

考虑混合电解槽的风-光-储离网制氢系统容量配置优化方法

韩连山, 胡 洋, 牛洪海, 张 曼, 宋晓健, 陈丹瑜, 朱俊杰, 王亚奇
(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

摘要:“双碳”目标下,高比例新能源装机带来的消纳难、波动强等问题亟待解决,具备可调节能力的电解槽负荷可实现与新能源出力的双向匹配,同时,离网制氢所产出的为全寿命周期零碳排的绿氢,是实现“双碳”战略的重要推动力。因此提出一种考虑混合电解槽的风-光-储离网制氢系统容量配置优化方法。首先,对系统的电源侧、制氢侧中的关键部分设备进行建模分析;其次,以系统制氢成本最低为优化目标,构建风-光-储离网制氢系统优化模型;最后,算例以我国西北某地区风电和光伏出力数据为基础进行了仿真分析,结果表明:混合电解槽协同运行策略相比单一电解槽能够降低制氢成本、减少电解槽启停次数、减少新能源弃电,验证了所提模型和方法的可行性和有效性。

关键词: 新能源消纳; 离网制氢; 容量配置; 混合电解槽

Capacity configuration optimization method for off-grid wind-solar-storage hydrogen production system considering hybrid electrolyzers

HAN Lianshan, HU Yang, NIU Honghai, ZHANG Man, SONG Xiaojian, CHEN Danyu,
ZHU Junjie, WANG Yaqi
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Under the goal of “dual carbon”, the high penetration of renewable energy generation brings about critical challenges such as integration difficulties and strong power fluctuations, which urgently require solutions. Electrolyzer loads with adjustable capacity can achieve bidirectional matching with renewable energy output. Meanwhile, off-grid hydrogen production yields green hydrogen with zero carbon emissions throughout its life, serving as a key driver for achieving the “dual carbon” strategy. Therefore, an optimal capacity configuration method for an off-grid wind-solar-storage hydrogen production system considering hybrid electrolyzers is proposed. First, modeling and analysis are conducted for key components on the power supply side and hydrogen production side of the system. Second, with the objective of minimizing hydrogen production costs, an optimization model for the off-grid wind-solar-storage hydrogen production system is constructed. Finally, a case study is performed based on wind and PV output data from a region in Northwest China. Simulation results demonstrate that the coordinated operation strategy of hybrid electrolyzers, compared to a single electrolyzer, can reduce hydrogen production costs, decrease the start-stop cycles of electrolyzers, and mitigate renewable energy curtailment, thereby verifying the feasibility and effectiveness of the proposed model and method.

Key words: new energy consumption; off-grid hydrogen production; capacity configuration; hybrid electrolyzers

0 引言

当前,随着我国对新能源行业的大规模建设,风电、光伏等新能源装机容量也不断提高,如何平抑其波动性对电力系统的影响,并最大程度地消纳新能源发电、减少弃电,成为亟待解决的问题。储能作为一种优质的灵活性资源,能够有效支撑新能

源电力系统的电力平衡和电量平衡^[1]。能够制备氢能的电解槽负荷具有可调节范围大、响应速度快、启停灵活等特性,同样可以促进新能源消纳、平抑出力波动性,另外,氢能作为一种高能量密度、零排放的燃料,还能进行长期存储和多形式转化,在“双碳”目标的背景下成为研究热点^[2]。

现阶段的新能源制氢系统大致分为并网型和离网型两种,其中并网型制氢由于可接入电网,在新能源出力不足时从电网下电,故电解槽不需要停机,负荷可以保持相对平稳,制氢量也会提升^[3]。但新能源出力的波动性和间歇性可能对电网造成冲

收稿日期: 2025-08-09; 修回日期: 2025-09-26

基金项目: 智能电网国家科技重大专项(2030)资助项目
(2024ZD0801900)

击,且产出的氢气也非绿氢,制氢成本受电价影响也较大;而离网型制氢系统通过自建风电、光伏、储能电源,以及合理配比碱性电解槽(alkaline electrolyzer, ALK)和质子交换膜电解槽(proton exchange membrane electrolyzer, PEM)容量,可实现制氢系统全生命周期零碳排放,充分利用风光丰富资源,促进新能源消纳^[4]。离网型新能源制氢系统更符合全球碳中和目标,能够激励氢能产业链协同发展,摆脱化石能源不足和电网建设薄弱地区的限制,因此相较于并网型制氢系统更具发展前景^[5]。

