

# 混合电解水制氢系统平抑风电波动的容量配置

陈德添<sup>1,2</sup>, 王宇翔<sup>1,2</sup>, 杨霞<sup>1,2</sup>, 林金阳<sup>1,2</sup>

(1. 福建理工大学 电气与信息工程学院, 福建 福州 350118;

2. 工业控制及数据分析福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 为解决风电功率波动性和随机性对电网稳定性带来的挑战, 提出一种结合质子交换膜电解槽 (PEMEL) 与碱性电解槽 (AEL) 运行特性的混合电解水制氢系统方案。该方案首先基于自适应小波包分解算法平滑风电功率的波动, 以使其满足并网要求; 进而构建了包含容量配置和功率分配两个层次的协同优化模型, 以提升系统经济性与新能源的利用率。在此基础上, 引入了一种改良的浣熊优化算法, 求解系统的最佳容量配置方案, 以实现经济性最优。实例结果表明, 混合电解水制氢模式可有效平抑风电场功率波动, 且具有良好的经济性, 同时也验证了改进算法的高效性能。

**关键词:** 电解水制氢; 碱性电解槽; 质子交换膜电解槽; 容量优化; 风电波动

中图分类号: TM727

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)03-0290-08

## Capacity configuration of hybrid electrolytic water hydrogen production system to stabilize wind power fluctuation

CHEN Detian<sup>1,2</sup>, WANG Yuxiang<sup>1,2</sup>, YANG Xia<sup>1,2</sup>, LIN Jinyang<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial University Key Laboratory of Industrial Control and Data Analysis, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** To address the challenges posed by wind power's fluctuation and randomness, which makes it difficult to meet grid stability standards, a water electrolysis hydrogen production system scheme that combines the operational characteristics of proton exchange membrane electrolyzers (PEMEL) and alkaline electrolyzers (AEL) is proposed. Firstly, the scheme smooths the fluctuation of wind power based on adaptive wavelet packet decomposition algorithm to meet the requirements of grid connection. Secondly, to optimize operational economy and enhance the utilization rate of renewable energy, a collaborative optimization model encompassing two levels—capacity configuration and power allocation—is constructed. On this basis, an improved Raccoon algorithm is proposed to determine the optimal capacity configuration scheme for the system, aiming to achieve optimal economy. Results of case studies show that the hybrid electrolytic water hydrogen production mode can effectively suppress the power fluctuation of the wind farm, while also validating the superior performance of the proposed algorithm.

**Keywords:** hydrogen production by water electrolysis; alkaline electrolyzer; proton exchange membrane electrolyzer; capacity optimization; wind power fluctuation

风力发电的输出功率受环境影响, 波动性较大, 难以精确预测。当风力发电接入电网运行时,

其波动性会对电网的整体稳定性构成挑战, 从而可能降低电网提供的电能质量<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 福建省自然科学基金青创项目 (2022J05197)

第一作者简介: 陈德添 (2001—), 男, 福建建瓯人, 硕士研究生, 研究方向: 储能容量优化配置。

通信作者: 林金阳 (1981—), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 光伏故障诊断、光伏发电系统等。

采用风力发电进行氢气生产,可以有效地吸纳风电输出功率中的波动成分,减轻风电并网对电网稳定性的冲击,并提升风电的利用效率<sup>[3-4]</sup>。梁俊鹏等<sup>[5]</sup>整合了电解制氢装置至风电并网系统,将电解槽视为可控负载,显著提升了风电的利用率。梁宁等<sup>[6]</sup>构建了一个风力发电系统与氢储能系统相结合的运行模型,深入分析该系统的经济性,为后续风电-氢储能耦合系统的参数优化、方案选型及规模化推广提供了关键的经济性决策支撑。郑楠<sup>[7]</sup>的研究显示,无论是质子交换膜电解槽(PEMEL)还是碱性电解槽(AEL),都能有效减轻风力发电输出功率的波动,确保电网运行的稳定,但是二者在技术方面存在较大区别。AEL电解水制氢技术较为成熟,且价格相对低廉,可用于大规模电解水制氢,但其实际运行时动态响应较慢,不能及时响应输入功率变化,对风电场的输出功率的平滑作用并不理想。而PEMEL能量利用效率高、动态响应迅速,但是设备昂贵、投资成本高。综上,研究混合电解水制氢系统平抑风力发电输出功率波动的方法及其容量的合理配置,具有重要的意义<sup>[8-9]</sup>。

在分析处理风电功率的波动特性上,通过小波变换对风电功率进行分解,可以确定风电的期望并网功率。付子恒等<sup>[10]</sup>利用小波变换确定了风力发电的目标出力,随后采用超级电容来平抑波动分量中的高频成分,而蓄电池则用于平抑低频成分。邢超等<sup>[11]</sup>基于小波变换提出了一种混合储能的协调控制策略,来实现功率波动的平抑和功率的合理分配。

