

工业技术

离网风光电-氢-氨系统建模与优化调度

马亚亚^{1,2}, 郑慧强³, 郭奥雪⁴, 周怀荣^{4*}, 张书培², 杨晓勤², 莫文龙^{1,2,5}

(1. 省部共建碳基能源资源化学与利用国家重点实验室, 新疆煤炭清洁转化与化工过程重点实验室, 新疆大学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆宜化化工有限公司, 准东煤高值多元转化工程技术研究中心, 新疆 昌吉 831700; 3. 新疆尉头国科技有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000; 4. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050; 5. 新疆科技学院石油化工学院, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:针对离网风光出力波动与制氢-制氨难以匹配的问题, 构建了含风电、光伏、电解槽、储氢罐、蓄电池、空分制氮及合成氨的离网电-氢-氨系统, 建立数学模型及以运行总成本最小为目标的优化调度模型。基于新疆准东地区数据, 分析典型工况运行规律及关键参数影响。结果表明, 系统形成电解制氢快速调节、储氢跨时段缓冲、蓄电池短时平抑与合成氨稳态运行的协同调度机制, 电解槽最小负荷率、储氢容量及蓄电池容量对经济性影响显著。

关键词: 离网系统; 风光互补; 绿氨; 电解制氢; 储氢; 优化调度

中图分类号: TM73; TQ113.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)S2-0333-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.054

Study on modeling and optimal scheduling of an off-grid electricity-hydrogen-ammonia system

MA Ya-ya^{1,2}, ZHENG Hui-qiang³, GUO Ao-xue⁴, ZHOU Huai-rong^{4*}, ZHANG Shu-pei², YANG Xiao-qin², MO Wen-long^{1,2,5}

(1. State Key Laboratory of Chemistry and Utilization of Carbon Based Energy Resources, Key Laboratory of Coal Clean Conversion & Chemical Engineering Process, School of Chemical Engineering and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Xinjiang Yihua Chemical Industry Co., Ltd., Engineering and Technology Research Center for High Value Diversified Conversion of Xinjiang Zhundong Coal, Changji 831700, China; 3. Xinjiang Yutouguo Science and Technology Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 4. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 5. College of Petroleum and Chemical Technology, Xinjiang College of Science and Technology, Korla 841000, China)

Abstract: To address the challenges of fluctuating wind and solar power output and the difficulty in matching electrolytic hydrogen production with continuous ammonia synthesis under off-grid conditions, an off-grid wind-solar-hydrogen-ammonia system is constructed, comprising wind turbines, photovoltaics, electrolyzers, hydrogen storage tanks, batteries, an air separation unit for nitrogen production, and an ammonia synthesis unit. A mathematical model and an optimal scheduling model aimed at minimizing the total operating cost are established. Based on the data from the Zhundong region of Xinjiang, the system's operating characteristics under typical conditions and the influence of key parameters on economic performance are analyzed. The results demonstrate that the system forms a coordinated scheduling mechanism characterized by fast regulation of electrolytic hydrogen production, cross-period buffering of hydrogen storage, short-term power smoothing by batteries, and relatively steady-state operation of ammonia synthesis. The minimum load rate of the electrolyzer, hydrogen storage capacity, and battery capacity all significantly affect the system's economics.

Key words: off-grid system; wind-solar complementarity; green ammonia; electrolytic hydrogen production; hydrogen storage; optimal scheduling

我国风光资源充沛, 但出力波动显著。绿电制氢再合成氨, 可实现可再生能源时空调储与外运; 绿氨兼具农资、零碳燃料、储氢载体多重价值, 应用前

景广阔^[1-3]。离网风光制氨无需外接电网, 适配西北荒漠、孤岛等缺网区域, 但需自洽平衡电与物料, 对多单元协同调度要求严苛^[4]。

收稿日期: 2026-04-22; 修回日期: 2026-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(22568027); 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2024B04001); 天山创新团队计划项目(2025D14013); 2026年甘肃省高校产业支撑计划项目(2026CYZC-022)

作者简介: 马亚亚(1991-), 女, 博士, 研究方向为绿氨合成催化剂与系统集成, mayaya1103@126.com; 周怀荣(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为化工过程系统工程, 通讯联系人, zhouhr@lut.edu.cn。

