DOI: 10.19666/j.rlfd.202504069

风光制氢混合电解槽双层优化调度策略

闫兆乾，罗蒙蒙，郝功涛，郑文广，王祎璇，钱 坤，王 清，
程永林，魏雅娟
（华电电力科学研究院有限公司，浙江 杭州 310030）

［摘 要］风光耦合电解水制储氢技术作为可再生能源与氢能结合的重要路径，在能源转型中展现出巨大潜力。然而，在大规模并网型制氢场站存在功率分配不均的问题以及未充分考虑碱性及质子交换膜电解槽的响应特性差异。基于此，提出风光制氢混合电解槽双层阵列优化调度策略。首先以系统净收益最高为目标，采用多时间尺度优化策略对风光制氢系统进行功率分配；其次考虑碱性及质子交换膜电解槽各机组的制氢效率及动态响应特性差异，对单台碱性-质子交换膜混合电解槽集群阵列进行分配及优化调度。结果表明：基于双层优化策略，并网型风光制储氢系统的新能源上网电量与发电量比例无限接近设定值 40%，经过双层策略优化的综合弃电率为 1.89%，极大地降低了系统的弃风弃光率，充分应用碱性及质子交换膜电解槽的运行特性，达到对波动性可再生能源的充分利用，提高了制氢系统运行的稳定性及安全性。

［关 键 词］混合电解槽；优化调度；运行特性；功率分配

［引用本文格式］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.

Double-layer optimal scheduling strategy for wind-solar hydrogen production hybrid electrolyzers

YAN Zhaoqian, LUO Mengmeng, HAO Gongtao, ZHENG Wenguang, WANG Yixuan, QIAN Kun, WANG Qing, CHENG Yonglin, WEI Yajuan
(Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract: As an important path for the combination of renewable energy and hydrogen energy, the technology coupling wind solar power with hydrogen production and storage through water electrolysis has shown great potential in energy transformation. However, large-scale grid-connected hydrogen production stations have problems such as uneven power distribution and insufficient consideration of the differences in response characteristics between alkaline and proton exchange membrane (PEM) electrolyzers. Therefore, this paper proposes an optimized scheduling strategy for the double-layer array of wind-solar hydrogen production hybrid electrolyzers. Firstly, with the goal of maximizing the net income of the system, a multi-time-scale optimization strategy is adopted to allocate the power of the wind and solar hydrogen production system. Secondly, considering the differences in hydrogen production efficiency and dynamic response characteristics between the alkaline and the PEM electrolyzers, optimal scheduling is performed for the array of alkaline and PEM hybrid electrolyzers. As a result, based on the two-layer optimization strategy, the ratio of the on-grid electricity generation to the power generation of the grid-connected wind and solar hydrogen production and storage system is infinitely close to the set value of 40%, and the comprehensive power curtailment rate is 1.89%, which greatly reduces the curtailment rate of wind and solar power in the system. The operational characteristics of the alkaline and PEM electrolyzers

收 稿 日 期：2025-04-30 修 回 日 期：2025-05-26 接 受 日 期：2025-05-28
基 金 项 目：浙江省博士后科学基金（366924）
Supported by: Zhejiang Provincial Postdoctoral Science Foundation (366924)
第一作者简介：闫兆乾（1995），男，博士，工程师，主要研究方向为新能源制氢技术及零碳园区，zhaoqian-yan@chder.com。
通信作者简介：郑文广（1984），男，硕士，正高级工程师，主要研究方向为碳排放与氢能技术，wengaung-zheng@chder.com。

are fully utilized to achieve the full utilization of fluctuating renewable energy and enhance the stability and safety of the hydrogen production system operation.
Key words: hybrid electrolyzer; optimal scheduling; operation characteristics; power allocation

在实现“碳达峰 碳中和”目标的背景下，可再生能源的装机量逐渐增加，由于其波动性、间歇性及季节性的特点，并网后会对现有电力系统的电能质量及稳定性造成冲击，导致大量弃风弃光[1-3]。氢能具有燃耗热值高、无污染及可持续发展等优点，氢储能也是最适合进行大规模和长时间储能的方案[4-6]。可再生能源耦合电解水制氢作为可再生能源与氢能结合的重要路径，在能源转型中展现出巨大潜力，助力风光等可再生能源的高效转存与灵活消纳。

电解水制氢技术是可再生能源制氢系统中重要的技术组成部分，现阶段碱性电解水制氢、质子交换膜（proton exchange membrane，PEM）电解水制氢、阴离子交换膜（anion exchange membrane，AEM）制氢、固体氧化物电解池（solid oxide electrolysis cell，SOEC）电解水制氢以及直接电解海水制氢技术被广大研究学者进行研究[7-8]。碱性电解水因其较高的技术成熟度与较低的制造成本是目前主流的电解水制氢技术路线[9-11]，被广泛应用于国内大规模电解水制氢项目，如新疆库车绿氢示范项目与纳日松风光制氢一体化示范项目[12-13]。但是碱性电解槽响应速度慢，运行负荷范围窄，与风光等可再生能源不能及时匹配，也会造成一定的弃风、弃光，存在一定弊端。PEM 电解水制氢技术即使电极材料采用贵金属导致其成本高，但其因高电流密度与响应速度快的优势依旧被受欢迎[1]。近期 PEM 电解水制氢也用于大规模电解水制氢项目，如吉林大安风光氢氨一体化示范项目。AEM 电解水制氢技术由于不采用贵金属催化剂，具备低成本潜力与动态响应速度快的优势，正逐步进入示范应用阶段，目前电极材料的不稳定与较短运行寿命是限制其发展的主要原因[7]。SOEC 电解水制氢技术距离规模化制氢应用尚需相关材料和催化剂技术进一步攻关，但其能耗低、能量转换效率高的优点可能成为未来主流可再生能源规模化制氢技术[8]。消纳海上风电的直接电解海水制氢技术处于示范应用阶段，即使东方电气、中国华能及深圳能源等单位进行了示范应用，但是也存在一些问题，提升阳极催化剂的抑氯反应与阴极催化剂的抗沉积效应是目前需要突破的重点与难点[14]。本文基于上述分析，考虑技术成熟度与现阶段大规模制氢场站应用的电解槽制氢技术，综合考虑碱性电解水制氢技术的低成本与技术成熟，以及 PEM 电解水制氢技术的快速响应能力与宽负荷范围波动，将碱性电解水与 PEM 电解水结合，融合二者优缺点，共同应用于大型电解水制氢项目。其中，碱性电解槽承担可再生能源稳定时的主流制氢任务，PEM 电解槽承担灵活性调节制氢任务。

电解水制氢技术如何更好地响应可再生能源出力是目前研究的热点，也是解决制氢项目现场运行优化调度的重点。现阶段已经有研究考虑电解槽制氢效率特性对其制氢系统进行优化。针对碱性电解槽制氢系统，文献[15]考虑效率与启停特性，采用鹈鹕优化算法实现多电解槽切换调度，提升了经济性；文献[16]针对风电波动性，利用模糊控制器分配风光、超级电容与电解槽功率，提高能源利用率；文献[17]基于风光发电、电解槽动态效率与启停模型，提出电解槽集群优化策略，增加了系统净收益；文献[18]通过协同控制光伏−储能−电解槽系统，降低弃电率；文献[19]计及运行效率与氢需求约束，提出多堆电解槽柔性调控策略，减少成本与弃电。针对 PEM 电解槽系统，文献[20]基于效率−功率关系，采用分段模糊控制优化风电制氢调度；文献[21]考虑效率特性、负荷与启停约束，提出多堆运行优化与改进轮值策略。针对碱性与 PEM 电解槽协同制氢系统，文献[22]考虑了两者动态响应差异，提出了离网风光耦合制氢系统的运行优化调度方案，通过引入储能电池平抑功率波动，维持系统稳定运行。现阶段考虑制氢效率的优化策略研究，多集中于单一的可再生能源或单一的电解槽制氢类型，缺乏综合考虑碱槽与 PEM 各自经济性与运行特性的研究。

