

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.005

面向新能源消纳的电—氢耦合系统多时间尺度运行优化方法

杨梦缘¹, 梁丹曦¹, 宗正¹, 宋洁¹, 柯绍杰¹, 杨云溪¹,
徐桂芝¹, 申屠磊璇²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310000)

摘要: 在“双碳”目标与绿电直连政策背景下,电—氢耦合系统是消纳新能源、制备绿氢的重要形式。针对现有优化研究场景适配性不足、模型精细化程度有限、对辅机系统约束考虑欠缺等问题,文中面向并网型绿电直连场景的新能源消纳需求,开展多时间尺度运行优化研究。构建计及辅机系统能耗特性与安全边界的多类型电解槽集群协同模型,建立日前—日内双层优化框架,建立多类型电解制氢异构系统性能补偿模型,提出兼顾差异化调节特性、约束动态响应的多目标协同运行策略。多场景仿真表明,所提效益最高方案可实现能耗、寿命与经济性协同平衡,为各场景综合最优策略;日内优化核心指标波动控制在1%左右,跟踪精度与稳定性良好;混联系统可有效平抑绿电波动,提升工程实用性与产氢效率。所提方法实现了新能源消纳、设备安全与经济性的多目标优化,可为电—氢耦合系统工程化应用提供支撑。

关键词: 电—氢耦合系统; 多时间尺度优化; 绿电直连; 新能源消纳; 电解槽调度; 电解槽辅机

Multi-time-scale Operation Optimization Method for the Electricity-hydrogen Coupling System for New Energy Accommodation

YANG Mengyuan¹, LIANG Danxi¹, ZONG Zheng¹, SONG Jie¹, KE Shaojie¹, YANG Yunxi¹,
XU Guizhi¹, SHENTU Leixuan²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: Against the background of the “dual carbon” goal and green power direct connection policy, the electricity-hydrogen coupling system represents an important form of renewable energy integration and green hydrogen production. To address the limitations of existing optimization studies, including insufficient scenario adaptability, limited model refinement, and inadequate consideration of auxiliary system constraints, in this paper a multi-time-scale operation optimization study is performed with the aim of meeting the renewable energy integration requirements of grid-connected direct green electricity scenarios. A collaborative model for multi-type electrolyzer clusters is constructed by considering the energy consumption characteristics and safety boundaries of auxiliary system. A day-ahead and two-layer optimization framework, along with a performance compensation model for heterogeneous multi-type electrolytic hydrogen production systems is set up. A multi-objective collaborative operation strategy that balances differentiated regulation characteristics and dynamic constraints response is proposed. The multi-scenario simulations show that the proposed optimal benefit scheme can achieve a synergistic balance among energy consumption, service life and economic performance, and is identified as the comprehensive optimal strategy for various scenarios. The core indicator fluctuation of intraday optimization is maintained at around 1%, with favorable tracking accuracy and stability. The green power fluctuations can be effectively suppressed by the hybrid system and the engineering practicality and hydrogen production efficiency can be improved. The proposed method can not only achieve multi-objective optimization of renewable energy integration safety, and economic efficiency, but also provide support for the engineering ap-

收稿日期:2026-01-26; 修回日期:2026-03-28

基金项目:国家电网公司科技项目资助(4000-202499318A-1-3-ZB)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(4000-202499318A-1-3-ZB).

plication of electricity-hydrogen coupling systems.

Key words: electricity-hydrogen coupling system; multi-time-scale optimization; green power direct connection; new energy accommodation; electrolyzer scheduling; electrolyzer auxiliary equipment

0 引言

氢能作为清洁高效的二次能源,是推动“双碳”目标实现的核心载体^[1-4]。电解制氢系统作为绿氢生产的关键装备^[5-9],不仅可实现零碳排放制氢,助力能源结构绿色转型^[10-12],还能有效消纳新能源的过剩出力,缓解其波动性给电网调度带来的压力,为新型电力系统的安全稳定运行提供重要支撑^[13]。

绿电直连制氢相关政策导向明确^[14-16],按国家能源局分为离网型与并网型。前者依赖源—储—荷自平衡,多用于偏远独立制氢场景;后者以新能源专线直连制氢负荷为核心、电网兜底补能,兼顾溯源与稳定。在此背景下,风光氢系统逐步走向“精细化”深度耦合,电—氢耦合应用模式已成为行业发展主流^[17-19],同时也对运行优化提出更高要求。一是风光出力的波动性会导致电解槽频繁启停与变载,加速催化剂、隔膜等关键部件衰减,缩短使用寿命,且低负载、快速变载下氧中氢含量升高,进一步加剧安全风险^[20-21]。二是源荷一体化运行对经济性、稳定性及风光消纳提出多重需求^[22],多目标协同权衡成为核心挑战。同时,单一碱性(alkaline, ALK)制氢调节难以适配波动场景。质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)电解槽具备快速响应能力,构建混联异构系统已成为绿电直连制氢的必然趋势^[23-24]。

在多类型多机协同调控方面,早期研究多聚焦于单一类型电解槽,如ALK电解槽^[25-26]、PEM电解槽^[27],分别针对其稳负荷或快响应特性开展优化调度。随着技术发展,逐步转向电解槽混联系统研究^[28-29],通过发挥两类电解槽的互补特性^[30],兼顾基础负荷稳定性与新能源波动响应能力^[31]。然而,目前研究仅关注电解槽本体运行特性,未充分考虑辅机系统的能耗特性与安全边界约束,与实际工程配置存在差距。同时,针对电解槽集群与辅机系统“多对一”耦合关系的协同调度策略较为缺乏,难以支撑精细化运行控制。因此,开展计及辅机系统的多机协同优化研究具有迫切的工程必要性。

在优化目标层面,现有研究逐步从单一目标向多目标协同优化演进。王跃社等^[32]建立以经济性最优和单位产氢能耗最低为目标的优化调度模型,使系统运行成本降低约19%。Zhao Y等^[33]构建以系统

总成本最低、碳排放最少为目标的优化模型,实现了经济性与低碳性的协同提升。李飞等^[34]则引入电解槽寿命衰减约束,降低了电解槽平均衰退率。在时间尺度上,从单一日前调度或日内实时调节^[35-37],向多时间尺度优化发展^[38]。杨胜等^[39]提出日前一日一实时多时间尺度优化运行策略,提升了系统的运行经济性。然而,目前研究在多目标权衡中,易出现侧重效率则牺牲寿命、侧重安全则降低消纳的问题,缺乏兼顾消纳、能耗、寿命与经济性的协同平衡机制。同时,针对异构电解槽差异化调节特性的动态性能补偿研究较少。因此,亟需构建多目标协同优化模型,以实现系统性能的均衡提升。

综上,现有研究仍存在场景适配性不强、模型精细化程度不足、辅机系统约束缺失等问题。为此,结合并网型绿电直连模式与该场景下实际制氢运行需求,文中以并网型绿电直连场景为研究对象,开展面向新能源消纳的电—氢耦合系统多时间尺度运行优化方法研究。通过构建计及辅机系统能耗特性与安全运行边界的多类型电解槽集群协同模型,建立日前一日内双层优化框架,构建多类型电解制氢异构系统性能补偿模型,提出兼顾差异化调节特性、约束动态响应的多目标协同运行策略,为制氢系统的工程化与高效稳定运行提供理论支撑。

1 电—氢耦合系统模型

1.1 系统架构

文中构建的并网型绿电直连场景下电—氢耦合系统场景见图1。系统架构贴合并网型绿电直连模式的运行特点,包含风光发电站、多类型制氢系统及储能,新能源通过专线直连制氢负荷,公共电网作为备用提供购电支撑、不参与余电上网。系统以新能源消纳为核心目标,在保障安全稳定运行的前提下,实现系统能耗、设备使用寿命与综合经济效益的协同优化。

1.2 计及温度效应的多电解槽—辅机协同模型

针对多类型制氢系统,本项目考虑变工况下温度、电流变化下辅机功耗、电解槽效率变化等,刻画了电解槽集群产氢与辅机纯化补水用电、集群产热特性与辅机系统冷却间的动态平衡关系,建立多电解槽—辅机协同模型,涵盖电、热、氢模型,表征变

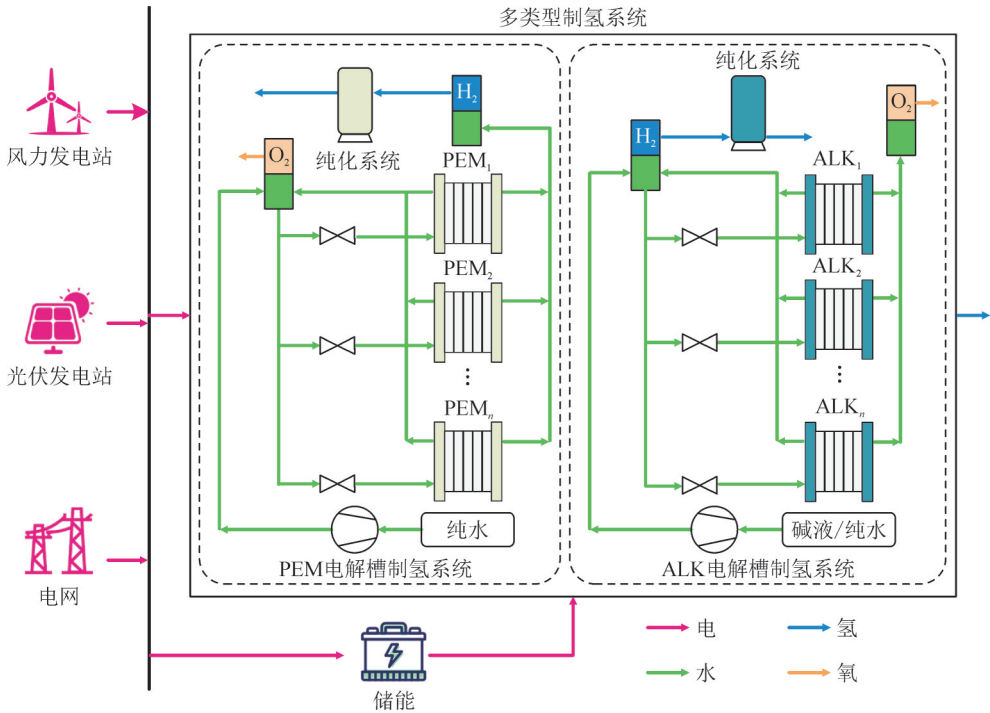


图1 电—氢耦合系统场景

Fig. 1 Scenario of electricity-hydrogen coupling system

工况下电解槽集群与辅机系统协同运行、能量匹配及动态调控问题。

1.2.1 功率模型

总功率为多类型制氢系统功率之和,公式为

$$P_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^X P_{X,i}(t) \quad (1)$$