近年来,国内外学者围绕可再生能源制氢合成氨系统开展了较多研究。已有工作主要集中于绿氢技术路线与关键工艺、并/离网运行方式比较、系统容量配置优化以及经济性评估等方面。吉旭等^[4]对大规模可再生能源电解水制氢合成氨关键技术与应用进展进行了系统总结;林今等^[5]分析了可再生能源电制氢合成氨系统的并/离网运行方式及经济性差异;王海鸣等^[6]针对离网式风光互补制氢合成绿氢系统开展了容量配置优化分析;Wu等^[7]进一步从柔性绿氢系统角度研究了容量设计与多频调度优化问题。总体来看,现有研究多侧重于技术路线、容量配置或运行方式比较,而对离网条件下多时间尺度优化调度机制,特别是电解槽、储氢、蓄电池与合成氨单元之间的分层协同调节关系,仍缺乏针对性研究。

新疆准东风光禀赋优异,适宜离网风光电-氢-氨项目开发。针对风光波动造成制氢、制氨工况难以匹配难题,搭建含风、光、电解制氢、储氢、储能、空

分、合成氨的一体化系统,构建日运行成本最优调度模型。依托典型工况厘清各单元协同调控特性,探究电解槽最低负荷、储氢与储能容量对绿氢度电成本的作用规律,为离网绿氢协同调度、项目设计及资源富集区工程优化提供理论支撑。

1 电-氢-氨系统建模

1.1 系统结构

如图1所示,离网风光电-氢-氨系统主要由风电单元、光伏单元、电解水制氢单元、储氢单元、蓄电池单元、空分制氮单元和合成氨单元构成。风电和光伏发电共同为系统提供电能;电解槽将波动电能转化为氢气;空分装置制取氮气;合成氨单元采用Haber-Bosch工艺,在氢气和氮气满足反应配比的条件下生产液氨;储氢罐和蓄电池分别承担物质侧和电力侧缓冲任务,用于平抑风光波动并维持系统连续运行。

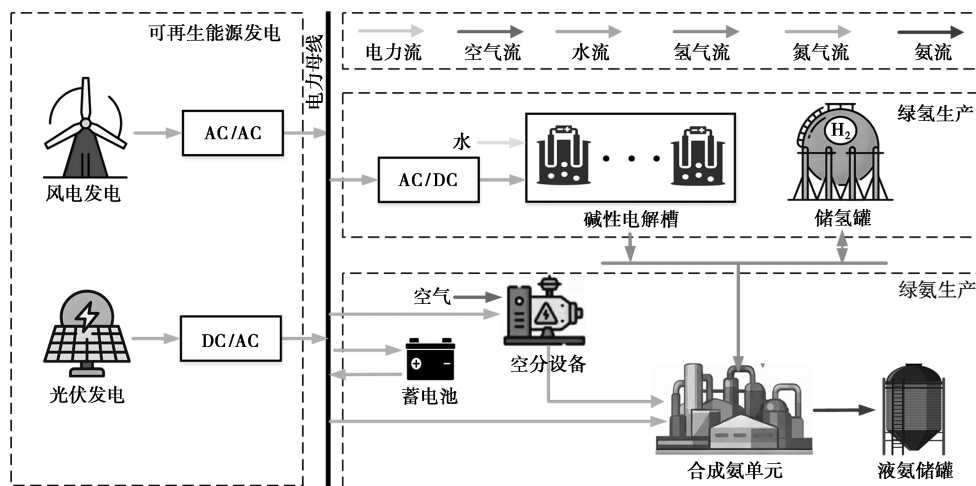


图1 离网风光电-氢-氨系统结构示意图

该系统不与外部电网发生功率交换,因此任一时段均需在系统内部实现实时电力平衡与物料匹配。其中,电解槽承担快速调节任务,储氢罐主要用于缓解制氢与制氨之间的跨时段物料错配,蓄电池主要用于削减电力侧短时间尺度波动,合成氨单元则维持相对稳定运行。由此,系统逐步形成“风光供电-电解制氢快调-储氢跨时段缓冲-蓄电池短时平抑-合成氨稳态运行”的协同运行模式。

1.2 各单元建模

本研究以新疆准东地区为研究案例,基于NASA公开气象数据集的实测年时序风光资源数据开展系统建模与优化。采用以下出力模型对风电与光伏系统的输出功率进行计算^[8]:

$$P_{\text{wind}}(t) = \begin{cases} 0 & 0 < v < v_i, v > v_e \\ \left[\frac{v(t)^3 - v_i^3}{v_r^3 - v_i^3} \right] P_{\text{wind}}^{\text{rated}} & v_i < v < v_r \\ P_{\text{wind}}^{\text{rated}} & v_r < v < v_e \end{cases} \quad (1)$$

$$P_{\text{pv}}(t) = P_{\text{pv}}^{\text{rated}} \cdot \theta \cdot (R_T / R_{25^\circ\text{C}}) \quad (2)$$

