

计及混合电解槽安全约束的微电网日前调度

张 航¹, 范馥麟¹, 宋 凯^{1,2}, 姜金海^{1,2}, 孙传禹^{1,2}, 周佳龙¹, 王正尧^{1,2}, 薛 瑞^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215104)

摘 要: 利用含电解槽的微电网将可再生能源转化为氢能进行存储, 是提高可再生能源消纳率的有效途径。为减缓可再生能源出力的波动性和随机性对微电网经济性和稳定性的影响, 需要合理分配微电网中电解槽、电化学储能、燃料电池等关键设备的运行功率。电解槽运行时, 由于隔膜无法完全隔绝氢气和氧气, 所产生的气体不可避免地出现交叉, 尤其在低负载运行时, 氢氧交叉比例显著上升。当氢氧交叉比例超过安全极限时, 可能引发爆炸等严重安全问题。因此, 微电网功率分配中需要限制电解槽的运行功率下限。现有研究多采用恒定的电解槽功率下限。然而, 由于电解槽的氢氧交叉比例随功率变化, 且不同时段微电网运行工况差异显著, 恒定电解槽功率下限的调度方法存在无法有效避免氢氧交叉比例越限和限制电解槽调节能力等潜在问题。此外, 微电网中常配置碱性电解槽和质子交换膜电解槽, 两种电解槽氢氧交叉比例随功率变化的特性存在显著差异, 分别设定其功率下限将进一步增加调度复杂性。为解决上述问题, 分析碱性和质子交换膜电解槽的运行特性, 建立电解槽动态安全约束, 并提出了考虑混合电解槽动态安全约束的光-氢-储微电网调度方法。仿真结果表明, 与传统调度方法相比, 所提方法能够有效保障电解槽安全, 为含氢储能微电网优化调度提供了新的思路。

关键词: 微电网; 电解槽; 氢氧交叉; 日前调度

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2025)03-0062-10

Day-ahead scheduling of microgrid considering safety constraints of hybrid electrolyzers

ZHANG Hang¹, FAN Fulin¹, SONG Kai^{1,2}, JIANG Jinhai^{1,2}, SUN Chuanyu^{1,2}, ZHOU Jialong¹,
WANG Zhengyao^{1,2}, XUE Rui^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Suzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Suzhou 215104, China)

Abstract: Equipping microgrids with electrolyzers which convert renewable energy sources (RESs) into hydrogen for storage is an efficient approach to enhancing RES consumptions. This requires rational power allocation among controllable devices, such as electrolyzers, electrochemical energy storage systems and fuel cells, within microgrids so as to mitigate the impacts of RES fluctuations on system economics and stability as well as equipment safety. Since the membrane of electrolyzers cannot completely separate the production of hydrogen and oxygen, the proportion of gas crossover will accumulate, especially during low-load operation, and might eventually exceed the maximum allowable limit and cause explosion. Therefore, the lower operating limits of electrolyzers must be taken into account to allocate power between electrolyzers and other components within microgrids. Constant lower power limits are usually specified for electrolyzers to ensure their safe operation. However, the use of constant lower limits for electrolyzers has certain limitations since the operating conditions of microgrids together with electrolyzers dynamically change over time. A constant lower limit would be too conservative to exploit the ability of an electrolyser to absorb RESs, and sometimes may fail to prevent excessive crossover when an electrolyser operates at low loads for long time. In addition, microgrids typically incorporate both alkaline electrolyzers (AELs) and proton exchange membrane (PEM) electrolyzers, which exhibit distinct gas crossover characteristics. This further increases the

收稿日期: 2024-12-27; 策划编辑: 白娅娜; 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.BB24122701

基金项目: 黑龙江省重点研发计划资助项目 (2024ZXJ03C06)

作者简介: 张 航 (1997—), 男, 贵州安顺人, 博士研究生。E-mail: zhpostg@163.com

通讯作者: 宋 凯 (1982—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 博士。E-mail: kaisong@hit.edu.cn

引用格式: 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.

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.



complexity of microgrid scheduling due to the fact that lower power limits must be set for each electrolyser type separately. To address these challenges, this paper first establishes dynamic safety constraints for AEL and PEM electrolysers based on a comprehensive analysis of their operational characteristics. Then, a microgrid scheduling method is proposed to maximise the overall benefits from hydrogen production and electricity price arbitrage by optimising power allocation to a photovoltaic plant, battery energy storage system, fuel cell, AEL and PEM electrolysers subject to the safety constraints. Simulation results demonstrate that, compared with traditional scheduling methods that adopt constant lower limits for electrolysers, the proposed approach effectively ensures dynamic safety of electrolysers in terms of gas crossover, providing a novel framework for the scheduling of hydrogen-based microgrids.

Key words: microgrid; electrolyser; gas crossover; day-ahead scheduling

0 引 言

风电、光伏等可再生能源是传统化石能源的理想替代品，对促进“双碳”目标的实现有着重要意义。然而，可再生能源出力具有间歇性和波动性，直接并网会降低电网频率和电压稳定性，增大电网运行难度。微电网通过区域能源调度和配备储能系统，有助于实现可再生能源的高效利用与波动平抑，显著提升其消纳率^[1]。然而，传统电化学储能技术电力存储成本较高^[2]，且容量衰减快^[3]，无法适用于大规模可再生能源并网应用。与之相比，基于可再生能源电解水制氢的氢储能可以实现电力大规模、长周期、跨季节存储，是促进风光等可再生能源大规模综合利用的优选方案之一。因此，氢能在微电网中的应用得到了广泛的关注。

由于可再生能源出力的间歇性和波动性，高效能量管理与日前调度策略对提高微电网运行效率和经济性至关重要。现有文献主要从经济性、稳定性、耐久性、能源利用率等多个角度对含氢储能微电网调度进行了研究。经济性方面，文献[4]考虑光伏出力、电价、用电和用氢需求的波动性，最大化微电网的售电和售氢量，以实现利润最大化。文献[5]通过焓分析计算设备运行成本，使系统成本降低了6.13%。稳定性方面，文献[6]提出考虑频率安全约束的日前优化调度模型及求解方法，有效降低频率变化率和最大频率偏差。文献[7]利用权重调节模型预测控制对风-光-氢-储系统进行在线功率调控，提高了系统灵活性和运行可靠性。耐久性方面，文献[8]提出考虑燃料电池变工况效率特性的多模块输出功率协同优化策略和燃料电池多模块工作协同策略，提升了燃料电池各模块的使用寿命。能源利用率方面，文献[9]利用随机优化算法实现微电网功率最优分配，解决能量供需之间的不平衡问题，从而提高能量利用率。

含氢储能微电网的日前调度问题通常建模为混合整数线性规划 (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 模型，并调用商业求解器进行求解。文献[10]利用 MILP 求解多微电网系统中电能和氢能的

调度问题，提升系统利用效率。部分文献考虑含氢储能微电网设备的非线性运行特性，将含氢储能微电网的日前调度问题建模为混合整数非线性规划 (Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP) 问题，通过线性化将其转化为 MILP 问题进行求解。文献[11]利用大 M 法对氢储能站的非线性出氢约束进行线性化，求解共享氢储能的日前调度经济优化问题。文献[12]利用分支定界法对电解槽产氢流量与耗电功率的非线性关系进行处理，求解甲烷化运行的电解水制氢系统日前调度问题。