式(1)中: $P_{X,i}(t)$ 为第 i 个制氢系统的功率; X 为系统数量。

单个制氢系统由电解设施、辅助设施和公用工程组成,公式为

$$P_X(t) = \sum_{x \in \{\text{ef}, \text{af}, \text{ut}\}} P_x(t) \quad (2)$$

式(2)中: $P_{\text{ef}}(t)$ 为电解设施用电; $P_{\text{af}}(t)$ 为辅助设施用电; $P_{\text{ut}}(t)$ 为公用工程用电。

电解设施用电包括电源转换单元和电解槽用电,公式为

$$P_{\text{ef}}(t) = \sum_{x \in \{\text{pc}, \text{ele}\}} \sum_{i=1}^{x_{\text{de}}} P_{x,i}(t) \quad (3)$$

式(3)中: $P_{\text{pc}}(t)$ 为电源转换损耗用电; $P_{\text{ele}}(t)$ 为电解槽用电; x_{ele} 为系统内电解槽数量。

辅助设施用电包括气液分离系统、气体纯化系统和控制系统用电。此外,电解槽、气液分离与气体纯化系统的配置模式并非固定采用单台电解槽独立配套的1:1:1模式,需结合项目规模、电源特性、负荷需求等多维度因素综合确定,公式为

$$P_{\text{af}}(t) = \sum_{i=1}^{x_{\text{sep}}} P_{\text{sep},i}(t) + \sum_{i=1}^{x_{\text{pur}}} P_{\text{pur},i}(t) + P_{\text{con}}(t) \quad (4)$$

式(4)中: $P_{\text{sep}}(t)$ 为分离系统用电; x_{sep} 为系统内分离系统数量; $P_{\text{pur}}(t)$ 为纯化系统用电; x_{pur} 为系统内纯化系统数量; $P_{\text{con}}(t)$ 为控制系统用电。

1) 气液分离系统。气液分离系统由循环泵和补水泵组成,公式为

$$P_{\text{sep}}(t) = P_{\text{cir}}(t) + P_{\text{mwp}}(t) \quad (5)$$

式(5)中: $P_{\text{cir}}(t)$ 为循环泵用电; $P_{\text{mwp}}(t)$ 为补水泵用电。

循环泵用电和循环水量成正比,公式为:

$$P_{\text{cir}}(t) = N_e(t) \cdot K_{\text{cir}} \quad (6)$$

$$N_e(t) = \frac{Q_{\text{cir}}(t) \cdot H \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g}{3\,600 \cdot \eta_{\text{cir}}} \div 1\,000 \quad (7)$$

$$K_{\text{cir}} = \begin{cases} 1.25 & 0 \leq N_e < 22 \\ 1.15 & 22 \leq N_e < 55 \\ 1 & N_e \geq 55 \end{cases} \quad (8)$$

式(6)-(8)中: $P_{\text{cir}}(t)$ 为循环泵用电; $N_e(t)$ 为泵电机功率; K_{cir} 为泵电机系数; $Q_{\text{cir}}(t)$ 为循环水量; η_{cir} 为循环泵效率; $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的密度; g 为重力加速度; H 为扬程。

补水泵用电和补水量成正比,公式为

$$P_{\text{mwp}}(t) = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g \cdot Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mwp}}(t) \cdot H}{\eta_{\text{mwp}}} \quad (9)$$

式(9)中: $P_{\text{mwp}}(t)$ 为补水泵用电; $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{mwp}}(t)$ 为补水量; η_{mwp} 为补水泵效率。

2) 气体纯化系统。纯化系统用电与产氢量呈正比关系, 公式为

$$P_{\text{pur}}(t) = k_{\text{pur}} \cdot Q_{\text{H}_2}^{\text{pur}}(t) \quad (10)$$

式(10)中: $P_{\text{pur}}(t)$ 为气体纯化系统用电; k_{pur} 为纯化系统耗电系数; $Q_{\text{H}_2}^{\text{pur}}(t)$ 为氢气纯化量。

公用工程用电包含热管理系统、给水系统、水纯化系统、仪表供气系统、吹扫置换气系统用电。公式为

$$P_{\text{ut}}(t) = P_{\text{heat}}(t) + \sum_{x \in \{\text{wss}, \text{wpur}, \text{iass}, \text{srvs}\}} P_x(t) \quad (11)$$

式(11)中, $P_{\text{heat}}(t)$ 为热管理系统用电。

热管理系统用电为给循环回路持液量加热所需电量, 公式为

$$P_{\text{heat}}(t) = \frac{dQ_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ut}}(t)}{dt} \quad (12)$$

式(12)中, $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ut}}(t)$ 为热管理系统用电给循环回路的加热量。

加热量与循环回路持液量呈正比关系, 公式为

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ut}}(t) = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ut}} \quad (13)$$

式(13)中: $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}}$ 为循环回路持液量; $c_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的比热容; $\Delta T_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ut}}$ 为循环回路温度变化。

1.2.2 气体模型

电解水制氢系统能流示意图见图2。文中构建了从电解槽产氢量到纯化后氢气的动态物料平衡关系, 刻画了各单元间的氢体积分数分配与传递特性, 可准确表征电解水制氢全流程的产氢效率与物料匹配问题。



图2 电解水制氢系统能流示意图

Fig. 2 Energy flow diagram of hydrogen production system through water electrolysis

产氢量的公式为

$$Q_{\text{H}_2}(t) = \frac{I(t) \cdot n \cdot \eta_1}{2391.5} \quad (14)$$

式(14)中: n 为小室个数; η_1 为电流效率。

分离系统中氢气体积分数的公式为

$$Q_{\text{H}_2}^{\text{mwp}}(t) = \frac{x_{\text{ele}}}{x_{\text{sep}}} \cdot Q_{\text{H}_2}(t) \quad (15)$$

纯化系统中氢气纯化量的公式为

$$Q_{\text{H}_2}^{\text{pur}}(t) = \frac{x_{\text{sep}}}{x_{\text{pur}}} \cdot Q_{\text{H}_2}^{\text{mwp}}(t) \quad (16)$$

1.2.3 温度—能耗非线性模型

电解水制氢系统循环温度示意图见图3。不同系统设备配置方案最大的区别在于系统温度, 如图3所示的“4对1”配置, 4个电解槽公用一套循环水。

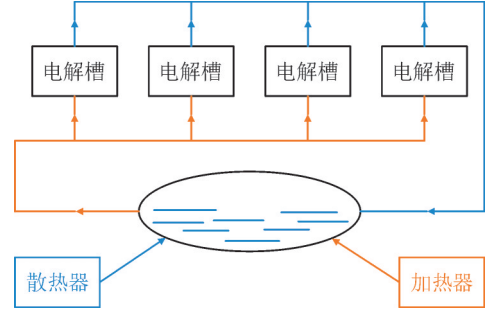


图3 电解水制氢系统循环温度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of circulating temperature in hydrogen production system through water electrolysis

假设循环回路持液量为 $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}}$, 单个制氢系统持液量为 $V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ele}}$, 公式为:

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}}(t) = \int_0^t P_{\text{cir}}(t) dt \quad (17)$$

$$P_{\text{cir}}(t) = \sum_{i=1}^{\frac{x_{\text{ele}}}{x_{\text{sep}}}} P_{\text{loss}, i}(t) + P_{\text{ut}}(t) \quad (18)$$

$$P_{\text{loss}}(t) = P_{\text{ele}}(t) \cdot (1 - \eta_v) \quad (19)$$

式(17)-(19)中: $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}}(t)$ 为循环回路总加热量; $P_{\text{loss}}(t)$ 为电解槽损失功率; η_v 为电压效率。

根据文[40], 不同电解槽制氢效率曲线见图4。公式为

$$\eta_v = \frac{U_{\text{ocv}}(T)}{U_{\text{cell}}(I, T)} \quad (20)$$

式(20)中: U_{ocv} 为热力学电压; U_{cell} 为电解槽电压; I 为电流; T 为电解槽温度。

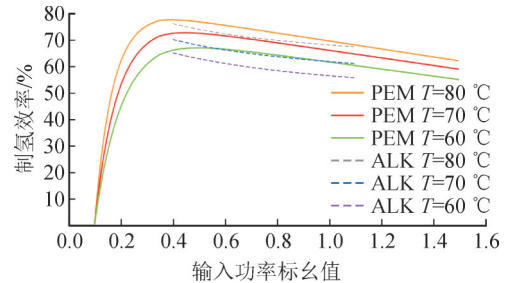


图4 不同电解槽制氢效率曲线

Fig. 4 Efficiency curve of hydrogen production by different electrolyzer

循环回路中液体温度变化的公式为

$$\Delta T_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}} = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}}{Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}}(t)} \quad (21)$$

式(21)中, $\Delta T_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{air}}$ 为温度变化量。

2 计及辅机安全运行边界的多目标日前一日内运行优化方法

针对两类电解槽特性的不同,对其启动时长、响应时间、制氢效率、运行寿命、安全可靠进行对比分析,电解槽特性对比见图5。相比于单一的电解槽,ALK和PEM混联的方式能更好地互补优化。因此,文中构建多类型电解制氢异构系统性能补偿模型,实现制氢系统最优机组匹配。