式中, $P_{\text{wind}}(t)$ 为 t 时刻风电输出功率; $v(t)$ 为 t 时刻风速; $P_{\text{wind}}^{\text{rated}}$ 为风电机组额定功率; v_i 、 v_r 、 v_e 分别为风机的切入、额定、切出风速; $P_{\text{pv}}(t)$ 为 t 时刻光伏输出功率; $P_{\text{pv}}^{\text{rated}}$ 为光伏组件的额定功率; R_T 、 $R_{25^\circ\text{C}}$ 分别为当前辐照度、标准工况下辐照度; θ 为光伏系统发电效率。

电解槽单元将电能转化为氢气,功率与产氢量关系为:

$$P_{\text{elec}}(t) = \lambda(t) \cdot P_{\text{elec}}^{\text{rated}} \quad (3)$$

$$F_{\text{H}_2, \text{prod}}(t) = [\eta_{\text{elec}} \cdot P_{\text{elec}}(t)] / LHV_{\text{H}_2} \quad (4)$$

其中, $P_{\text{elec}}(t)$ 为电解槽功率; $\lambda(t)$ 为电解槽负荷率; $P_{\text{elec}}^{\text{rated}}$ 为电解槽额定功率; $F_{\text{H}_2, \text{prod}}(t)$ 为单位时间的产氢速率; LHV_{H_2} 为氢气低热值。电解槽作为系统中的主要柔性负荷,用于吸纳风光波动电力^[9]。

储氢单元采用动态库存模型为:

$$V_{\text{H}_2}(t) = V_{\text{H}_2}(t-1) + F_{\text{H}_2, \text{prod}}(t) - F_{\text{H}_2, \text{used}}(t) \quad (5)$$

式中, $V_{\text{H}_2}(t)$ 和 $V_{\text{H}_2}(t-1)$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻槽储氢量; $F_{\text{H}_2, \text{used}}(t)$ 为单位时间耗氢速率。

蓄电池单元采用荷电状态模型:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + [\eta_{\text{ch}} P_{\text{bat, ch}}(t) - P_{\text{bat, dis}}(t) / \eta_{\text{dis}}] / E_{\text{bat}} \quad (6)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (7)$$

式中, $P_{\text{bat, ch}}(t)$ 、 $P_{\text{bat, dis}}(t)$ 分别为蓄电池充电功率、放电功率; $SOC(t)$ 为蓄电池荷电状态; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为蓄电池充、放电效率; E_{bat} 为蓄电池额定容量。离网场景下, 蓄电池主要承担短时间尺度的电功率波动平抑任务。

空分制氮单元的功率模型可表示为:

$$P_{\text{asu}}(t) = e_{\text{N}_2} \cdot F_{\text{N}_2, \text{prod}}(t) \quad (8)$$

式中, $P_{\text{asu}}(t)$ 为制氮功率; $F_{\text{N}_2, \text{prod}}(t)$ 为单位时间的产氮速率; e_{N_2} 为单位产氮电耗。

合成氨单元采用 Haber-Bosch 工艺, 其运行满足准稳态特征。氢气、氮气与氨气的摩尔流量满足:

$$F_{\text{H}_2}(t) : F_{\text{N}_2}(t) : F_{\text{NH}_3, \text{prod}}(t) = 3 : 1 : 2 \quad (9)$$

功率模型可写为:

$$P_{\text{asu}}(t) = e_{\text{NH}_3} \cdot F_{\text{NH}_3, \text{prod}}(t) \quad (10)$$

式中, $P_{\text{asu}}(t)$ 为合成氨单元功率; $F_{\text{NH}_3, \text{prod}}(t)$ 为单位时间产氨速率, e_{NH_3} 为单位产氨电耗。与此同时, 合成氨单元应满足最小稳定负荷、最大负荷及爬坡约束, 以体现连续生产、缓慢调节的工艺特征。

