其可再生能源资源丰富、就地消纳需求突出及政策支持力度大的特征,构建了 IES 优化模型。考虑到 P2A 等新兴技术尚处于示范阶段,且园区运行数据的公开性有限,本文在模型验证上仍存在一定局限性。然而,这些探索性工作能够为评估未来农村园区多能源耦合与低碳调度的潜在效益提供理论支撑和方法参考。未来研究中,将进一步推动与典型园区的实地合作,获取真实运行数据,对模型进行验证与改进,从而提升其实用性与应用价值。

[参考文献]

- [1] 袁合涛, 安彬. “双碳”目标下西部农村生活能源消费特征及碳排放分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 278-285.
YUAN H T, AN B. Analysis of energy consumption characteristics and carbon emissions in western rural areas of China under carbon peaking and neutrality goals [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(7): 278-285.
- [2] 孙顶强, 梅玉琦, 杨馨越. 现代农业园区建设能否促进农村产业融合: 基于全国 8325 个农业园区的经验证据[J]. 中国农村观察, 2024(3): 39-61.
SUN D Q, MEI Y Q, YANG X Y. Does the construction of modern agricultural parks promote rural industrial integration? empirical evidence from 8325 agricultural parks across China [J]. China rural survey, 2024(3): 39-61.
- [3] 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 W, CHEN B, ZENG W, et al. Key problems and prospects of integrated energy system for green ecological townships [J]. Electric power, 2019, 52(6): 77-86, 93.
- [4] 张时聪, 李涵钰, 刘志坚, 等. 考虑建筑屋顶光伏/光热和生物质耦合的农村综合能源系统研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(7): 93-103.
ZHANG S C, LI H Y, LIU Z J, et al. Research on rural integrated energy system considering building RTPV/T and biomass [J]. Acta energiae solaris sinica, 2025, 46(7): 93-103.
- [5] 刘明浩, 霍红阳, 韩中合, 等. 基于双层随机优化的农村能源系统规划设计方法[J]. 可再生能源, 2023, 41(12): 1675-1684.

- LIU M H, HUO H Y, HAN Z H, et al. A planning and design method for rural energy systems based on double layer stochastic optimization [J]. *Renewable energy resources*, 2023, 41(12): 1675-1684.
- [6] 高建伟, 张艺, 高芳杰, 等. 农业综合能源系统多场景置信间隙决策低碳调度[J]. *电力建设*, 2024, 45(5): 105-117.
- GAO J W, ZHANG Y, GAO F J, et al. Low-carbon scheduling for multi-scenario confidence gap decision making for integrated energy systems in agriculture [J]. *Electric power construction*, 2024, 45(5): 105-117.
- [7] 赵振宇, 李忻薪, 包格日乐图. 园区综合能源系统动态多目标规划模型研究[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(5): 213-226.
- ZHAO Z Y, LI X X, BAO G R L T. Research on dynamic multi-objective programming model for park-level integrated energy system [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2025, 46(5): 213-226.
- [8] 杨莘博, 潘昱树, 德格吉日夫, 等. 多方主体合作下农村园区综合能源系统运行优化及效益分配模型[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(9): 3758-3768.
- YANG S B, PAN Y S, DE G, et al. Operation optimization and benefit distribution model of park rural integrated energy system under multi-party cooperation [J]. *Science technology and engineering*, 2023, 23(9): 3758-3768.
- [9] WANG Q J, XIAO Y F, TAN H, et al. Day-Ahead scheduling of rural integrated energy systems based on distributionally robust optimization theory [J]. *Applied thermal engineering*, 2024, 246: 123001.
- [10] 黄扬琪, 何伟, 赵伟哲, 等. 计及动态响应特征的农村综合能源系统分层调控[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(2): 122-129.
- HUANG Y Q, HE W, ZHAO W Z, et al. Hierarchical management for rural integrated energy system considering dynamic response characteristics [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(2): 122-129.
- [11] 杨莘博, 谭忠富, 林宏宇, 等. 计及需求响应及储能聚合商的分布式农村清洁能源系统运行优化模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(12): 3319-3334.
- YANG S B, TAN Z F, LIN H Y, et al. Operation optimization model of distributed rural clean energy system considering demand response and energy storage aggregator [J]. *Systems engineering: theory & practice*, 2022, 42(12): 3319-3334.
- [12] 王守文, 叶金根, 徐丽洁, 等. 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[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(8): 88-97.
- WANG S W, YE J G, XU L J, et al. Rural comprehensive energy low-carbon economic dispatch taking into account temperature-controlled anaerobic fermentation and ladder carbon trading [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(8): 88-97.
- [13] WEN D, AZIZ M. Design and analysis of biomass-to-ammonia-to-power as an energy storage method in a renewable multi-generation system [J]. *Energy conversion and management*, 2022, 261: 115611.
- [14] 崔杨, 孙喜斌, 付小标, 等. 考虑电转氨和生物质废能转换的农村化工综合能源系统低碳调度方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(8): 3350-3360.
- CUI Y, SUN X B, FU X B, et al. Low-carbon dispatch method of rural chemical industry integrated energy system considering power to ammonia and biomass waste energy conversion [J]. *Power system technology*, 2024, 48(8): 3350-3360.
- [15] SANDEEP K C, KAMATH S, MISTRY K, et al. Experimental studies and modeling of advanced alkaline water electrolyser with porous nickel electrodes for hydrogen production [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2017, 42(17): 12094-12103.
- [16] JIN S W, LI Y P. Analyzing the performance of electricity, heating, and cooling supply nexus in a hybrid energy system of airport under uncertainty [J]. *Energy*, 2023, 272: 127138.
- [17] WANG Y L, CAI C C, LIU C, et al. Planning research on rural integrated energy system based on coupled utilization of biomass-solar energy resources [J]. *Sustainable energy technologies and assessments*, 2022, 53: 102416.
- [18] LI C B, YANG H Y, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal planning of islanded integrated energy system with solar-biogas energy supply [J]. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2020, 11(4): 2437-2448.
- [19] WANG N, LIU Z Y, HEIJNEN P, et al. A peer-to-peer market mechanism incorporating multi-energy coupling and cooperative behaviors [J]. *Applied energy*, 2022, 311: 118572.
- [20] 严坤, 吕一铮, 郭扬, 等. 工业园区温室气体核算方法研究[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(6): 13-23.
- YAN K, LV Y Z, GUO Y, et al. Review on greenhouse gas accounting methods on China's industrial parks [J]. *Chinese journal of environmental management*, 2021, 13(6): 13-23.
- [21] 牛浩森, 付学谦. 可再生能源为主体的农业能源互联网碳循环建模与优化[J]. *电力建设*, 2022, 43(10): 1-15.
- NIU H S, FU X Q. Modeling and optimization of carbon cycle of agricultural energy Internet based on renewable energy [J]. *Electric power construction*, 2022, 43(10): 1-15.

