

# 多场景下基于平滑因子的离网风储制氢功率协调控制策略研究

王立超<sup>1</sup>, 武家辉<sup>1</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 杨健<sup>2</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐市 830047;

2. 中广核新能源投资(深圳)有限公司新疆分公司, 乌鲁木齐市 830011)

**摘要:**【目的】针对离网型风储制氢系统中风电功率强波动性导致电解槽运行不稳定、启停频繁、效率下降等问题,提出一种不依赖风功率预测的多场景功率平滑控制策略。【方法】基于一阶低通滤波原理构建平滑功率指令方程,依据碱性电解槽的工作特性与效率特性,将其运行过程划分为启动、高效、额定及过载四个典型场景,并为各场景独立配置平滑因子。通过储能系统实时补偿风电与电解槽之间的功率差额,利用状态机实现运行场景的动态切换,构建多场景协调控制架构,实现对风电波动的自适应平滑。【结果】仿真结果表明,与现有控制方法相比,所提策略能够显著平抑电解槽输入功率波动,有效提升系统运行平稳性与制氢效率。【结论】在基本不增加系统总能耗的前提下,该策略可大幅延长电解槽高效运行时间、减少启停次数,并提高单位能耗产氢量,表现出良好的综合性能。为离网型风储制氢系统提供了一种结构清晰、鲁棒性强且不依赖预测的功率平滑解决方案。

**关键词:**离网型风储制氢;功率平滑控制;平滑因子;状态机;波动平抑

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2026)05-0170-15

DOI: 10. 12204/j. issn. 1000-7229. 2026. 05. 014

## Research on Coordinated Power Control Strategy for Off-Grid Wind-Storage Hydrogen Production Based on Smoothing Factor in Multiple Scenarios

WANG Lichao<sup>1</sup>, WU Jiahui<sup>1</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. CGN New Energy Investment (Shenzhen) Co., Ltd. Xinjiang Branch, Urumqi 830011, China)

**ABSTRACT:** [Objective] To address the problems of electrolyzer operation instability, frequent start-stop cycles, and efficiency reduction caused by strong wind power fluctuations in off-grid wind-storage hydrogen production systems, a power smoothing control strategy for multiple scenarios that does not rely on wind power forecasting is proposed. [Methods] Based on the principle of first-order low-pass filtering, a smoothed power command equation is constructed. According to the working and efficiency characteristics of alkaline electrolyzers, the operation process is divided into four typical scenarios: startup, high-efficiency, rated, and overload, with smoothing factors independently configured for each scenario. The energy storage system compensates in real-time for the power difference between wind power and the electrolyzer, and dynamic switching of operating scenarios is achieved using a state machine to build a multi-scenario coordinated control architecture, realizing adaptive smoothing of wind power fluctuations. [Results] Simulation results show that, compared with existing control methods, the proposed strategy can significantly suppress fluctuations in electrolyzer input power and effectively improve system operation stability and hydrogen production efficiency. [Conclusions] The strategy can greatly extend the high-efficiency operating time of the electrolyzer, reduce the number of start-stop cycles, and increase hydrogen production per unit energy consumption without substantially increasing the total system energy consumption, demonstrating good comprehensive performance. This provides a power smoothing solution with a clear structure, strong robustness, and no reliance on forecasting for off-grid wind-storage hydrogen production systems.

This work is supported by Key Research and Development Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022B01020-3) and Research on Xinjiang's Carbon-Neutral Energy Science and Technology (No. 2022TSYCLJ0001).

**KEYWORDS:** off-grid wind-battery hydrogen production; power smoothing control; smoothing factor; state machine; fluctuation suppression

## 0 引言

随着“双碳”目标的提出,风电、光伏等可再生能源技术和“绿氢”技术正在推动发展<sup>[1]</sup>。氢能具有热值高、清洁等优点<sup>[2]</sup>,是一种非常理想的绿色能源,许多国家正在推进氢能的发展<sup>[3]</sup>。利用可再生能源电解水制氢能够有效促进风光消纳和能源结构优化<sup>[4]</sup>,充分合理利用风光可提高风光利用率,减少弃风弃光和平抑风光波动,非常有利于低碳化事业和“双碳”目标的发展。

电解水制氢技术根据是否与电网耦合分为并网型和离网型<sup>[5]</sup>。并网型制氢可与电储能协同平抑风光出力的波动性,利用富余电能制取氢气,在电网需要的时候氢能也可转化为电能来稳定电网电力运输,文献[6]通过储能电池状态为观测器,对电解槽的启停进行控制,可以有效稳定母线上电压。文献[7]针对风电出力与碱性电解槽(alkaline water electrolyzer, AWE)工作特性间的矛盾问题提出一种效率优化控制策略,考虑平抑层和修正层,实现了电解槽与超级电容器之间功率合理分配,有效提高了制氢电厂的能源利用率。文献[8]采用分段模糊控制电解槽阵列的运行来提高制氢效率,并建立优化调度模型,采用人工蜂群算法求解最优制氢功率。文献[9]提出由启动运行、最优功率运行、额定功率运行及过载运行组成的四情景优化运行,并依据电解槽电解电压进行轮值,提高制氢效率和运行均衡性。并网型制氢研究一方面关注氢储能与电储能的结合控制、容量配置及优化调度;另一方面,为了契合电解槽的运行特性、提高整体效率与寿命,多场景的运行控制理念已在相关研究中被采用,这些研究对认识和运用电解槽的多段运行特性具备借鉴价值<sup>[10]</sup>。

而离网型制氢方面多数研究考虑风光波动性等因素的制氢系统的控制策略和容量配置<sup>[11]</sup>,两者的核心目的即实现最佳功率分配,提高制氢系统稳定性、效率和经济性<sup>[12]</sup>。因为离网型制氢没有电网支撑,主要依靠风电、光伏等可再生能源作为电源,风光波动性使得离网型制氢过程的稳定性、制氢效率受到较大冲击,导致电解槽启停频繁、运行工况恶劣。文献[13]提出一种基于风电预测的多目标滚动优化控制方法对离网型风氢系统的电解槽进行控

制,有效减少了电解槽的启停次数。文献[14]提出AWE阵列轮值协调控制策略,有效提升了电解槽阵列的运行安全性。文献[15]将基于区间最值的灰狼算法与长短期记忆网络结合为预测模型,对离网型风光储系统进行控制策略优化和容量配置,有效提高系统稳定性和增加系统收益。文献[16]提出了一种最小二乘支持向量机的超短期组合预测模型,先通过变分模态分解预处理风功率,后利用蜻蜓算法优化向量机并组建预测模型,以提高预测鲁棒性。文献[17]通过预测风电出力的最大值和最小值,并在此基础上采用交替控制策略对电解槽进行控制,可以降低风电的波动性。

上述基于预测的方法虽可提前应对功率波动,但其效果受预测精度影响显著,且预测模型往往计算复杂、依赖历史数据与训练过程<sup>[18]</sup>。此外,离网场景下预测系统的部署与维护亦会增加系统复杂性与成本<sup>[19]</sup>。为此,本文探索一种不依赖风功率预测的多场景功率平滑控制策略,通过在不同运行场景中独立设置平滑功率指令与平滑因子,并配合储能系统进行实时功率协调,以改善电解槽运行环境,提升其高效稳定运行时间,从而为离网型风电制氢系统的规模化应用提供更具鲁棒性与实用性的解决方案。

与现有研究相比,本文的主要贡献和创新点体现在以下三个方面:

1)提出一种不依赖风功率预测的多场景功率平滑控制架构。针对离网风电制氢系统中风电强波动性问题,采用状态机实现运行场景智能切换<sup>[20]</sup>,结合一阶低通滤波实现功率平滑过渡,避免了风功率预测的依赖性与复杂性,在降低系统实施门槛的同时实现了对风电波动的自适应平滑。

2)将碱性电解槽的物理约束深度融入控制逻辑设计。基于电解槽爬坡率<sup>[21]</sup>、冷启动时间、过载时限等关键参数,设计了储能放电时间阈值及过载退出条件,使控制策略与设备特性深度耦合,增强了策略的工程适用性与鲁棒性。

3)建立多场景划分与平滑因子差异化配置的协同机制。依据电解槽工作特性将运行过程划分为四个典型场景,并为各场景独立配置平滑因子。通过单因素敏感性分析明确平滑因子选取依据,保证了参数设置的合理性与可解释性。

## 1 离网型风储协调制氢系统建模

### 1.1 系统拓扑结构

离网型风储协调制氢系统由风力发电机、磷酸铁锂电池储能、AWE、储氢罐以及氢负荷组成,如图 1 所示。

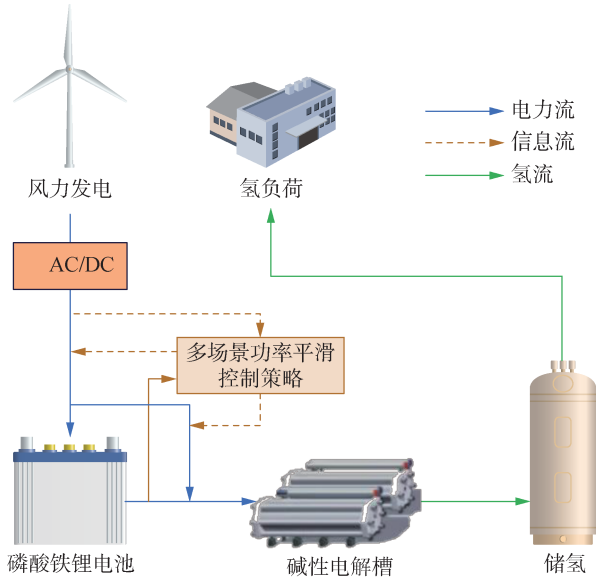


图 1 离网型风储协调制氢系统

Fig. 1 Off-grid wind-battery hybrid system for coordinated

在离网型风储制氢系统中,风力发电机作为唯一的供电单元,为系统提供全部电能输入,本文采用某风电场历史出力数据模拟其功率输出特性。为保证风电波动下制氢过程的连续与稳定,系统配备了磷酸铁锂电池储能装置,其不仅具备高安全性、长循环寿命及较好的经济性,更因毫秒级的快速功率响应能力,能有效协调风电功率波动与电解槽功率需求之间的实时匹配<sup>[22]</sup>。AWE 是实施电解水制氢的核心设备,其运行稳定性直接关系到制氢效率与系统整体性能,因此需通过合理的控制策略与储能协同,确保其在离网环境下仍能保持平稳、高效运行。