2 离网风光电-氢-氨系统优化调度模型

2.1 目标函数

离网风光电-氢-氨系统优化调度的核心在于: 在满足系统安全运行、物料平衡和生产任务要求的前提下, 协调风电、光伏、电解制氢、储氢、蓄电池、空分制氮和合成氨单元的时序运行状态, 以实现调度周期内系统运行总成本最小。为突出调度问题本质, 本文中不以年收益最大为目标, 而以运行维护成本、启停成本、变负荷惩罚成本、蓄电池循环折损成本以及弃风弃光惩罚成本之和最小为目标函数, 即:

$$\min C = \sum_{t=1}^T [C_{\text{om}}(t) + C_{\text{su}}(t) + C_{\text{ramp}}(t) + C_{\text{bat}}(t) + C_{\text{curt}}(t)] \quad (11)$$

进一步展开可写为:

$$\min C = \sum_{t=1}^T \{ c_{\text{elec}}^{\text{om}} \cdot P_{\text{elec}}(t) + c_{\text{asu}}^{\text{om}} \cdot P_{\text{asu}}(t) + c_{\text{hb}}^{\text{om}} \cdot P_{\text{hb}}(t) + c_{\text{elec}}^{\text{su}} \cdot SU_{\text{elec}}(t) + c_{\text{hb}}^{\text{su}} \cdot SU_{\text{hb}}(t) + c_{\text{elec}}^{\text{r}} \cdot \Delta P_{\text{elec}}(t) + c_{\text{hb}}^{\text{r}} \cdot \Delta P_{\text{hb}}(t) + c_{\text{bat}} [P_{\text{bat, ch}}(t) + P_{\text{bat, dis}}(t)] + c_{\text{curt}} P_{\text{curt}}(t) \} \quad (12)$$

式中, C 为调度周期内系统总运行成本; $c_{\text{elec}}^{\text{om}}$ 、 $c_{\text{asu}}^{\text{om}}$ 和 $c_{\text{hb}}^{\text{om}}$ 分别为电解槽、空分制氮单元和合成氨单元的单位运行维护成本; $c_{\text{elec}}^{\text{su}}$ 和 $c_{\text{hb}}^{\text{su}}$ 分别为电解槽和合成氨单元启停成本系数; $SU_{\text{elec}}(t)$ 和 $SU_{\text{hb}}(t)$ 分别为电解槽和合成氨单元在 t 时段的启机状态变量; $c_{\text{elec}}^{\text{r}}$ 和 c_{hb}^{r} 分别为电解槽和合成氨单元变负荷惩罚系数; $\Delta P_{\text{elec}}(t)$ 和 $\Delta P_{\text{hb}}(t)$ 分别为相邻时段电解槽和合成氨单元功率变化量的绝对值辅助变量; c_{bat} 为蓄电池循环折损成本系数; c_{curt} 为弃风弃光惩罚成本系数; $P_{\text{curt}}(t)$ 为系统弃电功率。

2.2 约束条件

2.2.1 电力平衡约束

离网运行条件下, 系统不与外部电网发生功率交换, 因此任一时段均需满足严格的电力平衡约束:

$$P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{bat, dis}}(t) = P_{\text{elec}}(t) + P_{\text{asu}}(t) + P_{\text{hb}}(t) + P_{\text{bat, ch}}(t) + P_{\text{aux}}(t) + P_{\text{curt}}(t) \quad (13)$$

式中, $P_{\text{aux}}(t)$ 为系统辅助用电功率; $P_{\text{curt}}(t)$ 为弃电功率。该约束反映了离网系统内部实时功率守恒关系。

2.2.2 氢气平衡约束

电解制氢、储氢和合成氨单元之间应满足氢气平衡关系, 即:

$$F_{\text{H}_2, \text{prod}}(t) + F_{\text{H}_2, \text{dis}}(t) = F_{\text{H}_2, \text{ch}}(t) + F_{\text{H}_2, \text{used}}(t) \quad (14)$$

式中, $F_{\text{H}_2, \text{prod}}(t)$ 为电解槽产氢速率; $F_{\text{H}_2, \text{dis}}(t)$ 和 $F_{\text{H}_2, \text{ch}}(t)$ 分别为储氢罐放氢速率和充氢速率; $F_{\text{H}_2, \text{used}}(t)$ 为合成氨单元耗氢速率。该约束体现了电解制氢、储氢调节和连续制氨之间的物料耦合关系, 是离网绿氨系统调度模型的核心。