在通过小波变换有效处理风电功率波动问题的基础上,规划电解水制氢系统中AEL和PEMEL的容量配比,可以有效降低整个制氢系统的成本支出。杨金刚等<sup>[12]</sup>研究发现,风-氢混合发电系统对比无制氢系统的场景,可有效增加售电利润,且当电解水制氢装置容量达到一定值时,能完全吸纳风电全部原始输出功率。郭梦婕等<sup>[13]</sup>发现,通过整合电解槽与燃料电池系统能够有效减少弃风量,显著降低系统的运行成本。崔杨等<sup>[14]</sup>针对高比例风电制氢系统的优化调度问题,提出了电解槽灵活运行策略,通过建立电-氢协调模型,将电解槽作为灵活负载参与系统调度,可以有效平抑风电波动,提升系统的整体经济运行水平。李奇等<sup>[15]</sup>构建了以系统总成本最低和

弃风弃光率最小为目标的优化模型,通过对电解槽、储氢罐和燃料电池等组件容量的协同优化,能够在满足负荷需求的同时,降低系统能源使用成本。

然而,当前多数风电制氢系统的设计往往局限于单一的电解水制氢装置,而未能充分利用AEL和PEMEL在风电波动时的吸纳能力及经济成本方面所展现出的互补优势。鉴于此,本研究设计了一种将AEL和PEMEL混合运行并耦合于风力发电场的电解水制氢系统。采用小波包变换技术将输入风电功率分解为满足并网标准功率部分和电解水制氢系统的输入功率部分,以提升电力系统对风电功率的消纳能力。为进一步评估该混合电解水制氢系统在平抑风电场输出功率波动方面的经济性,构建了相应的经济性模型。在模型求解过程中,引入了改进后的浣熊算法对电解槽容量进行优化配置,并通过集成Circle混沌映射、动态非线性逃避策略以及透镜反向学习策略,提升算法在应对复杂、高维优化问题时的适应性和寻优效率。

## 1 风电和电解槽功率模型

### 1.1 风电功率随机模型

风力发电机的有功输出主要受风速影响,其输出功率为:

$$P_{WT} = 0.5C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

式中, $P_{WT}$ 为风电输出的有功功率; $C_p$ 为风能利用系数; $\rho$ 为空气密度; $R$ 为风力机的叶轮半径; $v$ 为此刻的风速。为了保证风力发电机的运行安全性与稳定性,对风力发电的运行区间进行了限制:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & 0 < v \leq v_{in} \\ P_{WT} & v_{in} < v \leq v_{rate} \\ P_{WT,r} & v_{rate} < v \leq v_{out} \\ 0 & v_{out} < v \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{WT}(t)$ 为 $t$ 时刻风电输出的有功功率; $P_{WT}$ 为风电输出的有功功率; $v_{in}$ 为切入风速; $v_{out}$ 为切出风速; $v_{rate}$ 为额定风速; $P_{WT,r}$ 为风机的额定功率。

### 1.2 碱性电解槽功率模型

AEL功率主要受其自身极化特性影响,其电解制氢功率 $P_{ALE}$ 为:

$$P_{ALE} = I_{el} \times \left[ V_0 + \frac{r}{A_{cell}} I_{el} + s \log \left( \frac{T_{el}}{A_{cell}} I_{el} + 1 \right) \right] \quad (3)$$

式中,  $I_{el}$  与  $T_{el}$  分别为电解槽的电流与温度;  $r$  为电解液欧姆电阻参数;  $A_{cell}$  为电解槽有效面积;  $s$  为电极过电压系数;  $V_0$  为可逆电压。

### 1.3 质子交换膜电解槽功率模型

PEMEL 极化特性受开路电压  $V_{ocv}$ 、活化过电势  $V_{act}$ 、扩散过电势  $V_{diff}$  和欧姆过电势  $V_{ohm}$  影响, 其电解制氢功率  $P_{PEM}$  为<sup>[16]</sup>:

$$P_{PEM} = I_{el} \times [V_{ocv}(T_{el}, a) + V_{act}(T_{el}, \alpha, j) + V_{diff}(T_{el}, c) + V_{ohm}(\delta_m, \sigma_m, j)] \quad (4)$$

式中,  $j$  表示电流密度;  $\alpha$  表示转移电荷的数量;  $c$  表示浓度;  $\delta_m$  和  $\sigma_m$  分别表示厚度和阻抗。