需要说明的是,图 1 中的电解槽产生的氢气需先进入储氢罐后再供给下游氢负荷。这是因为风电的强波动性会导致电解槽产氢压力和速率波动,若直接供给下游,会使其输入压力不稳,并增加电解槽氢氧压差波动的安全风险。储氢罐可起到缓冲作用,稳定氢气压力、削峰填谷,保证下游连续稳定供氢<sup>[23]</sup>。同时,产生的低压氢气需经压缩、纯化后方可使用,储氢罐便于集中处理与调度<sup>[24]</sup>。本研究聚焦于风电-储能-电解槽侧的功率协调控制,暂不涉及储氢及下游用氢环节的建模与优化,后续将在容量配置研究中进一步考虑。

### 1.2 储能系统建模与选型分析

储能的荷电状态(state of charge, SOC)是表征其能量储存水平的关键变量,其离散时间模型可表示为:

$$S_{oc}(t+1) = S_{oc}(t) + \frac{\eta_c P_c(t)\Delta t - \eta_d^{-1} P_d(t)\Delta t}{E_{ESS}} \quad (1)$$

式中: $S_{oc}(t)$ 为 $t$ 时刻储能 SOC 值; $P_c(t)$ 与 $P_d(t)$ 分别为储能的充电与放电功率; $\eta_c$ 和 $\eta_d$ 分别为充、放电效率; $E_{ESS}$ 为储能额定容量; $\Delta t$ 为仿真步长。为避免过充过放并延长储能寿命,本文设定储能 SOC 的运行范围为 10%~90%<sup>[25]</sup>。

储能与风储制氢系统的协调控制关系体现在功率平衡层面:

$$P_{ref}(t) + P_{ess}(t) = P_w(t) \quad (2)$$

式中: $P_{ref}(t)$ 为 $t$ 时刻电解槽平滑功率指令; $P_{ess}(t)$ 为 $t$ 时刻储能的净输出功率; $P_w(t)$ 为 $t$ 时刻风电功率。通过实时调节储能功率 $P_{ess}(t)$ ,可动态吸收或补偿风电功率 $P_w(t)$ 与电解槽平滑功率指令 $P_{ref}(t)$ 之间的瞬时差额,从而抑制风电波动对电解槽的直接影响,确保电解槽按平滑指令稳定运行<sup>[26]</sup>。

在离网型风电制氢系统中,储能需具备高可靠性、频繁充放电能力及快速功率响应特性。本文选用磷酸铁锂电池,主要基于其高安全性、长循环寿命、毫秒级功率响应能力以及较好的经济性,能够有效适配离网场景下风电的强波动性,保障系统持续稳定运行。

### 1.3 碱性电解槽建模

目前,在电解槽类型方面,发展较为成熟的电解水制氢技术分别是碱性电解槽和质子交换膜电解槽<sup>[27]</sup>。碱性电解槽具有较长的发展历史<sup>[28]</sup>,相对质子交换膜电解槽而言技术更加成熟、购置成本更低且可以进行较大规模的制氢<sup>[29]</sup>,因此本文选择碱性电解槽为主要研究对象。

#### 1.3.1 碱性电解槽电压-电流关系

AWE 的数学模型有机理模型、半经验模型<sup>[30]</sup>、经验模型。机理模型即物理模型虽能够精确描述碱性电解槽的物理过程但表达式较为复杂且运算量较大,而经验模型即通过曲线拟合的方式建立的模型,缺乏实际物理意义,模型精度不高。半经验模型兼具机理模型和经验模型二者优点,适合对电解槽进行模拟研究<sup>[31]</sup>。所以,本文选择基于半经验模型建立碱性电解槽电压-电流关系式<sup>[32]</sup>:

$$U_{cell} = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T_{el}}{A_{el}} I_{el} + \text{Slg} \left( \frac{t_1 + t_2/T_{el} + t_3/T_{el}^2}{A_{el}} I_{el} + 1 \right) \quad (3)$$

式中:  $U_{\text{cell}}$  为电解槽的小室电压;  $I_{\text{el}}$  为电解槽的电流;  $r_1, r_2, S, t_1, t_2, t_3$  均为电化学相关参数;  $A_{\text{el}}$  为电极面积;  $T_{\text{el}}$  为电解液的温度。具体参数值见附录表A1。电解槽电压-电流关系曲线如图2所示。

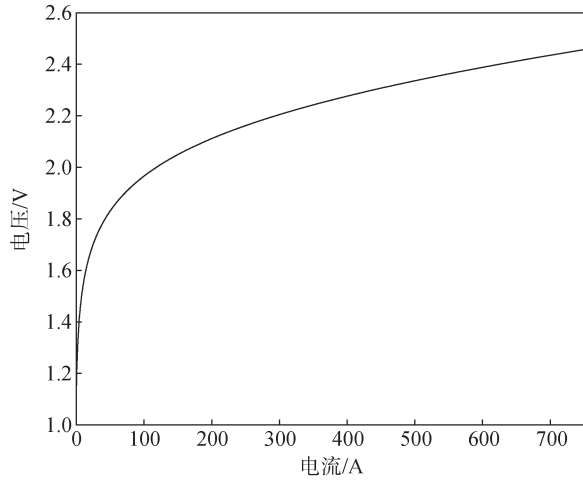


图2 电解槽电压-电流关系曲线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the electrolyzer voltage-current characteristic curve

电解槽包括若干个串并联的电解槽小室, 电解槽电压  $U_{\text{el}}$  可表示为:

$$U_{\text{el}} = N_{\text{el}} U_{\text{cell}} \quad (4)$$

式中:  $N_{\text{el}}$  为电解槽小室数量。

### 1.3.2 碱性电解槽制氢效率

电解槽制氢效率由电压效率和电解槽的法拉第效率组成, 电压效率由热中性电压与实际电压之比得到:

$$\eta_e = \frac{U_{\text{th}}}{U_{\text{el}}} \quad (5)$$

式中:  $\eta_e$  为电压效率;  $U_{\text{th}}$  为电解槽的热中性电压。

在恒温恒压条件下, 电解槽的法拉第效率  $\eta_F$  为:

$$\eta_F = 96.5e^{(0.09U_{\text{el}} - 75.5U_{\text{el}}^2)} \quad (6)$$

所以, 电解槽的制氢效率  $\eta$  (下文简称“电解槽效率”) 为:

$$\eta = \eta_e \eta_F \quad (7)$$

由式(3)—(7)可得出 AWE 效率跟随功率变化的曲线, 如图3所示。

从图3中可以看出, 电解槽效率曲线随着功率的增加先迅速上升至最高效率点后缓慢下降并逐渐趋于稳定, 因此电解槽效率最高点所对应的电解槽功率是一个较小的轻载功率。

### 1.4 碱性电解槽工作特性分析

AWE 在工作时有特殊的运行功率要求。首先电解槽的最小运行功率不能过低, 一般为额定功率的 15%~20%<sup>[33]</sup>, 原因是过低的运行功率会增加氢氧混

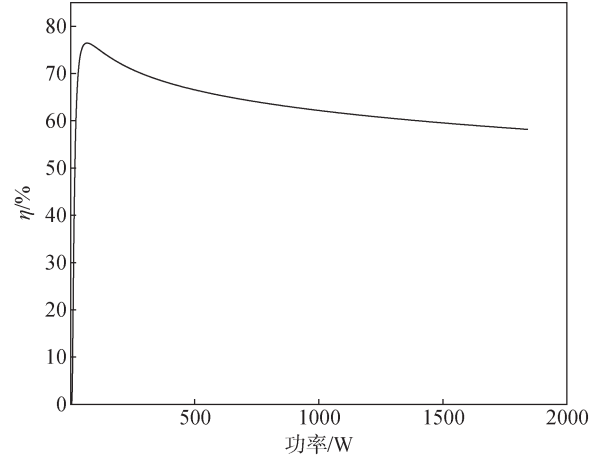


图3 电解槽效率-功率关系曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the electrolyzer efficiency-power characteristic curve

合的比例, 非常不利于生产安全<sup>[34]</sup>; 其次电解槽最大运行功率可以过载, 一般为额定功率的 110%~130%<sup>[35]</sup>, 但过载时间不宜过长, 否则会损害设备、降低运行性能。

AWE 启动过程通常分为冷启动和热启动<sup>[36]</sup>。冷启动是指电解槽从停机状态到正常运行状态的过程, 在这个过程中电解槽首先消耗功率提升制氢温度, 所以耗时较长, 通常为 15~60 min。而电解槽在工作一段时间后暂停运作时会保持一定的温度, 若此时电解槽启动过程会缩短较多时间, 仅需几分钟就可重新运作, 即热启动。另外, 电解槽从正常运行状态到停机状态的过程仅需几秒。总之, 电解槽运行功率呈现从低到高需要较长时间, 反之仅需较少时间的工作特点。

所以, 电解槽的运行控制必须充分考虑其效率特性和工作特性。

## 2 多场景下基于平滑因子的功率平滑控制策略

针对离网型风储制氢系统中风电波动性强、直接冲击电解槽运行稳定性的问题, 现有研究多通过风功率预测实现功率提前调度, 但其效果受预测精度制约, 且系统复杂性与成本较高。

为此, 本文从平滑控制角度出发, 提出一种基于多场景的功率平滑控制策略。该策略不依赖于风电预测, 而是依据电解槽在启动、最佳、额定及过载等不同运行场景的特性, 分别设计平滑功率指令与平滑因子, 并通过储能系统实时补偿功率差额, 从而在无需预测的前提下实现功率波动抑制与运行状态优化, 旨在提升离网环境下制氢过程的平稳性与整体效率。该方法基于一阶低通滤波器的离散时间差分

方程形式,构建电解槽平滑功率指令方程:

$$P_{\text{ref}}(t) = \alpha P_{\text{ref}}(t-1) + (1-\alpha)P_w(t) \quad (8)$$

式中: $\alpha$ 为平滑因子, $0 \leq \alpha \leq 1$ ,其关键决定了平滑程度。 $\alpha$ 越接近1, $P_{\text{ref}}(t)$ 变化越缓慢,系统越稳定,但对风电趋势的跟踪延迟越大,需要储能容量越大。