目前已有学者针对新能源制氢、用氢等开展相关研究。文献[6]构建了新型氢市场的博弈论框架,在灰氢、蓝氢和绿氢之间建立合作博弈联盟,并以Stackelberg博弈模型激励氢燃料电池汽车用户对加氢定价做出动态响应,有效降低了氢能的生产成本以及用户加氢成本,文献[7]构建了一种太阳能、地热能与制氢耦合的系统,并基于人工神经网络的遗传算法对系统进行了运行优化,提高了系统的能量效率,降低了电价成本;文献[8]提出了以新能源汽车为核心的储能、氢能和智能耦合的交通能源电力一体化技术方案,优化了氢储能参与新能源汽车电网互动过程。由于离网型新能源制氢系统能产出零碳排放的绿氢,有学者针对系统整体容量配置优化^[9-12]、系统中发电侧优化^[10]、系统整体运行调度优化^[11]进行了多方位研究,实现了降低系统制氢成本、提高储能利用率、促进新能源消纳。而在电解槽的研究上,文献[12]提出了基于波动适应性、制氢能效、运行条件以及经济性的灵活性评价指标体系,全面评估电解槽在多种工况下的综合性能,文献[13]提出了混合电解槽的功率分配策略,构建风光氢能源系统的优化配置模型,证明了混合电解槽的协同运行能够显著提升风光光伏的消纳能力。上述文献从多维度、全流程开展了新能源制氢系统、用氢路径的研究,包括系统整体与电网、电力市场的耦合互动,以及系统中发电侧、储能侧的单独优化。较少有文献研究离网条件下,综合考虑风电、光伏、储能,以及引入混合电解槽的容量配置优化问题。离网条件下风光出力直接用于电解槽,可能导致电解槽频繁启停从而缩短使用寿命,且将多个电解槽组视为一个整体参与制氢可能影响系统效率和经济效益的评估,因此需进一步研究混合电解槽离网制氢系统的容量配置优化、协同运行策略等问题。

综上所述,本文结合实际,提出了一种考虑混合电解槽的风-光-储离网制氢系统容量配置优化方法。首先,对系统中电源侧的风电、光伏、储能,

以及制氢侧的ALK和PEM电解槽进行了建模,其次,以系统整体年制氢成本最小化为优化目标,建立了风-光-储-氢系统优化模型,最后,以我国西北某地区的风光出力数据为基础,构建离网型制氢系统,验证所提混合电解槽模型的有效性。

1 风-光-储离网制氢系统

1.1 离网制氢系统基本架构

离网型制氢系统架构如图1所示,其中电源侧包括风力发电、光伏发电、储能,制氢侧包括ALK电解槽和PEM电解槽,用氢侧包括合成氨、合成甲醇、氢燃料电池等用氢负荷。

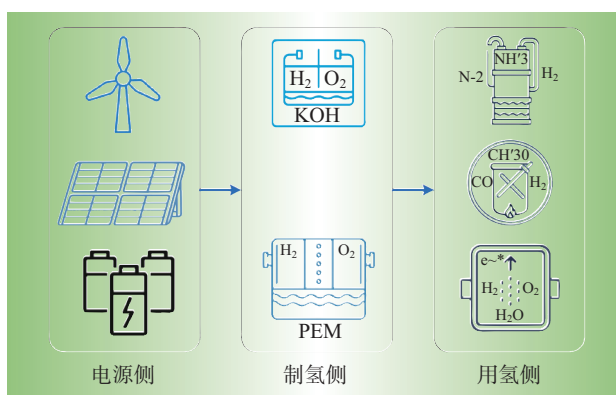


图1 离网型新能源制氢系统示意

Fig. 1 Schematic of off-grid new energy hydrogen production system

系统的主要运行逻辑如下:

(1) 当风电、光伏等新能源大发时,优先使用新能源发电为电解槽供电,并根据实际出力情况实时调整电解槽负荷;当电解槽以额定负荷运行时,若此时风电、光伏出力仍有富余,则富余出力通过向储能充电来消纳;当储能SOC达到上限时,若此时风电、光伏出力仍有富余,则电解槽负荷调整至上限,在设备允许范围内进行短时超负荷运行;当电解槽负荷调整至上限、储能SOC达到上限时,新能源出力若仍有富余,则富余部分弃电;

(2) 当风电、光伏等新能源出力不足时,优先降低电解槽负荷以匹配出力;当风光出力无法支撑电解槽最低运行负荷时,由储能放电来为电解槽供电,避免电解槽停机;

(3) 当风光出力无法支撑电解槽最低运行负荷,且储能已放电至SOC下限时,电解槽停机。

1.2 电源侧模型

(1) 风电出力模型

风机出力与风速相关,其出力模型如下所示

$$P_{\text{wind}}(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{\text{ci}}, v \geq v_{\text{co}} \\ \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \eta & v_{\text{ci}} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v < v_{\text{co}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{wind} 为风机实际输出功率; v 为实时风速; v_{ci} 为切入风速; v_{co} 为切出风速; v_r 为额定风速; P_r 为风机额定输出功率; ρ 为空气密度(标准状况下约 1.225 kg/m^3 , 随海拔和温度变化); A 为扫风面积; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风机设计的风能转化效率(与叶尖速比 λ 和桨距角 β 相关); η 为风机效率(通常为 $0.90 \sim 0.95$)。