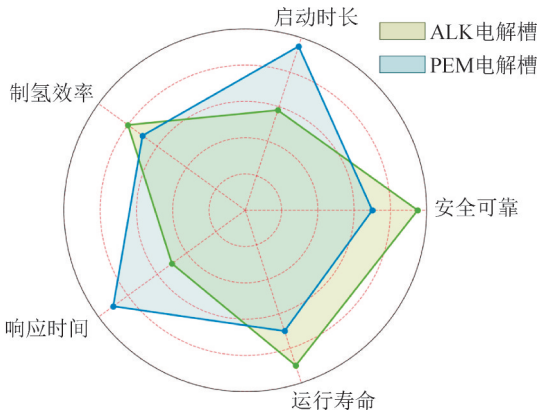


图5 电解槽特性对比

Fig. 5 Comparison of characteristics of electrolyzers

为破解新能源消纳场景中风光消纳水平、系统经济性、电解槽寿命与能耗间的多目标协同优化难题,文中提出一种计及辅机系统安全运行边界的多目标日前一日内双层运行优化方法,见图6。在日前阶段,创新性纳入氢气分离、纯化等辅机设备安全运行约束,避免与工程实际脱节;同时针对异构电解槽差异化特性,以新能源消纳为核心目标,协同优化系统能耗、设备使用寿命与综合经济效益,生成未来24 h基准运行计划。日内阶段采用滚动优化策略,每滚动一次生成未来4 h的校正计划,并按此规律持续更新,对日前基准计划进行动态校正。通过构建日前一日内多时间尺度优化框架,既保障全局多目标均衡,又适配短期波动,凸显本策略优于传统策略的优势,最终实现风光消纳、设备安全与综合效益的统筹优化,使系统运行更灵活可控。

2.1 日前优化调度策略

2.1.1 策略约束

日前优化调度阶段需综合考虑功率运行约束、各控制变量约束及电网相关约束。

1)总功率约束。

$$P_g(t) \geq P_c(t) \tag{22}$$

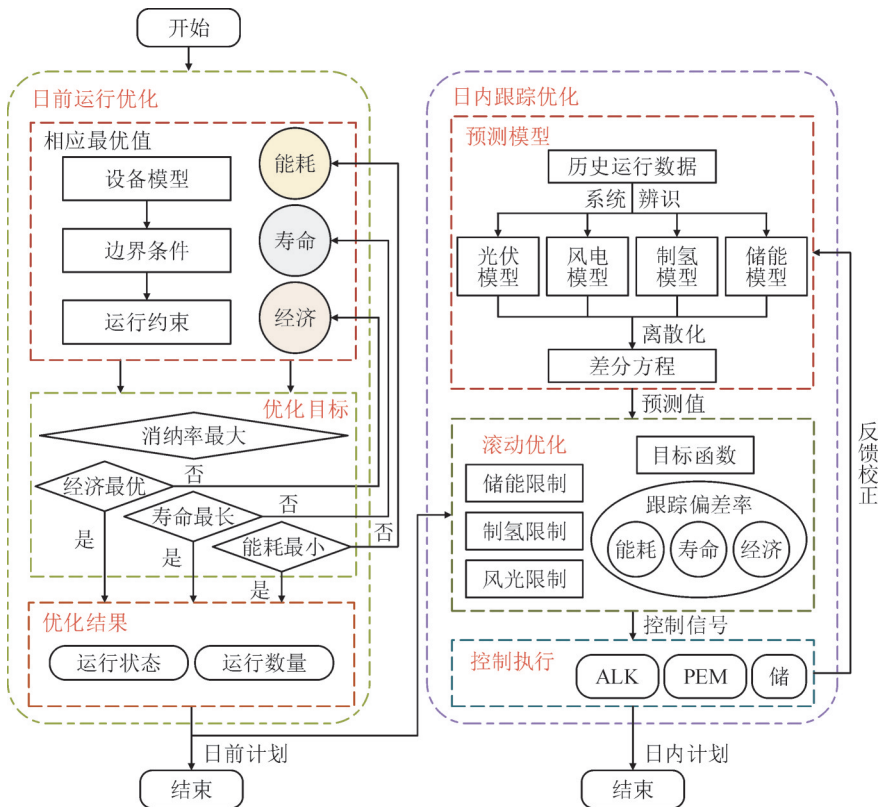


图6 多时间尺度运行优化方法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of multi-time-scale operation optimization method

$$P_g(t) = P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{grid}}(t) \quad (23)$$

$$P_c(t) = P_{\text{total}}(t) + E_{\text{SOCC}}(t) \quad (24)$$

式(22)-(24)中: $P_g(t)$ 、 $P_c(t)$ 分别为发电量、用电量; $P_{\text{grid}}(t)$ 为购电功率。

2) 储能约束。

$$E_{\text{SOC}}(t) = E_{\text{SOC}}(t-1) + E_{\text{SOCC}}(t) - E_{\text{SOCD}}(t) \quad (25)$$

$$0.2E_{\text{SOC}}^{\text{max}} \leq E_{\text{SOC}}(t) \leq E_{\text{SOC}}^{\text{max}} \quad (26)$$

式(25)、(26)中: $E_{\text{SOC}}^{\text{max}}$ 为储能容量上限; $E_{\text{SOCC}}(t)$ 为储能充电量; $E_{\text{SOCD}}(t)$ 为储能放电电量。

3) 辅机约束。气液分离系统、气体纯化系统氢气的输入量和变化量不能超过系统最大值, 公式为:

$$Q_{\min}^x(t) \leq Q_{\text{H}_2}^x(t) \leq Q_{\max}^x(t) \quad (27)$$

$x \in \{\text{sep, pur}\} \quad x \in \{\text{sep, pur}\} \quad x \in \{\text{sep, pur}\}$

$$\Delta Q_{\min}^x(t) \leq \Delta Q_{\text{H}_2}^x(t) \leq \Delta Q_{\max}^x(t) \quad (28)$$

$x \in \{\text{sep, pur}\} \quad x \in \{\text{sep, pur}\} \quad x \in \{\text{sep, pur}\}$

系统温度不能超限

$$T_{\min} \leq T_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{cir}} \leq T_{\max} \quad (29)$$

4) 电解槽约束。功率运行范围、调节速率不能超限:

$$P_{\min}^x \leq P_x(t) \leq P_{\max}^x \quad (30)$$

$x \in \{\text{ALK, PEM}\} \quad x \in \{\text{ALK, PEM}\} \quad x \in \{\text{ALK, PEM}\}$

$$|P_{\text{PEM}}(t) - P_{\text{PEM}}(t-1)| \leq R_{\text{PEM}} \cdot \Delta t \quad (31)$$

为保障 ALK 制氢系统稳定性, 设置最小运行时长约束

$$P_{\tau}^{\text{ALK}} \geq P_{\text{ALK}}^{\min} \quad \tau \in (t, t + T_{\text{ALK}}^{\min} - 1) \quad (32)$$

式(32)中, $T_{\text{ALK}}^{\min}$ 为最小运行时长。

5) 电网约束。

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t) \leq 0.1 \cdot \sum_{t=1}^T P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t) \quad (33)$$

2.1.2 目标函数

在并网型绿电直连场景下, 电-氢耦合系统运行优化需同时兼顾能效、设备安全与经济收益。因此, 文中在保障风光消纳率最大化的前提下, 分别从能效、可靠性与经济性维度刻画系统运行性能, 实现多维度指标的协同均衡。

$$f = \max C_{\text{cr}} \quad (34)$$

$$C_{\text{cr}} = \left[1 - \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t) - P_c(t)}{P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t)} \right] \cdot 100\% \quad (35)$$

1) 以系统能耗最小。能耗是衡量制氢系统能效水平的关键指标, 可直接反映消纳利用效率与单位

制氢过程的能量利用水平:

$$f_1 = \min(f_{\text{best}} + W) \quad (36)$$

$$W = \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{total}}(t) \cdot \Delta t}{Q_{\text{H}_2}(t)} \quad (37)$$

2) 以寿命衰减最少。寿命是衡量电解槽长期运行可靠性的核心指标之一, 可量化电解槽在频繁启停、变载等工况下的性能损耗:

$$f_1 = \min(f_{\text{best}} + \theta) \quad (38)$$

$$\theta = \theta_L + \theta_V + \theta_S \quad (39)$$

式(39)中: θ_L 为运行寿命衰减; θ_V 为变载寿命衰减; θ_S 为启停寿命衰减。

运行寿命衰减指的是运行在不同功率下的寿命衰减。公式为:

$$\theta_L = \theta_{\max} \cdot \sum_{t=1}^T \left(\frac{t_L}{T_L(t)} \right)^{k_L} \quad (40)$$

$$T_L(t) = b_L \cdot [P_{\text{el}}(t) - P_N]^2 + T_0 \quad (41)$$

式(40)、(41)中: $\theta_{\max}$ 为衰减上限; t_L 为运行时间; k_L 、 b_L 为运行衰减系数; T_0 为理论最大寿命。

变载寿命衰减指运行功率发生一次变动时, 因工况突变带来的寿命损耗。公式为:

$$\theta_V = \sum_{i=1}^n [k_V \cdot \theta_{P_{i+1}} \cdot f(|P_i - P_{i+1}|)] \quad (42)$$

$$f(|P_i - P_{i+1}|) = 1 - e^{-\beta_V \cdot \frac{|P_i - P_{i+1}|}{\Delta P_{\max}}} \quad (43)$$

式(42)、(43)中: k_V 为变载惩罚系数; $\theta_{P_{i+1}}$ 为基础衰减量; β_V 为衰减增长参数; $\Delta P_{\max}$ 为最大变载幅度。