2.2.3 电解槽运行约束

电解槽应满足最小稳定负荷、最大运行功率及爬坡速率限制^[10-11]:

$$u_{\text{elec}}(t) \cdot P_{\text{elec}}^{\min} \leq P_{\text{elec}}(t) \leq u_{\text{elec}}(t) \cdot P_{\text{elec}}^{\max} \quad (15)$$

$$-R_{\text{elec}}^{\text{down}} \leq P_{\text{elec}}(t) - P_{\text{elec}}(t-1) \leq R_{\text{elec}}^{\text{up}} \quad (16)$$

式中, $u_{\text{elec}}(t)$ 为电解槽启停状态变量; $P_{\text{elec}}^{\max}$ 和 $P_{\text{elec}}^{\min}$ 分别为电解槽最大和最小运行功率; $R_{\text{elec}}^{\text{up}}$ 与 $R_{\text{elec}}^{\text{down}}$ 分别为电解槽的最大上坡速率与下坡速率。

为表征启停行为, 可定义:

$$u_{\text{elec}}(t) - u_{\text{elec}}(t-1) \leq SU_{\text{elec}}(t) \quad (17)$$

式中, $SU_{\text{elec}}(t)$ 为电解槽启机状态变量。

2.2.4 合成氨单元运行约束

合成氨装置属于连续生产设备,其运行不能简单等同于一般柔性负荷^[12-13],因此应满足最小稳定负荷、最大运行功率以及爬坡速率约束:

$$u_{\text{hb}}(t) \cdot P_{\text{hb}}^{\min} \leq P_{\text{hb}}(t) \leq u_{\text{hb}}(t) \cdot P_{\text{hb}}^{\max} \quad (18)$$

$$-R_{\text{hb}}^{\text{down}} \leq P_{\text{hb}}(t) - P_{\text{hb}}(t-1) \leq R_{\text{hb}}^{\text{up}} \quad (19)$$

式中, $u_{\text{hb}}(t)$ 为合成氨单元启停状态变量; $P_{\text{hb}}^{\max}$ 和 $P_{\text{hb}}^{\min}$ 分别为合成氨单元最大和最小运行功率; $R_{\text{hb}}^{\text{up}}$ 与 $R_{\text{hb}}^{\text{down}}$ 分别为合成氨单元的最大上爬坡速率与下爬坡速率。

同样定义启机状态变量:

$$u_{\text{hb}}(t) - u_{\text{hb}}(t-1) \leq SU_{\text{hb}}(t) \quad (20)$$

为保证生产任务完成,调度周期内总产氨量应满足:

$$M_{\text{NH}_3}^{\text{req}} \leq \sum_{t=1}^T F_{\text{NH}_3, \text{prod}}(t) \quad (21)$$

式中, $M_{\text{NH}_3}^{\text{req}}$ 为调度周期内最低产氨需求。

3 案例分析

3.1 基础数据

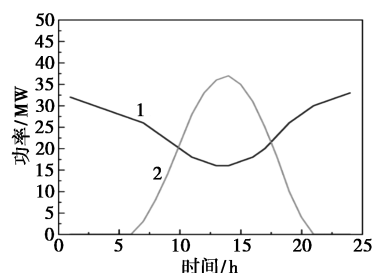
本文中选取新疆准东地区为案例,该地区风光资源丰富,具有开展离网电-氢-氨系统调度研究的良好代表性。以典型年 8 760 h 逐时风电、光伏出力数据为输入(时间分辨率取 1 h)。研究对象主要包括风电、光伏、电解槽、储氢罐、蓄电池、空分制氮和合成氨装置。风光提供全部电力,电解槽制氢,空分制氮,合成氨采用 Haber-Bosch 工艺,储氢罐用于缓解物料错配,蓄电池主要承担平抑短时功率波动。

采用混合整数线性规划方法求解,在 MATLAB 平台建模优化。为分析不同资源条件下的调度规律,从时序数据中选取夏季高光典型日和冬季低光高风典型日开展运行分析。其中夏季典型日反映光伏主导特征,而冬季典型日表征风电主导及低辐照调节规律。根据仿真结果,通过对比 2 类典型工况下的风光出力、电功率平衡、电解槽负荷、储氢变化、蓄电池荷电状态及合成氨运行状态,从而清晰地揭示离网风光电-氢-氨系统的协同调度机理。