AEL 与 PEMEL 的产氢速率  $n_{H_2}$  可以表示为

$$n_{H_2} = \eta_F \frac{N_{el} I_{el}}{zF} \quad (5)$$

式中,  $N_{el}$  为电解槽个数,  $\eta_F$  为法拉第效率;  $F$  为法拉第常数,  $z$  为每次反应电子转移数。

## 2 混合电解水制氢系统容量双层优化模型

### 2.1 双层规划架构

依据风电并网标准的具体规定, 明确风电场并网功率波动的可接受范围。评估风力发电功率  $P_{WT}$  是否达标, 不达标则采用小波包分解技术平抑波动。当分解后功率满足并网要求时, 确定此时的分解层数为最优层数, 将其标记为  $n_0$ ;  $P_{n,k}$  表示小波包分解到层数  $n$  时, 第  $k$  个功率分量 ( $k = 1, 2, \dots, 2^n - 1$ )。同时, 将分解后满足并网标准的功率部分记为  $P_0$ , 将  $P_0$  与原始风力发电功率之间的差值定义为原始风力发电功率中的波动量  $P_s$ , 即

$$\begin{cases} P_{WT} = P_0 + P_s \\ P_0 = P_{n,0} \\ P_s = P_{n,1} + P_{n,2} + \dots + P_{n,2^n-1} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $P_s$  代表的是不同频率区间的功率分量相互叠加而构成的复合体, 这些功率分量为混合电解水制氢系统需要处理并消纳的风电波动成分。系统在动态运行的过程中, 优先将低波动率功率分量分配给碱性电解槽, 高波动率功率分量则由质子交换膜电解槽处理。双层优化模型的具体架构如图 1 所示。

如图 1 所示, 本研究提出的数学模型包含两个层次的优化框架, 上层模型的目标是最优化平

均综合成本, 包括初始投入成本、运营成本、制氢收益等, 决策变量则是混合制氢系统中碱性电解槽与质子交换膜电解槽各自的额定功率大小。下层模型则聚焦于最大化混合制氢系统对输入功率的消纳率, 决策变量为在特定时间段内碱性电解槽与质子交换膜电解槽各自的运行功率。上下层优化模型之间存在着密切的相互作用与制约关系, 共同影响着整个混合制氢系统的优化决策过程。

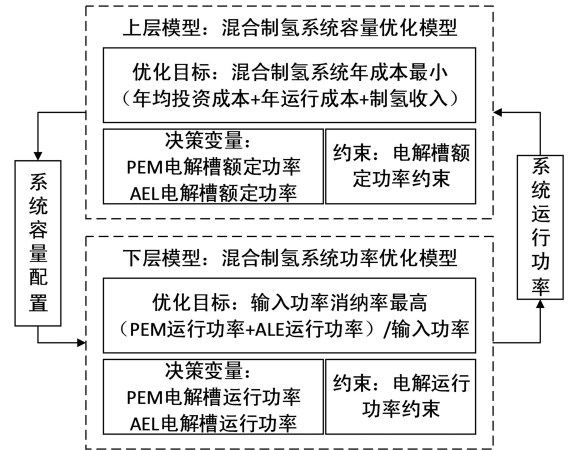


图 1 混合制氢系统容量双层优化模型结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-layer optimization model for hybrid hydrogen production system capacity

### 2.2 上层优化模型

上层优化模型的目标函数  $C$  如式(7)所示。

$$C = C_{inv} + C_{op} - S \quad (7)$$

式中,  $C_{inv}$ 、 $C_{op}$  和  $S$  分别为年投资成本、年运行成本和年产氢成本。其中, 年投资成本  $C_{inv}$  的计算如式(8)所示。

$$\begin{cases} C_{inv} = C_{EL} + C_{AS} \\ C_{EL} = P_{AEL} C_{AEL} + P_{PEM} C_{PEM} \\ C_{AS} = C_{EL} \times 10\% \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $C_{EL}$ 、 $C_{AS}$  分别表示电解槽的投资成本和制氢系统中辅助系统的投资成本;  $P_{AEL}$ 、 $P_{PEM}$  分别表示 AEL、PEMEL 的额定功率;  $C_{AEL}$ 、 $C_{PEM}$  分别表示 AEL、PEMEL 的单位功率价格。

运行成本  $C_{op}$  的计算如式(9)所示。

$$\begin{cases} C_{op} = C_{e\_AEL} + C_{e\_PEM} \\ C_{e\_AEL} = \sum_t^T (k_1(t) C_1(t) + k_2(t) C_2(t)) \\ C_{e\_PEM} = \sum_t^T (k_3(t) C_1(t) + k_4(t) C_2(t)) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $C_{e\_AEL}$ 、 $C_{e\_PEM}$  分别为 AEL、PEMEL 的运行成本;  $C_1(t)$ 、 $C_2(t)$  分别为  $t$  时刻的电与水的单价;  $k_1$ 、 $k_2$  分别表示 AEL 在  $t$  时刻对应电、水的消耗;  $k_3$ 、 $k_4$  分别表示 PEMEL 在  $t$  时刻对应的电、水的消耗。  $k_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 可以通过式(10)计算。

$$\begin{cases} k_i = p(t) * \Delta t, & i=1,3 \\ k_i = k * p(t) * \Delta t, & i=2,4 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $p(t)$  表示电解槽在  $t$  时刻的实际运行功率;  $k$  表示电消耗与水消耗的比例。