启停寿命衰减指的是从停机状态下变动的寿命衰减, 公式为

$$\theta_S = \sum_{i=1}^p k_S \cdot \theta_{P_{i+1}} \quad (44)$$

式(44)中, k_S 为启停衰减系数。

3) 以经济效益最高。效益可以直观反映系统在并网运行模式下的经济性, 综合考虑制氢收益、设备折旧与购电成本:

$$f_1 = \max(f_{\text{best}} + C) \quad (45)$$

$$C = S_{\text{H}_2} - C_{\theta} - C_{\text{grid}} \quad (46)$$

式(45)、(46)中: C_{θ} 为寿命成本; C_{grid} 为购电成本; S_{H_2} 为制氢收益。

寿命成本主要取决于电解槽的设备折旧费。

公式为:

$$C_{\theta} = \sum_{t=1}^T \theta(t) \cdot c_{\text{dep}}(t) \quad (47)$$

$$c_{\text{dep}}(t) = a_{\text{dep}} \cdot \left(e^{b_{\text{dep}} \cdot [\theta - \theta(t)]} - 1 \right) \quad (48)$$

式(47)、(48)中: $c_{\text{dep}}(t)$ 为折旧系数; a_{dep} 为折旧幅值系数; b_{dep} 为折旧增长率系数。

运行期间,向电网采购电力产生的成本。公式为

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}(t) \cdot c_{\text{grid}}(t) \quad (49)$$

式(49)中, $c_{\text{grid}}(t)$ 为购电价格。

电解槽制取的氢气通过售卖可以获得收益。公式为

$$S_{\text{H}_2} = c_{\text{H}_2} \cdot \sum_{t=1}^T Q_{\text{H}_2}(t) \quad (50)$$

式(50)中, c_{H_2} 为氢价。

2.2 日内跟踪优化策略

2.2.1 策略约束

在日内跟踪优化阶段,需要对预测模型中的状态向量进行约束,以确保其处于合理的运行范围。具体而言,需要限制两种电解制氢系统的输入功率范围、储能的功率范围。公式为

$$\begin{cases} P_x^{\min} \leq P_x(t+k\Delta t) \leq P_x^{\max} \\ 0.2E_{\text{SOC}}^{\max} \leq E_{\text{SOC}}(t+k\Delta t) \leq E_{\text{SOC}}^{\max} \end{cases} \quad (51)$$

同时还要限制增量不能超过最大最小值。公式为

$$\begin{cases} \Delta P_x^{\min} \leq \Delta P_x(t+k\Delta t) \leq \Delta P_x^{\max} \\ 0.2\Delta E_{\text{SOC}}^{\max} \leq \Delta E_{\text{SOC}}(t+k\Delta t) \leq \Delta E_{\text{SOC}}^{\max} \end{cases} \quad (52)$$

2.2.2 目标函数

$$f_2 = \min \left(\|\Delta Y\|_G^2 + W \|\Delta u\|_H^2 \right) \quad (53)$$

ΔY 包含能耗、寿命、经济的日内与日前的差量。公式为

$$\Delta Y = \{\Delta Y_w, \Delta Y_{\theta}, \Delta Y_c\} \quad (54)$$

Δu 为控制向量的变化量,即 ALK 系统功率、PEM 系统功率、储能功率的日内与日前的差量。公式为

$$\Delta u = \{\Delta P_{\text{ALK}}, \Delta P_{\text{PEM}}, \Delta E_{\text{SOC}}\} \quad (55)$$

引入权重系数 W , 以出现偏差时更加合理分配盈余的功率给不同的控制向量。公式为

$$W = \begin{pmatrix} w_{\text{ALK}} & & \\ & w_{\text{PEM}} & \\ & & w_{E_{\text{SOC}}} \end{pmatrix} \quad (56)$$

式(56)中, w_{ALK} 、 w_{PEM} 、 $w_{E_{\text{SOC}}}$ 分别为控制向量的权重。

3 结果对比与分析

3.1 性能指标

对日前日内运行优化效果的评价指标通过8种来实现:风光消纳率、系统能耗、寿命衰减、绿电率、绿电使用率、经济性、跟踪偏差率和算法加速比。

风光消纳率为

$$C_{\text{cr}} = \left[1 - \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t) - P_c(t)}{P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t)} \right] \cdot 100\% \quad (57)$$

系统能耗为

$$W = \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{total}}(t) \cdot \Delta t}{Q_{\text{H}_2}(t)} \quad (58)$$

寿命衰减为

$$\theta = \sum_{i=1}^N \theta_i \quad (59)$$

绿电率为

$$C_{\text{ge}} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t)}{P_g(t)} \cdot 100\% \quad (60)$$

绿电使用率为

$$C_{\text{gu}} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{\text{el}}(t)}{P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{PV}}(t)} \cdot 100\% \quad (61)$$

经济性为

$$C = \sum_{t=1}^T C(t) \quad (62)$$

跟踪偏差率为:

$$E = \sum_{i=1}^T \omega_i(t) e_i(t) \quad (63)$$

$$e_i(t) = \frac{|P_i^{\text{real}}(t) - P_i^{\text{plan}}(t)|}{|P_i^{\text{plan}}(t)|} \times 100\% \quad (64)$$

$$\omega_i(t) = \frac{P_i^{\text{plan}}(t)}{\sum_j P_j^{\text{plan}}(t)} \quad (65)$$

式(63)-(65)中: $e_i(t)$ 为第 i 个单元的跟踪偏差

率; i 为 ALK 系统、PEM 系统或储能; $P_i^{\text{real}}(t)$ 为日内功率; $P_i^{\text{plan}}(t)$ 为日前功率。

算法加速比为

$$S = \frac{v_{\text{base}}}{v_{\text{opt}}}$$

(66)

式(66)中: v_{base} 为日前求解速度; v_{opt} 为日内求解速度。

3.2 日前优化调度结果

3.2.1 多目标优化结果分析

基于风光出力水平划分的3类典型场景, 充分覆盖了资源丰裕、供需平衡与资源匮乏等不同运行工况, 能够有效反映新能源出力不确定性对制氢系统运行的影响, 更全面地体现风光资源随机波动、时序差异下系统的调度响应规律, 可验证所提方法在不同不确定性水平下的适应性与鲁棒性, 有效规避单一极端场景下结论的片面性。运行场景划分

示意图见图7, 运行优化方法部分参数见表1。

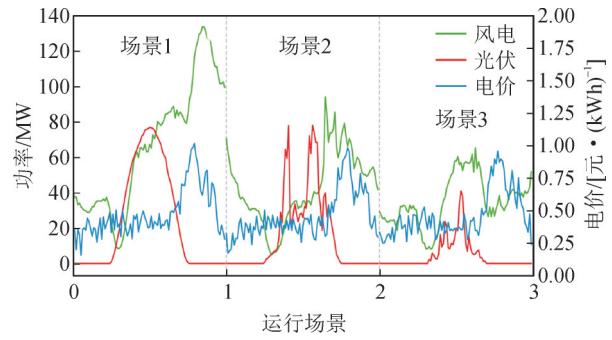


图7 运行场景划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of operational scenario division

日前不同调控方案的结果对比见表2, 数据为1个月仿真平均值, 涵盖3类典型运行场景。

结果表明, 能耗最小方案可将系统能耗降低约0.8%~6%, 但寿命衰减幅度大幅上升, 同时造成经济性下降约25%~45%。衰减最少方案通过引入寿命惩罚机制, 降低了制氢系统启停次数约2~3次, 提升

表1 运行优化方法参数

Table 1 Operation optimization method parameters

参数	数值	参数	数值
ALK 制氢系统数量	3	温度上限/℃	80
PEM 制氢系统数量	1	环境温度/℃	25
ALK 制氢系统内电解槽数量	4	补水泵效率/%	70
PEM 制氢系统内电解槽数量	4	制氢系统内分离系统数量	1
ALK 制氢系统额定功率/MW	20	制氢系统内纯化系统数量	1
PEM 制氢系统额定功率/MW	20	单个电解槽衰减上限	0.2
ALK 制氢系统运行范围/%	40~110	运行衰减系数	0.3
PEM 制氢系统运行范围/%	10~150	折旧增长率系数	4.71
储能最大功率/MW	10	氢价/(元·kg ⁻¹)	35

表2 日前不同调控方案结果对比

Table 2 Comparison of day ahead results from different regulation schemes

运行场景	目标函数	性能指标					
		风光消纳率/%	绿电率/%	绿电使用率/%	系统能耗/[kWh·(Nm ³) ⁻¹]	寿命衰减	经济性/万元
场景1	能耗最小	93.64	95.48	93.55	4.922 2	0.946 3	92.39
	消纳率最优	95.84	95.77	93.64	5.048 0	0.075 7	96.67
	衰减最少	95.82	95.55	94.44	5.003 3	0.101 0	97.68
	效益最高	95.76	97.54	93.50	5.052 3	0.211 9	95.43
场景2	能耗最小	96.87	93.67	96.87	4.926 8	0.147 0	67.47
	消纳率最优	98.52	93.82	96.48	4.992 1	0.041 3	67.66
	衰减最少	98.52	94.29	97.23	4.961 8	0.044 9	69.06
	效益最高	98.52	100.00	95.12	5.048 0	0.286 3	65.33
场景3	能耗最小	99.17	91.57	99.17	4.888 1	0.078 3	34.68
	消纳率最优	100.00	91.72	98.24	4.928 8	0.020 7	34.20
	衰减最少	100.00	92.66	100.00	4.940 2	0.028 1	35.17
	效益最高	100.00	100.00	95.08	5.101 2	0.181 1	31.87

了风光消纳率与绿电使用率,但产氢量相应降低约0.5%~2%。效益最高方案打破了单一指标优化的局限,实现了能耗、寿命与经济性的协同平衡,为3类典型场景下综合性能最优的调控策略。与文[32]所提目标函数相比,效益最高方案在风光消纳率基本持平的前提下,在能耗、寿命和经济性上均展现出显著优势,分别提升了0.97%、52.34%、2.27%。

不同调控方案雷达图见图8,直观呈现了各方案的优势分布:能耗最小方案在系统能耗与绿电使用率上表现最优;衰减最少方案在寿命衰减指标上占据显著优势;效益最高方案各维度指标保持均衡,展现出良好的综合性能。