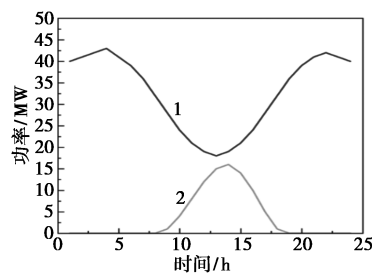
3.2 调度结果分析

图 2 给出了夏季高光典型日和冬季低光高风典型日的风电与光伏出力曲线。由图 2(a)可知,夏季典型日中风电出力由 32.14 MW 逐步下降至 15.86 MW,随后回升至 33.07 MW,日内波动幅度

为 17.21 MW;光伏出力在 7:00 之后快速上升,于 13:00 达到峰值 36.78 MW,随后逐步下降并在 20:00 后接近于 0。由图 2(b)可知,冬季典型日中风电出力由 40.27 MW 升至 42.83 MW 后逐渐下降,在 12:00 达到最低值 16.88 MW,随后再次升高至 33.72 MW,日内波动幅度为 16.84 MW;光伏出力整体较低,峰值仅为 15.86 MW。由此表明,夏季典型日呈现“高光-中风”特征,而冬季典型日则表现为“高风-低光”特征,风光出力在季节尺度上具有明显差异,这决定了离网电-氢-氨系统内部各单元的调用方式。



(a) 夏季高光典型日

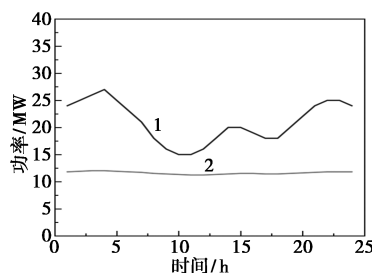


(b) 冬季低光高风典型日

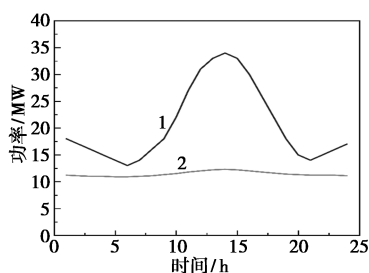
1—风电出力;2—光伏出力

图 2 典型日风电和光伏出力曲线

图 3 给出了电解槽与合成氨单元的负荷变化规律。由图 3(a)可知,夏季典型日中电解槽功率由 18.07 MW 下降至 13.12 MW,随后在中午高光时段快速上升,并于 14:00 达到最大值 33.84 MW,日内波动幅度为 20.72 MW;相比之下,合成氨单元功率仅在 10.94 ~ 12.26 MW 范围内变化,波动幅度为 1.32 MW。由图 3(b)可知,冬季典型日中电解槽功



(a) 夏季典型日



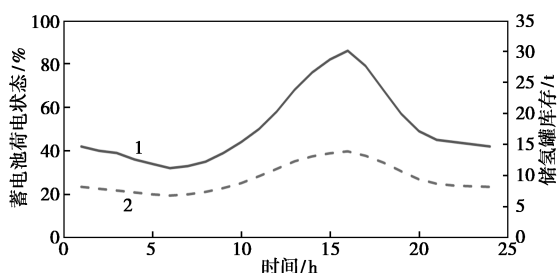
(b) 冬季典型日

1—电解槽用电;2—合成氨用电

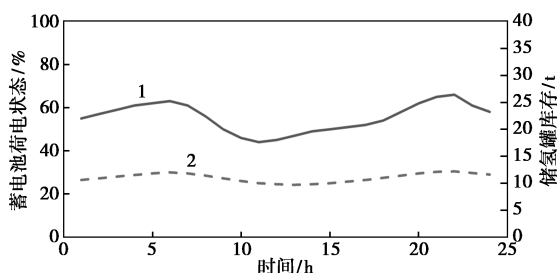
图3 典型日电解槽与合成氨单元负荷变化曲线

率在 15.08~26.74 MW 范围内变化,波动幅度为 11.66 MW,而合成氨单元功率维持在 11.18~11.97 MW 之间,波动幅度仅为 0.79 MW。该结果表明,电解槽承担了系统主要的快速调节任务,而合成氨单元始终维持相对平稳运行,体现出明显的“电解槽快调-合成氨缓调”特征。