上述文献对含氢储能的微电网日前调度进行了较为完整的研究，但是它们忽略了功率分配时电解槽的安全性。由于电解槽隔膜无法完全隔绝阴阳极产生的气体，电解槽产生的气体存在交叉。当气体交叉含量达到一定比例（通常为 4%^[13]），可能会引发爆炸事故。电解槽中的气体交叉比例通常随着电流密度的减小而增大^[14]，为了保证电解槽的安全，对微电网进行功率调度时需要对电解槽功率或电流进行限制。上述文献通常采用给定恒定电解槽功率或电流下限的方法确保电解槽安全。然而，给定的恒定功率下限过大时，微电网无法充分利用电解槽的响应调节能力，系统收益较低。给定的恒定功率下限过小时，电解槽安全无法得到保证。此外，当微电网同时含有质子交换膜 (Proton Exchange Membrane, PEM) 和碱性 (Alkaline ElectroLysis, AEL) 电解槽时，由于 2 种电解槽在相同功率下的氢氧交叉比例不同，因此需给定不同的恒定功率下限。选取合适的恒定功率下限，保证 PEM 和 AEL 电解槽运行安全的同时，充分利用电解槽的响应调节能力是十分困难的。

为解决该问题，笔者利用电解槽的传质特性建立电解槽的氢氧交叉比例安全约束，并提出了一种计及混合电解槽动态安全约束的微电网日前调度方法，保证微电网调度中电解槽的安全。所建立的电解槽动态安全约束具有强非线性，本文利用 McCormick 包络对其进行线性化，将微电网安全调度 MINLP 模型转换为 MILP 模型，以调用商业求解

器直接求解。以光伏为例,利用所提方法对光-氢-储微电网进行日前调度,并与传统方法进行了对比。

1 考虑电解槽动态安全约束的微电网日前调度

1.1 光-氢-储微电网系统结构

光-氢-储微电网系统结构如图 1 所示,其中光伏系统为微电网供电,部分电量用于微电网用电负荷供电,其余部分按照微电网收益最大化分配给电化学储能、电解槽或者向上级电网售电。电解槽通过电解水产生氢气存储在储氢罐中,并以每天 1 次的频率将所存储的氢气售出。当微电网电力不足时,利用储氢罐中的氢气通过燃料电池发电或者电化学储能放电为系统供电。

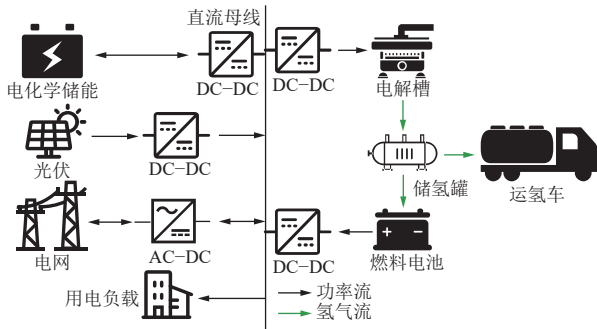
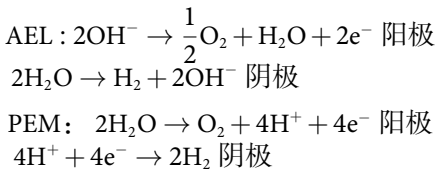


图 1 光-氢-储微电网系统结构

Fig. 1 Schematic of photovoltaic-hydrogen-storage microgrid.

1.2 电解槽动态安全约束

目前商业化的电解槽主要包括 AEL 电解槽和 PEM 电解槽。根据电解质的不同,电解槽制氢的原理可表示为



由于电解槽的隔膜无法将阴阳极所产生的氢气和氧气完全隔绝,电解槽产生的气体存在交叉。交叉比例超过安全极限(通常为 4%,工程中常以安全极限的 50%,即 2%,作为限制条件^[14])可能会导致爆炸事故。由于氢气在电解质的溶解度高于氧气,同时电解槽产生的氢气是氧气的 2 倍^[15],因此氧气中氢气的交叉比例通常高于氢气中氧气的比例。因此,通常选取氧中氢交叉比例(Hydrogen To Oxygen, HTO)为控制对象。同时,气液分离器中的 HTO 通常是电解槽中最高的,因此常被作为建模对象。气液分离器中的 HTO 定义为

$$\varphi_{\text{HTO}}(t) = \frac{N^{\text{H}_2}(t)}{N^{\text{O}_2}(t)} \quad (1)$$

其中, t 为时间; N^{H_2} 和 N^{O_2} 分别为气液分离器中氢气和氧气的摩尔数。氧气的摩尔数由其摩尔流速 n^{O_2} 决定,可以由法拉第定律进行计算:

$$n^{\text{O}_2}(t) = \frac{I(t)}{2F} \quad (2)$$

其中, I 为电解槽电解电流; F 为法拉第常数。而氢气交叉的摩尔流速将在 2.2.1 和 2.2.2 节中进行介绍。

1.2.1 碱性电解槽

AEL 电解槽的氢气交叉主要途径包括扩散、渗透以及电解质循环^[16],即:

$$n_{\text{AEL}}^{\text{im}}(t) = n_{\text{AEL}}^{\text{diff}}(t) + n_{\text{AEL}}^{\text{conv}}(t) + n_{\text{AEL}}^{\text{lye}}(t) \quad (3)$$

其中, $n_{\text{AEL}}^{\text{im}}$ 为 AEL 电解槽阳极电池中的总氢气交叉摩尔流速; $n_{\text{AEL}}^{\text{diff}}$ 、 $n_{\text{AEL}}^{\text{conv}}$ 和 $n_{\text{AEL}}^{\text{lye}}$ 分别为 AEL 电解槽中由扩散、渗透和电解质循环引起的阳极电池中氢气交叉摩尔流速。扩散引起的氢气交叉摩尔流速可以由 Fick 定律进行计算^[17]:

$$n_{\text{AEL}}^{\text{diff}}(t) = D_{\text{AEL}}^{\text{diff}} \frac{\Delta c_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t)}{\mu_{\text{AEL}}} \quad (4)$$

其中, $D_{\text{AEL}}^{\text{diff}}$ 为 AEL 电解槽中氢气的有效扩散系数; μ_{AEL} 为 AEL 电解槽隔膜的厚度; $\Delta c_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}$ 为 AEL 电解槽阴阳极氢气浓度的差值。由于电解槽中氢气产生于阴极,阳极的氢气浓度相比较小(通常低于阳极的 1%^[17]),因此氢气的浓度差可以用阴极电解槽中氢气的浓度近似。根据 Henry 定律^[18],溶解在液体中的气体浓度与气体分压成正比:

$$\Delta c_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t) \approx S_{\text{AEL}}^{\text{H}_2} p_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t) \quad (5)$$

式中: $S_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}$ 为氢气在 AEL 电解槽电解质中的溶解度; $p_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}$ 为 AEL 电解槽氢气压强。

由渗透引起的氢气交叉摩尔流速可以由 Darcy 定律^[19]进行计算:

$$n_{\text{AEL}}^{\text{conv}}(t) = \frac{K_{\text{AEL}}^{\text{mem}}}{\zeta_{\text{AEL}}} \Delta c_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t) \frac{\Delta p_{\text{AEL}}(t)}{\mu_{\text{AEL}}} \quad (6)$$