针对风光耦合混合电解槽制氢系统的协同策略还不够完善，需要进一步考虑碱槽和 PEM 制氢特性差异，探索风光制氢场站多种混合电解槽阵列功率分配技术。本文以内蒙地区为背景，考虑上网电量要求，依据风光出力特性、上下网功率、储能特性、电解槽运行特性、压缩机特性、下游氢需求等，以系统净收益最高为目标，设置各设备的容量约束条件，依据电力平衡和氢平衡，同时考虑碱槽与 PEM 电解槽的制氢效率及动态响应特性差异，

提出考虑制氢效率的风光制氢混合电解槽双层阵列优化调度策略，降低碱性电解槽得启停次数，提升风光资源利用率以及设备的使用寿命。

1 风光耦合制储氢系统结构

在可再生能源制氢系统中，可再生能源输出功率的波动将导致电解槽无法长时间维持恒定功率运行甚至频繁启停，存在一定的运行风险，且导致制氢系统整体运行效率低下。因此，需要根据可再生能源的输出功率及时调整电解槽的功率状态来适应宽功率波动。本文选择并网型风光发电耦合制储氢系统，由风力发电系统、光伏发电系统、网端、储能系统、整流变、整流柜、碱槽与 PEM 制氢系统、储氢球罐和氢需求端组成，结构如图 1 所示。其中，碱性电解槽为主要制氢装置，其动态响应速度慢，功率调节范围较窄，因此较难以持续稳定的功率进行氢气生产。另外，因为碱性电解槽投资成本与运行维护成本较低，在整个制氢系统中总装机容量及单台容量均大于 PEM 电解槽，承担着主要的制氢任务。PEM 电解槽为波动制氢装置，PEM 电解槽动态响应速度快，且可实现宽功率调节，主要用来响应风光功率波动，对波动性风光资源有更好的消纳能力。另外，因 PEM 电解槽效率较碱性电解槽更高，即使 PEM 电解槽成本更高，但在整个生命周期内，系统配置一定容量的 PEM 电解槽也可具有一定的经济优势。

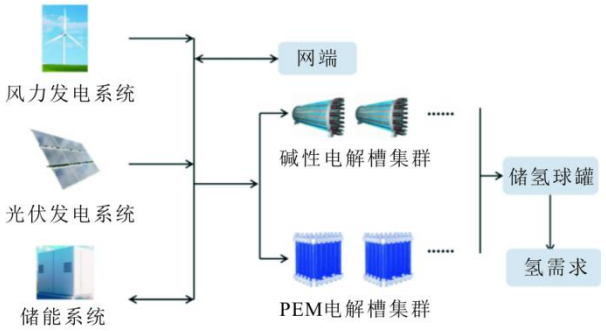


图 1 并网型风光发电耦合制储氢系统拓扑结构

Fig.1 Topological structure of the grid-connected wind-solar power generation coupled hydrogen production and storage system

2 建立电解槽模型

2.1 碱性电解槽模型

碱性电解槽的电解液为质量分数 30%的 KOH 溶液，在直流电的作用下，阴极水分子被解离为 H^+ 与 OH^-。H^+得到电子被还原为氢气；而 OH^-通过隔膜到达阳极，失去电子生成氧气和水。碱性电解槽的化学反应式为：

$$2H_2O+2e^- \rightarrow H_2+2OH^- \tag{1}$$

$$2OH^- -2e^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2+H_2O \tag{2}$$

$$2H_2O \rightarrow 2H_2+O_2 \tag{3}$$

Ulleberg[23]与梁涛等[24]所提出的电解槽电化学模型是目前使用最为广泛的模型之一，参考其模型，可得以下经验方程式：

$$U_{\text{cell}}=U_{\text{rev}}+[(a_1+b_1)+a_2T+b_2p]\frac{I}{A}+ \text{sln}\left[\left(t_1+\frac{t_2}{T}+\frac{t_3}{T^2}\right)\frac{I}{A}+1\right] \tag{4}$$

式中：U_{cell}为碱性电解槽小室电压，V；U_{rev}为可逆电压，V；I为电解电流，A；A为面积，m^2；T为槽温，℃；p为压强，MPa；a_1、b_1、a_2、b_2、t_1、t_2、t_3为待定系数；s为特定的系数，与碱性电解槽的型号和功率有关。各参数如表 1 所示。

表 1 碱性电解槽模型参数

Tab.1 Model parameters of alkaline electrolyzer

项目	取值	项目	取值
a_1/(Ω·m²)	1.951 35×10⁻⁶	t_1/(m²·A⁻¹)	–0.024 13
a_2/(Ω·m²·℃⁻¹)	1.895 32×10⁻⁹	t_2/(m²·℃·A⁻¹)	5.211 81
b_1/(Ω·m²)	–6.143 85×10⁻⁶	t_3/(m²·℃²·A⁻¹)	30.241 78
b_2/(Ω·m²·Pa⁻¹)	1.572 34×10⁻¹²	A/m²	0.5
s/V	0.329 69		

2.2 PEM 电解槽模型

PEM 电解槽主要由膜电极、双极板、扩散层等组成，电解液为纯水，在直流电的作用下，阳极发生氧化反应，水被分解为氧气和 H^+，而 H^+通过质子交换膜，得到电子被还原成氢气。PEM 电解槽的化学反应式为：

$$2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^- \tag{5}$$

$$2H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2 \tag{6}$$

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \tag{7}$$

PEM 电解槽的电压受可逆电压、活化电压、欧姆电压和扩散电压影响，据文献[25]报道，扩散电压占比很小可以忽略不计，因此，PEM 电解槽的电压模型为：

$$V_{\text{cell}}=V_{\text{ocv}}+V_{\text{act}}+V_{\text{ohm}} \tag{8}$$

式中：V_{ocv}为开路可逆电压；V_{act}为活化极过电动势；V_{ohm}为欧姆极化过电动势。

根据能特斯方程可知，开路可逆电压 V_{ocv}为：

$$V_{\mathrm{ocv}}=V_{\mathrm{rev}}+\frac{RT_{\mathrm{el}}}{2F}\left[\ln\left(\frac{\alpha_{\mathrm{H_2}}\sqrt{\alpha_{\mathrm{O_2}}}}{\alpha_{\mathrm{H_2O}}}\right)\right] \tag{9}$$

式中：V_{rev} 为标准情况下可逆过电压；R 为气体常数，值为 8.314 J/(mol·K)；T_{el} 为电解温度，K；F 为法拉第常数，值为 96 485；α_i 为物质 i 的活度，对于理想气体，$\alpha_i=p_i/p_0$（p_i 为物质 i 的分压，p_0 是大气压），$\alpha_{\mathrm{H_2O}}=1$。

根据电化学反应的动力方程将活化极过电动势 V_{act} 表示为：

$$V_{\mathrm{act}}=\frac{RT_{\mathrm{el}}}{\alpha_{\mathrm{an}}F}\arcsin h\left(\frac{i_{\mathrm{o}}}{i_{\mathrm{o.an}}}\right)+\frac{RT_{\mathrm{el}}}{\alpha_{\mathrm{cat}}F}\arcsin h\left(\frac{i_{\mathrm{o}}}{i_{\mathrm{o.cat}}}\right) \tag{10}$$