(2) 光伏出力模型

光伏发电是利用光伏电池阵列将太阳能转化为电能,在标准测试条件下(standard test conditions, STC),即辐照度 $= 1000 \text{ W/m}^2$,电池温度 $= 25^\circ\text{C}$ 时,标准条件下光伏阵列的输出功率如下所示

$$P_{\text{STC}} = \eta_{\text{STC}} A_{\text{pv}} G_{\text{STC}} \quad (2)$$

式中: η_{STC} 为 STC 条件下的组件效率, $15\% \sim 22\%$; A_{pv} 为光伏总面积, m^2 。

而光伏阵列的实际输出功率与光照强度 G 和电池温度 T 相关,其修正后的输出功率模型为

$$P_{\text{pv}}(G, T) = P_{\text{STC}} \frac{G}{G_{\text{STC}}} [1 + \gamma(T - T_{\text{STC}})] \quad (3)$$

式中: γ 为功率温度系数, $\%/^\circ\text{C}$, 通常取 $-0.3 \sim -0.5$, 单晶硅的典型值为 $-0.4\%/^\circ\text{C}$ 。

(3) 储能充放电模型

储能的充、放电模型如下所示

$$\begin{cases} S(t) = S(t_0) + \int_{t_0}^t [\eta_{\text{ch}} P_{\text{ch}}(x)] dx, & t_0 \text{ 至 } t \text{ 时段充电} \\ S(t) = S(t_0) - \int_{t_0}^t \left[\frac{P_{\text{dis}}(x)}{\eta_{\text{dis}}} \right] dx, & t_0 \text{ 至 } t \text{ 时段放电} \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 为时间; η_{ch} 为充电效率; η_{dis} 为放电效率; $P_{\text{ch}}(t)$ 为充电功率; $P_{\text{dis}}(t)$ 为放电功率。

1.3 制氢侧模型

常见的两种电解槽,即 ALK 电解槽和 PEM 电解槽,是制氢侧设备的主要组成部分。其主要特点如下:

(1) ALK 电解槽常采用液态碱性电解质(KOH 或 NaOH, $20\% \sim 30\%$ 浓度),在阴极(Ni 基)和阳极(Ni 或 Ni-Co)之间发生电解反应。属于目前较成熟的制氢技术,造价相对较低,单槽装机规模较大,可达 10 MW 及以上;但响应速度较慢,一般启动时间为分钟级至小时级,负荷可调范围一般在 $30\% \sim 110\%$ 。在启停特性上,ALK 电解槽停机时须保持电解液循环或惰性气体吹扫,启动时需预热电解液至工作温度,其启停成本主要来自这两部分产生的气体成本和加热能耗成本,在系统全寿命周期制氢成本中占比

很低,可忽略不计^[14-15]。

(2) PEM 电解槽采用固态质子交换膜(如 Nafion),在阴极(Pt/C)和阳极(IrO_2)催化下电解。单槽装机规模较小(一般不超过 5 MW),响应速度较快,可达秒级至分钟级,由于依赖铂、铱等贵金属化合物,其造价相对较高(为 ALK 电解槽的 $2 \sim 3$ 倍),负荷可调范围一般在 $0 \sim 110\%$ 。在启停特性上,PEM 电解槽停机时须保持湿度或惰性气体保护,防止膜脱水催化,而启动时膜无需预热且能快速响应,其启停成本较低,可忽略不计。

本文采用 ALK 和 PEM 两种电解槽协同运行制氢的模式,下面分别对两种电解槽进行建模分析。

ALK 电解槽的总电压 V_{ALK} 如下所示

$$V_{\text{ALK}} = E_{\text{rev}} + V_{\text{act,a}} + V_{\text{act,c}} + V_{\text{ohm}} + V_{\text{conc}} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} E_{\text{rev}} = 1.229 - E_{\text{re}}(T - 298) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2} \sqrt{p_{\text{O}_2}}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \\ V_{\text{act},i} = \frac{RT}{\alpha_i F} \sinh^{-1} \left(\frac{j}{2j_{0,i}} \right), \quad i = a, c \\ V_{\text{ohm}} = j \left(\frac{d_{\text{elec}}}{\sigma_{\text{elec}}} + \frac{d_{\text{sep}}}{\sigma_{\text{sep}}} \right) \\ V_{\text{conc}} = \frac{RT}{2F} \ln \left(1 + \frac{j}{j_{\text{lim}}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: E_{rev} 为可逆电压; E_{re} 为温度修正系数(ALK 电解槽约 $9 \times 10^{-4} \text{ V/K}$); $i = a$ 时, $V_{\text{act,a}}$ 为阳极活化过电位; $i = c$ 时, $V_{\text{act,c}}$ 为阴极活化过电位; V_{ohm} 为欧姆过电位; V_{conc} 为浓度过电位; T 为温度; p_{H_2} 、 p_{O_2} 分别为氢气和氧气分压; $a_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水的活度,通常取 1; R 为通用气体常数, $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; F 为法拉第常数, 96485 C/mol ; j 为电流密度; $j_{0,i}$ 为交换电流密度; α_i 为传递系数; d_{elec} 、 d_{sep} 分别为电极和隔膜厚度; σ_{elec} 、 σ_{sep} 分别为电极、隔膜电导率; j_{lim} 为极限电流密度。