式中: $K_{\text{AEL}}^{\text{mem}}$ 为 AEL 电解槽隔膜的渗透率; Δp_{AEL} 为 AEL 电解槽阴阳极的氢气压差; ζ_{AEL} 为 AEL 电解槽电解质的动态黏度。

由电解质循环带来的氢气交叉摩尔流速与电解质流速有关^[20]:

$$n_{\text{AEL}}^{\text{lye}}(t) = \frac{S_{\text{AEL}}^{\text{H}_2} p_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t) v_{\text{lye}}(t)}{4} \quad (7)$$

其中, v_{lye} 为电解质流速。通过式 (3)—式 (7) 可以得出电解槽阳极电池中的氢气交叉摩尔流速。

由式 (2) 可知随着电解槽电流的下降,其氧气流速呈线性减小。而与之相比,由阴极交叉到阳极的氢气摩尔流速(式 (3)—式 (7)) 几乎没有受到影

响。这即为电解槽的氢氧交叉比例随功率降低而升高的主要原因。

阳极电池中的氢气随着电解质流动到气液分离器中,并在重力的作用下在分离器中积累。根据气液分离器中氢气的摩尔数守恒可得:

$$\frac{dN_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t)}{dt} = n_{\text{AEL}}^{\text{in}}(t) - n_{\text{AEL}}^{\text{out}}(t) \quad (8)$$

其中, $N_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}$ 为 AEL 电解槽气液分离器中氢气的摩尔数; $n_{\text{AEL}}^{\text{out}}$ 为流出 AEL 电解槽气液分离器的氢气摩尔流速,与分离器气体体积和氧气摩尔流速相关:

$$n_{\text{AEL}}^{\text{out}}(t) = \frac{N_{\text{H}_2}^{\text{H}_2}(t)}{\tau(t)} \quad (9)$$

$$\tau(t) = \frac{N_{\text{O}_2}^{\text{O}_2}(t)}{n_{\text{AEL}}^{\text{O}_2}(t)} = \frac{p_{\text{AEL}}^{\text{O}_2}(t) V_{\text{sep}}}{RT(t) n_{\text{AEL}}^{\text{O}_2}(t)} \quad (10)$$

式中: τ 为氢气在气液分离器中积累的时间常数; $p_{\text{AEL}}^{\text{O}_2}$ 为 AEL 电解槽阳极气液分离器氧气压强; V_{sep} 为气液分离器气体体积; R 为理想气体常数; T 为气液分离器温度。

对 AEL 电解槽进行功率分配时,氢气交叉模型(式(3)—式(7))和累积模型(式(8)—式(10))中,除了电流以外,其余变量均为已知值,因此,可以将 AEL 电解槽的 HTO 模型表示为

$$\frac{d\varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t)}{dt} = a_{\text{AEL}} + b_{\text{AEL}} \varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t) I_{\text{AEL}}(t) \quad (11)$$

其中, $\varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}$ 为 AEL 电解槽的氧中氢交叉比例; I_{AEL} 为 AEL 电解槽电流; a_{AEL} 和 b_{AEL} 为 AEL 电解槽的氢氧交叉特性参数,可由模型(式(3)—式(10))结合电解槽具体参数得出。

微电网调度主要是对设备功率进行优化分配,因此需要结合 AEL 电解槽电流-功率特性和电流-氢氧交叉模型(式(11))建立 AEL 电解槽的功率-氢氧交叉模型。AEL 电解槽的电流-功率特性可以表示为

$$P_{\text{AEL}}(t) = U_{\text{AEL}}(t) I_{\text{AEL}}(t) \quad (12)$$

$$U_{\text{AEL}}(t) = U_{\text{AEL}}^{\text{rev}} + (r_{1,\text{AEL}} + r_{2,\text{AEL}} T_{\text{AEL}}) I_{\text{AEL}}(t) + s_{\text{AEL}} \text{Log} \left[\left(k_{1,\text{AEL}} + \frac{k_{2,\text{AEL}}}{T_{\text{AEL}}} + \frac{k_{3,\text{AEL}}}{T_{\text{AEL}}^2} \right) I_{\text{AEL}} + 1 \right] \quad (13)$$

其中, P_{AEL} 和 U_{AEL} 分别为 AEL 电解槽的功率和电压; $U_{\text{AEL}}^{\text{rev}}$ 为 AEL 电解槽可逆电压; $r_{1,\text{AEL}}$ 、 $r_{2,\text{AEL}}$ 、 s_{AEL} 、 $k_{1,\text{AEL}}$ 、 $k_{2,\text{AEL}}$ 和 $k_{3,\text{AEL}}$ 分别为 AEL 电解槽极化曲线经验参数,可以由电流-电压曲线得出。

结合式(11)—式(13)可以得出 AEL 电解槽的功率-氢氧交叉比例模型为

$$\frac{d\varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t)}{dt} = \alpha_{\text{AEL}} + \beta_{\text{AEL}} \varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t) P_{\text{AEL}}(t) \quad (14)$$

式中: α_{AEL} 和 β_{AEL} 为氢氧交叉特性参数,可以由式(12)和式(13)计算得出。

根据调度步长对式(14)进行离散化,可以得到适应于微电网调度的 AEL 电解槽动态安全约束:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t+1) &= (\alpha_{\text{AEL}} + \beta_{\text{AEL}} \varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t) P_{\text{AEL}}(t)) \Delta t + \\ &\varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t) \leq \varphi_{\text{lim}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: Δt 为调度步长; φ_{lim} 为电解槽氢氧交叉比例安全上限,通常取 2%。

1.2.2 质子交换膜电解槽

PEM 电解槽的气体交叉机制与 AEL 电解槽类似,区别在于 PEM 电解槽的气体交叉来源仅包括渗透和扩散,没有电解质循环带来的氢气交叉^[21]:

$$n_{\text{PEM}}^{\text{in}}(t) = n_{\text{PEM}}^{\text{diff}}(t) + n_{\text{PEM}}^{\text{conv}}(t) \quad (16)$$

其中, $n_{\text{PEM}}^{\text{in}}$ 为 PEM 电解槽阳极电池氢气交叉总摩尔流速; $n_{\text{PEM}}^{\text{diff}}$ 和 $n_{\text{PEM}}^{\text{conv}}$ 分别为 PEM 电解槽中由渗透和扩散引起的氢气交叉摩尔流速,与 AEL 电解槽类似,可分别通过 Fick 定律和 Darcy 定律进行计算,但由于电解槽结构、材料等区别其具体参数与 AEL 电解槽不同。

同样地,基于气液分离器中氢气的摩尔数守恒和电解槽电流-功率特性也可以得出 PEM 电解槽的功率-氢氧交叉比例模型为

$$\frac{d\varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t)}{dt} = \alpha_{\text{PEM}} + \beta_{\text{PEM}} \varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t) P_{\text{PEM}}(t) \quad (17)$$

式中: $\varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}$ 为 PEM 电解槽的氧中氢交叉比例; P_{PEM} 为 PEM 电解槽功率; α_{PEM} 和 β_{PEM} 为 PEM 电解槽的氢氧交叉特性参数。