式中：α_{an} 为阳极电荷转移系数；α_{cat} 为阴极电荷转移系数；$i_{\mathrm{o.an}}$ 为阳极交换电流密度；$i_{\mathrm{o.cat}}$ 为阴极交换电流密度。

欧姆极化过电动势 V_{ohm} 表示为：

$$V_{\mathrm{ohm}}=\frac{i_{\mathrm{o}}}{\sigma_{\mathrm{m}}}\delta_{\mathrm{m}} \tag{11}$$

式中：σ_{m} 为质子交换膜膜电导率，S/cm；δ_{m} 为质子交换膜厚度。

根据阿伦尼乌斯公式σ_{m}表示为：

$$\sigma_{\mathrm{m}}=(0.513\ 9\lambda_{\mathrm{m}}-0.326)\exp\left(1\ 268\left(\frac{1}{303}-\frac{1}{T_{\mathrm{el}}}\right)\right) \tag{12}$$

2.3 产氢量模型建立

根据 Faraday 定律，电解槽输入电流越大，产氢速率越高，二者为正相关关系，在输入电流一定时电解槽制氢速率 Q_i 表示为：

$$Q_i=\frac{In\eta}{2\ 390} \tag{13}$$

式中：Q_i为标准工况下电解槽制氢速率，m³/h；I为通过电解小室的直流工作电流，A；n 为电解小室数（个），当通电方式为一正两负电解小室数目减半；η为电流效率。

2.4 制氢效率模型

电解槽的电压效率 η_{e} 通常表示为电解槽热中性电压 U_{th} 与电解槽小室直流电压 U_{el} 之比，如式(14)所示。其中，电解槽热中性电压指电解过程中电解液中的正、负离子在电解槽中的电压差。

$$\eta_{\mathrm{e}}=\frac{U_{\mathrm{th}}}{U_{\mathrm{el}}} \tag{14}$$

此外，法拉第效率η_{F}也是电解槽的一个重要参数，是电解槽在正常工作时实际产氢量与理论产氢量的比值，也可以描述为参与实际产氢量的电流与制氢总电流之比。在给定温度下，下式可对这些现象进行准确描述。

$$\eta_{\mathrm{F}}=\frac{(I/A)^2}{f_1+(I/A)^2}f_2 \tag{15}$$

为了将温度和流量的作用考虑在内，对公式进行修订，将 f_1、f_2 更新为以温度和流量为变量的函数：

$$f_1=f_{11}+f_{t1}T \tag{16}$$

$$f_2=f_{22}+f_{t2}T \tag{17}$$

式中：f_1、f_2 为与电解槽电流损耗有关的参数，其值会随温度、流速变化而发生改变；f_{11}、f_{22}、f_{t1}、f_{t2} 为待定系数。

电解槽的运行效率η_{ele} 为电压效率和法拉第效率的乘积：

$$\eta_{\mathrm{ele}}=\eta_{\mathrm{e}}\eta_{\mathrm{F}} \tag{18}$$

图 2 展示了碱性电解槽与 PEM 电解槽的制氢效率与功率的曲线。可以看出，在输入功率经过最大值后，电解效率逐渐降低。这是由于随着电流密度的增加，过电位升高，更多的能量转换为的热量，降低了制氢效率。

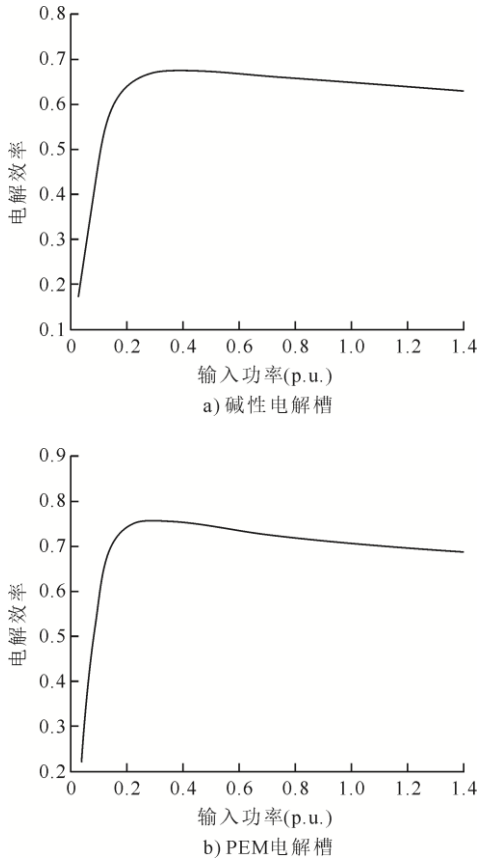


图 2 碱性和 PEM 电解槽制氢效率、制氢功率曲线
Fig.2 The efficiency and power curves of hydrogen production for the alkaline electrolyzer and PEM electrolyzer

3 目标函数及约束条件

3.1 目标函数

本文以系统净收益 C 最大为目标函数 MAX(C)，其表达式为：

$$\mathrm{MAX}(C)=C_1+C_2+C_3 \tag{19}$$

式中：C_1 为售氢收入；C_2 为上网售电收入；C_3 为下网用电支出。

售氢收入 C_1 为：

$$C_1=\sum_{t=0}^{T}tC_{\mathrm{H_2}}M_{\mathrm{H_2}}^{t} \tag{20}$$

式中：$C_{\mathrm{H_2}}$ 为氢气售价；$M_{\mathrm{H_2}}^{t}$ 为 t 时刻内的售氢量，即 t 时刻内从压缩机出来的氢气总量。

上网售电收入 C_2 为：

$$C_2=\sum_{t=0}^{T}tP_{\text{g-on}}^{t}C_{\text{g-on}} \tag{21}$$

式中：$C_{\text{g-on}}$ 为上网电量单价售价；$P_{\text{g-on}}^{t}$ 为 t 时刻内的上网功率。

下网用电支出 C_3 为：

$$C_3=\sum_{t=0}^{T}tP_{\text{g-off}}^{t}C_{\text{g-off}} \tag{22}$$

式中：$C_{\text{g-off}}$ 为下网电量单价售价；$P_{\text{g-off}}^{t}$ 为 t 时刻内的下网功率。

3.2 约束条件

本文所考虑的约束条件包含电力平衡约束、氢平衡约束、风光发电、储能、制氢集群、电网、储罐及压缩机组约束。

电力平衡约束：

$$P_{\text{g-on}}+P_{\text{b-c}}+P_{\text{ele}}+P_{\text{c}}+P_{\text{Aux}}=P_{\text{w-p}}+P_{\text{pv-p}}+P_{\text{b-d}}+P_{\text{g-off}} \tag{23}$$

式中：$P_{\text{g-on}}$ 为上网功率；$P_{\text{b-c}}$ 为储能充电功率；P_{ele} 为电解槽集群制氢功率；P_{c} 为压缩机集群功率；P_{Aux} 为公辅系统功率；$P_{\text{w-p}}$ 为风力发电功率；$P_{\text{pv-p}}$ 为光伏发电功率；$P_{\text{b-d}}$ 为储能放电功率；$P_{\text{g-off}}$ 为下网功率。

风力发电功率约束：

$$P_{\text{w-p}}\geqslant 0 \tag{24}$$

$$P_{\text{w-dis}}\geqslant 0 \tag{25}$$

$$P_{\text{w-p}}+P_{\text{w-dis}}=P_{\text{w-big}} \tag{26}$$

式中：$P_{\text{w-p}}$ 为发电功率；$P_{\text{w-dis}}$ 为弃电功率；$P_{\text{w-big}}$ 为最大发电功率。

光伏发电约束：

$$P_{\text{pv-p}}\geqslant 0 \tag{27}$$

$$P_{\text{pv-dis}}\geqslant 0 \tag{28}$$

$$P_{\text{pv-p}}+P_{\text{pv-dis}}=P_{\text{pv-big}} \tag{29}$$

式中：$P_{\text{pv-p}}$ 为光伏发电功率；$P_{\text{pv-dis}}$ 为光伏弃电功率；$P_{\text{pv-big}}$ 为光伏最大发电功率。