图4进一步给出了储氢罐库存与蓄电池荷电状态变化。由图4(a)可知,夏季典型日中蓄电池荷电状态由 41.8%降至 32.1%,随后在中午高光时段持续升高,并于 15:00 达到最大值 84.7%;同期储氢罐库存由 8.24 t 下降至 6.83 t,随后上升至 13.87 t,日内变化幅度为 7.04 t。由图4(b)可知,冬季典型日中蓄电池荷电状态在 44.1%~65.7% 范围内变化,储氢罐库存维持在 9.73~12.18 t 之间,波动幅度分别为 21.6%和 2.45 t,明显小于夏季典型日。说明在夏季高光工况下,系统具有更强的跨时段能量转



(a) 夏季典型日



(b) 冬季典型日

1—蓄电池荷电状态;2—储氢罐库存

图4 典型日储氢罐库存与蓄电池荷电状态变化

移需求,储氢和蓄电池均呈现较大幅度的充放过程;而在冬季高光工况下,系统运行相对平稳,储氢和蓄电池更多发挥辅助缓冲作用。

综上,离网风光电-氢-氨系统逐步形成了“风光供电-电解制氢快调-储氢跨时段缓冲-蓄电池短时平抑-合成氨相对稳态运行”的分层协同调度机制。与单纯依赖单一柔性单元的运行方式相比,储氢与蓄电池协同调度能够更有效地吸纳波动可再生能源,并降低系统频繁启停和剧烈爬坡带来的不利影响。

4 结论

针对新疆准东地区离网风光电-氢-氨系统中风光波动与连续制氨过程难以匹配的问题,构建了统一数学模型和优化调度模型,并结合典型工况与参数敏感性分析了系统运行规律,主要结论如下。

(1) 典型日调度结果表明,系统形成了“风光供电-电解制氢快调-储氢跨时段缓冲-蓄电池短时平抑-合成氨相对稳态运行”的分层协同调度机制。夏季高光典型日中电解槽与合成氨单元功率波动幅度分别为 20.72、1.32 MW,冬季低光高光典型日中分别为 11.66、0.79 MW,说明电解槽承担了主要快速调节任务。

(2) 储氢与蓄电池分别承担物质侧和电力侧缓冲功能,夏季典型日中储氢库存与蓄电池荷电状态变化幅度分别为 7.04 t 和 0.526,冬季分别为 2.45 t 和 0.216,表明二者协同运行可有效提高系统稳定性。总体上,降低电解槽最小负荷率并合理配置储氢和蓄电池容量,是提升离网绿氨系统稳定性与经济性的关键。

参考文献

- [1] 李育磊,刘玮,董斌琦,等.双碳目标下中国绿氢合成氨发展基础与路线[J].储能科学与技术,2022,11(9):2891-2899.
- [2] Zhang Z, Zhang H, Jiang H, et al. Green ammonia: Revolutionizing sustainable energy for a carbon-free future[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12: 33334-33361.
- [3] Sekhar S J, Al-Shahri A S A, Glavin G, et al. A critical review of the state-of-the-art green ammonia production technologies: Mechanism, advancement, challenges, and future potential[J]. Fuel, 2024, 358: 130307.
- [4] 吉旭,周步祥,贺革,等.大规模可再生能源电解水制氢合成氨关键技术与应用研究进展[J].工程科学与技术,2022,54(5):1-11.
- [5] 林今,余志鹏,张信真,等.可再生能源电制氢合成氨系统的并/离网运行方式与经济性分析[J].中国电机工程学报,2024,44(1):117-127.

(下转第 344 页)