系统制取的氢气可以出售,制氢收入  $S$  可以通过式(11)计算。

$$S = \sum_t^T C_H(t) * H_H(t) \quad (11)$$

式中,  $C_H(t)$  表示氢气在  $t$  时刻的单价;  $H_H(t)$  为  $t$  时刻制氢总量。

AEL 和 PEMEL 的运行功率应该小于等于该混合制氢系统的输入功率。因此,上层优化模型的约束条件为:

$$\begin{cases} P_{AEL} \geq 0 \\ P_{PEM} \geq 0 \\ P_{AEL} + P_{PEM} \geq \max P_{EL} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P_{EL}$  表示该混合电解水制氢系统的目标运行功率。

### 2.3 下层优化模型

下层优化的目标函数为 AEL 和 PEMEL 消耗功率和最大,其数学表达式为:

$$\max f = \sum_t^T (p_{AEL} + p_{PEM}) \quad (13)$$

式中,  $T$  为整个优化周期,  $t$  为时间刻度(分钟);  $p_{AEL}$  表示碱性电解槽的实时运行功率;  $p_{PEM}$  表示质子交换膜电解槽的实时运行功率。

结合上层优化模型,下层约束条件可以表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{AEL} \leq P_{AEL} \\ 0 \leq p_{PEM} \leq P_{PEM} \\ 0 \leq p_{AEL} + p_{PEM} \leq p_{EL} \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $p_{EL}$  为系统的输入功率输入的实时功率<sup>[17]</sup>。

AEL 的运行功率区间为额定功率的 20% ~ 100%,冷启动与热启动时间分别为 60 min 和 15 min,功率调节速率为每秒变化额定功率的 10%;PEMEL 具备更宽的功率调节范围(5% ~ 100%额定功率),冷、热启动时间均仅为 5 min,且功率调节速度达每秒 40%额定功率,展现出更优

的动态响应特性。

## 3 双层模型求解

在所提优化框架中,上层决策聚焦电解水制氢系统容量配置,因决策变量单一,采用改进浣熊算法高效求解。下层优化以最大化混合制氢系统输入功率消纳效率为核心,决策变量为质子交换膜电解槽与碱性电解槽的实时运行功率分配,该层变量维度较大,高维特性提升了优化模型的复杂度,传统求解方法耗时久、效率低。因此,本研究采用了 MATLAB 的 Yalmip 优化求解工具箱以应对下层优化模型的高维变量挑战,从而实现更快速、更准确的求解过程。

### 3.1 标准浣熊算法

浣熊优化算法(coati optimization algorithm, COA)模拟了浣熊合作攻击鬣蜥以及分散逃避捕食者的行为,其结构包括搜索阶段和开发阶段。该算法无需设置控制参数、计算效率高、收敛平衡性好、全局探索能力强。

在搜索阶段,浣熊种群  $N$  在搜索空间中的位置  $X$  具有独立性和随机性,一半浣熊爬树来吓跑鬣蜥,另一半则在地上等待鬣蜥随机掉落到地面并攻击它。树上浣熊的位置公式为:

$$X_{i,j}^{pl} = X_{i,j} + r(L_j - IX_{i,j}) \quad (15)$$

式中,  $i$  表示浣熊个体,  $j$  表示维度,  $r$  为  $[0,1]$  中的随机实数;  $L_j$  为鬣蜥掉落的参考位置;  $I$  为  $[1,2]$  中的随机整数;  $X_{i,j}$  为鬣蜥更新前的位置。鬣蜥随机掉落后的位置和地上浣熊的位置如式(16)、式(17)所示。地上浣熊的最佳位置则通过对应目标函数值根据贪婪策略进行更新,如式(18)所示。

$$L_j^c = b_j + r(a_j - b_j) \quad (16)$$

$$X_{i,j}^c = \begin{cases} X_{i,j} + r(L_j^c - IX_{i,j}), & F_{L^c} < F_i \\ X_{i,j} + r(X_{i,j} - L_j^c), & F_{L^c} > F_i \end{cases} \quad (17)$$

$$X_i^{new} = \begin{cases} X_i^c, & F_i^{new} < F_i \\ X_i, & F_i^{new} > F_i \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $a_j$ 、 $b_j$  表示第  $j$  维的上界和下界;  $L_j^c$  表示鬣蜥随机掉落的位置,  $F_{L^c}$  为对应目标函数值;  $X_{i,j}^c$  为第  $j$  维第  $i$  只地上浣熊更新后的位置,  $F_i$  为浣熊位置更新前对应的目标函数值;  $F_i^{new}$  为第  $i$  只浣熊更新后的目标函数;  $X_i^{new}$  为第  $i$  只浣熊更新后的位置。