电网约束：

$$P_{\text{g-on}}\geqslant 0 \tag{30}$$

$$P_{\text{g-off}}\geqslant 0 \tag{31}$$

$$2P_{\text{G-g-on-MA}}+\sum_{t=0}^{T}tP_{\text{g-on}}\leqslant X_{\max}\left(P_{\text{G-w-p-MA}}+\sum_{t=0}^{T}tP_{\text{w-p}}+\sum_{t=0}^{T}tP_{\text{w-p}}+P_{\text{G-pv-p-MA}}+\sum_{t=0}^{T}tP_{\text{pv-p}}\right) \tag{32}$$

式中：$P_{\text{G-g-on-MA}}$ 为累计上网电量；$P_{\text{G-w-p-MA}}$ 为风电累计发电量；$P_{\text{G-pv-p-MA}}$ 为光伏累计发电量；$X_{\max}$ 为上网电量与新能源发电量比例上限。

储能约束：

$$0\leqslant P_{\text{b-c}}\leqslant P_{\text{b-cap}}X_{\text{b-c-max}} \tag{33}$$

$$0\leqslant P_{\text{b-d}}\leqslant P_{\text{b-cap}}X_{\text{b-d-max}} \tag{34}$$

$$C_{\text{AP-b-stor}}\geqslant 0 \tag{35}$$

$$\sum_{t=0}^{T}tP_{\text{b-c}}X_{\text{b-c-eff}}-\sum_{t=0}^{T}t\frac{P_{\text{b-d}}}{X_{\text{b-d-eff}}}=C_{\text{AP-b-stor}}-C_{\text{AP-b-i}} \tag{36}$$

$$C_{\text{AP-b-soc-ll}}\leqslant C_{\text{AP-b-stor}}\leqslant C_{\text{AP-b-soc-ul}} \tag{37}$$

式中：$P_{\text{b-cap}}$ 为储能额定装机容量；$X_{\text{b-c-max}}$ 为储能的实际最大充电倍率；$X_{\text{b-d-max}}$ 为储能的实际最大放倍率；$X_{\text{b-c-eff}}$ 为储能的充电转换效率；$X_{\text{b-d-eff}}$ 为储放电转换效率；$X_{\text{b-leak}}$ 储能的自放电率；$C_{\text{AP-b-soc-ul}}$ 为储能的荷电状态（SOC）允许上限；$C_{\text{AP-b-soc-ll}}$ 为储能的 SOC 允许下限；$C_{\text{AP-b-i}}$ 为初始的预计电量。

制氢集群的约束：

$$P_{\text{ele}}\geqslant 0 \tag{38}$$

$$H_{\text{ele-St}}\geqslant 0 \tag{39}$$

$$H_{\text{ele-A}}\geqslant 0 \tag{40}$$

$$P_{\text{ele-cap}}X_{\text{ele-p-ll}}\leqslant P_{\text{ele}}\leqslant P_{\text{ele-cap}}X_{\text{ele-p-up}} \tag{41}$$

$$H_{\text{ele-St}}+H_{\text{ele-A}}=\frac{P_{\text{ele}}\times 1\,000}{P_{\text{ele-ph2}}} \tag{42}$$

式中：$H_{\text{ele-St}}$ 为每时刻的制氢集群送入储氢罐区的氢流量；$H_{\text{ele-A}}$ 为每时刻的制氢集群排空的氢流量；$P_{\text{ele-cap}}$ 为制氢集群的额定容量；$X_{\text{ele-p-ll}}$ 为制氢集群负载下限；$X_{\text{ele-p-up}}$ 为制氢集群负载上限；$P_{\text{ele-ph2}}$ 为制氢集群的交流侧平均单位制氢电耗。

储氢罐区约束：

$$p_{\text{t}}\geqslant 0 \tag{43}$$

$$\sum_{t=0}^{T}t(H_{\text{ele-St}}-H_{\text{c}})=\frac{(p_{\text{t}}-p_{\text{t-inip}})\times V_{t1}}{8.314\times(T_{\text{t}}+273)} \tag{44}$$

$$p_{\text{t-ll}}\leqslant p_{\text{t}}\leqslant p_{\text{t-ul}} \tag{45}$$

式中：p_t 为每时刻的储氢罐区中可用球罐的平均压力；$p_{t\text{-}inip}$ 为储氢罐区可用球罐的平均压力；V_{t1} 为球罐体积；$p_{t\text{-}u1}$ 储氢罐区的压力上限；$t_{p\text{-}11}$ 储氢罐区的压力下限；H_c 为每时刻压缩机组总氢气流量；T_t 为球罐温度。

压缩机机组约束：

$$P_c \geqslant 0 \tag{46}$$

$$H_c \geqslant 0 \tag{47}$$

$$H_{c\text{-}tmf\text{-}ul} = (A_{t1} + A_{c2} + ... + A_{ti})H_{c\text{-}tmf} \tag{48}$$

$$H_c \leqslant H_{c\text{-}tmf\text{-}ul} \tag{49}$$

$$P_c = \frac{H_c}{H_{c\text{-}amf}} \frac{P_{c\text{-}n}}{1\,000} \tag{50}$$

式中：P_c 为每时刻压缩机组总功率；$H_{c\text{-}tmf\text{-}ul}$ 压缩机组能达到的最大总质量流量；A_{ci} 为单台压缩机的状态；$H_{c\text{-}tmf}$ 为单台压缩机的质量流量；H_c 为每时刻压缩机组总氢气流量；$P_{c\text{-}n}$ 为单台压缩机的额定电功率；$H_{c\text{-}amf}$ 为单台隔膜压缩机充装过程的平均质量流量。

充装量与氢需求的约束：

$$\sum_{t=0}^{T} tH_c \leqslant H_{c\text{-}dn} \times 11.2 \tag{51}$$

式中：$H_{c\text{-}dn}$为下游每天的最大氢气需求量。

4 案例分析

4.1 系统参数

本文对并网型风光耦合制储氢系统进行优化调控，选取内蒙某地 14 天（336 h）的典型日历史风光预测数据输入模型对其进行日前优化调度，计算时间步长均取 15 min，结果如图 3 所示。风力发电装机容量为 60 MW，光伏发电容量为 40 MW，电解槽容量为 30 MW，配备容量为 10 MW h 的储能系统、储氢罐、压缩机组。风光制氢系统关键参数如表 2 所示。

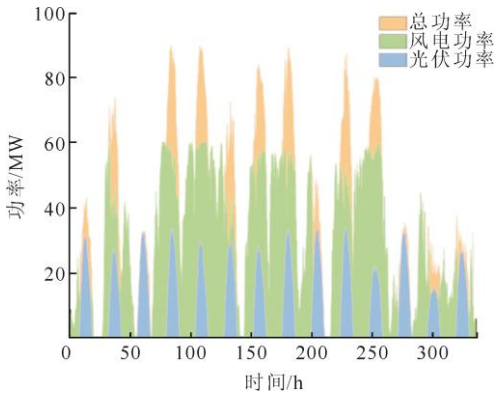


图 3 风光预测出力数据

Fig.3 The predicted wind and solar output data

表 2 风光制氢系统关键参数

Tab.2 Key parameters of the wind and solar hydrogen production system

项目	数值
优化时间颗粒度/min	15
上网电量/风光发电量/(MW h)	40/100
储能电池容量/(MW h)	10
储能电池电量下限/%	20
储能电池电量上限/%	100
储罐区容积/m^3	4 500
储罐压力上限/MPa	1.6
储罐压力下限/MPa	0.8
平均质量流量（单台压缩机）/(m^3 h^{-1})	1 500
单台压缩机额定功率/kW	160
下游每天氢气最大需求量/kg	3 500