增幅 38.1%,冷煤气效率从 67.3% 升至 83.2%, 烟效率从 74.1% 升至 82.0%。

参考文献

- [1] 中矿(北京)煤炭产业景气指数研究课题组,宋梅.2024—2025 年中国煤炭产业经济形势研究报告[J].中国煤炭,2025,51(2):1-12.
- [2] Wang W, Li Z, Lyu J, *et al.* An overview of the development history and technical progress of China's coal-fired power industry[J]. *Frontiers in Energy*, 2019, 13(3): 417-426.
- [3] Abdalazeez A, Li T, Liu X, *et al.* Investigation of BaFe₂O₄ oxygen carrier modified by supports in chemical looping gasification of bio-char[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 238-251.
- [4] Zhang R, Li X, Dong R, *et al.* Modification of red mud using K/Ca doping to enhance its oxygen-donating performance in chemical looping gasification of biomass waste[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2025, 200: 108011.
- [5] Peng L, Dong S, Yang J, *et al.* Industrial solid waste as oxygen carrier in chemical looping gasification technology: A review[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2024, 116: 101694.
- [6] Qi J, Liu J, Chen G, *et al.* Hydrogen production from municipal solid waste via chemical looping gasification using CuFe₂O₄ spinel as oxygen carrier: An Aspen Plus modeling[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 294: 117562.
- [7] Fang S, Zheng X, Lin Y, *et al.* Evaluation of the chemical looping gasification characteristics of kitchen waste using CuFe₂O₄ and NiFe₂O₄ as oxygen carriers[J]. *Energy*, 2024, 312: 133617.
- [8] Chisalita D A, Petrescu L, Galusnyak S C, *et al.* Environmental evaluation of hydrogen production employing innovative chemical looping technologies-A Romanian case study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(32): 12112-12128.
- [9] Li Z, Xu H, Yang W, *et al.* Numerical investigation and thermodynamic analysis of syngas production through chemical looping gasification using biomass as fuel[J]. *Fuel*, 2019, 246: 466-475.
- [10] An M, Guo Q, Ma J, *et al.* Chemical-looping gasification of coal with CuFe₂O₄ oxygen carriers: The reaction characteristics and structural evolution[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, 98(7): 1512-1524.
- [11] Wang Y, Tian X, Zhao H, *et al.* The use of a low-cost oxygen carrier prepared from red mud and copper ore for in situ gasification chemical looping combustion of coal[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 205: 106460.
- [12] Ge H, Shen L, Feng F, *et al.* Experiments on biomass gasification using chemical looping with nickel-based oxygen carrier in a 25 kWth reactor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 85: 52-60.
- [13] 穆林,李永麟,李延宇,等.碱(土)金属改性赤铁矿载氧体的化学链气化实验研究[J].燃烧科学与技术,2024,30(6):550-560.
- [14] 张将,沈来宏,冯璇,等.CuFe₂O₄ 载氧体的释氧特性及其对煤化学链气化的影响[J].燃烧科学与技术,2019,25(3):220-228.
- [15] 吴宇婷.基于 Fe₂O₃ 及其复合氧载体的生物质多元体系化学链气化特性研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [16] Liu G, Liao Y, Wu Y, *et al.* Characteristics of microalgae gasification through chemical looping in the presence of steam[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(36): 22730-22742.
- [17] Xue S, Wang X. Process simulation of chemical looping gasification of biomass using Fe-based oxygen carrier: Effect of coupled parameters[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 356: 131839.
- [18] Fernández J R, Abanades J C. Optimized design and operation strategy of a CaCu chemical looping process for hydrogen production[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 166: 144-160.
- [19] 张坤,王庆宇,何德民,等.煤热解-化学链气化耦合工艺流程模拟[J].化学工程,2019,47(6):74-78.
- [20] Chen X, Zheng D, Guo J, *et al.* Energy analysis for low-rank coal based process system to co-produce semicoke, syngas and light oil[J]. *Energy*, 2013, 52: 279-288. ■
-
- (上接第 337 页)
- [6] 王海鸣,张润之,周家辉,等.离网式风光互补制氢合成绿氨系统容量配置优化分析[J].综合智慧能源,2024,46(11):73-82.
- [7] Wu Y, Zhao T, Tang S, *et al.* Research on design and multi-frequency scheduling optimization method for flexible green ammonia system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 300: 117976.
- [8] Wei S, Espedal L, Balakin B V, *et al.* Experimental and numerical investigation of direct absorption solar collectors (DASCs) based on carbon black nanofluids[J]. *Experimental Heat Transfer*, 2024, 37(6): 665-686.
- [9] Wang J, Wen J, Wang J, *et al.* Water electrolyzer operation scheduling for green hydrogen production: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 203: 114779.
- [10] Zhou Z, Zhang S, Zhong Y, *et al.* A predictive control method for multi-electrolyzer off-grid hybrid hydrogen production systems with photovoltaic power prediction[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 84: 383-393.
- [11] Yu B, Fan G, Sun K, *et al.* Adaptive energy optimization strategy of island renewable power-to-hydrogen system with hybrid electrolyzers structure[J]. *Energy*, 2024, 301: 131508.
- [12] Bouaboula H, Ouikhalfan M, Saadouni I, *et al.* Addressing sustainable energy intermittence for green ammonia production[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 4507-4517.
- [13] Edmonds L, Pfromm P H, Amanor-Boadu V, *et al.* Green ammonia production-enabled demand flexibility in agricultural community microgrids with distributed renewables[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2022, 31: 100736. ■