开发阶段,当有掠食者攻击浣熊时,浣熊分散逃离。浣熊位置可表示为:

$$\begin{cases} a_j^l = \frac{a_j}{t} \\ b_j^l = \frac{b_j}{t} \end{cases} \quad (19)$$

$$X_{i,j}^{P2} = X_{i,j} + (1-2r)(b_j^l + r(a_j^l - b_j^l)) \quad (20)$$

式中,  $X_{i,j}^{P2}$  表示第  $i$  只浣熊在第  $j$  维局部探索后的位置;  $a_j^l, b_j^l$  分别表示第  $j$  维的局部上界和局部下界;  $t$  为迭代次数; 根据公式 (20) 更新最佳位置。

$$X_i = \begin{cases} X_{i,j}^{P2}, & F_i^{P2} < F_i \\ X_i, & F_i^{P2} > F_i \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $X_i$  表示第  $i$  只浣熊的最终位置;  $X_{i,j}^{P2}$  表示局部探索后的候选位置;  $F_i^{P2}$  表示候选位置对应的目标函数值;  $F_i$  表示原始位置对应的目标函数值。

### 3.2 改进策略

由于在种群初始化时多样性不足且分布不均,且容易在开发阶段陷入局部最优,本研究在标准 COA 的基础上引入了 Circle 混沌映射、动态非线性逃避策略和透镜反向学习策略,提出了一种改进的浣熊算法 (ICOA)。

#### 3.2.1 Circle 混沌映射种群初始化

Circle 混沌映射一定程度上能扩大浣熊在空间中的搜索范围,增加了群体位置的多样性。Circle 映射定义为:

$$x_{t+1} = \text{mod} \left( x_t + 0.2 - \frac{0.5}{2\pi} \sin(2\pi x_t), 1 \right) \quad (22)$$

式中,  $\text{mod}$  为取余函数,  $t$  为迭代次数;  $x_t$  为迭代次数为  $t$  时个体的位置;  $x_{t+1}$  为迭代次数为  $t+1$  时个体的位置。

#### 3.2.2 动态非线性逃避策略

基于体力消耗策略引入了自适应因子和非线性调整,由此引用了一种新型的动态非线性逃避策略。该策略能更精确模拟浣熊在开发阶段的逃避行为,并且适应各种复杂环境,使浣熊在逃避过程的不同阶段更加侧重于探索。定义自适应因子  $\alpha(t)$  的计算如式 (23) 所示。

$$\alpha(t) = \frac{2}{1 + e^{-\beta \cdot t}} - 1 \quad (23)$$

式中,  $\beta$  为超参数,可根据具体问题进行调整。

对体力参数引入非线性函数进行非线性调整,以此来模拟浣熊在逃避过程中体力随时间和位置变化的动态消耗过程,如式 (24) 所示。

$$E' = E(1 - \varepsilon \cdot \tanh(\gamma t + \delta X_{i,j})) \quad (24)$$

式中,  $E$  表示浣熊和捕食者的体力参数;  $E'$  为非线性调整后的体力参数;  $\gamma$  和  $\delta$  分别表示影响时间和位置的参数,描述体力的逐渐消耗过程;  $t$  为迭代次数;  $\varepsilon$  表示体力消耗系数,其值从 1 递减到 0 线性减小。开发阶段浣熊的位置可根据式 (25) 来选择。

$$\begin{cases} X_i^{P2} = X_{i,j} + \alpha(t) \cdot (1-2r \cdot (b_j^l + r \cdot (a_j^l - b_j^l))), & E'_0 > E'_1 \\ X_i^{P2} = X_{i,j} \cdot (2r-1) \cdot |E'_0 - E'_1|, & E'_0 < E'_1 \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $E'_0, E'_1$  分别为调整后的浣熊和捕食者的体力参数。

#### 3.2.3 透镜反向学习策略

透镜反向学习策略<sup>[18]</sup>结合了反向学习和透镜成像原理,通过基于当前坐标生成一个反向解,可以扩大搜索范围以及在搜索过程中逐渐找到最优解,原理如图 2 所示。  $x$  轴的搜索空间范围为  $[a, b]$ ,  $y$  轴表示凸透镜。假设物体  $A$  在  $x$  轴上的投影是  $X$ , 高度是  $h$ , 通过凸透镜成像; 另一侧图像为  $A^*$ ,  $A^*$  在  $x$  轴上的投影为  $X^*$ , 高度为  $h^*$ 。 可得出式 (26):

$$\frac{(a+b)/2 - X}{X^* - (a+b)/2} = \frac{h}{h^*} = K \quad (26)$$

式中,  $K$  表示缩放比例系数。反向解可表示为:

$$X_j^* = \frac{a_j + b_j}{2} + \frac{a_j + b_j - 2X_j}{2K} \quad (27)$$

式中,  $X_j$  是浣熊在第  $j$  维的位置,  $X_j^*$  是  $X_j$  的反向解,  $a_j$  和  $b_j$  是第  $j$  维的最大和最小边界。