PEM 电解槽的总电压 V_{PEM} 如下所示

$$V_{\text{PEM}} = E_{\text{rev}} + V_{\text{act}} + V_{\text{ohm}} + V_{\text{mem}} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} E_{\text{rev}} = 1.229 - E_{\text{re}}(T - 298) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{\text{H}_2} \sqrt{p_{\text{O}_2}}}{a_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \\ V_{\text{act}} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) \\ V_{\text{ohm}} = j \left(\frac{d_{\text{elec}}}{\sigma_{\text{elec}}} + \frac{d_{\text{mem}}}{\sigma_{\text{mem}}} \right) \\ V_{\text{mem}} = \frac{RT}{F} t_w \ln \left(\frac{c_{\text{w}}^{\text{anode}}}{c_{\text{w}}^{\text{cathode}}} \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_{mem} 为膜过电位; E_{re} 为温度修正系数(PEM 电解槽约 $8.5 \times 10^{-4} \text{ V/K}$); d_{mem} 为膜厚度; σ_{mem} 为膜电导率,与湿度相关; t_w 为水传输系数; c_w 为水浓度。

则 ALK 和 PEM 电解槽的实时产氢量模型为

$$Q_{\text{H}_2}(t) = Q_{\text{H}_2, \text{ALK}}(t) + Q_{\text{H}_2, \text{PEM}}(t) \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} Q_{\text{H}_2, \text{ALK}}(t) = \varepsilon_{\text{F}} \cdot \frac{P_{\text{ALK}}(t)}{2FV_{\text{ALK}}(t)} \times \frac{R \cdot 273}{1.013 \times 10^5} \\ Q_{\text{H}_2, \text{PEM}}(t) = \frac{P_{\text{PEM}}(t)}{2FV_{\text{PEM}}(t)} \times \frac{R \cdot 273}{1.013 \times 10^5} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{ALK}}(t)$ 、 $P_{\text{PEM}}(t)$ 分别为输入 ALK、PEM 电解槽的功率; ε_{F} 为法拉第效率(通常为 95%~99%, PEM 电解槽法拉第效率接近 100%)。

2 风-光-储离网制氢系统优化模型

2.1 目标函数

风光储离网制氢系统容量配置的优化目标为全寿命周期经济性最佳,即全寿命周期内产氢量最大、总成本最低。合理配置电解槽以及风电、光伏、储能的装机容量,能够提高产氢效率,增加对风光资源的利用率^[14]。本文考虑资金的时间价值,以全寿命周期平准化制氢成本最低为优化目标进行建模,系统整体目标函数为

$$\min C_{\text{H}_2} = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{\text{inv},i} + C_{\text{re},i} + C_{\text{op},i} + C_{\text{dep},i}) / (1+r)^i}{\sum_{i=1}^N Q_{\text{H}_2,i} / (1+r)^i} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} C_{\text{inv},i} = \lambda_{\text{inv}, \text{wind}} P_{\text{wind},i} + \lambda_{\text{inv}, \text{pv}} P_{\text{pv},i} + \lambda_{\text{inv}, \text{es}} P_{\text{es},i} + \mu_{\text{inv}, \text{es}} E_{\text{es},i} + \theta_{\text{inv}, \text{ALK}} P_{\text{ALK},i} + \theta_{\text{inv}, \text{PEM}} P_{\text{PEM},i} \\ C_{\text{re},i} = \lambda_{\text{re}, \text{wind}} P_{\text{wind},i} + \lambda_{\text{re}, \text{pv}} P_{\text{pv},i} + \lambda_{\text{re}, \text{es}} P_{\text{es},i} + \mu_{\text{re}, \text{es}} E_{\text{es},i} + \theta_{\text{re}, \text{ALK}} P_{\text{ALK},i} + \theta_{\text{re}, \text{PEM}} P_{\text{PEM},i} \\ C_{\text{op},i} = \lambda_{\text{op}} C_{\text{inv},i} \\ C_{\text{dep},i} = \frac{(1 - \lambda_{\text{dep}})}{i} C_{\text{inv},i} \\ Q_{\text{H}_2,i} = \sum_{t=1}^T Q_{\text{H}_2}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: i 为年份; N 为系统的理论寿命年限; r 为折现率; $Q_{\text{H}_2,i}$ 为年制氢量; T 为全年时段数; $C_{\text{inv},i}$ 为初始建设成本; $C_{\text{re},i}$ 为设备更换成本,包括风电、光伏设备在项目期内更换风机叶片、更换光伏板,储能电芯寿命到期后更换电芯,电解槽大修、更换的成本; $C_{\text{op},i}$ 为运行维护成本; $C_{\text{dep},i}$ 为折旧成本; $\lambda_{\text{inv}, \text{wind}}$ 、 $\lambda_{\text{inv}, \text{pv}}$ 分别为风电、光伏单位功率的建设成本系数; $\lambda_{\text{inv}, \text{es}}$ 、 $\mu_{\text{inv}, \text{es}}$ 分别为储能单位功率、单位容量的