根据调度步长进行离散化后可以得出适用于微电网调度的 PEM 电解槽动态安全约束:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t+1) &= (\alpha_{\text{PEM}} + \beta_{\text{PEM}} \varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t) P_{\text{PEM}}(t)) \Delta t + \\ &\varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t) \leq \varphi_{\text{lim}} \end{aligned} \quad (18)$$

1.2.3 电解槽动态安全约束线性化

电解槽的动态安全约束(15)和(18)涉及氢氧交叉比例 $\varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t)$ 、 $\varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t)$ 和电解槽功率 $P_{\text{AEL}}(t)$ 、 $P_{\text{PEM}}(t)$ 的乘积,具有强非线性,求解困难,因此在对其进行求解时需要对其线性凸松弛。对于该类问题,可以将 $\varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t) P_{\text{AEL}}(t)$ 和 $\varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t) P_{\text{PEM}}(t)$ 分别定义为新变量 $\phi_{\text{AEL}}(t)$ 和 $\phi_{\text{PEM}}(t)$,并用 McCormick 包络^[22] 对其范围进行限制:

$$\phi_{\text{AEL}}(t) \geq 0 \quad (19)$$

$$\phi_{\text{AEL}}(t) \geq \varphi_{\text{lim}} P_{\text{AEL}}(t) + \varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t) P_{\text{AEL}}^{\text{max}} - \varphi_{\text{lim}} P_{\text{AEL}}^{\text{max}} \quad (20)$$

$$\phi_{\text{AEL}}(t) \leq \varphi_{\text{lim}} P_{\text{AEL}}(t) \quad (21)$$

$$\phi_{\text{AEL}}(t) \leq \varphi_{\text{HTO}}^{\text{AEL}}(t) P_{\text{AEL}}^{\text{max}} \quad (22)$$

$$\phi_{\text{PEM}}(t) \geq 0 \quad (23)$$

$$\phi_{\text{PEM}}(t) \geq \varphi_{\text{lim}} P_{\text{PEM}}(t) + \varphi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t) P_{\text{PEM}}^{\text{max}} - \varphi_{\text{lim}} P_{\text{PEM}}^{\text{max}} \quad (24)$$

$$\phi_{\text{PEM}}(t) \leq \phi_{\text{lim}} P_{\text{PEM}}(t) \quad (25)$$

$$\phi_{\text{PEM}}(t) \leq \phi_{\text{HTO}}^{\text{PEM}}(t) P_{\text{PEM}}^{\text{max}} \quad (26)$$

式中: $P_{\text{AEL}}^{\text{max}}$ 和 $P_{\text{PEM}}^{\text{max}}$ 分别为 AEL 电解槽和 PEM 电解槽的功率上限。

将电解槽的动态安全约束(式(19)—式(26))代入微电网调度模型即可保证对微电网进行功率分配时电解槽的安全运行。

1.3 光-氢-储微电网日前调度策略

微电网调度目标主要包括经济性、稳定性、耐久性和能源利用率。本文以经济性调度为例,对所提方法的有效性进行验证与阐述。

1.3.1 目标函数

含氢储能微电网收益主要由售电收益和售氢收益 2 部分组成,因此含氢储能微电网的收益可以表示为

$$W = \Delta t \left[\lambda_1 \sum_{t=1}^{t_{\text{end}}} \omega_p(t) P_{\text{grid}}(t) + \lambda_2 \sum_{t=1}^{t_{\text{end}}} \omega_{\text{H}_2}(t) n_{\text{sto}}^{\text{H}_2}(t) \right] \quad (27)$$

式中: W 为微电网日收益; P_{grid} 为微电网与主电网的交互电量,为正表示微电网向主电网售电,为负表示向主电网购电; ω_p 和 ω_{H_2} 分别为售电和售氢的单价; λ_1 和 λ_2 为权重系数; t_{end} 为待求解变量的维数,与调度步长有关:

$$t_{\text{end}} = \frac{86\,400}{\Delta t} \quad (28)$$

式中: $n_{\text{sto}}^{\text{H}_2}$ 为微电网产氢量,等于电解槽产氢量减去燃料电池耗氢量:

$$n_{\text{sto}}^{\text{H}_2}(t) = n_{\text{PEM}}^{\text{H}_2}(t) + n_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t) - n_{\text{fuel}}^{\text{H}_2}(t) \quad (29)$$

其中, $n_{\text{PEM}}^{\text{H}_2}$ 和 $n_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}$ 分别为 PEM 电解槽和 AEL 电解槽的产氢量; $n_{\text{fuel}}^{\text{H}_2}$ 为燃料电池耗氢量。电解槽的产氢量和电解槽功率呈二次函数关系^[23]:

$$n_{\text{PEM}}^{\text{H}_2}(t) = h_{1,\text{PEM}} + h_{2,\text{PEM}} P_{\text{PEM}}(t) + h_{3,\text{PEM}} P_{\text{PEM}}^2(t) \quad (30)$$

$$n_{\text{AEL}}^{\text{H}_2}(t) = h_{1,\text{AEL}} + h_{2,\text{AEL}} P_{\text{AEL}}(t) + h_{3,\text{AEL}} P_{\text{AEL}}^2(t) \quad (31)$$

式中: $h_{1,\text{PEM}}$ 、 $h_{2,\text{PEM}}$ 和 $h_{3,\text{PEM}}$ 为 PEM 电解槽产氢特性常数; $h_{1,\text{AEL}}$ 、 $h_{2,\text{AEL}}$ 和 $h_{3,\text{AEL}}$ 为 AEL 电解槽产氢特性常数。

1.3.2 微电网运行特性约束

除了第 2.2 节所提的电解槽动态安全约束以外,微电网调度问题还需考虑功率平衡约束和设备运行特性约束等限制条件,具体包括:

1) 功率平衡约束

微电网与主电网的交互功率等于光伏发电量和燃料电池发电量减去电解槽、负荷和电化学储能的耗电量:

$$P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{fuel}}(t) - (\delta_{\text{cha}} P_{\text{sto}}(t) / \eta_{\text{cha}} + \delta_{\text{dis}} P_{\text{sto}}(t) \eta_{\text{dis}}) - P_{\text{AEL}}(t) - P_{\text{PEM}}(t) - P_{\text{load}}(t) \quad (32)$$

式中: P_{PV} 和 P_{fuel} 分别为光伏和燃料电池功率; P_{sto} 为电化学储能充放电功率,为正表示电化学储能充电,为负表示电化学储能放电; δ_{cha} 和 δ_{dis} 分别为电化学储能的充放电效率; μ_{cha} 和 μ_{dis} 为电化学储能充放电状态的 0-1 变量; P_{load} 为微电网中负荷功率。