该方程类似于一个“惯性”系统,新的指令值是旧指令值和新风电值的加权平均,使得任何风电的突变都被延缓平滑地施加到电解槽上。储能的协调作用也起到关键作用,在本策略中只需全力弥补瞬时功率缺口,无需判断风电趋势。电解槽运行过程一般分为启动功率点、最佳功率点、额定功率点及过载功率点四个场景,以下是分别在电解槽运行过程中的四个运行场景具体的策略设计和控制流程设计。

由电解槽工作特性所决定,电解槽运行功率为 $[0.2P, 1.2P]$ ,其中 $P$ 为额定功率。所以设电解槽启动功率为 $0.2P$ ,最大过载功率为 $1.2P$ ,且每次进入过载并持续的最大时间为15 min。由电解槽制氢效率-功率特性曲线可以了解到制氢效率最高点对应的功率大约为 $0.35P$ ,设电解槽最佳制氢功率为 $0.35P$ 。另外,设置电解槽待机功率为 $0.15P$ ,待机的目的是 $P_w(t)$ 恢复时能够使电解槽迅速热启动,缩减启动时间。电解槽运行总台数为 $n$ , $n$ 为正整数。

## 2.1 多场景功率平滑控制设计

场景控制策略当中的所有时间阈值均依据电解槽物理特性设定,并与仿真采样周期相匹配,以保证控制逻辑的时间尺度协调统一。

### 2.1.1 启动功率场景

在该场景下,电解槽总运行台数为 $q$ , $q=1,2,\dots,n$ 。台数 $q$ 由满足启动条件的风功率决定:

$$q = \left\lfloor \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{st}}} \right\rfloor \quad (9)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 代表向小取整; $P_{\text{st}}$ 为启动功率;平滑因子 $\alpha$ 取0.95,确保指令变化缓慢,避免波动。当 $P_{\text{ref}}(t) \geq P_{\text{st}} + \delta$ ( $\delta$ 为启动迟滞量,设为 $0.1P_{\text{st}}$ )时,第 $i$ 台电解槽的运行功率 $P_{e,i}$ 由式(10)确定:

$$P_{e,i}(t) = \min \left( P_b, P_{\text{st}} + \int_{t-1}^t r_{\text{ramp}} dt \right) \quad (10)$$

式中: $r_{\text{ramp}}$ 为爬坡率限制, $i=1,2,\dots,q$ 。该式确保电解槽功率从 $P_{\text{st}}$ 开始,以不超过 $r_{\text{ramp}}$ 的速率平滑上升,直至达到当前指令值或最佳功率 $P_b$ 。设置电解槽运行状态的持续时间为 $T_{\text{under}}$ ,则当 $P_{\text{ref}}(t) < P_{\text{st}}$ 时,电解槽运行状态由式(11)确定:

$$P_{e,i}(t) = \begin{cases} P_{\text{st}}, & T_{\text{under}} < 30 \\ P_{\text{standby}}, & T_{\text{under}} \geq 30 \\ 0, & T_{\text{under}} \geq 60 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{standby}}$ 为待机功率。该式表明,根据持续时间情况决定电解槽运行状态分别为启动、待机和停机。

储能通过充放电协调功率平滑,储能的充放电功率 $P_{\text{ess}}(t)$ 由式(12)决定。

$$P_{\text{ess}}(t) = P_w(t) - P_{\text{ref}}(t) \quad (12)$$

如果 $P_w(t) > P_{\text{ref}}(t)$ ,储能充电;如果 $P_w(t) < P_{\text{ref}}(t)$ ,储能放电,以维持 $P_{\text{ref}}(t)$ 。当储能SOC为90%时,停止充电,提高 $P_{\text{ref}}(t)$ ;当储能SOC为10%时,停止放电,并调低 $P_{\text{ref}}(t)$ 以匹配 $P_w(t)$ 。

### 2.1.2 最佳功率场景

在此场景下,最佳制氢功率台数为 $k$ ,其中 $k$ 计算式为:

$$k = \left\lfloor \frac{P_{\text{ref}}}{P_b} \right\rfloor \quad (13)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 代表向小取整; $k=1,2,\dots,n$ 。本场景主要目的是提高制氢效率,优先让尽可能多的电解槽运行在最佳功率点 $P_b$ , $\alpha$ 取0.90。电解槽的运行功率 $P_e$ 按式(14)分配:

$$P_{e,i}(t) = \begin{cases} P_b, & i = 1, 2, \dots, k \\ P_{\text{ref}}(t) - kP_b, & i = k + 1 \\ 0, & i = k + 2, \dots, n \end{cases} \quad (14)$$

若 $P_{\text{ref}}(t) > nP_b$ 持续时间 $T_{\text{under}} \geq 15$  min,则切换至额定功率场景。本式中第 $k+1$ 台电解槽运行功率仍以式(10)变化,而本式是其变化的目标值。若 $P_{\text{ref}}(t) < kP_b$ 持续时间 $T_{\text{under}} \geq 15$  min,则将当前总功率指令均分至 $k$ 台电解槽,即:

$$P_{e,i}(t) = \frac{P_{\text{ref}}(t)}{k}, \forall i \leq k \quad (15)$$

使 $k$ 台电解槽能够处于相近的最佳功率点。若 $P_{\text{ref}}(t) < (k-1)P_b$ 持续时间 $T_{\text{under}} \geq 15$  min,让1台电解槽返回场景1运行策略并更新 $k=k-1$ 。剩余 $k-1$ 台电解槽的功率设定值调整为:

$$P_{e,i}(t) = \frac{P_{\text{ref}}(t)}{k-1}, \forall i \leq k-1 \quad (16)$$

储能弥补 $P_{\text{ref}}(t)$ 与 $P_w(t)$ 的瞬时差值:

$$P_{\text{ess}}(t) = P_w(t) - P_{\text{ref}}(t) \quad (17)$$

当SOC为90%时,停止充电,并允许 $P_{\text{ref}}(t)$ 轻微上调以消耗多余 $P_w(t)$ 。

### 2.1.3 额定功率场景

所有 $n$ 台电解槽逐渐运行至额定功率 $P$ 。平滑因子 $\alpha$ 取较大值,使 $P_{\text{ref}}(t)$ 能缓慢跟踪风电趋势,其上限为:

$$P_{\text{ref}}(t) \leq nP \quad (18)$$

电解槽功率从当前值逐渐升至额定功率 $P$ ,即:

$$P_{e,i}(t) = \min[P, P_{\text{ref}}(t)] \quad (19)$$

如果  $P_{\text{ref}}(t) \geq nP$  持续时间  $T_{\text{under}} \geq 30 \text{ min}$ , 则优先让储能吸收多余功率:

$$P_{\text{ess}}(t) = P_w(t) - nP \quad (20)$$

若此过程中储能 SOC 达到 90%, 则停止充电, 系统随即切换至过载功率场景。当检测到  $P_w(t) < nP$  时, 由储能放电弥补功率缺口:

$$P_{\text{ess}}(t) = P_w(t) - \sum_{i=1}^n P_{e,i}(t) \quad (21)$$

若储能持续放电时间  $T_{\text{ess,dis}} \geq 30 \text{ min}$ , 从时刻  $T_{\text{trigger}}$  开始, 平滑功率指令从当前值  $nP$  开始线性下降, 下降速率受限于  $r_{\text{ramp,down}}$ , 即:

$$P_{\text{ref}}(t) = nP - r_{\text{ramp,down}}(t - T_{\text{trigger}}) \quad (22)$$

下降速率  $r_{\text{ramp,down}}$  的设定需满足每 30 min 下降的功率值不超过一台电解槽的额定功率与最佳功率之差, 即:

$$r_{\text{ramp,down}} \leq \frac{P - P_b}{30} \quad (23)$$

当  $P_w(t) < nP_b$  时, 退出额定功率场景, 切换回最佳功率场景。

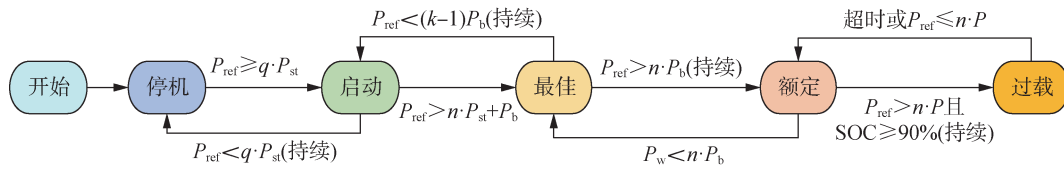


图4 电解槽运行场景切换条件关系图

Fig. 4 Flowchart of the segmented power smoothing control strategy

由场景2进入场景3的条件: 当  $P_{\text{ref}} > nP_b$  持续时间达到阈值时, 即风功率足以支持全部电解槽运行于额定功率且仍有盈余时, 系统进入额定功率场景。

由场景3进入场景4的条件: 在额定场景下若  $P_{\text{ref}} > nP$  持续达到时间阈值, 且储能  $\text{SOC} \geq 90\%$ , 则系统进入过载场景。由高阶场景切回低阶场景的条件: 当风功率下降, 致使  $P_{\text{ref}}$  低于当前场景维持所需功率阈值并持续一定时间时, 系统将退回至更低功率水平的场景。储能协调策略贯穿所有场景, 其充放电功率  $P_{\text{ess}} = P_w - P_{\text{ref}}$ 。当 SOC 触及限制边界时, 通过调整  $P_{\text{ref}}$  参与系统功率平衡, 防止过充或过放。

该控制流程通过将复杂的多规则决策转化为清晰的状态机切换, 并与明确的数学式相结合, 确保了离网型风储制氢系统在不同波动场景下的稳定、高效运行。多场景功率协调控制流程图详见附录图 B1—B3。

### 2.3 平滑因子的参数选取方法

在一阶低通滤波器中, 平滑因子  $\alpha$  决定了功率指令对风电波动的衰减程度。  $\alpha$  的选取需综合考虑电解槽

### 2.1.4 过载功率场景

本场景下, 允许电解槽短时过载运行。平滑因子  $\alpha$  取 0.80, 使  $P_{\text{ref}}(t)$  能快速响应高风电功率。  $P_{\text{ref}}(t)$  的上限动态设置为  $1.2nP$ 。电解槽功率均匀分配:

$$P_{e,i}(t) = \frac{P_{\text{ref}}(t)}{n} \quad (24)$$

并启动过载计时器  $T_{\text{overload}}$ 。若  $T_{\text{overload}} \geq 15 \text{ min}$  或  $P_{\text{ref}}(t) \leq nP$ , 退出过载, 并切换回额定功率场景。在过载期间, 通常 SOC 已满, 储能不动作,  $P_{\text{ess}}(t) = 0$ 。若  $P_w(t) > 1.2nP$ , 多余风功率被弃置。