建设成本系数; $\theta_{\text{inv}, \text{ALK}}$ 、 $\theta_{\text{inv}, \text{PEM}}$ 分别为 ALK、PEM 电解槽的单位建设成本系数; $\lambda_{\text{re}, \text{wind}}$ 、 $\lambda_{\text{re}, \text{pv}}$ 分别为风电、光伏单位功率的更换成本系数; $\lambda_{\text{re}, \text{es}}$ 、 $\mu_{\text{re}, \text{es}}$ 分别为储能单位功率、单位容量的更换成本系数; $\theta_{\text{re}, \text{ALK}}$ 、 $\theta_{\text{re}, \text{PEM}}$ 分别为 ALK、PEM 电解槽的单位更换成本系数; $P_{\text{wind},i}$ 、 $P_{\text{pv},i}$ 、 $P_{\text{es},i}$ 、 $P_{\text{ALK},i}$ 、 $P_{\text{PEM},i}$ 分别为第 i 年对应设备的装机功率,包括建设期新建的设备及运营期新增的设备功率; $E_{\text{es},i}$ 为第 i 年储能的装机容量,包括建设期新建的及运营期新增的储能容量; λ_{op} 为系统整体的年运行维护成本系数; λ_{dep} 为系统整体的残差系数。

2.2 约束条件

(1) 装机容量约束

电解槽的总容量不应超过风电、光伏总装机容量,如下所示

$$0 \leq P_{\text{ALK},r} + P_{\text{PEM},r} \leq P_{\text{wind},p} + P_{\text{pv},p} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{ALK},r}$ 、 $P_{\text{PEM},r}$ 分别为 ALK、PEM 的额定功率; $P_{\text{wind},p}$ 、 $P_{\text{pv},p}$ 分别为项目建设完成后风电、光伏实际的总装机功率。

(2) 功率平衡约束

系统运行期内需满足电源侧和制氢侧的功率平衡条件,如下所示

$$\begin{aligned} P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{dis}}(t) = \\ P_{\text{ALK}}(t) + P_{\text{PEM}}(t) + P_{\text{ch}}(t) + P_{\text{loss}}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{loss}}(t)$ 为新能源发电的弃电功率,在新能源大发、电解槽负荷调整至上限时,其表达式如下

$$P_{\text{loss}}(t) = P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{ch}}(t) - P_{\text{ALK}}(t) - P_{\text{PEM}}(t) \quad (15)$$

(3) 电解槽调节范围约束

电解槽可调节范围约束如下所示

$$\begin{cases} \lambda_{\text{ALK}, \text{min}} P_{\text{ALK},r} \leq P_{\text{ALK}}(t) \leq \lambda_{\text{ALK}, \text{max}} P_{\text{ALK},r} \\ \lambda_{\text{PEM}, \text{min}} P_{\text{PEM},r} \leq P_{\text{PEM}}(t) \leq \lambda_{\text{PEM}, \text{max}} P_{\text{PEM},r} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\lambda_{\text{ALK}, \text{min}}$ 、 $\lambda_{\text{ALK}, \text{max}}$ 分别为 ALK 电解槽的可调下限、上限系数; $\lambda_{\text{PEM}, \text{min}}$ 、 $\lambda_{\text{PEM}, \text{max}}$ 分别为 PEM 电解槽的可调下限、上限系数。

(4) 电解槽启停次数约束

电解槽频繁启停会对设备造成损耗,降低使用寿命,系统应避免电解槽短时间反复启停、尽量减少启停次数^[15],电解槽启停次数约束如下所示

$$\begin{cases} \gamma_{\text{on},t-\alpha} - \gamma_{\text{off},t} = \theta_t - \theta_{t-1} \\ \gamma_{\text{on},t} \leq 1 - \theta_{t-1} \\ \gamma_{\text{off},t} \leq \theta_{t-1} \\ \sum_{t=1}^T \gamma_{\text{on},t} \leq \gamma_{\text{on},t}^{\text{max}} \\ \sum_{t=1}^T \gamma_{\text{off},t} \leq \gamma_{\text{off},t}^{\text{max}} \end{cases} \quad (17)$$