2) 设备功率约束

微电网各设备功率无法超过其功率限制范围,主要包括电解槽、电化学储能和燃料电池:

$$0 \leq P_{\text{AEL}}(t) \leq P_{\text{AEL}}^{\text{max}} \quad (33)$$

$$0 \leq P_{\text{PEM}}(t) \leq P_{\text{PEM}}^{\text{max}} \quad (34)$$

$$P_{\text{sto}}^{\text{min}} \leq P_{\text{sto}}(t) \leq P_{\text{sto}}^{\text{max}} \quad (35)$$

$$0 \leq P_{\text{fuel}}(t) \leq P_{\text{fuel}}^{\text{max}} \quad (36)$$

其中, $P_{\text{AEL}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{PEM}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{sto}}^{\text{max}}$ 和 $P_{\text{fuel}}^{\text{max}}$ 分别为 AEL 电解槽、PEM 电解槽、电化学储能和燃料电池的功率上限; $P_{\text{sto}}^{\text{min}}$ 为电化学储能功率下限,一般为负值,其绝对值表示电化学储能的最高放电功率。值得注意的是,本文通过引入了动态安全约束后理论上不需要再对电解槽的功率下限进行限制。但是根据电解槽 HTO 模型(式(14)和式(17)),电解槽功率为负会导致电解槽氢氧交叉比例降低,加入动态安全约束而不限制电解槽功率为正会导致求解结果出现电解槽功率为负的不合理结果。因此,本文加了式(33)和式(34)限制电解槽的功率不为负。

3) 设备爬坡速率限制

对微电网中设备进行功率调控时,受设备耐久性和材料特性等因素的影响,单位时间内设备功率的变化值(即爬坡速率)受到限制。

$$-P_{\text{AEL}}^{\text{ramp}} \Delta t \leq P_{\text{AEL}}(t+1) - P_{\text{AEL}}(t) \leq P_{\text{AEL}}^{\text{ramp}} \Delta t \quad (37)$$

$$-P_{\text{PEM}}^{\text{ramp}} \Delta t \leq P_{\text{PEM}}(t+1) - P_{\text{PEM}}(t) \leq P_{\text{PEM}}^{\text{ramp}} \Delta t \quad (38)$$

$$-P_{\text{sto}}^{\text{ramp}} \Delta t \leq P_{\text{sto}}(t+1) - P_{\text{sto}}(t) \leq P_{\text{sto}}^{\text{ramp}} \Delta t \quad (39)$$

$$-P_{\text{fuel}}^{\text{ramp}} \Delta t \leq P_{\text{fuel}}(t+1) - P_{\text{fuel}}(t) \leq P_{\text{fuel}}^{\text{ramp}} \Delta t \quad (40)$$

式中: $P_{\text{AEL}}^{\text{ramp}}$ 、 $P_{\text{PEM}}^{\text{ramp}}$ 、 $P_{\text{sto}}^{\text{ramp}}$ 、 $P_{\text{fuel}}^{\text{ramp}}$ 分别为 AEL 电解槽、PEM 电解槽、电化学储能和燃料电池单位时间内功率变化上限,即最大爬坡速率。

4) 储氢罐氢储量约束

储氢罐内的氢气总量不能超过其最大容量。同时,为满足微电网系统的用氢需求,一天内总的产氢量需要大于用氢需求量,即:

$$0 \leq M_{\text{sto},0}^{\text{H}_2} + \Delta t \sum_{t=1}^s n_{\text{sto}}^{\text{H}_2}(t) \leq M_{\text{sto}}^{\text{max}} \quad (41)$$

$$M_{\text{sto},0}^{\text{H}_2} + \sum_{t=1}^{t_{\text{end}}} n_{\text{sto}}^{\text{H}_2}(t) \Delta t \geq M_{\text{dem}}^{\text{H}_2} \quad (42)$$

式中: $M_{\text{sto}}^{\text{max}}$ 为储氢罐最大容量; $M_{\text{sto},0}^{\text{H}_2}$ 为调度初始时刻储氢罐内储氢量; $M_{\text{dem}}^{\text{H}_2}$ 为用氢需求量。

5) 电化学储能容量限制

与储氢罐限制相同, 电化学储能存储能量不能超过其最大容量。

$$0 \leq Q_{\text{sto},0} + \Delta t \sum_{t=1}^s P_{\text{sto}}(t) \leq Q_{\text{sto}}^{\text{max}} \quad (43)$$

式中: $Q_{\text{sto},0}$ 和 $Q_{\text{sto}}^{\text{max}}$ 分别为电化学储能的初始存储能量和最大存储容量。

6) 电化学储能充放电约束

电化学储能设备不能同时处于充电和放电状态, 表示为

$$\delta_{\text{cha}}(t) + \delta_{\text{dis}}(t) \leq 1 \quad (44)$$

综上, 考虑电解槽动态安全约束的日前优化调度问题可以表示为

$$\begin{aligned} & \arg \max W \\ & \{P_{\text{AEL}}(t), P_{\text{PEM}}(t), P_{\text{fuel}}(t), P_{\text{sto}}(t)\} \\ & \text{s.t. (19) - (26), (28) - (44)} \end{aligned} \quad (45)$$

该模型为 MILP 问题, 通过调用商业求解器即可进行求解。

2 算例分析

2.1 微电网参数

为验证所提调度方法有效性, 本章以新疆某光-氢-储微电网为例, 在 Wolfram Mathematica 14.0 中构建日前调度模型, 通过调用 Gurobi 11.0.3 进行求解, 步长为 15 min, 求解时间约 35 s, 求解所使用的设备参数为 Intel(R) Core(TM) i5-14 400 处理器和 16.0 GB RAM。

光伏出力、负载功率、电价和氢价曲线如图 2 所示。根据光伏出力, 在满足负载需求的前提下, 通过求解调度优化问题对电解槽、燃料电池和电化学储能的功率进行分配, 以实现微电网收益最大化。微电网各设备参数及调度策略参数见表 1。

2.2 结果分析

2.2.1 与传统方法结果对比

图 3 比较了所提出的电解槽动态约束调度方法和传统给定电解槽负载下限调度方法得到的光-氢-储微电网日前功率分配结果。两种方法取得的微电网调度结果整体相似, 但在电解槽和燃料电池功率上存在显著差异 (图 3a 和图 3d)。

如图 3a 所示, 在负载较高时, AEL 和 PEM 电解槽的功率在两种方法下均趋于一致。这是因为 AEL 和 PEM 电解槽的产氢量-功率曲线式 (30) 和式

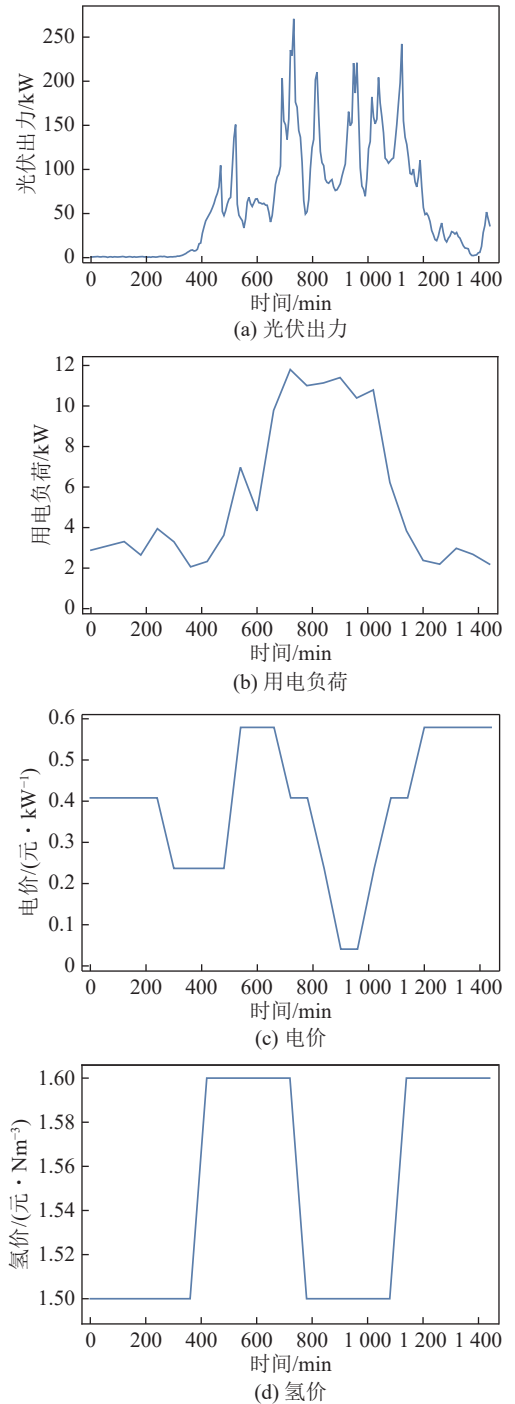


图 2 光-氢-储微电网调度输入曲线

Fig. 2 Input profiles of photovoltaic-hydrogen-storage microgrid.