### 2.2 电解槽场景切换设计

本节基于前述数学模型, 提出了电解槽运行场景切换的条件关系, 如图4所示。该策略采用状态机设计理念, 系统初始化后从启动功率场景开始运行, 并根据实时计算的平滑功率指令  $P_{\text{ref}}$  与各功率阈值的比较结果, 动态切换运行场景, 同时协调储能系统动作。场景切换条件如下。

由场景1进入场景2的条件: 当  $P_{\text{ref}} > nP_{\text{st}}$  持续一定时间, 且当前功率足以支持至少一台电解槽运行于最佳功率点  $P_b$  附近时, 系统切换至最佳运行场景。

物理约束、功率平滑效果、储能系统负担以及系统运行效率。本文通过以下步骤确定各场景平滑因子的取值: 首先, 根据电解槽爬坡率限制通过仿真测试确定  $\alpha$  的理论可行范围; 其次, 结合各场景的控制目标, 初步确定每个场景的合理取值区间; 最后, 采用单因素敏感性分析, 以电解槽功率标准差、启停次数和储能 SOC 边际时间为评价指标, 通过关键点仿真分析确定各场景的代表值。详细过程及结果见附录 C。第 2.3 节的仿真验证表明, 所选参数能够有效提升系统运行性能。

### 3 算例分析

本文采用中国某风电场 8760 h 风电出力数据, 如附录图 A1 所示, 截取 30 MW 以内的功率段作为仿真输入。该截取范围基于系统实际容量确定, 算例配置 4 台额定功率 5 MW 的碱性电解槽和 10 MWh 储能, 既保留了风电波动的真实特性, 又避免了因风功率长期远超系统处理上限而导致的仿真失真, 能够更真实地反映离网场景下风机容量适度富余的典型运行条件。风电数据采样间隔为 15 min, 共形成 35

040个采样点,仿真分析均基于该分辨率数据进行。这一时间尺度的选择与本文控制策略的设计逻辑相匹配,策略中状态切换所涉及的时间阈值如过载持续时间、冷启动时间等,均以 15 min 为基本判断单位,与电解槽的物理参数形成良好对应。15 min 尺度在离网型风电制氢系统的长周期仿真分析中具有广泛适用性,文献[37]同样采用该分辨率制定日内调度计划,表明其适用于评估系统级的中长期运行特性。虽然 15 min 采样会平滑掉部分分钟级以内的瞬时波动,但策略中嵌入的爬坡率约束能够确保电解槽功率变化率始终处于安全范围。如图 5 所示,截取后的风电出力仍表现出较强波动性,为验证本文策略的功率平滑效果提供了合理的输入条件。电解槽及储能的详细参数如表 1 所示。

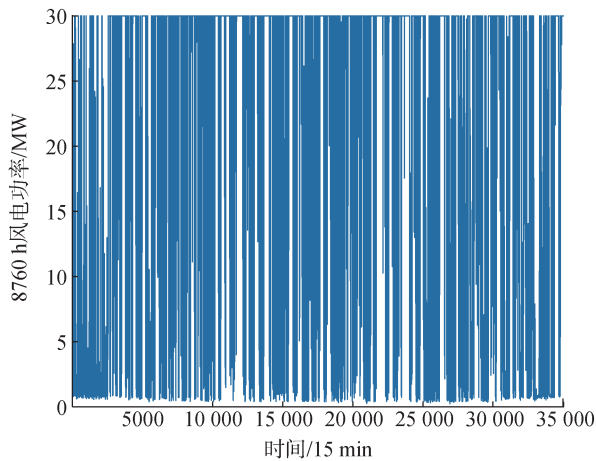


图 5 8760 h 风电出力截取 30 MW 以内的风电曲线

Fig. 5 Extract the 8760 h wind power output curve below 30 MW

表 1 电解槽及储能参数

Table 1 Electrolyzer and energy storage system parameters

参数	取值	参数	取值
电解槽规格/(m <sup>3</sup> /h)	1000	储能容量/MWh	10
电解槽数/台	4	额定功率/MW	5
爬坡率限制/(%/min)	5	冷启动时间/min	30
待机时长/min	15	负载范围/%	20~120

### 3.1 控制策略有效性对比验证与分析

为综合评估本文所提多场景平滑控制策略的性能,本节将其与两种典型方法进行仿真对比:其一为常规策略(电解槽功率直接跟随实时风功率波动,不做任何平滑处理);其二为预测策略(基于滚动预测方法生成电解槽功率指令)。三者均配置相同储能系统以进行公平比较。通过在相同风况环境下进行仿真,从宏观功率协调特性与微观运行指标两个层面,系统比较各策略在平抑功率波动、提升电解槽运

行稳定性与制氢效率方面的表现,从而凸显本文策略在离网场景下的适用性与优越性。

如图 6—8 所示,本节选取了一段具有代表性的 24 h 风功率曲线与各策略下对应的电解槽功率变化进行对比分析。从图 6 可见,常规策略下的电解槽功率与风电出力呈现强跟随特性:在风电波动剧烈时段,电解槽功率随之大幅起落;在风电相对平稳时段,电解槽运行也趋于稳定。该结果表明,在离网风储制氢系统中,若不对风功率进行有效处理,电解槽将直接承受其全部波动,这对于功率调节能力有限、抗冲击性能较弱的碱性电解槽尤为不利。频繁且剧烈的功率波动会加速电解槽材料老化,从而严重损害设备运行可靠性。因此,为保障碱性电解槽在离网环境下的长期稳定运行,必须对风电功率施加适当的平滑与控制。

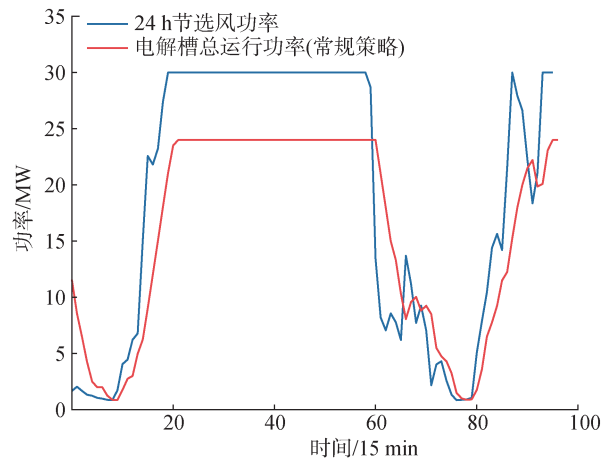


图 6 常规策略风电与电解槽功率对比曲线图

Fig. 6 Comparison of conventional strategy wind power and electrolyzer power

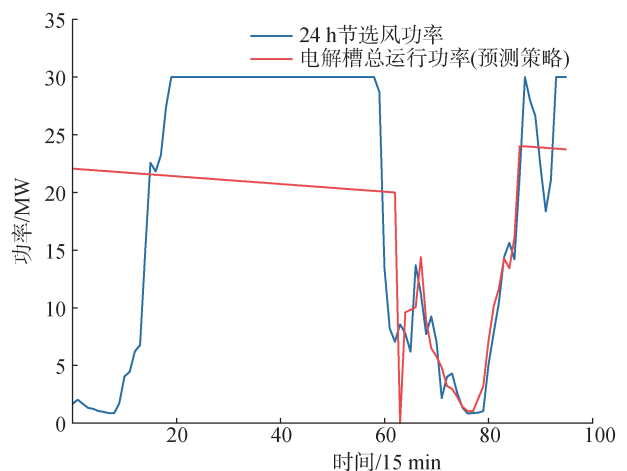


图 7 预测策略风力与电解槽功率对比曲线图

Fig. 7 Comparison of wind power and electrolyzer power under the predictive strategy

预测策略的仿真结果如图 7 所示。在风电出力

充裕时,该策略下电解槽功率的变化趋势与本文策略相近,均呈现较为平缓的调整过程;然而在风功率不足的时段,电解槽功率波动显著加剧,导致其在风电低谷期间的运行稳定性明显下降。此外,当风功率在短时间内迅速上升时,预测策略驱动的电解槽功率亦会随之快速响应,此类功率的剧烈波动极易对电解槽设备造成累积性损伤。因此,该策略难以适应功率响应速度较慢、抗波动能力较弱的碱性电解槽,不利于其长期稳定运行;若系统采用功率调节能力更强的质子交换膜电解槽,或碱性电解槽与质子交换膜电解槽相结合的混合制氢方式,则该策略或具备更好的适用性。

如图 8 所示,在本文所提策略下,电解槽功率曲线表现出较好的平滑特性,其波动程度较风功率有明显改善。这一结果验证了本文所构建的多场景功率平滑控制机制的有效性。策略的核心在于依据电解槽的启停、高效、额定及过载等运行场景特性,预设了相应的平滑因子与控制逻辑,并借助储能系统进行功率实时补偿,从而在不依赖风电预测的条件下,通过内置的状态机在不同功率区间动态切换运行场景,对风电波动形成了有效缓冲。因此,图 8 所呈现的整体平滑效果,正是本文策略在应对变化风况时动态运行的自然体现。本文策略为离网风电制氢系统提供了一种通过场景化平滑改善电解槽运行稳定性的可行思路,具有一定的参考价值。

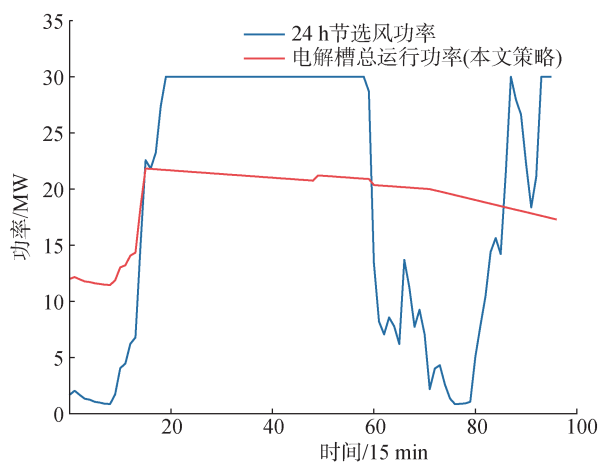


图 8 本文策略风力与电解槽功率对比曲线图

Fig. 8 Comparison of wind power and electrolyzer power under the proposed strategy