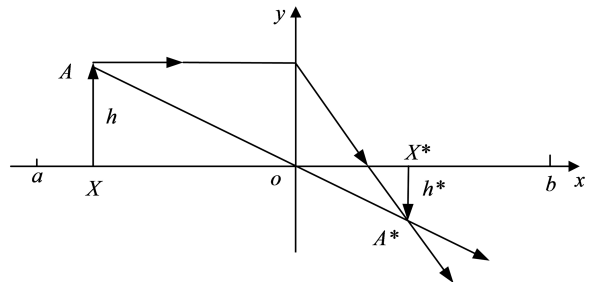


图 2 透镜反向学习原理图

Fig.2 Lens reverse learning principle diagram

ICOA 算法流程图如图 3 所示。

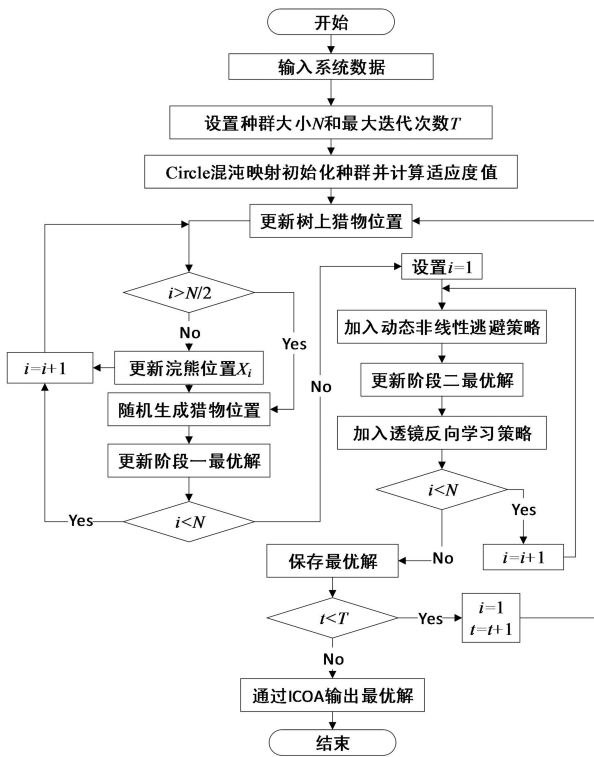


图 3 ICOA 算法流程图

Fig.3 ICOA algorithm flowchart

## 4 算例分析

### 4.1 系统参数设置

风力发电场的实时输出功率有强烈的随机波动特性。图 4 为内蒙古装机容量为 7.5 MW 的风电场典型日功率。采用傅里叶频率变换方法,分析风电场在一个典型日的风电输出功率,揭示风电输出功率在频域上的能量分布特性,如图 5 所示。

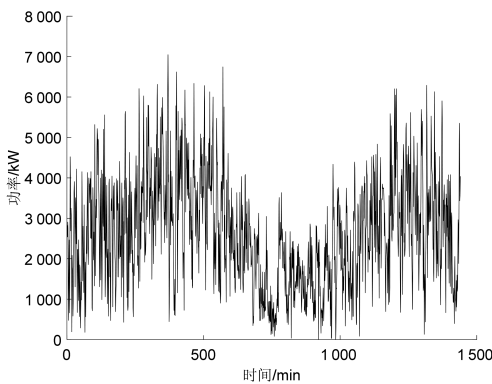


图 4 风电出力

Fig.4 Wind power output

由图 5 可知,风电场输出功率主要集中在  $0 \sim 10^{-3}$  Hz 频段,在范围之外的频率段上,其功率分

布相对稀少,即风电输出功率的低频成分承载了其主要的能量供应。为了有效提升风力发电利用率,应当优先考虑将富含能量的低频功率尽可能地整合并入电网系统,未能直接并入电网的剩余功率部分可以借助混合电解水制氢系统进行有效的平滑处理,以确保风力发电最终并网的功率能够符合既定的并网标准和要求。双层模型的相关的参数如表 1 所示,具体参数参考文献[17]。

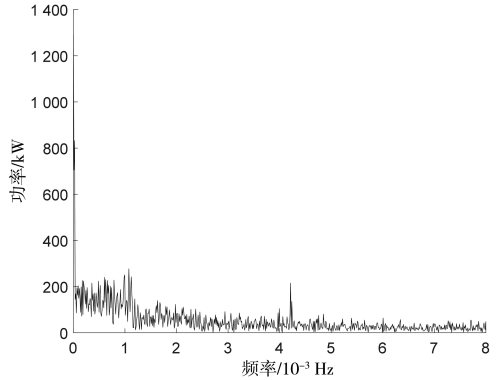


图 5 风电场输出功率幅频特性曲线

Fig.5 Amplitude-frequency characteristic curve of wind farm output power

表 1 混合电解水制氢系统相关参数设定<sup>[19-21]</sup>

Tab.1 Parameter settings of hydrogen production system by mixed electrolytic water