式中： α 为电解槽启动延时； θ_t 为 t 时段电解槽启停状态，启动状态为1、停机状态为0； $\gamma_{on,t}$ 、 $\gamma_{off,t}$ 分别为 t 时段电解槽启动动作、关停动作变量； $\gamma_{on,t}^{max}$ 、 $\gamma_{off,t}^{max}$ 分别为电解槽启动、关停次数上限。

(5) 储能充放电约束

储能充放电约束如下所示

$$\begin{cases} P_{ch}(t)P_{dis}(t)=0 \\ 0\leq P_{ch}(t)\leq P_{ch,max} \\ 0\leq P_{dis}(t)\leq P_{dis,max} \\ S_{min}\leq S(t)\leq S_{max} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $P_{ch,max}$ 为最大充电功率； $P_{dis,max}$ 为最大放电功率； S_{min} 为SOC下限； S_{max} 为SOC上限。

2.3 求解方法

本文所构建的模型，采用 Matlab 中的 Gurobi 求解器进行求解。整体流程如图2所示。

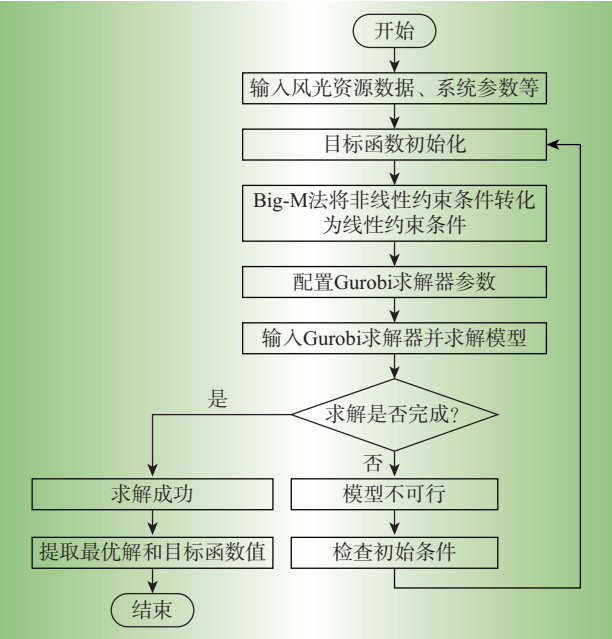


图2 求解流程

Fig. 2 Solution flow

3 算例分析

3.1 相关参数设置

本文以西北某地区为例，结合当地全年 8 760 h 的风电和光伏出力数据，对系统风电、光伏、储能、ALK 电解槽、PEM 电解槽的最优容量配置进行分析。要求新能源装机总容量 50 MW，电解槽总装机容量 20 MW，且为保障储能对于风光离网系统的暂态支撑能力，储能功率按不低于新能源装机容量的 30% 配置，时长至少 2 h。系统整体规划运行年限 20 年，折现率 6.5%。

当地风电、光伏设备的相关参数如表 1 所示。

表 1 风电光伏设备参数

Table 1 Wind and photovoltaic parameters

指标名称	风电	光伏
年有效利用小时数/h	2 200	1 600(直流侧)
造价/(元·W ⁻¹)	5	3
年运行维护成本/(元·W ⁻¹)	0.08	0.05

储能采用电化学储能，设备参数如表 2 所示。

表 2 储能设备参数

Table 2 Energy storage parameters

指标名称	数值
造价/(元·Wh ⁻¹)	0.8
换电成本/(元·Wh ⁻¹)	0.4
电芯寿命/年	10
年运行维护成本/Wh	0.005
充电效率/%	92.2
放电效率/%	92.2
SOC 下限/%	5
SOC 上限/%	95

制氢设备采用 ALK 和 PEM 两种电解槽，设备参数如表 3 所示。其中，由于现有技术条件下，两种电解槽均可通过材料创新、系统优化及控制策略等途径（如 ALK 电解槽采用高活性、耐腐蚀电极，PEM 电解槽使用超薄、高强度的质子交换膜），来实现短时超负荷稳定运行，不会对设备造成损坏，因此两种电解槽的可调范围上限为 110%。

表 3 电解槽参数

Table 3 Electrolyzer parameters

指标名称	ALK 电解槽	PEM 电解槽
单槽规模/(Nm ³ ·h ⁻¹)	2 000	500
可调范围下限/%	60	30
可调范围上限/%	110	110
单槽造价/(元·N ⁻¹ ·m ⁻³)	6 000	15 000
年运行维护成本/(元·N ⁻¹ ·m ⁻³)	400	500