从图 6—8 的对比可以看出,常规策略下电解槽功率与风电出力呈现强跟随特性,波动剧烈;预测策略在风电低谷期波动显著加剧;而本文策略下的电解槽功率曲线整体更为平缓。结合表 2 的量化分析,本文策略的电解槽功率标准差为 7.26 MW,较常规

策略的 9.66 MW 降低了 24.8%,同时功率期望值为 15.90 MW,与常规策略的 15.65 MW 基本持平。这表明本文策略在有效平抑功率波动的同时,并未显著改变系统运行的平均功率水平。

### 3.2 控制策略对制氢稳定性的作用效果分析

同时,电解槽的累计运行时长是评价其运行稳定性的重要指标。从图 9 可以看出,本文策略下的电解槽累计运行时长达到 8000 h,与预测策略的 7950 h 相当,且本文策略略优,提升幅度约为 0.6%。两者均显著高于常规策略的 6800 h,提升幅度约为 17.6%。这表明引入平滑控制或预测控制均能有效提升系统的持续运行能力。进一步对比可见,本文策略在运行时长上亦略优于预测策略,说明其在不依赖风电预测的情况下,仍能通过功率平滑机制保障电解槽的长期连续运行。

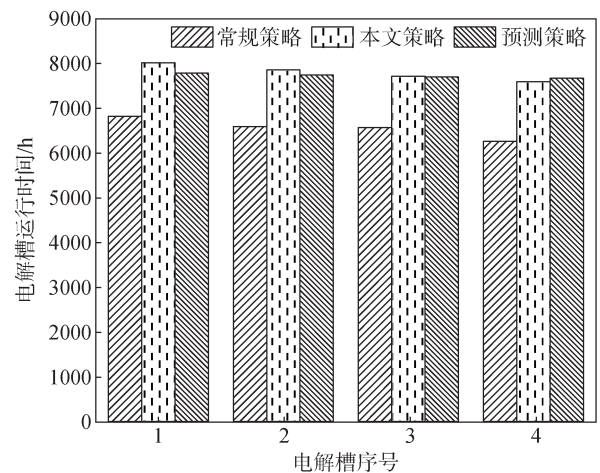


图 9 各策略电解槽运行时间对比图

Fig. 9 Comparison of electrolyzer operating time under different strategies

为深入分析运行稳定性,图 10 进一步展示了各策略下电解槽的启停次数累计柱状图。本文策略全年启停次数总计约为 50 次,而常规策略各台电解槽启停次数均超过 500 次,预测策略中电解槽 1 启停次数超过 450 次,其余电解槽也接近 400 次。相比之下,本文策略的启停次数较常规策略降低约 90%,较预测策略降低约 87%~88%。这主要归因于本文所提出的平滑因子在多场景中的系统化设置与协同作用。具体而言,在启动场景、最佳场景与额定场景中,平滑因子  $\alpha$  分别设置为 0.95、0.90 与 0.95,通过较高的平滑强度有效抑制了功率波动向电解槽的传递,减少了因短时功率跌落或波动引发的频繁启停。在过载场景中, $\alpha$  设为 0.8,在允许电解槽快速响应高功率风电的同时,仍保留了必要的平滑惯性,再配合设定的最大过载持续时间限制,共同避免了在功率

尖峰期间的运行振荡。因此,本文策略不仅在维持系统长期连续运行方面表现优异,更在抑制启停、提升运行平稳性方面展现出显著优势,从而为电解槽的寿命延长与系统可靠运行提供了有效支撑。

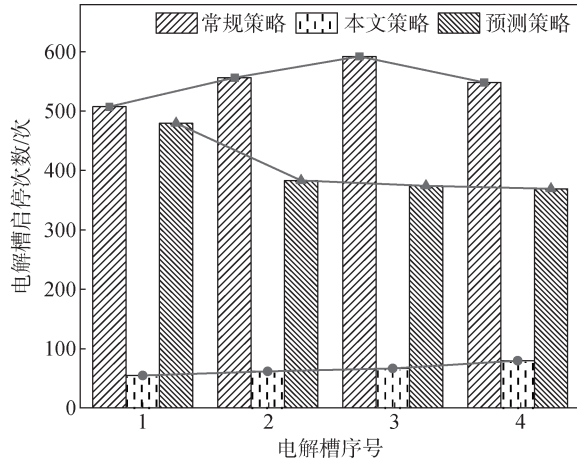


图10 各策略电解槽启停次数对比图

Fig. 10 Comparison of electrolyzer start-stop cycles under different strategies

为从统计分布角度进一步评估各策略对电解槽功率的平滑效果,表2列出了三种策略下电解槽功率的期望值 $\mu$ 与标准差 $\sigma$ 。从期望值来看,本文策略为15.90 MW,与常规策略的15.65 MW基本持平,表明两者在相近的平均功率水平下运行,对比具有公平性;而预测策略的期望值达到19.04 MW,明显高于前两者,这与其总耗电量较高(见表3)的特征相一致。

表2 各策略电解槽功率期望值和标准差  
Table 2 Expected value and standard deviation of electrolyzer power under different strategies

策略	期望值 $\mu$ /MW	标准差 $\sigma$ /MW
常规策略	15.659 66	7.625 62
本文策略	15.907 26	9.692 80
预测策略	15.046 92	9.756 65

表3 各策略电解槽制氢性能指标情况对比  
Table 3 Comparison of hydrogen production performance metrics for the electrolyzer under different strategies

制氢性能指标	常规策略	本文策略	预测策略
系统加权平均效率/%	68.51	69.80	69.01
总产氢量/ $m^3$	26 536 194.51	27 457 297.42	32 609 732.21
总耗电量/MWh	137 122.03	139 274.85	167 274.81
单位耗电产氢量/ $(m^3/kWh)$	0.193 5	0.197 1	0.194 9
平均产氢速率/ $(m^3/h)$	3 029.25	3 134.66	3 748.68

在表征波动程度的标准差方面,本文策略为7.26,较常规策略的9.66降低了24.8%,说明本文策略在维持平均功率水平不变的前提下,显著抑制了电解槽输入功率的波动程度。与预测策略的6.92相比,本文策略的标准差略高,但二者已处于相近水平,且本文策略并未依赖风电预测,在工程实现上更具简便性与鲁棒性。图11所示的正态分布曲线也直观反映了这一结果:本文策略的功率分布较常规策略更为集中,波动性明显改善。

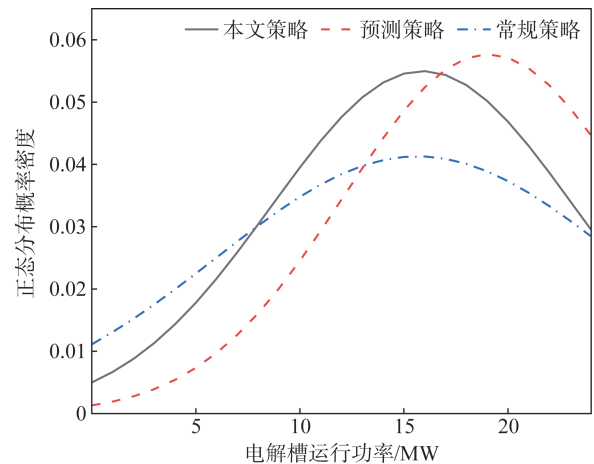


图11 各策略电解槽功率分布曲线

Fig. 11 Electrolyzer power distribution curves under different strategies

结合图9和图10的进一步分析可见,本文策略在降低功率波动的同时,显著延长了电解槽的累计运行时间,并大幅减少了启停次数,从而有效提升了系统的运行平稳性与持续性。

上述结果表明,本文策略通过平滑因子的多场景差异化设置,有效缓冲了风电波动对电解槽的冲击,在不依赖预测的条件下实现了运行平稳性与持续性的显著提升。

### 3.3 控制策略对制氢效率的作用效果分析

表3对比了三种策略下电解槽的制氢性能指标。从系统加权平均效率来看,本文策略达到69.80%,高于常规策略的68.51%和预测策略的69.01%,分别提升了1.29个百分点和0.79个百分点。这表明本文策略能够更有效地将风电功率分配至电解槽的高效运行区间,从而提升整体能量转换效率。

在总产氢量方面,本文策略为2 745.7万 $m^3$ ,较常规策略的2 653.6万 $m^3$ 提升约3.5%;预测策略虽达到3261万 $m^3$ ,但其总耗电量高达167 274.81 MWh,较本文策略高出20.1%。相比之下,本文策略的总耗电量为139 274.85 MWh,仅略高于常规策略约1.6%,体现出良好的能耗控制能力。

从单位能耗产氢量这一综合指标来看,本文策略为 $0.1971\text{ m}^3/\text{kWh}$ ,较常规策略的 $0.1935\text{ m}^3/\text{kWh}$ 提升 $1.86\%$ ,较预测策略的 $0.1949\text{ m}^3/\text{kWh}$ 提升 $1.13\%$ 。这表明在相近耗电水平下,本文策略可实现更高的氢气产出效率。同时,本文策略的平均产氢速率达到 $3134.66\text{ m}^3/\text{h}$ ,介于常规策略的 $3029.25\text{ m}^3/\text{h}$ 与预测策略的 $3748.68\text{ m}^3/\text{h}$ 之间,在保证运行平稳性的前提下兼顾了产氢能力。

综合来看,本文策略通过平滑因子 $\alpha$ 的多场景差异化设置与储能的协调配合,在仅增加 $1.6\%$ 耗电量的前提下,实现了总产氢量 $3.5\%$ 的提升,并在系统加权平均效率、单位能耗产氢量等关键指标上均优于对比策略,体现出良好的综合性能。

## 4 结论

针对离网型风电制氢系统因电源波动性强而导致电解槽运行稳定性差、效率偏低的问题,本文提出了一种多场景基于平滑因子的功率平滑控制策略。通过建立系统模型、设计场景化控制算法并开展仿真对比验证,得到以下结论:

1)本文提出一种不依赖风功率预测的多场景功率平滑控制架构。依据碱性电解槽的工作特性与效率特性,将运行过程划分为启动、高效、额定及过载四个典型场景,基于一阶低通滤波原理构建统一的平滑功率指令框架,并为各场景独立配置平滑因子,其中启动场景和额定场景取值为 $0.95$ 以满足电解槽最大爬坡率约束,最佳场景取 $0.90$ 以兼顾响应速度,过载场景取 $0.80$ 以快速利用高风电功率。灵敏度分析验证了所选参数在平滑效果、启停次数和储能压力之间实现了较优平衡。

2)与常规直接跟随风电的控制策略相比,本文策略显著抑制了电解槽输入功率的波动。功率标准差降低 $24.8\%$ ,启停次数由超过 $500$ 次减少至约 $50$ 次,降幅达 $90\%$ ,累计运行时间延长至 $8000\text{ h}$ 以上,有效提升了系统的运行平稳性与持续性。

3)与基于风电预测的控制策略相比,本文策略在不依赖预测的条件下取得了相近的功率平滑效果,功率标准差为 $7.26$ ,预测策略为 $6.92$ 。在制氢效率方面,本文策略的系统加权平均效率达到 $69.80\%$ ,单位能耗产氢量为 $0.1971\text{ m}^3/\text{kWh}$ ,均优于预测策略的 $69.01\%$ 和 $0.1949\text{ m}^3/\text{kWh}$ 。在仅增加约 $1.6\%$ 耗电量的前提下,实现了产氢量约 $3.5\%$ 的提升,展现出良好的综合性能。

4)本文在控制逻辑设计中深度融入了碱性电解槽的物理约束,包括爬坡率限制、冷启动时间及过载

时限,使平滑因子取值和状态切换条件与设备特性相匹配,增强了策略的工程适用性。

综上所述,本文所提功率平滑控制策略具有结构清晰、无需预测、鲁棒性强等特点,能够有效提升离网型风储制氢系统的运行稳定性与制氢效率,具备较好的工程应用参考价值。后续工作可在此基础上,进一步结合储能容量优化配置与经济性分析,以推动该技术的实用化与商业化发展。

### 利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

### 作者贡献声明 (Authors' Contributions):

王立超提出多场景功率平滑控制策略的基本概念与整体框架,进行仿真实验、分析结果并起草论文;武家辉设计研究方案、实施研究过程并修订论文;王维庆提出研究方向、指导研究思路并审核论文;杨健收集与清洗风电数据、参与仿真验证并参与论文修订。所有作者均阅读并同意了终稿内容。

## 5 参考文献

- [1] ABBAS M K, HASSAN Q, TABAR V S, et al. Techno-economic analysis for clean hydrogen production using solar energy under varied climate conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(8): 2929-2948.
- [2] 牛萌,肖宇,刘锋,等. 可再生能源接入对氢储能系统的影响及控制策略[J]. 电力建设, 2018, 39(4): 28-34.  
NIU Meng, XIAO Yu, LIU Feng, et al. Influences of renewable energy on hydrogen storage system and its control strategy [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4): 28-34.
- [3] 陈颖,石永富,钟鸿鸣,等. 含高比例风光接入的输电网氢-电混合储能系统配置方法[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 85-98.  
CHEN Ying, SHI Yongfu, ZHONG Hongming, et al. Configuration method for hydrogen-electricity hybrid energy storage system in transmission grid with high proportion of PV and wind power connection [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 85-98.
- [4] 渠悦意,江艺宝,苗伟威,等. 计及典型控制的风储协同调频参数整定和功率量化方法[J]. 广东电力, 2024, 37(12): 16-26.  
QU Yueyi, JIANG Yibao, MIAO Weiwei, et al. Parameter tuning and power quantification method for wind-storage coordinated frequency regulation considering typical control [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12): 16-26.
- [5] 高芳杰,孙玉杰,李忆,等. 计及海上风电制氢的海岛多能微网鲁棒优化调度[J]. 中国电力, 2025, 58(7): 68-79.  
GAO Fangjie, SUN Yujie, LI Yi, et al. Robust optimization scheduling of island multi-energy microgrid considering offshore wind power to hydrogen [J]. Electric Power, 2025, 58(7): 68-79.
- [6] AL-SAGHEER Y, STEINBERGER-WILCKENS R. Novel control approach for integrating water electrolyzers to renewable energy sources [J]. Fuel Cells, 2022, 22(6): 290-300.
- [7] 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.
- [8] 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 Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 366-376.
- [9] 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.
- [10] KOJIMA H, NAGASAWA K, TODOROKI N, et al. Influence of renewable energy power fluctuations on water electrolysis for green hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(12): 4572-4593.
- [11] JIANG Y, CHEN W Z, HOU Y H, et al. Coordinated control strategy of hydrogen production system in DC microgrid considering operating states of electrolyzer[J]. *Engineering Research Express*, 2025, 7(2): 025320.
- [12] ZHU X K, CHEN J W, WANG L, et al. Optimum power control and coordinate sizing for the stand-alone wind-energy storage integrated hydrogen production system[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 88: 803-814.
- [13] 王加荣, 杨博, 张芮, 等. 基于风电预测的碱性电解槽系统优化控制[J]. *电网技术*, 2024, 48(7): 2940-2947.
- WANG Jiarong, YANG Bo, ZHANG Rui, et al. Optimization control of alkaline electrolyzer system based on wind power prediction [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7): 2940-2947.
- [14] 沈小军, 聂聪颖, 吕洪. 计及电热特性的离网型风电制氢碱性电解槽阵列优化控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(3): 463-472.
- SHEN Xiaojun, NIE Congying, LÜ Hong. Coordination control strategy of wind power-hydrogen alkaline electrolyzer bank considering electrothermal characteristics [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(3): 463-472.
- [15] 赵宇洋, 赵钰欢, 郭英军, 等. 离网型风光氢储系统容量配置与控制优化[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(7): 50-59.
- ZHAO Yuyang, ZHAO Yuhuan, GUO Yingjun, et al. Capacity configuration and control optimization of off-grid wind solar hydrogen storage system [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(7): 50-59.
- [16] 赵宇洋, 赵浩然, 谭建鑫, 等. 面向风电制氢的超短期组合功率预测[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(3): 162-168.
- ZHAO Yuyang, ZHAO Haoran, TAN Jianxin, et al. Combined ultra-short-term power prediction for wind power hydrogen production technology [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(3): 162-168.
- [17] 闫庆友, 史超凡, 秦光宇, 等. 基于近端策略优化算法的电化学/氢混合储能系统双层配置及运行优化[J]. *电力建设*, 2022, 43(8): 22-32.
- YAN Qingyou, SHI Chaofan, QIN Guangyu, et al. Research on two-layer configuration and operation optimization based on proximal policy optimization for electrochemical/hydrogen hybrid energy storage system [J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(8): 22-32.
- [18] 乔如好, 于凯, 李泽民, 等. 基于动态指数时间平滑随机梯度下降的短期风电功率在线概率预测方法[J]. *供用电*, 2025, 42(2): 100-107.
- QIAO Ruyi, YU Kai, LI Zemin, et al. Online short term wind power probabilistic forecasting approach based on dynamic exponential time smoothed stochastic gradient descent [J]. *Distribution & Utilization*, 2025, 42(2): 100-107.
- [19] ZHANG Q J, LIU J J, LIN W, et al. Dual-layer energy management strategy for offshore wind-solar off-grid hydrogen production system [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2025, 83: 104646.
- [20] BARELLI L, CIUPAGEANU D A, OTTAVIANO A, et al. Stochastic power management strategy for hybrid energy storage systems to enhance large scale wind energy integration [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101650.
- [21] GUO T T, LIU Y B, ZHAO J B, et al. A dynamic wavelet-based robust wind power smoothing approach using hybrid energy storage system [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 116: 105579.
- [22] 郜捷, 宋洁, 王剑晓, 等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(19): 1-15.
- GAO Jie, SONG Jie, WANG Jianxiao, et al. Form and key technologies of integrated electricity-hydrogen system supporting energy security in China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(19): 1-15.
- [23] ZHANG J, XIAO F, MA F, et al. Load-follow-source cooperative control method for medium-voltage DC wind turbine-photovoltaic powered off-grid hydrogen production system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 128: 786-799.
- [24] ZHANG F, ZHAO P C, NIU M, et al. The survey of key technologies in hydrogen energy storage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(33): 14535-14552.
- [25] HASSAN I A, RAMADAN H S, SALEH M A, et al. Hydrogen storage technologies for stationary and mobile applications: Review, analysis and perspectives [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 149: 111311.
- [26] ZHAO Y Y, ZHU Z Z, TANG S H, et al. Electrolyzer array alternate control strategy considering wind power prediction [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 223-232.
- [27] 晋萃萃, 岳洋, 张磐, 等. 柔性配电网氢储能 SOP 长-短周期协调低碳运行优化方法 [J/OL]. *电力系统及其自动化学报*, 1-11 [2026-03-03]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001798>.
- JIN Cuicui, YUE Yang, ZHANG Pan, et al. Long-short cycle coordinated optimization method of flexible distribution networks for low-carbon operation using hydrogen energy storage integrated soft open points [J/OL]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 1-11 [2026-03-03]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001798>.
- [28] 李建林, 梁忠豪, 赵文鼎, 等. 混合电解槽制氢系统选型及评估方法[J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2653-2662.
- LI Jianlin, LIANG Zhonghao, ZHAO Wending, et al. Selection and evaluation method of hydrogen production system in hybrid