4.2 系统多时间尺度优化运行结果

4.2.1 日前优化运行

经过计算，典型 14 天优化调控下功率分配结果如图 4 所示。图 4 中：大于零的参数为风力发电功率、光伏发电功率、储能放电功率及下网功率；小于零的参数为上网功率、电解槽制氢功率、储能充电功率、公辅设备用电功率以及弃电功率。在前 24 h 内，可以看出在发电量较低的时候，电解槽制氢功率大于上网功率，表明经过优化调控后风光发电优先供应制氢需求，满足下游的氢气需求，经过优化的 14 天的弃风率为 1.97%，弃光率为 2.24%，综合弃电率为 1.89%，极大地降低了系统的弃风弃光率。

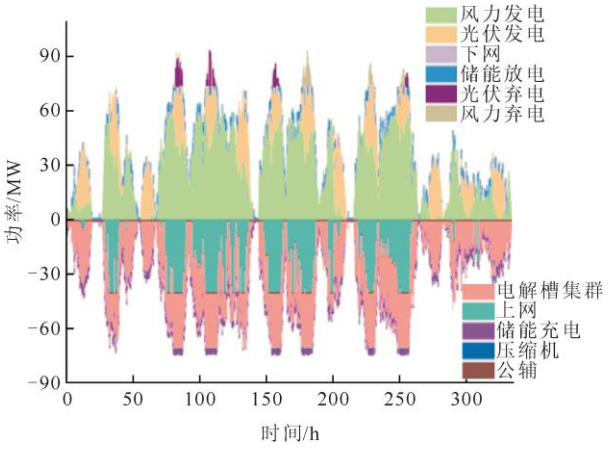


图 4 14 天优化调控下功率分配结果

Fig.4 The power distribution result with 14-day optimal scheduling

图 5 为 14 天优化调控收支预计、上网电量与发电量占比预计。由图 5 可见，14 天的售氢总收入为 122.28 万元，上网总收入为 141.20 万元，净收益达 263.58 万元。图 5b)显示了 14 天内每天的上网电量，用于指导系统的上网电量控制，优化区间内新能源的

上网电量与发电量比例无限接近设定值 40%。

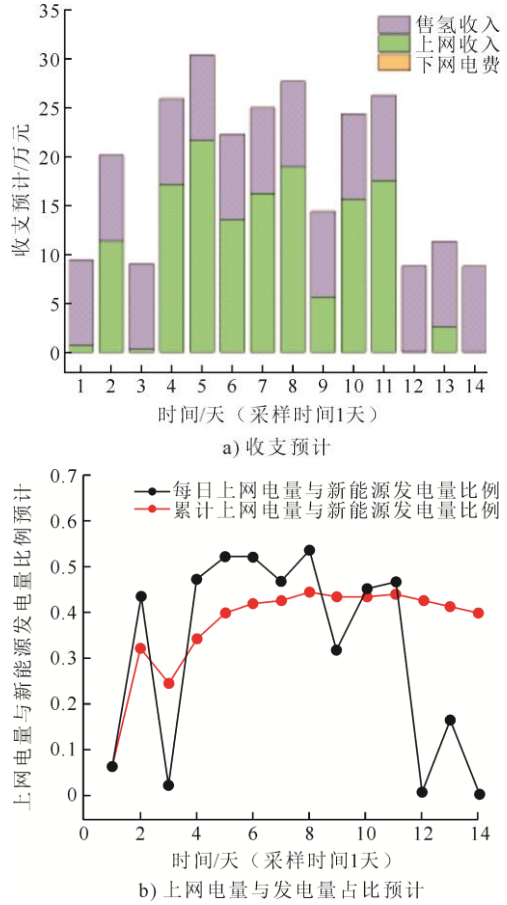
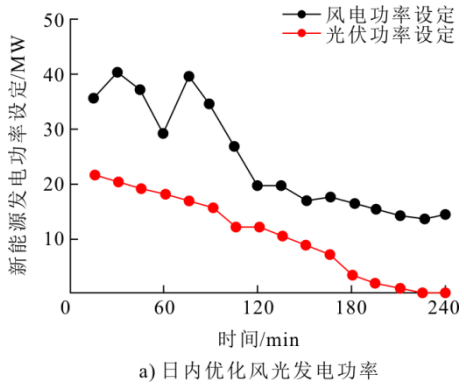


图 5 14 天优化调控收支预计、上网电量与发电量占比预计

Fig.5 The expected revenue and expenditure, and estimated proportions of on grid electricity and power generation with 14-days optimal scheduling

4.2.2 日内优化运行

经过典型日内 240 min 优化运行，得出 240 min 的发电功率、上下网功率、储能功率以及制氢集群的功率调度指令，具体如图 6 所示。初始时间新能源出力较充足时可以为电网供电，随着新能源发电功率的降低，约 120 min 后，发电功率仅供制氢集群，停止上网，并且储能也会放电平抑新能源功率的波动，尽可能为制氢集群提供稳定电源。



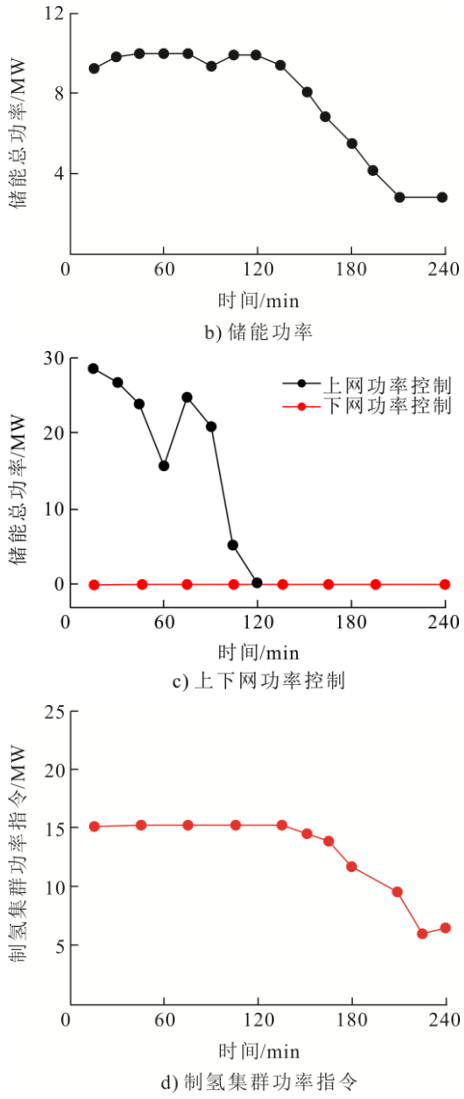


图 6 日内优化运行参数

Fig.6 The intra-day optimized operation parameters

4.3 制氢集群优化结果

4.3.1 碱性电解槽集群

依据 4.2.2 节中日内 240 min 的优化运行制氢集群功率分配指令，对碱性电解槽制氢集群各机组功率进行优化分配。制氢集群为 6 台 5 MW 的碱性电解槽，共计 30 MW。碱性电解槽关键参数如表 3 所示，每台碱性电解槽运行功率调度如图 7 所示。