参数名称	设定值
碱性电解槽投资成本	6 000 元/kW
质子交换膜电解槽投资成本	9 500 元/kW
碱性电解槽每年维护成本占投资成本比例	4%
质子交换膜电解槽每年维护成本占投资成本比例	4%
碱性电解槽预期寿命	100 000 h
质子交换膜电解槽预期寿命	80 000 h
风电单位电价	0.2 元/kW·h
氢气单位价格	60 元/kg

### 4.2 混合电解水制氢策略的有效性分析

结合 3 种案例对所提混合电解水制氢系统的有效性进行分析。案例 1 为单一 ALE 制氢系统,案例 2 为单一 PEMEL 制氢系统,案例 3 为混合电解水制氢系统。优化后的系统制氢设备容量配置与系统整体特性如表 2 所示。

表 2 电解水制氢系统优化结果

Tab.2 Optimization results of hydrogen production system by electrolytic water

案例	AEL 容量/ kW	PEMEL 容量/ kW	新能源 消纳率/ %	初始投 资成本/ 万元	运行 成本/ 万元	制氢 收入 /万元
1	4 824	—	38.32	3 183.82	289.44	1 494.25
2	—	4 631	53.21	4 839.41	439.94	2 082.14
3	3 554	1 256	50.66	3 682.16	332.56	2 294.32

由表 2 可知,采用单一 AEL 的制氢系统投资建设成本最低,新能源消纳率仅为 38.32%,采用单一 PEMEL 制氢的系统能量效率达到 53.21%,然而过高的投资运行成本使其综合成本远高于其他系统。相对于单一 AEL 制氢,采用混合电解水制氢技术的制氢系统初投资增加了 15.65%,但新能源消纳率提升 12.34%,制氢收益提升 53.54%,具有最优的总收益率。经过 3 种案例平抑风电之后的风电功率曲线如图 6 所示。

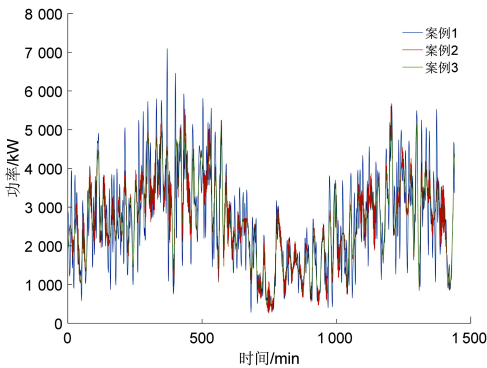


图 6 平抑之后的风电功率曲线

Fig.6 Wind power curve after stabilization

由图 6 可见,案例 2 平抑效果最好,案例 3 次之。相较于 AEL,PEMEL 电解槽具有快速启动和停止的能力,以及快速功率调节的响应速度,适用于新能源发电时的波动性输入。虽然案例 2 和案例 3 的平抑效果相差不大,但是案例 2 的投入成本比案例 3 明显更高。

#### 4.3 改进算法的有效性分析

为验证所提算法的有效性,结合 3 种策略进行分析。策略 1 为粒子群 (PSO) 算法,策略 2 为浣熊算法 (COA),策略 3 为所提改进浣熊算法 (ICOA)。种群大小均设为 80,最大迭代次数设置为 100,PSO 的学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  为 1.5,惯性权重

$\omega$  设为 0.8。3 种策略的迭代曲线和优化效果分别见图 7 和表 3。

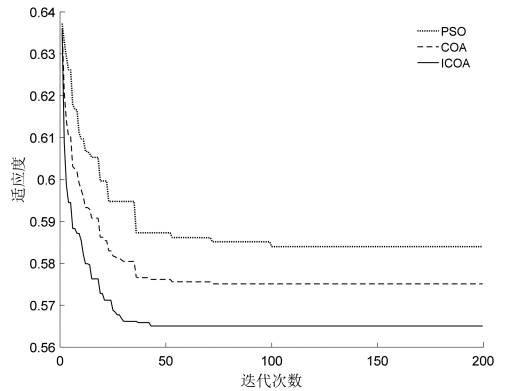


图 7 3 种策略的迭代曲线

Fig.7 Iterative curves of three strategies

表 3 3 种算法结果

Tab.3 Results of three algorithms

算法	AEL 容 量/kW	PEMEL 容量/kW	新能源 消纳率/%	综合运行 成本/万元	运行 时间/s
PSO	3 315	1 443	47.62	1 865.21	110.6
COA	3 461	1 325	48.21	1 801.21	89.7
ICOA	3 554	1 256	50.66	1 720.42	65.5