- electrolytic cell [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50 (6) : 2653-2662.
- [29] 白章, 韩运滨, 王智, 等. 基于功率分配策略的风光互补复合制氢系统与容量优化[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 910-921, 943. BAI Zhang, HAN Yunbin, WANG Zhi, et al. Wind-solar hybrid hydrogen production system and capacity optimization based on power allocation strategy [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 910-921, 943.
- [30] 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.
- [31] 江悦, 沈小军, 吕洪, 等. 碱性电解槽运行特性数字孪生模型构建及仿真[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2897-2908. JIANG Yue, SHEN Xiaojun, LÜ Hong, et al. Construction and simulation of operation digital twin model for alkaline water electrolyzer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2897-2908.
- [32] HUANG N T, WU Y Y, LU G B, et al. Combined probability prediction of wind power considering the conflict of evaluation indicators[J]. IEEE Access, 2019, 7: 174709-174724.
- [33] 胡致远, 程浩然, 夏杨红, 等. 碱液电解槽建模与宽范围运行控制[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(11): 17-23. HU Zhiyuan, CHENG Haoran, XIA Yanghong, et al. Modeling and wide range operation control of alkaline water electrolyzer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(11): 17-23.
- [34] 王士博, 孔令国, 蔡国伟, 等. 电力系统氢储能关键应用现状、挑战及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6660-6680. WANG Shibo, KONG Lingguo, CAI Guowei, et al. Current status, challenges and prospects of key application technologies for hydrogen storage in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6660-6680.
- [35] 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): 8136-8145, I0018. 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 Chinese Society for Electrical Engineering, 2024, 44(20): 8136-8145, I0018.
- [36] 梁忠豪, 王丽芳, 李建林. 基于纳什均衡的光-储耦合制氢系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(3): 125-134. LIANG Zhonghao, WANG Lifang, LI Jianlin. Nash equilibrium based optimal control method for hydrogen production system with photovoltaic-storage coupling [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 125-134.
- [37] 邱一苇, 孙清洁, 吴晨旭, 等. 计及风功率不确定性的离网风储制氢日内实时双层有功平衡优化控制[J]. 电网技术, 2025, 49 (1): 52-62. QIU Yiwei, SUN Qingjie, WU Chenxu, et al. Optimized bi-level control for day-ahead and real-time active power balancing of an off-grid wind power-to-hydrogen system with ESS considering wind power uncertainty [J]. Power System Technology, 2025, 49 (1): 52-62.

收稿日期: 2026-02-09 修回日期: 2026-03-04



王立超

作者简介:

王立超(2000),男,硕士,研究方向为新能源制氢,E-mail:wlc347141667@163.com;

武家辉(1988),女,博士,教授,通信作者,研究方向为风电并网系统稳定性研究、复杂能源系统稳定分析与控制,E-mail:wjh229@xju.edu.cn;

王维庆(1959),男,博士,教授,博士研究生导师,研究方向为风电并网系统稳定性分析与控制,E-mail:wwq59@sina.cn;

杨健(1989),男,本科,工程师,研究方向为新能源智慧集控、新能源发电能力优化,E-mail:791588261@qq.com.

(编辑 孙静琳)

## 附录 A

表 A1 电解槽数学模型参数

Table A1 Parameters of electrolyzer mathematical model

参数	参数值
$U_{nev}/V$	1.123
$r_1/(\Omega \cdot m^2)$	$8.232 \times 10^{-5}$
$r_2/(\Omega \cdot m^2 \cdot ^\circ C^{-1})$	$-4.51 \times 10^{-7}$
$S/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	0.185
$t_1/(m^2/A)$	0.025 4
$t_2/(m^2 \cdot ^\circ C/A)$	-0.158
$t_3/(m^2 \cdot ^\circ C^2 \cdot A^{-1})$	$1.212 \times 10^{-3}$
$A_{cl}/m^2$	0.25
$T_{cl}/^\circ C$	80
$U_{th}/V$	1.481 3

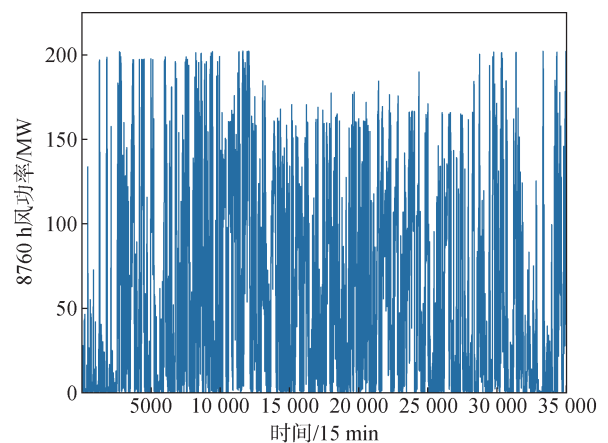


图 A1 风功率 8760 h 原始数据

Fig. A1 Original wind power data (8760 h)

附录 B

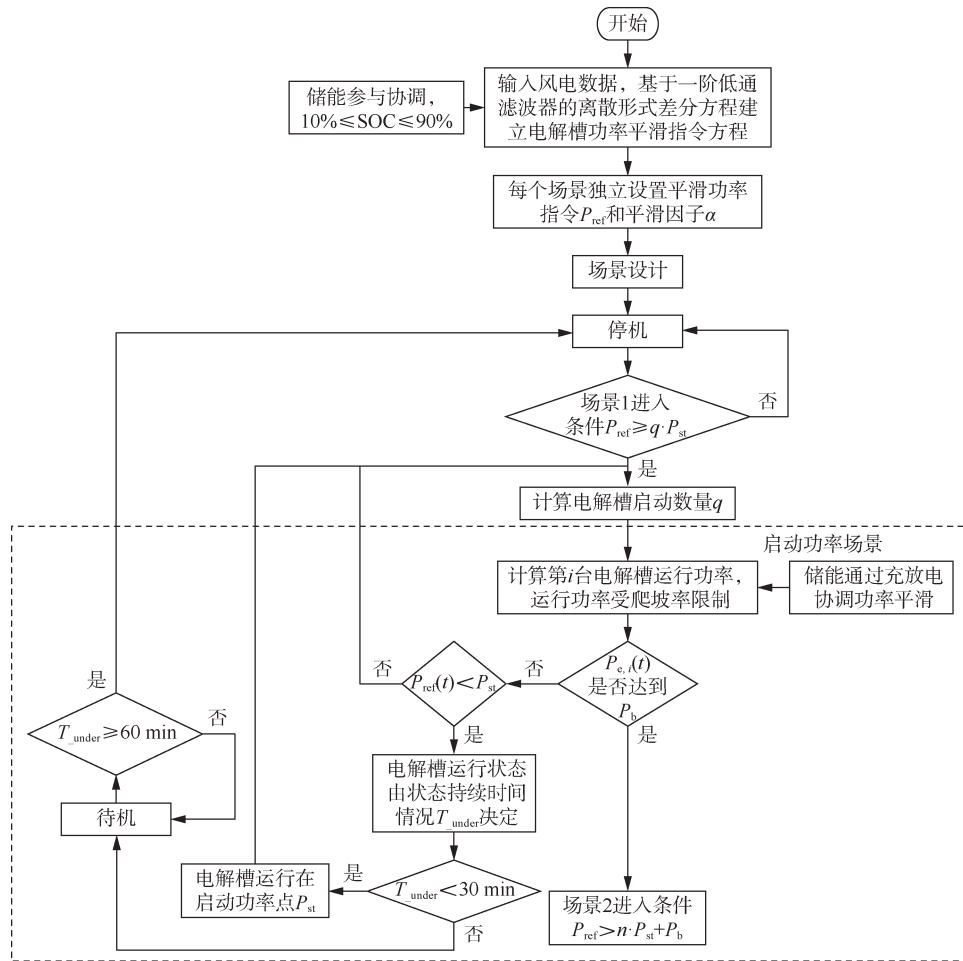


图 B1 开始与启动功率场景控制

Fig. B1 Start and startup power scenario control

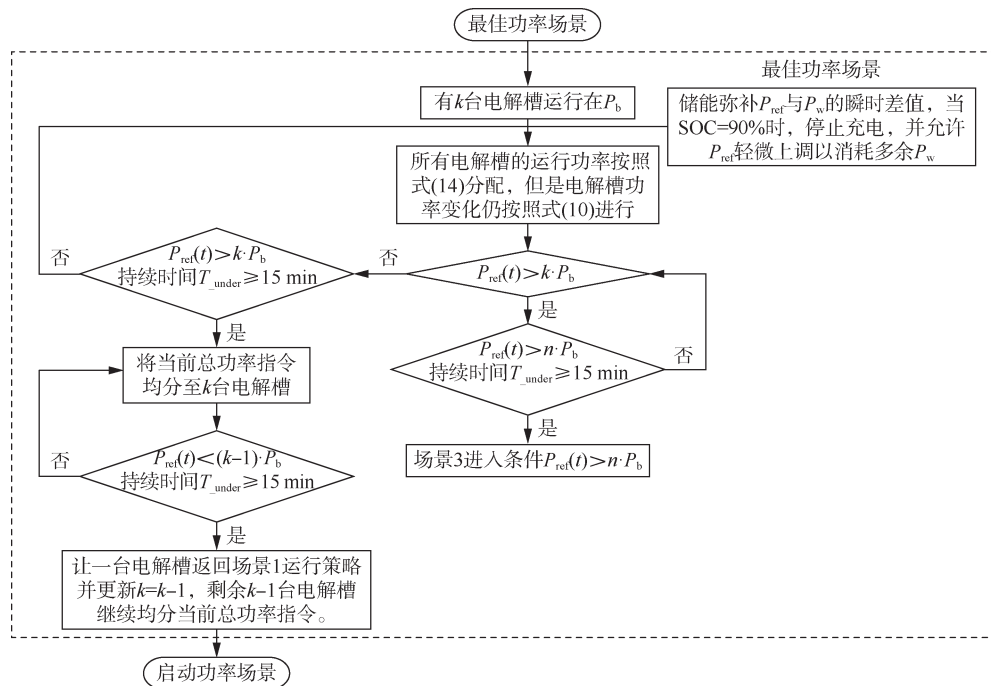


图 B2 最佳功率场景控制

Fig. B2 Optimal power scenario control

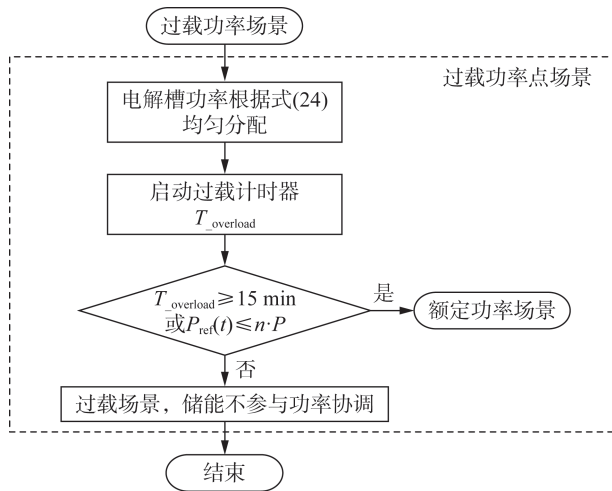


图 B3 过载功率场景控制

Fig. B3 Overload power scenario control

### 附录 C

#### C.1 平滑因子的物理意义与理论取值范围

在一阶低通滤波器中,平滑因子  $\alpha$  决定了功率指令对风电波动的衰减程度,其递推关系为:

$$P_{ref}(t) = \alpha P_{ref}(t-1) + (1-\alpha)P_w(t) \quad (C1)$$

$\alpha$  越接近 1,功率指令变化越缓慢,平滑效果越强,但响应延迟增大,储能需补偿的功率差额持续时间延长; $\alpha$  越接近 0,响应速度越快,但平滑效果减弱,电解槽将承受较大功率波动。因此, $\alpha$  的选取需在平滑效果、响应速度与储能负担之间取得平衡。