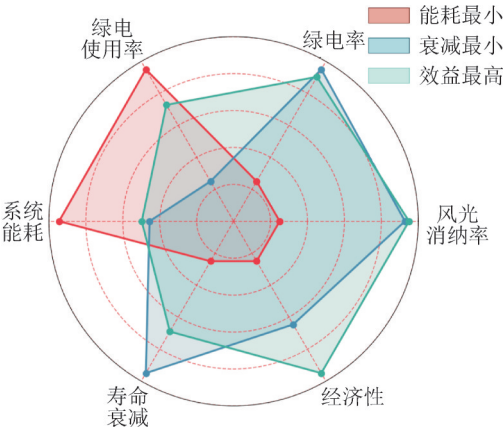


图8 不同调控方案雷达图

Fig. 8 Radar chart of different regulation schemes

不同场景的日前调控结果见图9-11。结果表明:在不同场景下,策略可根据不同风光不确定性水平与设备性能边界,生成电解槽集群的最优运行数量,实现资源利用率与系统效益的动态平衡。面对新能源出力的随机不确定性,日前调度层可提前规划基础运行区间,平抑大幅波动带来的冲击。ALK制氢系统整体运行平稳,仅进行平缓功率调节,无频繁启停,充分契合其稳负荷特性,体现了日前调度对产氢负荷的支撑作用。PEM制氢系统则随优化目标呈现显著差异:能耗最小方案下,系统启停频繁、波动剧烈,可快速响应风光波动并降低单位产氢能耗,但加剧了设备疲劳;衰减最少方案下,系统运行稳定、启停较少,有效延缓寿命损耗;效益最高方案通过适度功率调节匹配风光出力,在提升消纳与经济性的同时,控制启停频次,实现了能耗、寿命与效益的协同优化。

电价与氢价数据见图12。电价呈现日内波动特征,氢价保持在35元/kg。针对效益最高方案,将综合考虑实时电价、电解槽寿命惩罚成本与氢价收益,优先在低电价时段以平稳方式制氢,并避免高电价时段的频繁启停与购电行为,从而实现经济性与设备寿命的协同优化。