(31) 为凹函数, 且两者的氢产量曲线系数差异较小 (表 1), 当总功率固定时, 2 种电解槽功率均分可实现最大产氢量。在低负载情况下, 2 种方法的电解槽功率调度结果存在显著差异, 主要原因在于限制氢氧交叉比例的方式不同, 其中传统方法通过设定电解槽功率不低于某个恒定负载下限来限制氢氧交叉比例, 以确保电解槽安全。然而, 如图 5 所示, 这种方法并未达到安全保障效果。其中, PEM 电解

表 1 光-氢-储微电网参数及日前调度策略参数

Table 1 Parameters related to photovoltaic-hydrogen-storage microgrid and day-ahead schedules.

参数	取值	参数	取值
α_{AEL}	1.46e-4	β_{AEL}	-1.455e-5
α_{PEM}	1.05e-4	β_{PEM}	-1.851e-5
HTO_{lim}	0.02	Δt	900 s
λ_1	1	λ_2	1
$h_{1,\text{PEM}}$	-9.602e-4	$h_{1,\text{AEL}}$	-9.501e-4
$h_{2,\text{PEM}}$	0.310 7	$h_{2,\text{AEL}}$	0.315 2
$h_{3,\text{PEM}}$	-0.088 7	$h_{3,\text{AEL}}$	-0.088 6
$P_{\text{AEL}}^{\text{max}}$	100 kW	$P_{\text{PEM}}^{\text{max}}$	100 kW
$P_{\text{sto}}^{\text{min}}$	-100 kW	$P_{\text{sto}}^{\text{max}}$	100 kW
$P_{\text{AEL}}^{\text{ramp}}$	50 kW/min	$P_{\text{PEM}}^{\text{ramp}}$	200 kW/min
$P_{\text{sto}}^{\text{ramp}}$	50 kW/min	$P_{\text{fuel}}^{\text{ramp}}$	100 kW/min
$P_{\text{fuel}}^{\text{max}}$	200 kW	$M_{\text{sto},0}^{\text{H}_2}$	0
$M_{\text{sto}}^{\text{max}}$	1 100 mol	$M_{\text{den}}^{\text{H}_2}$	400 mol
$\text{SOC}_{\text{sto},0}$	0	$\text{SOC}_{\text{sto}}^{\text{max}}$	100 kWh

槽隔膜具有更好的阻隔性，氢氧交叉比例较低，大部分时间内 HTO 保持在安全限值以下，但在 1 200 min 后仍然超出安全极限，说明该阶段内负载下限设定过低。

同时，如图 3(a) 所示，在 200-400 min 时间段内传统方法分配的 PEM 电解槽功率为 39kW，其 HTO 为 1.46%，这表明电解槽功率此时可以低于 39 kW 而保证 HTO 不超标；同时段内所提方法分配的 PEM 电解槽的功率低至 28 kW，而 HTO 刚好为 2%，表明 PEM 电解槽此时段最低可以在 28 kW 运行，与传统方法相比运行范围扩展了额定功率的 11%。若想让传统方法得出和所提方法一样的卡边运行结果，需要在调度前给定负载下限，然后根据调度结果对负载下限进行不断调整，但计算成本巨大。

对于 AEL 电解槽，由于其隔膜阻隔性较差一些，且氢气交叉可额外来源于电解质循环，其氢氧交叉比例通常较高。因此当 AEL 电解槽和 PEM 电解槽的给定负载下限相同时，AEL 电解槽的 HTO 将相对较高。如图 4 所示，传统方法中 AEL 电解槽的 HTO 在大部分时段内高于安全极限，而所提方法在所有时间内将 AEL 电解槽 HTO 限制在安全极限 2% 以内，保证 AEL 电解槽安全的同时，充分利用了 AEL 电解槽的调节能力。

综上，所提方法在微电网调度中保证了 AEL 电

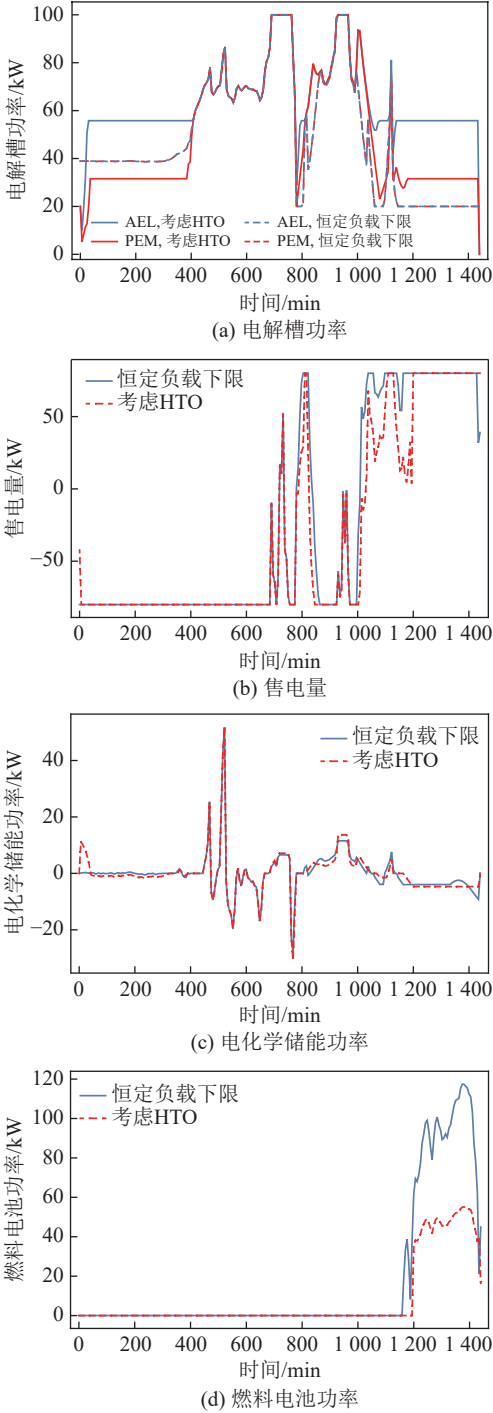


图 3 光-氢-储微电网日前调度功率分配结果

Fig. 3 Day-ahead power allocation results of photovoltaic-hydrogen-storage microgrid.