电解槽爬坡率限制为 5%/min。 $\alpha$  越接近 1,平滑效果越强,但响应延迟增大、储能负担加重; $\alpha$  越接近 0,响应越快,但功率波动加剧。综合考虑平滑效果与储能负担, $\alpha$  不宜过接近 1,否则将过度依赖储能、削弱风电直接利用;同时  $\alpha$  也不宜过小,否则电解槽功率波动加剧、运行平稳性下降。根据一阶低通滤波特性, $\alpha$  取 0.99 时已具备足够平滑作用且能满足爬坡率约束,故取为上限。下限方面,过载场景要求快速响应,允许  $\alpha$  取较小值。仿真中  $\alpha=0.75$  时过载场景各项指标仍处可接受范围,且该取值能兼顾响应速度与平滑需求,故取 0.75 为下限。综合确定  $\alpha$  的可行范围为 [0.75, 0.99]。

#### C.2 各场景控制目标与初步取值

在上述理论可行范围内,根据各场景的控制目标,初步确定每个场景平滑因子的合理取值区间,为后续敏感性分析提供基准。

1)启动场景( $\alpha_1$ )。启动过程中电解槽需从停机状态平稳恢复,首先要抑制功率冲击、避免因风电突

变导致启动中断或反复启停。因此初步区间取较大范围,即 [0.91, 0.99],中心值为 0.95。

2)最佳场景( $\alpha_2$ )。电解槽运行在高效区,需兼顾平滑与响应,既希望功率相对稳定以维持高效运行,又需适度跟踪风电变化以避免储能过度充放。初步区间取 [0.85, 0.95],中心值为 0.90。

3)额定场景( $\alpha_3$ )。要求功率输出稳定,减少场景切换,同样需要较强的平滑作用,初步区间取 [0.91, 0.99],中心值为 0.95。

4)过载场景( $\alpha_4$ )。过载时风电功率充裕,需快速响应以充分利用风电、避免弃风,因此要求平滑因子较小,初步区间取 [0.75, 0.85],中心值为 0.80。

上述初步区间的设定基于物理意义和工程经验,为后续通过仿真确定各场景代表值提供了搜索范围。

#### C.3 各场景平滑因子的单因素敏感性分析

由于四个场景在时间上是顺序切换的,各场景的控制作用相对独立,且平滑因子对系统性能的影响可近似解耦,因此采用固定其他场景为初步区间中心值、仅改变目标场景平滑因子的方法进行单因素敏感性分析。各初步区间中心值分别为:启动场景 0.95、最佳场景 0.90、额定场景 0.95、过载场景 0.80。

为量化储能负担,定义储能 SOC 边际时间:全年仿真期间储能 SOC 小于等于 0.15 或大于等于 0.85 的累计时间。该指标越大,表明储能系统越频繁地工作在容量边界附近,承受的压力越大。

分别对四个场景的平滑因子在其初步区间内选取下限、中心值、上限三个关键点进行仿真,结果如表 C1—C4 所示。表中数据基于全年 8760 h 仿真获得,所有指标均在同一风电输入下对比。

进行启动场景敏感性分析时,固定最佳场景  $\alpha_2=0.90$ 、额定场景  $\alpha_3=0.95$ 、过载场景  $\alpha_4=0.80$ ,仅改变启动场景  $\alpha_1$  取值,仿真结果如表 C1 所示。

表 C1 启动场景  $\alpha_1$  关键点仿真结果  
Table C1 Sensitivity analysis results of startup scenario  $\alpha_1$

$\alpha_1$	功率标准差/MW	总冷启动次数	SOC 边际时间/h
0.91	7.25	263	5 612.25
0.95	7.26	264	5 621.25
0.99	7.26	261	5 625.00

从表 C1 可见,当  $\alpha_1$  在 0.91~0.99 范围内变化时,电解槽功率标准差、启停次数及储能 SOC 边际时间均保持高度稳定。功率标准差最大波动仅 0.01

MW, 启停次数波动幅度小于 1.2%, SOC 边际时间波动幅度小于 0.3%。这表明启动场景平滑因子在该区间内具有良好的鲁棒性, 取值变化对系统综合性能影响甚微。在此情况下, 选取区间中心值  $\alpha_1=0.95$  作为代表值, 一方面与其他场景的参数(额定场景  $\alpha_3$  同样取 0.95)保持协调一致, 另一方面也符合启动场景需较强平滑作用的物理预期。

进行最佳场景敏感性分析时, 固定启动场景  $\alpha_1=0.95$ 、额定场景  $\alpha_3=0.95$ 、过载场景  $\alpha_4=0.80$ , 仅改变最佳场景  $\alpha_2$  取值, 仿真结果如表 C2 所示。

表 C2 最佳场景  $\alpha_2$  关键点仿真结果

$\alpha_2$	功率标准差/MW	总冷启动次数	SOC 边际时间/h
0.85	7.28	248	5 627.50
0.90	7.26	264	5 621.25
0.95	7.42	232	5 567.00

从表 C2 可见,  $\alpha_2=0.90$  时功率标准差最小, 启停次数和 SOC 边际时间均处于适中水平;  $\alpha_2=0.85$  时功率标准差略大, 启停次数较少但 SOC 边际时间略高;  $\alpha_2=0.95$  时功率标准差显著增大至 7.42 MW, 启停次数减少, SOC 边际时间降低。这表明  $\alpha_2=0.90$  在保证较低功率波动的同时, 启停次数和储能负担均维持在合理范围, 综合性能最优。因此最佳场景代表值取 0.90。

进行额定场景敏感性分析时, 固定启动场景  $\alpha_1=0.95$ 、最佳场景  $\alpha_2=0.90$ 、过载场景  $\alpha_4=0.80$ , 仅改变额定场景  $\alpha_3$  取值, 仿真结果如表 C3 所示。

表 C3 额定场景  $\alpha_3$  关键点仿真结果

$\alpha_3$	功率标准差/MW	总冷启动次数	SOC 边际时间/h
0.91	7.35	256	5 561.25
0.95	7.26	264	5 621.50
0.99	7.29	261	5 479.75

从表 C3 可见,  $\alpha_3$  从 0.91 增至 0.95 时, 功率标准差降低 0.09 MW, 达到最小值 7.26 MW, 启停次数增加 8 次, SOC 边际时间增加 60.25 h, 系统功率稳定性明显提升; 从 0.95 增至 0.99 时, 功率标准差反弹至 7.29 MW, 启停次数减少 3 次, 但 SOC 边际时间下降 141.75 h。虽然 0.99 时储能负担减轻, 但功率波动增大, 不利于电解槽稳定运行。因此,  $\alpha_3=0.95$  能够实现最佳的功率平滑效果, 同时启停次数和储能负担处于可接受水平, 是额定场景下的合理选择。

进行过载场景敏感性分析时, 固定启动场景  $\alpha_1=$

0.95、最佳场景  $\alpha_2=0.90$ 、额定场景  $\alpha_3=0.95$ , 仅改变过载场景  $\alpha_4$  取值, 仿真结果如表 C4 所示。

表 C4 过载场景  $\alpha_4$  关键点仿真结果

$\alpha_4$	功率标准差/MW	总冷启动次数	SOC 边际时间/h
0.75	7.30	264	5 622.00
0.80	7.26	264	5 621.50
0.85	7.17	264	5 622.50

从表 C4 可见, 随着  $\alpha_4$  增大, 功率标准差持续降低, 从 7.30 MW 降至 7.17 MW, 而启停次数和 SOC 边际时间基本保持不变。然而, 过载场景的核心控制目标是快速响应高风电功率以避免弃风, 若  $\alpha$  取值过大将导致功率指令响应滞后, 不利于风电的及时消纳。因此, 需要在平滑效果与响应速度之间做出权衡。 $\alpha_4=0.80$  相比 0.75 已使功率标准差降低 0.04 MW, 且储能负担未明显增加; 若进一步增大至 0.85, 虽能继续降低功率波动, 但响应速度下降可能影响过载时风电的快速利用。综合考虑, 选取  $\alpha_4=0.80$  作为过载场景的代表值, 兼顾了平滑效果与响应速度。

#### C.4 代表值的最终确定

综合上述单因素敏感性分析, 各场景平滑因子的代表值确定如下: 启动场景取 0.95, 最佳场景取 0.90, 额定场景取 0.95, 过载场景取 0.80。这些代表值均位于各场景初步区间内, 且通过仿真实验验证了其合理性。

#### C.5 步长选择的说明

各平滑因子在敏感性分析中的步长取 0.05, 是基于以下考虑: 一阶低通滤波器的频率响应特性随  $\alpha$  连续变化, 步长的选择需确保能够有效观测  $\alpha$  变化对系统性能的影响。在本文采样周期下, 0.02 的步长能够使关键性能指标呈现可分辨的变化趋势, 同时兼顾了多组仿真计算的实际可行性。敏感性分析结果表明, 该步长足以识别各场景平滑因子的合理取值。

#### C.6 整体仿真验证

第 3 章的仿真结果表明, 在本文所选平滑因子组合下, 电解槽功率标准差较常规策略降低 24.8%, 启停次数减少约 90%, 累计运行时间提升 17.6%, 系统加权平均效率达到 69.80%。这些宏观性能的改善从整体上验证了各场景平滑因子取值的合理性。