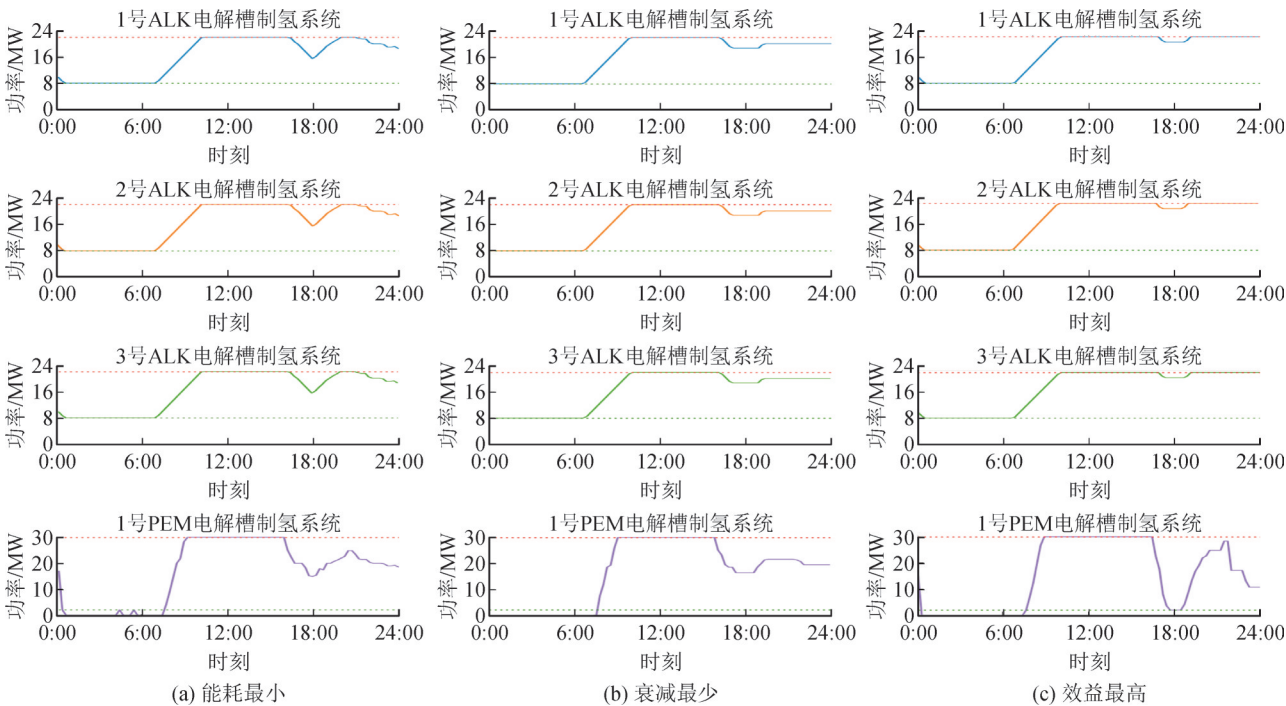


图9 场景1日前调控结果

Fig. 9 Day ahead regulation results for scenario 1

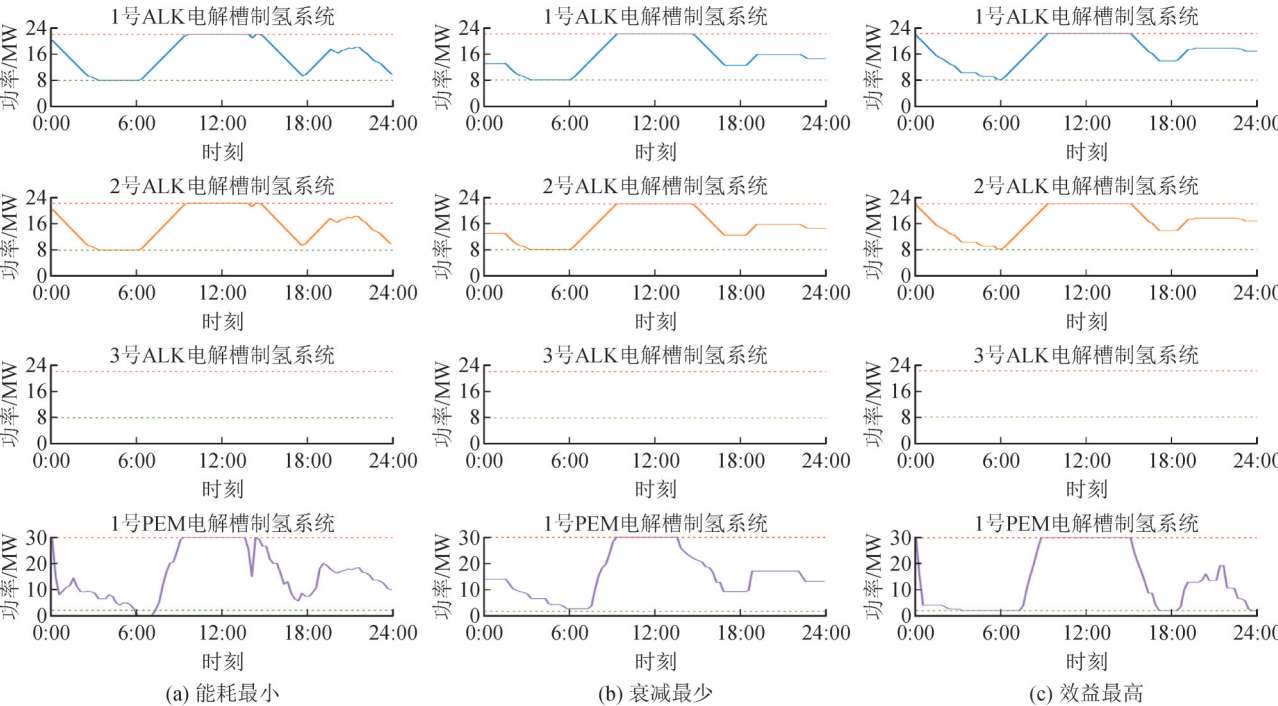


图 10 场景2日前调控结果

Fig. 10 Day ahead regulation results for scenario 2

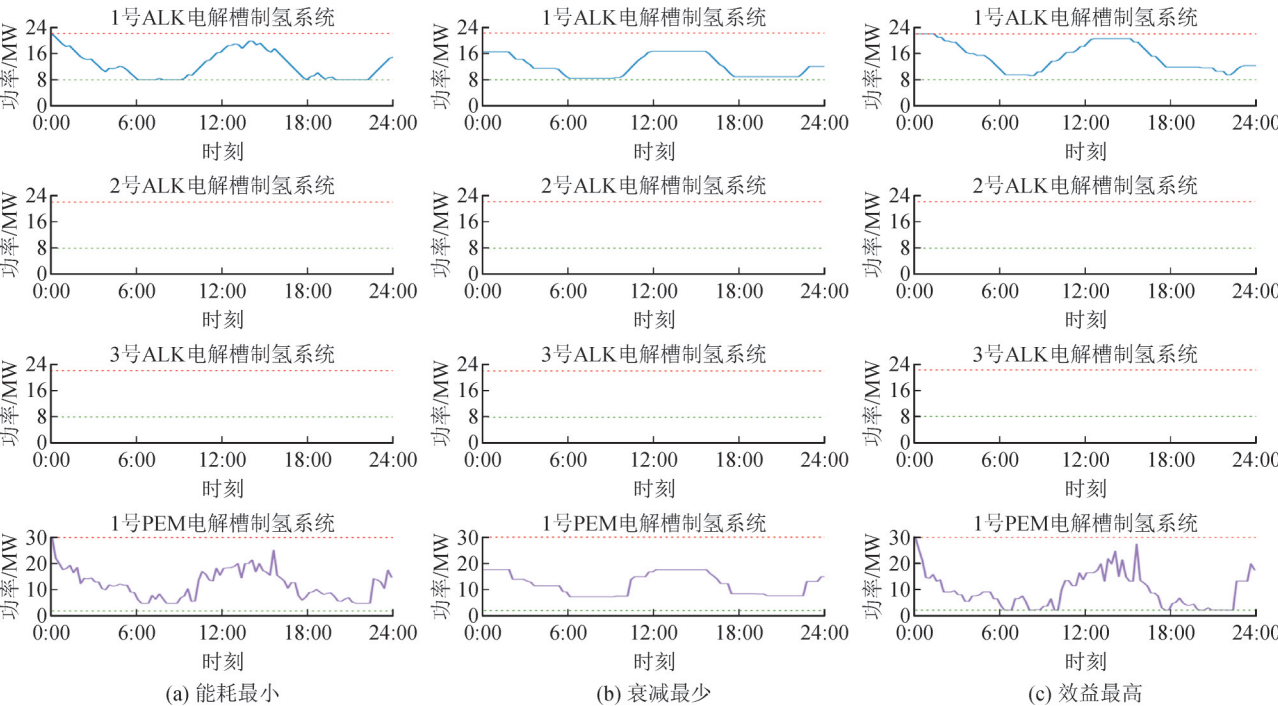


图 11 场景3日前调控结果

Fig. 11 Day ahead regulation results for scenario 3

3.2.2 多槽集群—辅机联合优化结果分析

制氢系统关键运行状态曲线见图 13,直观展现了制氢系统中电解槽功率、辅机功耗及温度—产氢量的联动规律。图 13(a)、(b)可见,在总功率较低时,

优先集中部分电解槽高功率运行;总功率较高时,则切换为多槽平均分配模式。图 13(c)、(d)给出了制氢系统的功率构成分布,电解槽功率为主导部分,辅机功率占比约为 15%。图 13(e)、(f)的温度与产氢

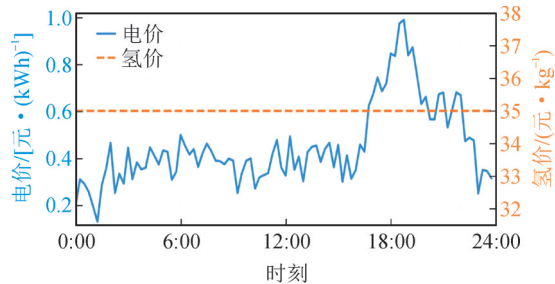
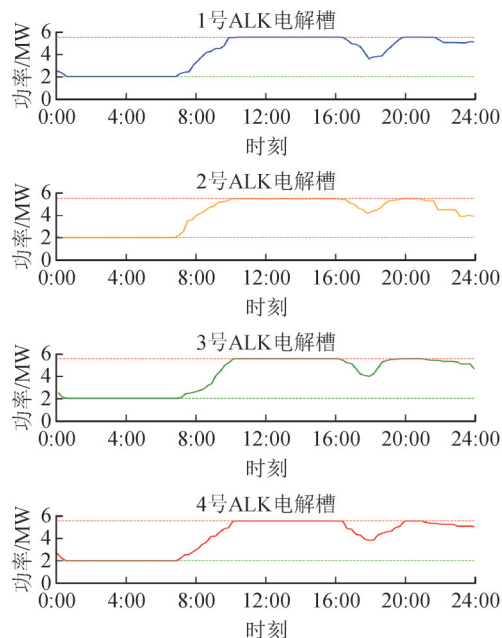
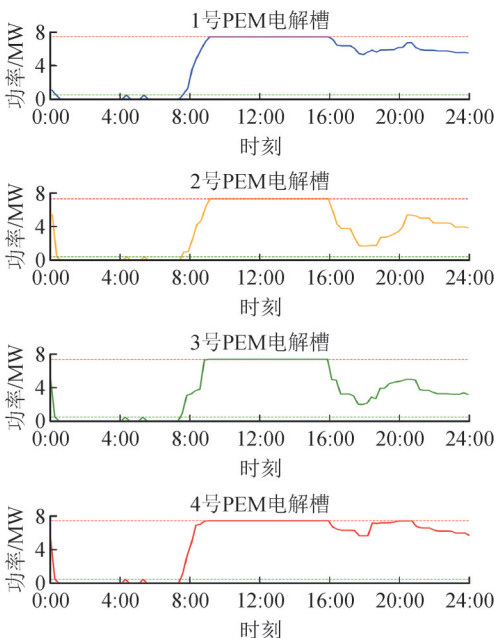


图12 电价与氢价数据

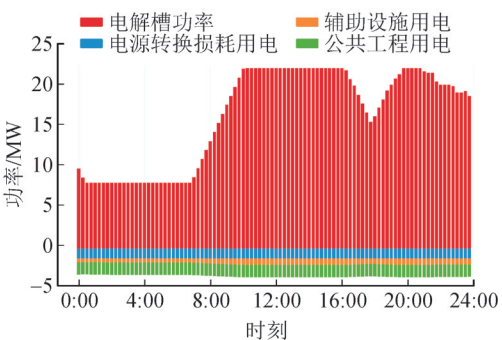
Fig. 12 Electricity and hydrogen price data



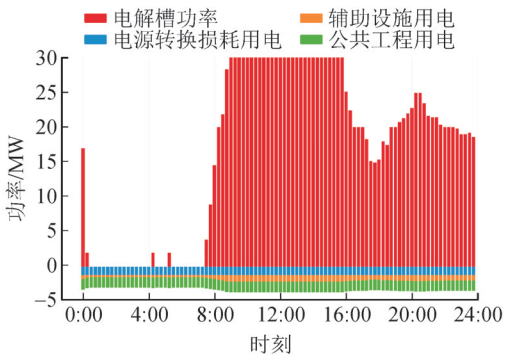
(a) 1号ALK制氢系统单槽功率曲线



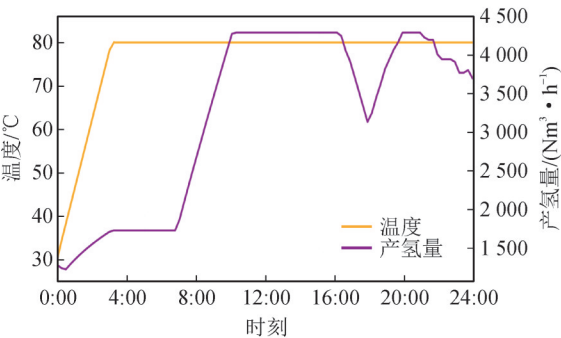
(b) 1号PEM制氢系统单槽功率曲线



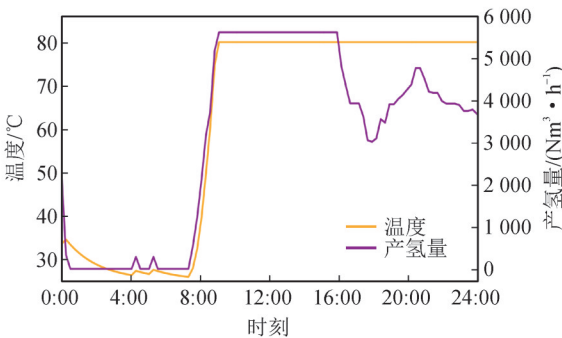
(c) 1号ALK制氢系统总功率构成曲线



(d) 1号PEM制氢系统总功率构成曲线



(e) 1号ALK制氢系统温度和产氢量变化曲线



(f) 1号PEM制氢系统温度和产氢量变化曲线

图13 制氢系统关键运行状态曲线

Fig. 13 Key operating state curve of hydrogen production system

量曲线表明,系统产氢量与电解槽功率呈显著正相关,且随槽温升高进一步提升。因此,所提多槽协同调控方法,可根据系统功率水平动态切换运行模式,在保障槽温上升速率的同时避免单台设备过载,实现了产氢效率、设备安全与辅机能耗的协同平衡。

3.3 日内跟踪优化结果

日内不同调控方案结果对比见表3。同一场景

下,衰减最少与效益最高方案跟踪偏差率更低,可将寿命衰减、绿电率、绿电使用率等核心指标的波动控制在1%左右;能耗最小方案虽经济性有所提升,但跟踪偏差率略高,跟踪鲁棒性稍弱。不同场景下,衰减最少与效益最高方案的跟踪效率与性能稳定性优势更突出。

表3 日内不同调控方案结果对比

Table 3 Comparison of intra day results from different regulation schemes

运行 场景	目标函数	性能指标								
		跟踪偏差率/%	算法加 速比	差异						
				风光消纳 率/%	绿电 率/%	绿电使用 率/%	系统能耗/ [kWh·(Nm ³) ⁻¹]	寿命 衰减	经济性/万元	
场景 1	能耗最小	29.17	10.45	+1.93	-0.09	-0.99	+0.114 9	-0.888 0	+3.22	
	消纳率最优	衰减最少	4.50	7.07	-0.16	-0.05	-1.13	+0.041 6	-0.021 6	-0.57
	效益最高	7.45	9.11	-0.38	-0.17	-1.63	+0.038 6	-0.043 7	-0.98	
场景 2	能耗最小	15.18	15.39	+1.73	-0.04	-1.19	+0.182 3	-0.097 9	-0.25	
	消纳率最优	衰减最少	1.90	8.41	-0.43	-0.05	-1.41	+0.077 6	+0.000 3	-0.68
	效益最高	6.70	8.35	+0.25	-0.07	-1.40	+0.068 1	+0.000 2	-0.95	
场景 3	能耗最小	5.68	11.65	+0.50	-0.03	-0.59	+0.084 9	-0.049 3	-0.15	
	消纳率最优	衰减最少	4.43	13.40	-0.63	-0.11	-0.73	+0.005 8	+0.000 2	-0.45
	效益最高	6.10	14.55	-0.15	-0.08	-1.26	+0.028 5	+0.000 0	-0.53	

日内偏差对比见图 14。从波动幅度来看,储能功率波动最大,PEM 电解槽次之,ALK 电解槽最小。结果表明,所提方法通过将日内偏差主要分配至储能与 PEM 电解槽,最大限度抑制 ALK 电解槽的功率波动,避免频繁变负荷对其寿命造成不利影响,既保证了调度指令的跟踪精度,又保障了各设备的安全稳定运行。