LOW-CARBON DISPATCH OF INTEGRATED ENERGY SYSTEM IN RURAL INDUSTRIAL PARKS COUPLED WITH AMMONIA AND BIOGAS

Han Feiyan^{1, 2}, Han Fengwu², Zhao Yunlong²

(1. Economics and Management Department, Xinzhou Normal University, Xinzhou 034000, China;

2. Department of Economics and Management, North China Electric Power University(Baoding), Baoding 071003, China)

Abstracts: To address the low efficiency and high pollution associated with fossil-energy-dominated energy use in rural industrial parks, a park-level integrated energy system (PIES) model is established based on the source-load characteristics of rural parks. To promote renewable energy accommodation and biomass utilization, a power-to-ammonia system (P2A) and a biomass anaerobic fermentation gas production system (AF) are introduced into the PIES and modeled in detail. Considering the influence of anaerobic fermentation temperature on gas production rate, the waste heat from the P2A system is delivered to the AF system to construct a P2A-AF coupled system, thereby improving system energy efficiency and economy. On this basis, detailed carbon emission modeling is carried out for the main energy-use processes of the PIES, and carbon emission costs are incorporated to establish an optimal dispatch model with the minimum total cost as the objective. The simulation results show that the proposed system can improve energy economy by 31.56%, increase the local accommodation rate of renewable energy by 34.92%, and reduce total carbon emissions by 3.58%.