3.2 系统容量配置优化

为验证本文所提模型的有效性，本文通过设置多种方案，分别进行容量配置优化，对比分析多场景下的系统运行特征。方案设计如表 4 所示。

表 4 方案设计

Table 4 Design of schemes

方案	是否考虑 风光发电	是否考虑 ALK 电解槽	是否考虑 PEM 电解槽	是否考虑 储能
1	是	是	否	是
2	是	是	否	否
3	是	是	是	是
4	是	是	是	否
5	是	否	是	是
6	是	否	是	否

求解得到不同方案的最优容量配置及运行结果如表5所示。

表5 不同方案的容量配置及运行结果
Table 5 Capacity configuration and operation results of different schemes

方案	1	2	3	4	5	6
风电装机/ MW	22.0	25.9	21.8	26.1	23.1	26.1
光伏装机/ MW	28.0	24.1	28.2	23.9	26.9	23.9
储能功率/ MW	15	0	15	0	15	0
储能容量/ MWh	30	0	30	0	30	0
ALK电解槽/ 台	2	2	1	1	0	0
PEM电解槽/ 台	0	0	4	4	8	8
制氢成本/ (元·kg ⁻¹)	15.62	17.80	16.58	17.43	17.60	17.40
弃电率/%	7.15	26.50	7.41	19.78	7.13	14.37
年启停 次数/次	807	526	626	519	438	496
年停机 时长/h	2 648	4 405	2 086	3 707	1 427	2 914
年产氢量/ (万 kg)	178.35	144.06	178.54	157.26	180.00	167.87

由表5容量配置结果可知：

(1) 配置储能对系统整体运行效益有提升作用。配置储能的方案,相比不配置储能的能够减少弃电50%以上,并减少电解槽年停机时长1 400 h以上,增加系统年产氢量约130~300万t。且方案1和方案3相比方案2和方案4,增加储能还能够显著降低制氢成本约1~2元/kg。而方案5配置储能的制氢成本相比方案6反而提高的原因是,PEM电解槽的可调节范围更大,一定程度上替代了储能机组的电力电量平衡调节功能,产氢量受到的影响小于其他方案。而增加储能之后系统的整体投资提高,总投资规模的增幅大于总产氢量的增幅,使得最终制氢成本略有提升。

(2) ALK电解槽在经济性方面优于PEM电解槽。对比表5方案计算结果可知,随着ALK电解槽数量减少,PEM电解槽数量增加,制氢成本增加约0.9元/kg。这是由于PEM电解槽造价远高于ALK电解槽,使得初始投资增加,且初始投资的增幅大于年产氢量的增幅,因此整体制氢成本也会增加。

(3) PEM电解槽在运行性能方面优于ALK电解槽。同样表5可知,增加PEM电解槽数量可以降低弃电率约5%~6%,减少电解槽年启停次数180次以上,减少年停机时长约600 h。PEM电解槽的优点之

一是可调范围较大,相比ALK电解槽能够减少启停次数和停机时长,从而延长使用寿命,使得系统整体运行更为平稳安全。故综合考虑系统经济性和稳定性,宜采用PEM电解槽和ALK电解槽混合制氢的策略。

综上,混合电解槽模型相比单一电解槽模型,能够减少电解槽总启停次数,从而提高新能源利用率,促进新能源消纳,减少弃电,并因此增加产氢量,使得单位制氢成本降低,实现对系统整体的综合优化。

4 结束语

基于新能源出力波动性强、不确定性大导致的消纳难、并网难等问题,将新能源发电与制氢结合起来能够发挥各自优势,促进新能源消纳的同时加快氢能产业发展。本文构建了离网型风光储制氢系统,并对系统的容量配置优化进行了建模,结合西北某地区的风光数据进行了仿真验证。结论如下：

(1) 混合电解槽协同制氢相比单一电解槽制氢,可降低制氢成本约1.02元/kg,并减少电解槽年启停次数约22%,缩短年停机时长约21%。可实现新能源发电的更高效利用,增加系统整体产氢量,同时也能通过减少电解槽启停次数,延长系统整体寿命。

(2) 本文所构建的风光储离网制氢系统容量配置优化模型,能够有效反映系统整体的经济性效益和容量优化配置效果。在不同场景需求下,模型可求解得到风电、光伏、储能、电解槽的最优容量配置组合,使得系统整体制氢成本最低的同时,尽可能减少了启停次数和停机时长,显著提升了系统的灵活性、经济性和制氢效率。

综上,ALK和PEM电解槽混合协同运行策略在离网型新能源制氢中具有一定的应用前景,未来可进一步研究风电、光伏波动性对混合电解槽协同制氢系统的影响,以及在电解槽设备层面进行改进从而实现对氢能进一步的制取利用。D

参考文献：

[1] 金红光,郭烈锦,宣益民,等.“双碳”目标下能源转化与利用科学问题[J].中国科学基金,2025,39(3):474-488.
JIN Hongguang, GUO Liejin, XUAN Yimin, et al. Scientific issues related to energy conversion and utilization under the “dual carbon” goals [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3):474-488.