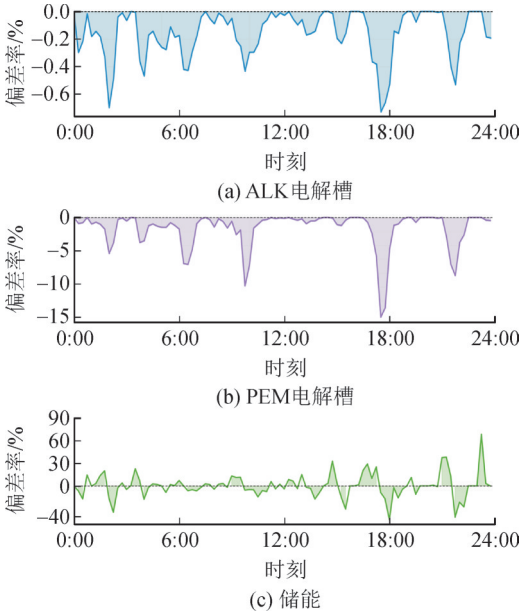


图 14 日内偏差对比

Fig. 14 Intraday deviation comparison

4 结论

文中针对当前电—氢耦合系统运行优化中场景针对性不足、工程实用性欠缺的问题,提出面向

新能源消纳、计及辅机安全运行边界的多时间尺度运行优化方法,主要结论与创新点如下:

1)构建了计及辅机安全约束的日前一日内多时间尺度优化体系,实现了不同场景下系统性能的动态适配。仿真结果表明,日前优化中效益最高方案实现了多维度指标的协同均衡,为各场景综合最优选择,与文献相比能耗、寿命和经济性分别提升了0.97%、52.34%、2.27%;日内优化中核心指标波动可控制在1%以内,跟踪精度与运行稳定性显著提升。

2)面向并网型绿电直连模式下的风光消纳场景,构建了多类型电解制氢异构系统性能补偿模型,实现风光出力的高效消纳与波动平抑。ALK 制氢系统作为基础负荷单元,保持稳定长时运行,保障制氢的稳定性;PEM 制氢系统灵活适配绿电出力的随机波动,适配不同风光资源。

3)构建了混联异构制氢系统—辅机协同精细化模型,考虑变工况下温度、电流对电解槽效率及辅机功耗的影响,刻画产氢、产热与纯化、补水等辅机系统的动态能量平衡。所提多槽协同调控方法,可根据系统功率水平动态切换运行模式,在保障槽温上升速率的同时避免单台设备过载,实现了产氢效率、设备安全与辅机能耗的协同平衡。

参考文献:

[1] Johnson N, Liebreich M, Kammen D M, et al. Realistic roles for hydrogen in the future energy transition[J]. Nature Reviews Clean

- Technology, 2025, 1(5): 351-371.
- [2] 覃文力, 荣娜. 基于全生命周期法的含氢能梯级利用综合能源系统优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(4): 145-154.
- Qin Wenli, Rong Na. Low-carbon and economical optimal scheduling of an integrated energy system with hydrogen energy cascade based on a whole life cycle approach[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(4): 145-154.
- [3] 郭尊, 安之, 魏楠, 等. 计及氢能多环节利用和混合需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳优化[J]. 供用电, 2024, 41(2): 52-63.
- Guo Zun, An Zhi, Wei Nan, et al. Multi-time scale low-carbon optimization of an integrated energy system considering the multi-link utilization of hydrogen energy and mixed demand response[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(2): 52-63.
- [4] 夏佳伟, 张一帆, 雷浩, 等. 考虑高效氢能利用和碳捕集的综合能源系统低碳优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(12): 100-111.
- Xia Jiawei, Zhang Yifan, Lei Hao, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering efficient hydrogen utilization and carbon capture equipment[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12): 100-111.
- [5] Bhandari R, Adhikari N. A comprehensive review on the role of hydrogen in renewable energy systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024(82): 923-951.
- [6] 施涛, 许泽炎, 雷震亚, 等. 计及一致性的多点新能源发电制氢协同控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 26-36.
- Shi Tao, Xu Zeyan, Lei Zhenya, et al. Study on cooperative control strategy of multi-point new energy power generation and hydrogen production considering consistency[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 26-36.
- [7] 宋洁, 郜捷, 梁丹曦, 等. 质子交换膜电解制氢系统建模研究综述[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 58-78.
- Song Jie, Gao Jie, Liang Danxi, et al. A review on modeling of hydrogen production system with proton exchange membrane electrolysis[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 58-78.
- [8] 范建斌, 孟昭军, 周格格, 等. 电解水制氢储能系统并网互动运行标准体系架构研究[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(9): 1-8.
- Fan Jianbin, Meng Zhaojun, Zhou Gege, et al. Research on the standard framework for the grid integration and interactive operation of water electrolysis-based hydrogen energy storage systems[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(9): 1-8.
- [9] 李建林, 王大龙, 赵文鼎, 等. 计及动态氢价的光伏电解水制氢调度策略[J]. 电力建设, 2025, 46(2): 99-112.
- Li Jianlin, Wang Dalong, Zhao Wending, et al. Hydrogen production scheduling strategy for photovoltaic electrolysis of water considering dynamic hydrogen prices[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(2): 99-112.
- [10] 李建林, 刘文博, 梁忠豪, 等. “双碳”背景下全球典型氢能示范工程分析[J]. 电力自动化设备, 2026, 46(2): 1-11.
- Li Jianlin, Liu Wenbo, Liang Zhonghao, et al. Analysis of global typical hydrogen energy demonstration projects under background of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46(2): 1-11.
- [11] 张泓楷, 张黎, 朱梦姝, 等. 基于氢能枢纽的电—氢综合能源系统能量管理建模与优化运行[J]. 南方电网技术, 2025, 19(9): 46-57.
- Zhang Hongkai, Zhang Li, Zhu Mengshu, et al. Modeling and optimal operation for energy management of electric hydrogen integrated energy system based on hydrogen energy hub[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(9): 46-57.
- [12] 刘佳佳, 田铭兴, 苏照旭, 等. 基于氢能多元利用与绿证—碳联合交易机制的多微网—共享储能运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 52-67.
- Liu Jiajia, Tian Mingxing, Su Zhaoxu, et al. Operation optimization strategy for multiple microgrids with shared energy storage considering multi-utilization of hydrogen and green certificate-carbon joint trading mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 52-67.
- [13] 柴海东, 任永峰, 云平平, 等. 构网型风氢耦合系统电解槽轮值优化控制[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 12-22.
- Chai Haidong, Ren Yongfeng, Yun Pingping, et al. Rotational optimization control of electrolytic cell in grid-forming wind-hydrogen coupling system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 12-22.
- [14] 陈昆灿, 陈荣锋, 陈恺, 等. 绿电直连模式下的风光储容量配置研究[J]. 电力勘测设计, 2025(11): 1-6.
- Chen Kuncan, Chen Rongfeng, Chen Kai, et al. Research on capacity configuration of wind, photovoltaic and energy storage under the direct green electricity connection mode[J]. Electric Power Survey & Design, 2025(11): 1-6.
- [15] 刘珊珊, 李柯睿, 刘柏康, 等. 绿证—碳联合机制下含多类型需求响应和氢能多元利用的综合能源系统优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 203-215.
- Liu Shanshan, Li Kerui, Liu Baikang, et al. Optimal dispatching of integrated energy systems with diverse demand response and multifaceted hydrogen utilization under green certificate-carbon joint mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 203-215.
- [16] 陈昆灿, 涂福荣, 陈恺, 等. 绿电直连双重约束下新能源替代率研究[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2026, 29(1): 9-15.
- Chen Kuncan, Tu Furong, Chen Kai, et al. Research on new energy replacement rate under dual constraints of green electricity direct connection[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2026, 29(1): 9-15.
- [17] 窦真兰, 孔维铭, 姜科宇, 等. 电氢耦合系统集群协同调控技术[J/OL]. 发电技术: 1-14[2026-01-26]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20251103.0848.002>.
- Dou Zhenlan, Kong Weiming, Jiang Keyu, et al. Collaborative control technology for electric hydrogen coupling system cluster[J]. Power Generation Technology: 1-14[2026-01-26]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20251103.0848.002>.
- [18] 刘硕, 吴旭, 马速良, 等. 基于模型预测控制的光—氢—储耦合系统的功率优化分配方法研究[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 23-33.
- Liu Shuo, Wu Xu, Ma Suliang, et al. Research on power optimization allocation method for solar-hydrogen-storage coupled system based on model predictive control[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 23-33.

[19] 王玉玮, 王玉茹, 唐哲, 等. 基于物理信息 GAN 的生物质—光伏—氢能全可再生能源系统多目标调度[J]. 智慧电力, 2025, 53(11): 1-9.
Wang Yuwei, Wang Yuru, Tang Zhe, et al. Multi-objective scheduling for biomass - photovoltaic - hydrogen integrated fully renewable energy systems based on physics-informed GAN[J]. Smart Power, 2025, 53(11): 1-9.

[20] Arsalis A, Papanastasiou P, Georgiou G E. Life time performance degradation of an anion exchange membrane electrolyzer under dynamic operation in a photovoltaic-powered nanogrid environment[J]. Renewable Energy, 2026(265): 125615.

[21] 张柯, 文中, 陈冰. 考虑功率波动与启停寿命的风光制氢优化策略[J]. 能源化工, 2025, 46(6): 1-7.
Zhang Ke, Wen Zhong, Chen Bing. Optimization of off-grid wind-solar hydrogen production considering start - stop lifespan and power fluctuation coupling[J]. Energy Chemical Industry, 2025, 46(6): 1-7.

[22] 罗必雄, 孙纯军, 陈剑光, 等. 计及电解槽运行特性的离网型风光储联合制氢系统优化容量配置[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-11 [2026-01-26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20251231.1433.009>.
Luo Bixiong, Sun Chunjun, Chen Jianguang, et al. Capacity optimization in off-grid wind-solar-storage integrated hydrogen production system considering operation characteristics of electrolyzer[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-11 [2026-01-26]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20251231.1433.009>.