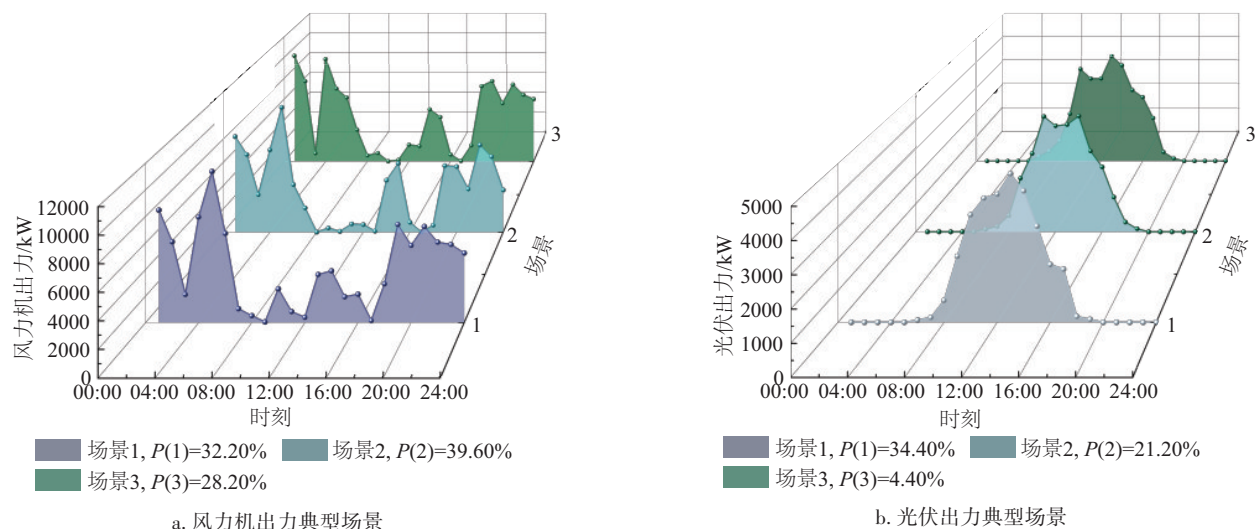
Keywords: renewable energy; biomass; scheduling; rural industrial parks; integrated energy system

附录 A

表 A1 设备参数及 P2P 交易价格表

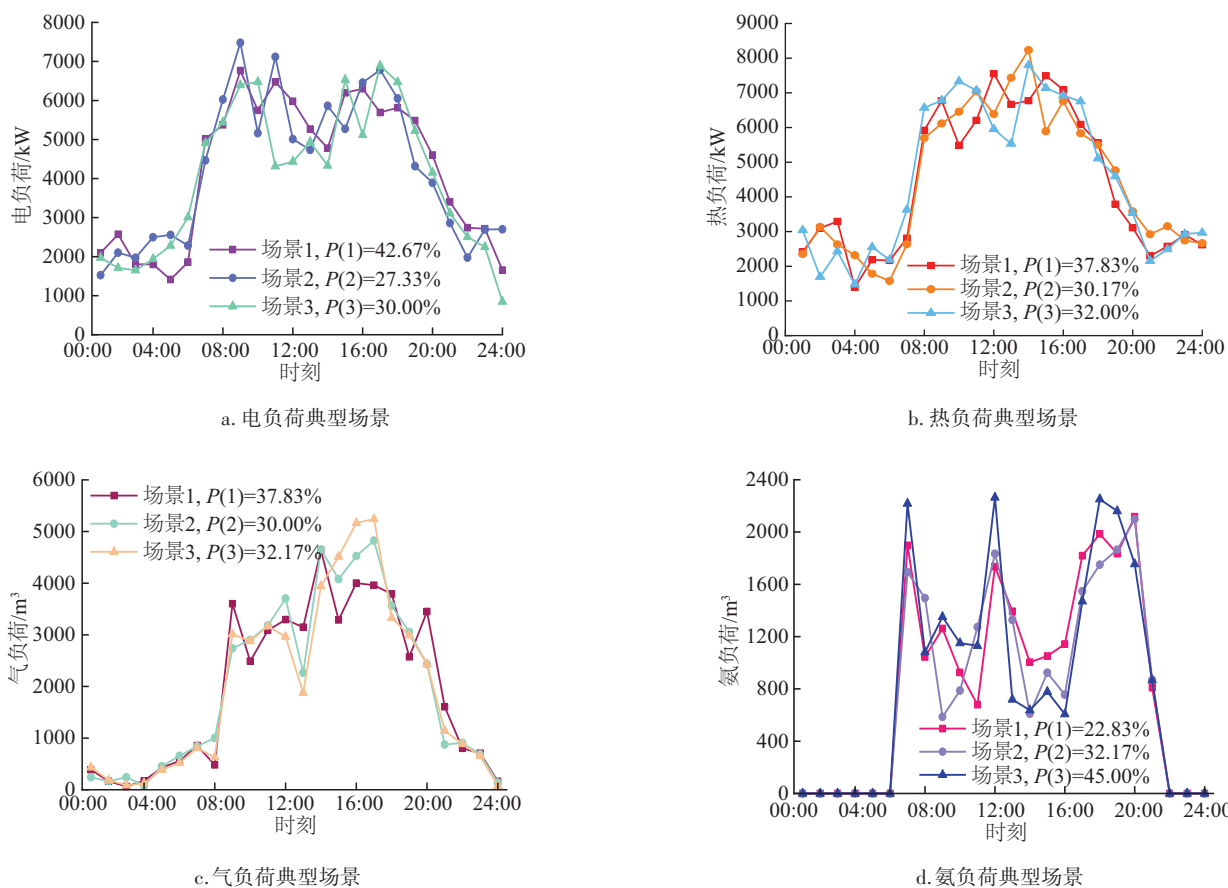
Table A1 Equipment parameters and P2P transaction price list