解槽和 PEM 电解槽的运行安全，同时充分利用电解槽的调节能力。而传统方法要达到同样的效果需要不断对电解槽的负载下限进行调整，甚至需要在不同时间段内给定不同的负载下限，在实际应用中难以实现。

所提方法与传统方法的功率分配结果在燃料电池上也存在一定差异。在 1 200-1 400 min 内，所提方法的燃料电池功率较高，这是因为此时电价较高

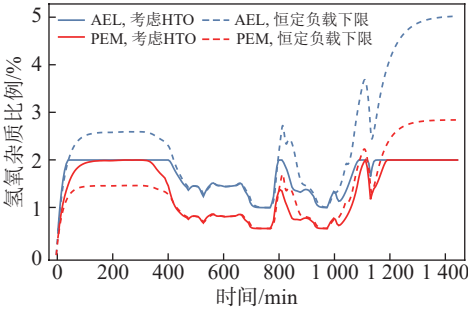


图 4 光-氢-储微电网日前调度电解槽氢氧交叉比例结果
Fig. 4 Hydrogen-to-oxygen crossover of electrolyzers in day-ahead schedules of photovoltaic-hydrogen-storage microgrid.

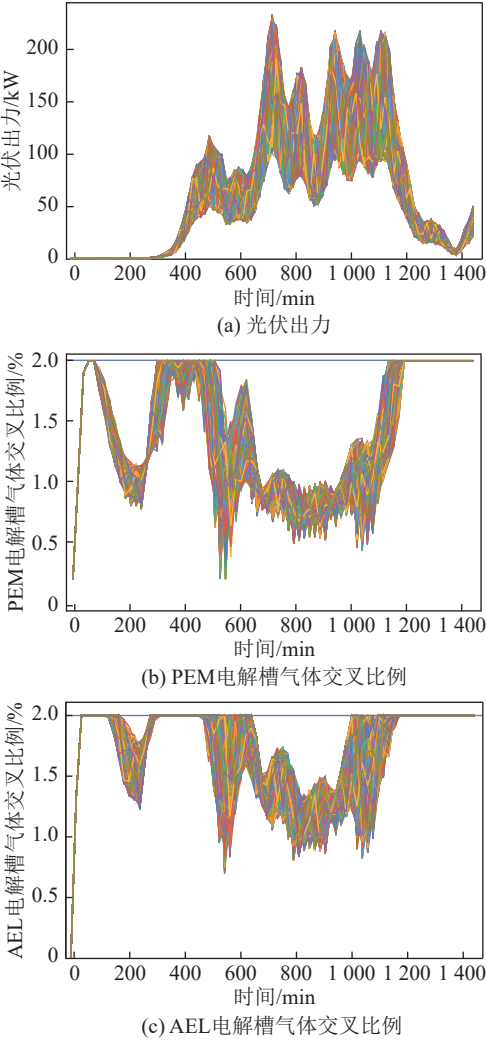


图 5 光伏出力随机场景及相应电解槽氢氧交叉比例
Fig. 5 Photovoltaic power outputs and corresponding gas crossover results of electrolyzers under stochastic scenarios.

(图 1c), 微电网向上级电网售电收益更高, 因此售电量达到最大值 (图 3b)。而此时光伏出力接近于 0, 因此这部分售电量需要由燃料电池发电提供, 同时燃料电池还需要向电解槽供电以保证其 HTO 不超标。而此时所提方法求得的电解槽功率更高 (图 3a), 因此燃料电池的功率更高。

2.2.2 鲁棒性验证

光伏出力日前预测值与实际值之间存在误差, 误差过大会导致得到的调度结果性能较差。减小光伏出力预测误差往往需要先进的气象观测仪器, 造成投资成本和数据处理成本增加, 当前大多数的光伏场站无法获取较为准确的光伏出力预测^[24]。因此, 在进行调度时需要考虑光伏预测的误差。本节以图 2a 所示的光伏出力日前预测值为基础, 考虑预测误差随机性, 生成不同的光伏出力场景, 对不同随机场景利用所提方法进行调度, 得出 PEM 和 AEL 电解槽的氢氧交叉比例, 验证本文调度方法的鲁棒性。

据文献 [25] 统计, 现有光伏预测方法的归一化均方根误差 (normalized Root Mean Square Error, E_{nRMS}) 平均值为 40%。本文以预测值的 40% 作为预测误差幅值上限, 以预测值的 140% 和 60% 为上下限进行蒙特卡洛采样, 生成 1 000 个光伏出力随机场景, 如图 5a 所示。在不同场景下, PEM 电解槽和 AEL 电解槽的氢氧交叉比例结果分别如图 5b 和图 5c 所示, 在不同的光伏出力曲线下, 电解槽的氢氧杂质比例变化也有所不同, 但所提方法均能将其限制在安全极限 2% 以下, 验证了所提方法的鲁棒性。

2.3 售氢价格影响分析

考虑到随着电制氢技术的发展, 绿氢价格将会随之降低, 本节对售氢价较低时微电网的调度进行了仿真分析。如图 6a 所示, 当氢价较低时, 传统调度方法中电解槽在大部分时间段内以最低负载运行, 燃料电池也更多地发电以向主电网售电 (图 6c)。这种运行模式虽然能在氢价较低时降低氢产量来增大微电网收益, 但如图 6b 所示, 此时 AEL 和 PEM 电解槽的氢氧交叉比例在绝大部分时间段内都超过了安全极限 2%, 危及电解槽安全。与之相比, 如图 6a 所示, 在所提方法调度下, 尽管电解槽同样在较多时间内以低负载运行, 但 AEL 和 PEM 电解槽的氢氧交叉比例均保持在 2% 以下 (图 6b), 有效保障电解槽的安全性。

3 结 论

1) 在氢价较高时, 电解槽高功率运行时间较长, 高功率运行工况下电解槽氢氧交叉比例在 2% 以下, 电解槽尚处于安全状态。但当电价变高或者光伏出力过低时电解槽需要以最低负载运行, 此时给定恒定负载下限的传统调度方法中电解槽的氢氧交叉比例超标, 电解槽无法安全运行, 而本文所提方法能够保证电解槽在全时间段内安全运行。

2) 在氢价较低时, 电解槽更多地以低负载运

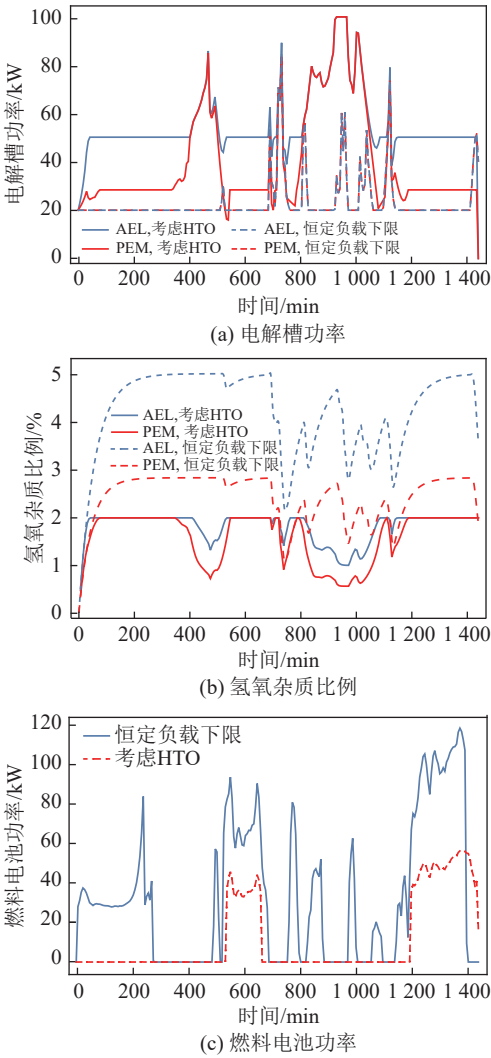


图 6 氢价较低时光氢储微电网日前调度和 HTO 结果

Fig. 6 Day-ahead schedules and HTO of photovoltaic-hydrogen-storage microgrid under lower hydrogen prices.