表 3 碱性电解槽关键参数

Tab.3 Key parameters of the alkaline electrolyzer

电解槽种类	碱性电解槽
单台容量/MW	5
工作温度/℃	85
工作压力/MPa	1.6
额定电流密度/(A cm^{-2})	0.4
运行负荷范围/%	30~110
冷启动时间/min	50
冷启动功耗/%	12

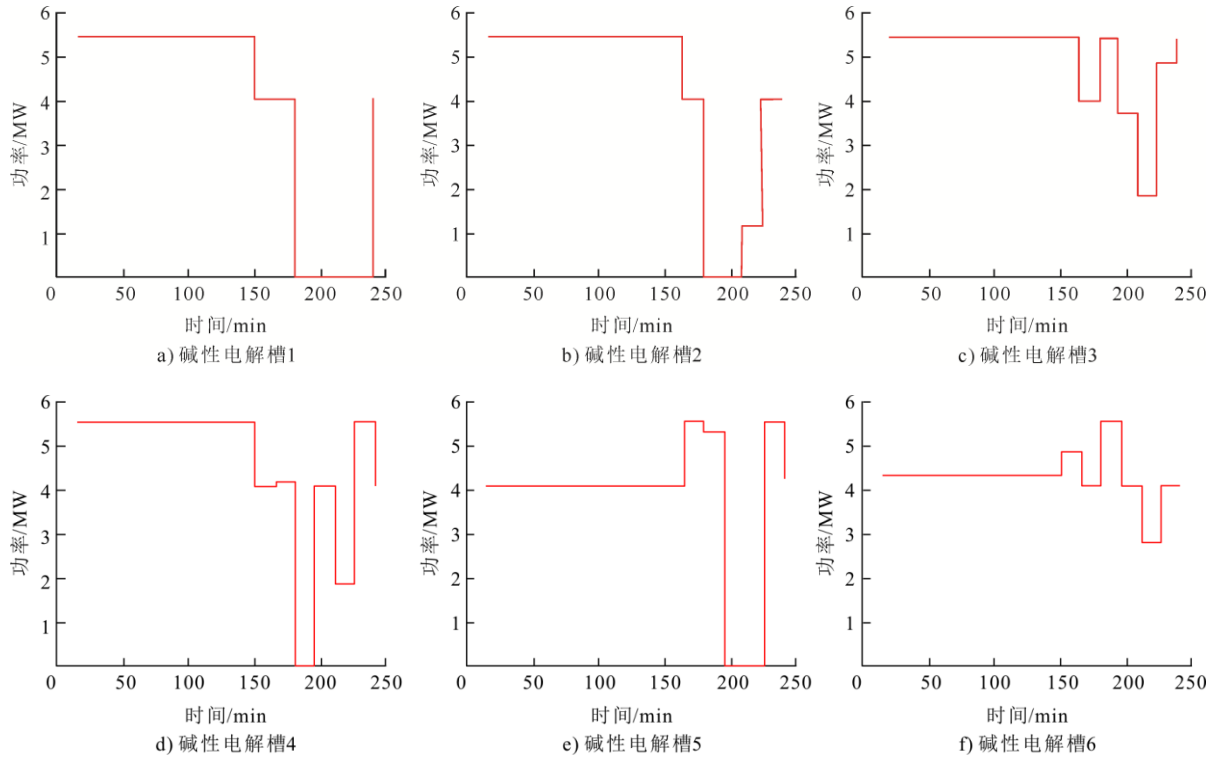


图 7 每台碱性电解槽运行功率调度
Fig.7 Power scheduling for each alkaline electrolyzer

可以看出，在 150 min 后制氢集群调度功率下降时（图 6d)），碱性电解槽运行功率随之下降，在制氢功率不足以维持碱性电解槽最低负荷时，碱性电解槽进入停机状态。图 7 中碱性电解槽集群的总体启停次数为 4 次，进入停机状态的电解槽数量占据 80%。大规模的频繁停机对碱性电解槽的运行寿命产生较大影响。

4.3.2 碱性电解槽与 PEM 电解槽混合集群

依据 4.2.2 节日内 4 h 的优化运行制氢集群功率分配指令，对制氢集群各机组功率进行优化分配。制氢集群 30 MW 中碱性电解槽和 PEM 电解槽同时存在，为 5 台碱性电解槽和 5 台 PEM 电解槽，单台碱性电解槽容量为 5 MW，单台 PEM 电解槽容量为 1 MW。设置对比、优化 2 个方案进行仿真分析。

对比方案是不考虑电解槽的运行特性，将所有碱性和 PEM 电解槽的效率都设置相同，除容量不一样，将碱性和 PEM 电解槽看作完全相同的机组。对比方案电解槽关键参数如表 4 所示。

优化方案是考虑电解槽的运行特性，将 PEM 与碱性电解槽区分开来，对制氢集群各阵列进行优化调度。优化方案电解槽关键参数如表 5 所示。

表 4 对比方案电解槽关键参数
Tab.4 Key parameters of the electrolyzer in comparison plan

项目	碱性电解槽	PEM 电解槽
单台容量/MW	5	1
工作温度/℃	85	55
工作压力/MPa	1.6	
额定电流密度/(A cm^{-2})	0.4	1.5
运行负荷范围/%	30~110	
冷启动时间/min	50	
冷启动功耗/%	12	

表 5 优化方案电解槽关键参数
Tab.5 Key parameters of the electrolyzer in optimization plan

项目	碱性电解槽	PEM 电解槽
单台容量/MW	5	1
工作温度/℃	85	55
工作压力/MPa	1.6	
额定电流密度/(A cm^{-2})	0.4	1.5
运行负荷范围/%	30~110	15~130
冷启动时间/min	50	10
冷启动功耗/%	12	8