参数	数值	参数	数值
$\hat{P}_i^{\text{WT}}$	30MW	$\varepsilon_i^{\text{PV}}, \varepsilon_i^{\text{WT}}$	0.8、0.8 kg/(kW·h)
$v_r^{\text{WT}}, v_{\text{cin}}^{\text{W}}, v_{\text{out}}^{\text{W}}$	10、3、25 m/s	$r_{\text{down}}^{\text{CHP}}, r_{\text{up}}^{\text{CHP}}$	10、10 MW
$r_{\text{ref}}^{\text{PV}}$	1000W/m ²	$T_{\text{CHP}}^{u,\text{MIN}}, T_{\text{CHP}}^{d,\text{MIN}}$	1、1 h
T_{ref}	25℃	$P_{\text{min}}^{\text{CHP}}, P_{\text{max}}^{\text{CHP}}$	0、20 MW
$\eta_{i,t}^{\text{PV}}$	0.11	$P_{\text{min}}^{\text{WT}}, P_{\text{max}}^{\text{WT}}$	0、30 MW
$\eta_{\text{E}}^{\text{CHP}}, \eta_{\text{loss}}^{\text{CHP}}$	0.4、0.1	$P_{\text{min}}^{\text{PV}}, P_{\text{max}}^{\text{PV}}$	0、5000 kW
$\eta_{\text{m}}, \eta_{\text{isc,PSA}}$	0.75、0.72	$A_{\text{min}}^{\text{AR}}, A_{\text{max}}^{\text{AR}}$	0、2000 m ³
$\eta_i^{\text{P}}, \eta_i^{*\text{cut}}$	0.15、0.2	$P_{\text{min}}^{\text{PSA}}, P_{\text{max}}^{\text{PSA}}$	0、5000 kW
$\eta_{\text{ESC}}, \eta_{\text{ESD}}$	0.95、0.95	$G_{\text{min}}^{\text{AF}}, G_{\text{max}}^{\text{AF}}$	0、1000 m ³
$\mu_{\text{c}}^{\text{WT}}, \mu_{\text{c}}^{\text{CHP}}$	0.8、2.165	$A_{\text{C,max}}^{\text{AES}}, A_{\text{D,max}}^{\text{AES}}$	2000、2000 m ³
η_Q^{AE}	0.8 kW·h/m ³	$G_{\text{C,max}}^{\text{GES}}, G_{\text{D,max}}^{\text{GES}}$	2000、2000 m ³
$\eta_{\text{H}_2}^{\text{AE}}$	0.25 m ³ /(kW·h)	$S_{\text{max}}^{\text{AES}}, S_{\text{max}}^{\text{GES}}$	8000、6000 m ³
$\mu_{\text{C}}^{\text{CHP}}$	1.62 kg/(kW·h)	$\gamma^{\text{AES}}, \gamma^{\text{GES}}$	0.02
T^{PSA}	35℃	C_{h}	1
η^{AR}	0.9 kW·h/m ³	L_{ng}	9.7 kW·h/m ³
B_0	0.45m ³ /kg	q_{H_2}	39 kW·h/kg
S_0	100 kg/m ³	$\pi_P^{\text{trans}}, \pi_P^{\text{cut}}$	0.15、0.8 元/kg
θ	5 d	$\pi_Q^{\text{cut}}, \pi_G^{\text{cut}}$	1 元/(kW·h)、5 元/m ³
K	1	$\pi^{\text{PV}}, \pi^{\text{WT}}, \pi^{\text{P2A}}, \pi_i^{\text{CHP}}$	0.35、0.49、0.56、0.35 元/(kW·h)
R	8.314 J/(mol·K)	$F_{\text{Fe}}, F_{\text{Fq}}, F_{\text{Fg}}, F_{\text{Fa}}$	0.58、0.60、0.75、0.75
c_{m}	1.16×10 ⁻³ kW·h/°C	$E_{\text{FOM}}, E_{\text{FBM}}$	0.35、0.35、0.21/0.49 元/m ³
ρ_{m}	998.2 kg/m ³	π^{CO_2}	0.525 元/kg
V_{AF}	1000 m ³	$\pi_i^{\text{GES}}, \pi_i^{\text{AES}}$	0.14、0.14 元/(kW·h)
n_i	5×10 ⁻⁵ kW/°C	$\eta_{\text{ESC}}, \eta_{\text{ESD}}$	0.95
η_{loss}	0.25	π^{AF}	0.4 元/m ³



图A1 风光出力典型场景

Fig. A1 Typical scene of wind and solar output



图A2 PIES负荷典型场景

Fig. A2 Typical scenarios of PIES load