- [2] 邹才能, 李建明, 张茜, 等. 氢能工业现状、技术进展、挑战及前景[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 1-20.
ZOU Caineng, LI Jianming, ZHANG Xi, et al. Industrial status, technological progress, challenges and prospects of hydrogen energy[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 1-20.
- [3] 周峻, 冀承泽, 李儒欢, 等. 电解水制氢技术发展现状及其在新型电力系统中的应用进展[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2 096-2 113.
ZHOU Jun, JI Chengze, LI Ruhuan, et al. Recent development in the technology of water electrolysis and its applications to new power systems[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2 096-2 113.
- [4] 杨晓, 姚明宇, 韩伟, 等. 大规模可再生能源电解制氢技术现状及发展研究[J]. 热力发电, 2025, 54(5): 33-43.
YANG Xiao, YAO Mingyu, HAN Wei, et al. Review on current status and development of largescale renewable energy electrolysis hydrogen production technology[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(5): 33-43.
- [5] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2 187-2 201.
CAO Fan, GUO Tingting, CHEN Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2 187-2 201.
- [6] WANG X, LI K, LIU G, et al. Collaborative optimization of hydrogen energy systems: a game-theoretic integration of production, usage and refueling in cross-sectoral scenarios[J]. Applied Energy, 2025, 398: 126 450.
- [7] YILMAZ C, ARSLAN M, OZDEMIR S N, et al. Thermal design and genetic algorithm optimization of geothermal and solar-assisted multi-energy and hydrogen production using artificial neural networks[J]. Energy, 2025, 324: 135 941.
- [8] 魏一凡, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 面向碳中和的新能源汽车与车网互动技术展望[J]. 汽车工程, 2022, 44(4): 449-464, 444.
WEI Yifan, HAN Xuebing, LU Languang, et al. Technology prospects of carbon neutrality-oriented new-energy vehicles and vehicle-grid interaction[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(4): 449-464, 444.
- [9] 姜建国, 姚德华, 毕洪波. 风光氢储耦合系统容量配置优化研究[J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(4): 98-104.
JIANG Jianguo, YAO Dehua, BI Hongbo. Optimization study on capacity allocation of wind, light and hydrogen storage coupling system[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(4): 98-104.
- [10] HAHOLU O, DUMAN A C, GÜLER Ö. Technoeconomic analysis of off-grid residential hybrid renewable energy systems utilizing excess energy for small-scale green hydrogen production[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025: 107 422.
- [11] 吕东, 冒焯颖, 丁敏. 考虑热-电-气-氢-碳耦合与源荷响应的综合能源系统优化调度[J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(3): 65-70.
LYU Dong, MAO Yeying, DING Min. Optimal scheduling of integrated energy system considering heat-electricity-gas-hydrogen-carbon coupling and the source-load response[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(3): 65-70.
- [12] 康忠健, 范佳瑄, 陈光, 等. 基于AHP-DEMATEL的风光储氢系统中混合电解槽容量配置优化方法[J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(4): 35-43.
KANG Zhongjian, FAN Jiaxuan, CHEN Guang, et al. Optimization method of hybrid electrolyzer capacity configuration in wind-solar hydrogen storage system based on AHP-DEMATEL[J]. Power Demand Side Management, 2025, 27(4): 35-43.
- [13] XIE J, ZHANG Y, XIANG M, et al. Optimal configuration method of hydrogen energy system for coordinated operation of multi-type electrolyzers for new energy consumption[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 113: 564-574.
- [14] 谢金勇, 张逸, 张亚超, 等. 提升新能源消纳的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, 1-15[2025-07-25].
XIE Jinyong, ZHANG Yi, ZHANG Yachao, et al. Optimized configuration method of park-level hydrogen energy system for coordinated operation of hybrid electrolyzers to improve new energy consumption[J]. Power System Technology, 1-15[2025-07-25].
- [15] 徐衍会, 李冠霖. 基于碱性-质子交换膜混合电解槽的离网型风光耦合制氢系统容量配置优化[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(4): 1-9.
XU Yanhui, LI Guanlin. Capacity configuration optimization of off-grid wind-solar coupling hydrogen production system based on alkaline-proton exchange membrane hybrid electrolyzers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 1-9.

作者简介:

韩连山(1986), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制工作;

胡洋(2000), 男, 安徽安庆人, 助理工程师, 主要从事电力系统分析与设计工作;

牛洪海(1980), 男, 辽宁鞍山人, 高级工程师, 主要从事电力系统保护控制系统的研究和设计工作。

(责任编辑 水 鹤)