图 8 为对比方案功率分配。150 min 后，电解槽集群功率开始下降（图 6d)），由图 8 看出，碱性

电解槽和 PEM 电解槽制氢功率同时降低，PEM 电解槽功率呈现阶梯性变化，与碱性电解槽响应时间一致，并且碱性电解槽机组整体启停次数为 4 次。

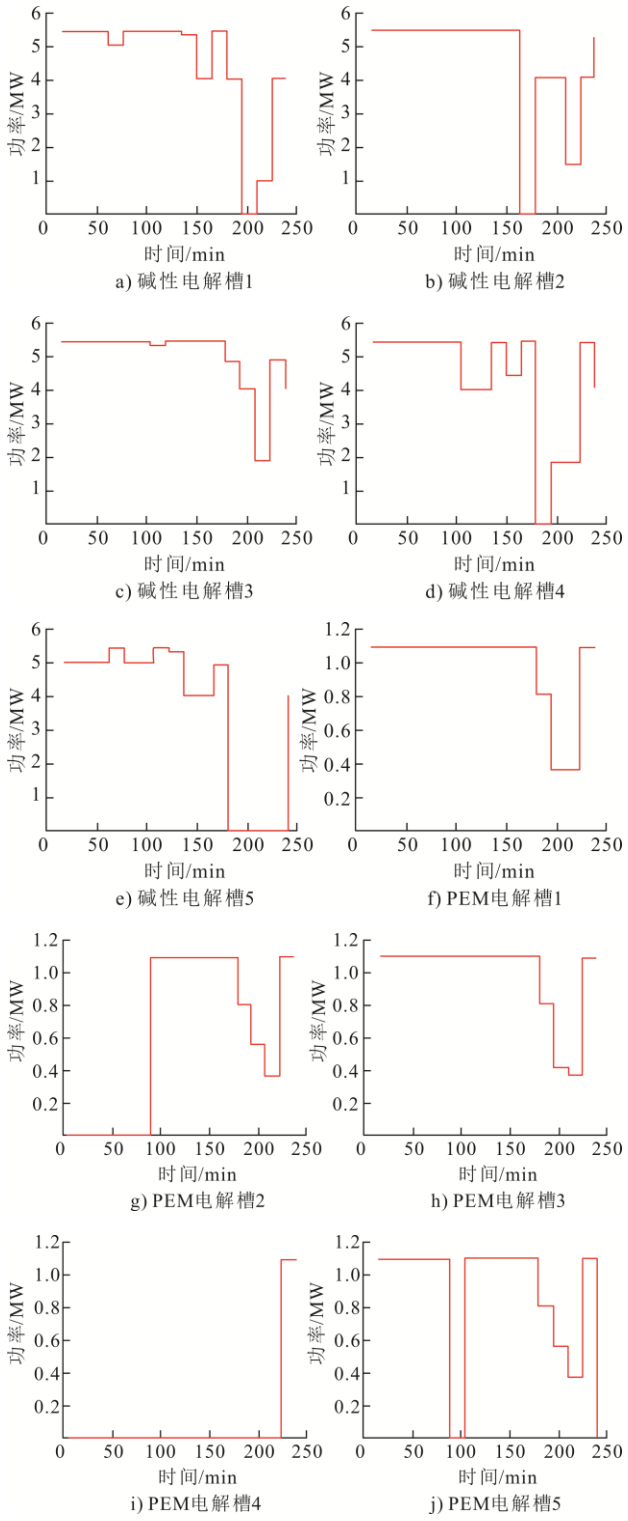
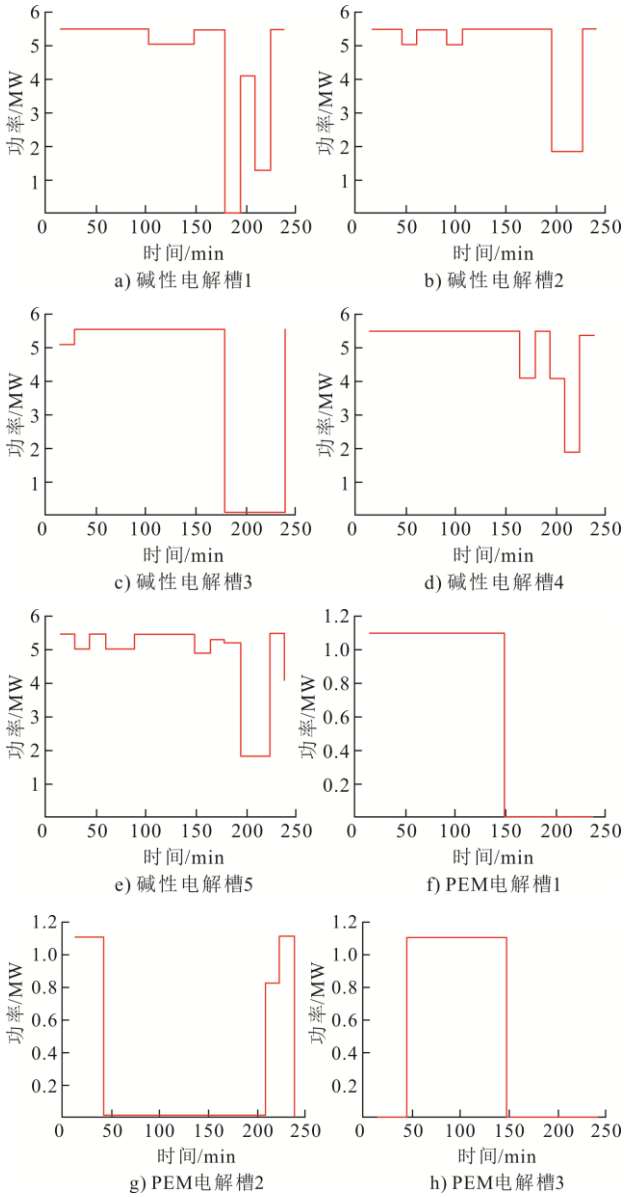


图 8 对比方案每台电解槽运行功率调度

Fig.8 Power scheduling for each electrolyzer in comparison plan

图 9 为优化方案功率分配。当制氢集群功率下降时，PEM 电解槽优先降低功率，在剩余功率不能满足碱性电解槽额定功率运行时，碱性电解槽再降低功率，PEM 电解槽的功率变化幅度增加，在优化区间内，无阶梯性变化，考虑运行特性后碱性电解槽机组的整体启停次数为 2 次。由于风光出力具有一定波动性，导致电解槽制氢功率波动，需要配置碱性电解槽与 PEM 电解槽协同运行。碱性电解槽响应速度慢，功率调节受限制，承担稳定负荷；PEM 电解槽响应速率快，符合调节范围宽，承担波动性负荷，响应功率波动的变化。上述仿真结果与 2 类电解槽的运行特性也相对应，同时降低了碱性电解槽的启停次数，充分应用 PEM 电解槽的运行特性，从而达到对波动性可再生能源的充分利用，提高制氢系统运行的稳定性及安全性。优化方案仿真结果如图 9 所示。



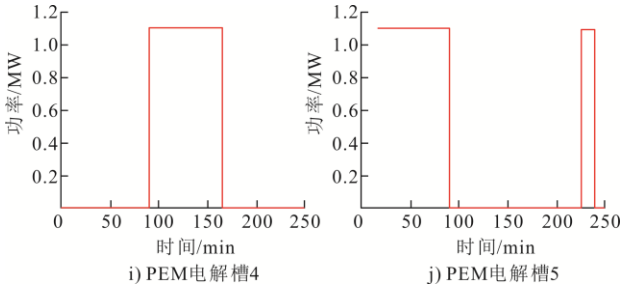


图 9 优化方案单台电解槽运行功率调度

Fig.9 Power scheduling for each electrolyzer in optimization plan

5 结 论

本文建立了考虑制氢效率的风光制氢混合电解槽双层阵列优化调度策略。

1）基于上网电量与新能源装机容量的比例上限，依据风光出力特性、上下网功率、储能特性、电解槽运行特性、压缩机特性、下游氢需求等特性，建立工段级“源-网-氢-储-加”模型，采用多时间尺度优化策略对风光制氢系统进行功率分配，能够在日前与日内时间尺度精准预测制氢集群的功率。

2）考虑碱槽与 PEM 各机组的制氢效率及动态响应特性差异，建立碱性电解槽与 PEM 电解槽电压电流、制氢效率及产氢量模型，采用线性化处理，并考虑冷启动时间、损耗、运行状态等因素，对单台碱性-质子交换膜混合电解槽集群阵列进行分配及优化调度。

3）根据内蒙某地典型日历史风光预测数据对并网型风光耦合制储氢系统进行优化调控。分析结果表明：基于工段级多时间尺度优化策略，并网型风光制储氢系统的新能源上网电量与发电量的比例无限接近设定值 40%；经过优化，14 天的综合弃电率为 1.89%，极大地降低了系统弃风弃光率；经过集群级优化调度，充分利用 PEM 电解槽的响应能力，降低了碱性电解槽的启停次数，提升了设备的使用寿命。

[参 考 文 献]

[1] 滕越, 赵骞, 张红, 等. 新能源-质子交换膜电解槽电制氢容量双层规划模型研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 37-46.
TENG Yue, ZHAO Qian, ZHANG Hong, et al. Study on double-layer planning model for hydrogen production capacity of new energy proton exchange membrane electrolyzer[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 37-46.

[2] 李琦, 韩运滨, 白章, 等. 离网型风光发电联合制氢系统的协调运行策略与容量配置优化[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8136-8146.
LI Qi, HAN Yunbin, BAI Zhang, et al. Coordination operation strategy and capacity optimization of off-grid wind-solar hybrid hydrogen production system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8136-8146.