行，传统方法调度下电解槽氢氧交叉比例在绝大部分时间内高于安全极限。在所提方法调度下，虽然电解槽也更多地以低负载运行，但其氢氧交叉比例未超出安全极限，保证了电解槽安全。

3) AEL 和 PEM 电解槽的氢氧交叉特性存在差异，在相同负载条件下氢氧交叉比例不同。传统方法需要不断调整负载下限，从而保证两种电解槽的安全运行。本文所提方法避免了该调整过程，通过引入电解槽动态安全约束自动确定了电解槽能够运行的最低负载。

参考文献 (References) :

[1] 张继阳, 郑秀, 赵斌, 等. 电网级大规模储能的电池技术进展 [J]. 电池, 2024, 54(5): 745-750.
ZHANG Jiyang, ZHENG Xiu, ZHAO Bin, et al. Progress in battery technology for large-scale grid-level energy storage[J]. Battery Bimonthly, 2024, 54(5): 745-750.

[2] 程林, 索克兰, 许鹤麟. 新能源侧电池储能系统运行评价: 现状与展望 [J/OL]. 电力系统自动化, 1-19[2025-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20241031.0851.002.html>.
CHENG Lin, SUO Kelan, XU Helin. Operation Evaluation of Battery Energy Storage Systems at Renewable Energy Side: Current Status and Prospects[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-19[2025-03-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20241031.0851.002.html>.
[3] 李练兵, 季亮, 祝亚尊, 等. 等效循环电池组剩余使用寿命预测 [J]. 工程科学学报, 2020, 42(6): 796-802.
LI Lianbing, JI Liang, ZHU Yazun, et al. Investigation of RUL prediction of lithium-ion battery equivalent cycle battery pack[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(6): 796-802.
[4] XU X, HU W H, CAO D, et al. Optimal operational strategy for an offgrid hybrid hydrogen/electricity refueling station powered by solar photovoltaics[J]. Journal of Power Sources, 2020, 451: 227810.
[5] LI Z W, ZHAO Y Z, WU P, et al. Enhancing efficiency and economy of hydrogen-based integrated energy system: A green dispatch approach based on exergy analysis[J]. Energy, 2024, 310: 133315.
[6] 李晨, 任洲洋, 李文沅. 考虑燃料电池和电解槽虚拟惯量支撑的电力系统优化调度方法 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 9-16.
LI Chen, REN Zhouyang, LI Wenyuan. Optimal scheduling method of power system considering virtual inertia support of fuel cells and electrolyzers[J]. China Industrial Economics, 2024, 44(11): 9-16.
[7] 孔令国, 王嘉祺, 韩子娇, 等. 基于权重调节模型预测控制的风-光-储-氢耦合系统在线功率调控 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4192-4207.
KONG Lingguo, WANG Jiaqi, HAN Zijiao, et al. On-line power regulation of wind-photovoltaic-storage-hydrogen coupling system based on weight adjustment model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4192-4207.
[8] 殷骏, 李笑竹, 杜锡力, 等. 考虑燃料电池变工况特性的风-光-氢综合能源系统优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 151-158.
[9] 崔杨, 闫石, 仲悟之, 等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4254-4264.
CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4254-4264.
YIN Jun, LI Xiaozhu, DU Xili, et al. Optimal scheduling of wind-solar-hydrogen integrated energy system considering variable operating condition of fuel cell[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 151-158.
[10] FANG X L, DONG W, WANG Y B, et al. Multiple time-scale energy management strategy for a hydrogen-based multi-energy microgrid[J]. Applied Energy, 2022, 328: 120195.
[11] 李奇, 邹雪俐, 蒲雨辰, 等. 基于氢储能的热电联供型微电网优化调度方法 [J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 9-21.

- LI Qi, ZOU Xueli, PU Yuchen, et al. Optimal schedule of combined heat-power microgrid based on hydrogen energy storage[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2023, 58(1): 9–21.
- [12] 余娟, 时权妍, 杨知方, 等. 考虑电解水与甲烷化运行特性的电转气系统日前调度方法 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(18): 18–25.
- YU Juan, SHI Quanyan, YANG Zhifang, et al. Day-ahead scheduling method of power-to-gas system considering operation characteristics of water electrolysis and methanation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(18): 18–25.
- [13] SCHRÖDER V, EMONTS B, JANSEN H, et al. Explosion limits of hydrogen/oxygen mixtures at initial pressures up to 200 bar[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2004, 27(8): 847–851.
- [14] BUTTLER A, SPLIETHOFF H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2440–2454.
- [15] HAUG P, KOJ M, TUREK T. Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(15): 9406–9418.
- [16] LI Y Y, ZHANG T, DENG X T, et al. Active pressure and flow rate control of alkaline water electrolyzer based on wind power prediction and 100% energy utilization in off-grid wind-hydrogen coupling system[J]. *Applied Energy*, 2022, 328: 120172.
- [17] TRINKE P, HAUG P, BRAUNS J, et al. Hydrogen crossover in PEM and alkaline water electrolysis: Mechanisms, direct comparison and mitigation strategies[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(7): F502–F513.
- [18] MOHAMED MOHSIN H, ZHUO Y T, SHEN Y S. Eulerian-Eulerian-VOF multifluid modelling of liquid–gas reacting flow for hydrogen generation in an alkaline water electrolyser[J]. *Fuel*, 2024, 373: 132164.
- [19] SCHALENBACH M, LUEKE W, STOLTEN D. Hydrogen diffusivity and electrolyte permeability of the zirfon PERL separator for alkaline water electrolysis[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(14): F1480–F1488.
- [20] DAVID M, ALVAREZ H, OCAMPO-MARTINEZ C, et al. Dynamic modelling of alkaline self-pressurized electrolyzers: A phenomenological-based semiphenomenological approach[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(43): 22394–22407.
- [21] OMRANI R, SHABANI B. Hydrogen crossover in proton exchange membrane electrolyzers: The effect of current density, pressure, temperature, and compression[J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 377: 138085.
- [22] DENG L R, SUN H B, LI B J, et al. Optimal operation of integrated heat and electricity systems: A tightening McCormick approach[J]. *Engineering*, 2021, 7(8): 1076–1086.
- [23] 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.
- [24] KUMARI P, TOSHNIWAL D. Deep learning models for solar irradiance forecasting: A comprehensive review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318: 128566.
- [25] BLAGA R, SABADUS A, STEFU N, et al. A current perspective on the accuracy of incoming solar energy forecasting[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 70: 119–144.