[23] 邹鹏, 肖泽文, 袁开寿, 等. 多电解槽混联制氢系统及控制切换策略[J]. 机械工程师, 2025(10): 1-5.
Zou Peng, Xiao Zewen, Yuan Kaishou, et al. Multi - electrolyzer hybrid hydrogen production system and control switching strategy[J]. Mechanical Engineer, 2025(10): 1-5.

[24] 杨玉, 娄清辉, 石祥建, 等. 离网型新能源混联制氢协同控制策略研究[J]. 分布式能源, 2025, 10(4): 73-80.
Yang Yu, Lou Qinghui, Shi Xiangjian, et al. Research on the cooperative control strategy of off-grid new energy hybrid hydrogen production[J]. Distributed Energy, 2025, 10(4): 73-80.

[25] Varela C, Mostafa M, Zondervan E. Modeling alkaline water electrolysis for power-to-x applications: a scheduling approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(14): 9303-9313.

[26] 郭小龙, 亢朋朋, 田晨, 等. 考虑碱性电解槽状态转换的风电制—储氢系统优化调度[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 60-68.
Guo Xiaolong, Kang Pengpeng, Tian Chen, et al. Optimal scheduling of hydrogen production-storage system from wind power considering state transition of alkaline electrolyzer[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 60-68.

[27] Wang Y, Pang Y, Xu H, et al. PEM fuel cell and electrolysis cell technologies and hydrogen infrastructure development - a review[J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15(6): 288-328.

[28] 闫兆乾, 罗蒙蒙, 郝功涛, 等. 风光制氢混合电解槽双层优化调度策略[J]. 热力发电, 2026, 55(3): 119-129.
Yan Zhaoqian, Luo Mengmeng, Hao Gongtao, et al. Double-layer optimal scheduling strategy for wind - solar hydrogen production hybrid electrolyzers[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 119-129.

[29] Wang Kang, Yuan Tiejiang, Teng Yue. Operation optimization and configuration of a novel wide - power hybrid electrolytic water - to - hydrogen system in response to fluctuations in renewable energy sources[J]. Applied Energy, 2026(406): 127296.

[30] 谢金勇, 张逸, 张亚超, 等. 考虑混合电解槽协同运行的园区级氢能系统优化配置方法[J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3256-3265.
Xie Jinyong, Zhang Yi, Zhang Yachao, et al. Optimized configuration method of park - level hydrogen energy system for coordinated operation of hybrid electrolyzers[J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3256-3265.

[31] 姚明豪, 刘佳, 唐早, 等. 波动工况下考虑功率分配机制的风电制氢系统容量优化配置[J/OL]. 电力系统自动化: 1-16 [2026-01-26]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260317.0945.004>.
Yao Minghao, Liu Jia, Tang Zao, et al. Capacity optimal configuration of wind power hydrogen production system considering power allocation mechanism under fluctuating operation conditions[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-16 [2026-01-26]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260317.0945.004>.

[32] 王芊瑞, 阮景昕, 王跃社. 考虑风、光出力时空相关性的电—氢协同储能系统经济性优化调度研究[J]. 综合智慧能源, 2025, 47(12): 34-45.
Wang Qianrui, Ruan Jingxin, Wang Yueshe. Economic optimal scheduling of electricity - hydrogen coordinated energy storage system considering spatiotemporal correlation of wind and photovoltaic power outputs[J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(12): 34-45.

[33] Zhao Y, Wei Y, Zhang S, et al. Multi-objective robust optimization of integrated energy system with hydrogen energy storage[J]. Energies, 2024, 17(5): 1132.

[34] 李飞, 花磊, 方益成, 等. 光伏耦合制氢系统中电解槽机组协调运行策略[J]. 太阳能学报, 2026, 47(1): 28-34.
Li Fei, Hua Lei, Fang Yicheng, et al. Coordinated operation strategies for electrolyzer units in off - grid photovoltaic coupled hydrogen production system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2026, 47(1): 28-34.

[35] 梁丹曦, 杨梦缘, 宗正, 等. 计及电解槽寿命的风光氢一体化系统双层运行优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(16): 6176-6189.
Liang Danxi, Yang Mengyuan, Zong Zheng, et al. Double - layer optimization method for integrated wind - solar - hydrogen system considering electrolyzer lifespan[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(16): 6176-6189.

[36] 崔先迺, 曾伟杰, 崔泽政, 等. 考虑氢负荷需求的风光氢热联产型虚拟电厂日前调度优化运行策略[J]. 湖南电力, 2024, 44(6): 1-9.
Cui Xianyi, Zeng Weijie, Cui Zezheng, et al. Day-head scheduling optimal operation strategy for wind - solar - hydrogen - heat cogeneration virtual power plants considering Hydrogen load requirements[J]. Hunan Electric Power, 2024, 44(6): 1-9.

[37] 张航, 范馥麟, 宋凯, 等. 计及混合电解槽安全约束的微电网日前调度[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 62-71.

- radiation and safety of radiation sources[S].
- [13] 王忠立, 胡新梅. 真空断路器生产伴生 X 射线危害干预前后比较[J]. 职业与健康, 2016, 32(18): 2456-2459.
Wang Zhongli, Hu Xinmei. Occupational hazard of X-ray associated with vacuum circuit breaker manufacturing before and after intervention[J]. Occupation and Health, 2016, 32(18): 2456-2459.
- [14] 杨保初, 赵文正, 吴美羔, 等. 高压放电对其试验人员的外周血象及遗传学效应的研究[J]. 高电压技术, 1988, 14(2): 44-48.
Yang Baochu, Zhao Wenzheng, Wu Meigao, et al. Study on peripheral blood picture and genetic effects of high voltage discharge on test personnel[J]. High Voltage Engineering, 1988, 14(2): 44-48.
- [15] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation; UNSCEAR 2008 report to the general assembly with scientific annexes[R]. 2010-08-18.
- [16] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: volume 100 D: radiation[R]. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2012-11-14.
- [17] 路建超, 王忠立, 杨海峰, 等. 真空灭弧室伴生 X 射线健康危害研究[J]. 中国辐射卫生, 2015, 24(5): 453-456.
Lu Jianchao, Wang Zhongli, Yang Haifeng, et al. Research on health hazards associated with vacuum arcing chamber X-ray[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2015, 24(5): 453-456.
- [18] 杨保初. 空气间隙放电产生的 X 射线对人体的影响[J]. 高电压技术, 1985, 11(4): 59-62.
Yang Baochu. Effects of X-rays generated by air gap discharge on human body[J]. High Voltage Engineering, 1985, 11(4): 59-62.
- [19] 张良安, 苑淑渝, 张文艺, 等. 高压放电环境中 X 线照射量的水
平[J]. 高电压技术, 1988, 14(2): 31-38.
Zhang Liang'an, Yuan Shuyu, Zhang Wenyi, et al. Level of X-ray exposure in high voltage discharge environment[J]. High Voltage Engineering, 1988, 14(2): 31-38.
- [20] JJG 593—2016 个人和环境监测用 X、 γ 辐射热释光剂量测量系统检定规程[S].
JJG 593—2016 Thermoluminescence dosimetry systems used in personal and environmental monitoring for X and γ radiation[S].
- [21] Zhang P Z, Shi H T, Wang Y Z, et al. X-ray spectrum estimation of a low-impedance rod pinch diode via transmission-absorption measurement and Monte-Carlo simulation[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133(24): 243301.
- [22] 李卫国, 田 涛, 吴 军. 灭弧室内屏蔽罩上电位变化的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(9): 122-126.
Li Weiguo, Tian Tao, Wu Jun. Mechanism research of the potential changing of shielding in arc extinguish chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 122-126.
- [23] 肖慧荣, 欧阳建光, 王 晟, 等. 真空断路器真空度与电场电位关系研究[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(10): 1191-1195.
Xiao Huirong, Ouyang Jianguang, Wang Sheng, et al. Influence of shield electric potential on pressure in vacuum interrupter[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(10): 1191-1195.
- 孙 为(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事高压真空灭弧室 X 射线辐射方向的研究(E-mail: 1479246260@qq.com)。
李兴文(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压与大电流、脉冲功率与等离子体等方向的研究(通信作者)(E-mail: xwli@mail.xjtu.edu.cn)。

(上接第 69 页)

- Zhang Hang, Fan Fulin, Song Kai, et al. Day-ahead scheduling of microgrid considering safety constraints of hybrid electrolyzers[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 62-71.
- [38] 梁富光, 马忠强. 独立海岛零碳微网多时间尺度优化运行方法[J]. 分布式能源, 2026, 11(1): 94-102.
Liang Fuguang, Ma Zhongqiang. Multi-time scale optimal operation method of independent island zero-carbon microgrid[J]. Distributed Energy, 2026, 11(1): 94-102.
- [39] 杨 胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 68-80.
Yang Sheng, Fan Yanfang, Hou Junjie, et al. Multi-time scale optimization strategy of a renewable energy ALK-PEM combined hydrogen production system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 68-80.
- [40] 段麟奇, 贾燕冰, 黄 亮, 等. 含多类型电解槽模块的电—氢—热综合能源系统优化策略[J/OL]. 上海交通大学学报: 1-17 [2026-01-26]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.050>.
Duan Linqi, Jia Yanbing, Huang Liang, et al. Optimisation strategy for an integrated electric-hydrogen-thermal energy system with multiple types of electrolyser modules[J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University: 1-17[2026-01-26]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.050>.
- 杨梦缘(1999—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为电氢互动调控、场站能量管控(E-mail: 18010283090@163.com)。
梁丹曦(1992—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电氢系统优化与控制技术、电氢协同优化调度技术(E-mail: liangdanxi@sina.com)。
徐桂芝(1976—), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为新型储能、大规模储能技术、智慧能源(通信作者)(E-mail: xuguizhi@epri.sgcc.com.cn)。