[3] 郭富民, 徐广强, 王小君, 等. 基于 8 760 h 生产模拟的离网风光储氢系统规划方法[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2227-2235.
GUO Fumin, XU Guangqiang, WANG Xiaojun, et al. A planning method for stand-alone wind-solar hydrogen storage system based on 8 760 hours production simulation[J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2227-2235.

[4] 张虹, 孙权, 李占军, 等. 风氢耦合系统协同控制发电策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(3): 15-23.
ZHANG Hong, SUN Quan, LI Zhanjun, et al. Research on synergistic control strategy of wind powercoupled with hydrogen system[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(3): 15-23.

[5] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/制氢/燃料电池/超级电容器混合系统控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(17): 84-94.
CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, et al. Control of hybrid system of wind/hydrogen/fuel cell/supercapacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17): 84-94.

[6] 李建林, 李光辉, 梁丹曦, 等. “双碳目标”下可再生能源制氢技术综述及前景展望[J]. 分布式能源, 2021, 6(5): 1-9.
LI Jianlin, LI Guanghui, LIANG Danxi, et al. Review and prospect of hydrogen technology from renewable energy under targets of carbon peak and carbon neutrality[J]. Thermal Distributed Energy, 2021, 6(5): 1-9.

[7] 杨成玉, 马军, 李广玉, 等. 大型碱性电解水制氢装备多对一的应用与实践[J]. 太阳能, 2022(5): 103-114.
YANG Chengyu, MA Jun, LI Guangyu, et al. Application and practice of many-to-one large-scale alkaline water electrolysis hydrogen production equipment[J]. Solar Energy, 2022(5): 103-114.

[8] 郝新朝, 王健, 闫兆乾, 等. 可再生能源耦合 PEM 电解水制氢研究进展[J]. 自动化应用, 2025, 66(7): 129-134.
HAO Xinchao, WANG Jian, YAN Zhaoqian, et al. Research progress of hydrogen production from water electrolysis with renewable energy coupled PEM[J]. Automation Application, 2025, 66(7): 129-134.

[9] 李卓言, 涂宏, 丁奕, 等. 基于碱性水电解槽电化学模型的应用分析[J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 115-123.
LI Zhuoyan, TU Hong, DING Yi, et al. Application analysis of electrochemical model based on alkaline water electrolyzer[J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(3): 115-123.

[10] 张宝平, 赵雄, 陈明轩, 等. 碱性电解水制氢双目标能效模型全局遗传算法求解与应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39(3): 57-65.
ZHANG Baoping, ZHAO Xiong, CHEN Mingxuan, et al. Solution and application of a dual-objective energy efficiency model for alkaline water electrolysis using global genetic search algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2025, 39(3): 57-65.

[11] 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.

[12] 碳索氢能网. 中石化库车绿氢项目：预计 2026 年实现满负荷生产[R/OL]. (2025-02-14). https://h2.solarbe.com/news/20250214/50000409.html.
Carbon Search Hydrogen Energy Network. Sinopec Kuche Green Hydrogen Project: It is expected to achieve full-load production in 2026[R/OL]. (2025-02-14). https://h2.solarbe.com/news/20250214/50000409.html.

[13] 澎湃新闻. 梁思彦, 李静菲: 三峡集团首个光伏制氢项目光伏电站全面并网发电[R/OL]. (2023-12-31). https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_25858733.
The paper.cn. LIANG Siyan, LI Jingfei: The photovoltaic power station of the first photovoltaic hydrogen production project of China Three Gorges Corporation has been fully connected to the grid and started generating electricity[R/OL]. (2023-12-31). https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_25858733.

[14] 王泓乾, 陈少杰, 刘威, 等. 电解海水制氢电极研究进展[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 41-53.
WANG Hongqian, CHEN Shaojie, LIU Wei, et al. Recent development on electrodes for seawater electrolysis[J]. Clean Coal Technology, 2025, 31(3): 41-53.

[15] 梁涛, 杨文博, 谭建鑫, 等. 计及效率和启停特性的大规模离网风电制氢多电解槽切换调度策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(2): 78-85.
LIANG Tao, YANG Wenbo, TAN Jianxin, et al. Switching scheduling strategy of multi-electrolyzer for large-scale off-grid wind powerhydrogen production considering efficiency and start-stop characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(2): 78-85.

[16] 孙东阳, 于继轩, 阮俊霖, 等. 基于制氢装置效率特性的风储制氢电厂优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 53-61.
SUN Dongyang, YU Jixuan, RUAN Junlin, et al. Optimal control strategy of wind-energy storage hydrogen production power plant based on efficiency characteristics of hydrogen production device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 53-61.

[17] 张文韬, 周家辉, 张润之, 等. 计及能耗特性的风光制氢碱性电解槽集群优化策略[J]. 化工进展, 2024, 43(11): 6119-6128.
ZHANG Wentao, ZHOU Jiahui, ZHANG Runzhi, et al. Optimization strategy of wind and solar hydrogen production alkaline electrolyzer cluster considering energy consumption characteristics[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(11): 6119-6128.

[18] 张勇, 彭勇刚, 韦巍. 计及制氢效率的光-储-氢系统协调控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 67-75.
ZHANG Yong, PENG Yonggang, WEI Wei. Coordination control for PV, storage and hydrogen system considering hydrogen energy conversion efficiency[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(11): 67-75.

[19] 田雪沁, 冯亚杰, 袁铁江, 等. 考虑电氢负荷柔性的多堆电解槽优化运行[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 84-92.
TIAN Xueqin, FENG Yajie, YUAN Tiejiang, et al. Optimal operation of multi alkaline electrolyzers considering flexible electrical and hydrogen load[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 84-92.

[20] 牛萌, 洪振鹏, 李蓓, 等. 考虑制氢效率提升的风电制氢系统优化控制策略[J]. 太阳能学报, 2023, 44(9): 366-376.
NIU Meng, HONG Zhenpeng, LI Bei, et al. Optimal control strategy of wind power to hydrogen system considering electrolyzer efficiency improvement[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(9): 366-376.

[21] 梁丹曦, 宗正, 宋洁, 等. 计及效率和寿命的多堆电解制氢系统运行优化[J]. 煤炭学报, 2025, 50(6): 3139-3149.
LIANG Danxi, ZONG Zheng, SONG Jie, et al. Operation optimization strategy of multi-stack hydrogen production system considering efficiency and lifetime[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(6): 3139-3149.

[22] 张文韬, 周家辉, 李敏杰, 等. 计及能耗特性的风光制氢碱性质子交换膜混合电解槽多列优化策略[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 63-72.
ZHANG Wentao, ZHOU Jiahui, LI Minjie, et al. Optimization strategy of wind and solar hydrogen production alkaline-PEM hybrid electrolyzers cluster considering energy consumption characteristics[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 63-72.

[23] ULLEBERG Ø. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28: 21-33.

[24] 梁涛, 刘子聪, 谭建鑫, 等. 兆瓦级碱性电解槽多变量数字孪生仿真系统构建[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 545-554.
LIANG Tao, LIU Zicong, TAN Jianxin, et al. Construction of multivariate digital twin simulation system for megawatt-scale alkaline electrolyzer[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(12): 545-554.

[25] 阮景昕, 王跃社, 张俊峰, 等. 基于氢储能的风光氢能源系统能质转换优化策略[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(2): 413-421.
RUAN Jingxin, WANG Yueshe, ZHANG Junfeng, et al. Energy-mass conersion optimization strategy of wind-solar-hydrogen energy system based on hydrogen energy storage[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(2): 413-421.

（责任编辑　杨嘉蕾）