图 7 表明,在迭代后期种群多样性较低,PSO 和 COA 易陷入局部最优。ICOA 算法在迭代后期则保持优良的种群多样性,全局搜索能力较强,降低了陷入局部最优的可能。

从表 3 可见,经过优化后,系统的各项指标较优化前均有改善,策略 3 的优化效果较其他两种策略优化效果更为明显。策略 2 的新能源消纳率较策略 1 增加 0.59%,综合运行成本和优化时间较策略 1 分别减少 3.43%、18.90%;策略 3 较策略 2 在新能源消纳率上继续减少 2.45%,综合运行成本减少 4.496%,运行时间减少 26.31%,所以策略 3 代表的改进浣熊算法寻优效果更好且速度更快。

## 5 结论

基于风力发电场的输出功率特性和电解水制氢装置的运行特点,结合具体的算例分析,得出了以下结论:

1) 混合电解水制氢系统可有效平抑风电波动

并提升能源利用率。通过集成质子交换膜电解槽与碱性电解槽,并采用自适应小波包分解算法处理风电功率,所提系统能够将波动功率分量定向分配至适应性不同的电解槽,从而在满足并网功率稳定要求的同时提高了风电的消纳率与整体利用效率。

2)所提系统通过构建容量配置与功率分配协同优化的双层模型,并采用改进浣熊算法求解,实现了初始投资、运行成本与制氢收益的综合优

化。算例表明,相较于单一电解槽系统,混合制氢模式在适度增加投资的情况下,能提升制氢收益与新能源消纳率,具有更优的综合经济效益。

3)改进的浣熊算法有效提升了优化问题的求解性能。对比实验表明,ICOA在求解复杂高维优化模型时,其收敛速度、避免局部最优以及最终解的质量优于传统PSO算法及标准COA算法,为类似工程优化问题可提供有效的解决方案。

## 参考文献:

- [1] 张晓东,张怡,刘向杰,等.改进的自适应小波包风电波动平滑控制策略[J].太阳能学报,2024,45(10):566-573.
- [2] 罗潇,任洲洋,温紫豪,等.考虑氢能系统热回收的电氢区域综合能源系统日前优化运行[J].电工技术学报,2023,38(23):6359-6372.
- [3] 黄大为,齐德卿,蔡国伟.基于制氢系统的平抑风电输出功率方法研究[J].太阳能学报,2016,37(12):3155-3162.
- [4] 林今,余志鹏,张信真,等.可再生能源电制氢合成氨系统的并/离网运行方式与经济性分析[J].中国电机工程学报,2024,44(1):117-127.
- [5] 梁俊鹏,张高航,李凤婷,等.计及氢储能-制氢-碳捕集的综合能源系统低碳优化调度[J].电力自动化设备,2024,44(10):16-23.
- [6] 梁宁,潘郑楠,徐慧慧,等.风氢耦合系统参与现货市场的竞标策略及优化调度方法[J].太阳能学报,2024,45(2):351-359.
- [7] 郑楠.分布式能源系统源储荷耦合特性及主动调控运行策略研究[D].北京:华北电力大学,2024.
- [8] 王文,黎隆基,岳雨霏,等.面向风电平抑的双电池单元储能系统功率分层优化控制策略[J].太阳能学报,2024,45(10):736-744.
- [9] 霍俊达,王毅.兼顾平抑波动与储能保护的混合储能优化策略[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-12.[2024-06-13].<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=HBDL20240608001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [10] 付子恒,穆钢,武方泽,等.基于单风电场功率波形幅-时特性的风电场群功率波动幅度演化建模与机理分析[J].中国电机工程学报,2025,45(1):124-137,10010.
- [11] 邢超,肖家杰,李培强,等.基于双层鲁棒控制的风电场储能集群出力调控策略[J].电网技术,2025,49(5):1887-1897.
- [12] 杨金刚,刘维妙,李顺昕,等.风氢耦合发电系统优化运行策略与效益分析[J].电力建设,2017,38(1):106-115.
- [13] 郭梦婕,严正,周云,等.含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J].中国电力,2020,53(1):115-123,161.
- [14] 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.
- [15] 李奇,赵淑丹,蒲雨辰,等.考虑电氢耦合的混合储能微电网容量配置优化[J].电工技术学报,2021,36(3):486-495.
- [16] 赵强,张雅洁,谢小荣,等.基于可再生能源制氢系统附加阻尼控制的电力系统次同步振荡抑制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3728-3736.
- [17] 郑博,白章,袁宇,等.多类型电解协同的风光互补制氢系统与容量优化[J].中国电机工程学报,2022,42(23):8486-8495.
- [18] 付华,刘昊.多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用[J].控制与决策,2022,37(1):87-96.
- [19] 韩晓娟,郭思琪,吕志恒.基于双重模糊控制的氢-储耦合系统协同优化策略[J].太阳能学报,2024,45(11):718-726.
- [20] 张利伟,史泽辉,周文婷,等.计及电池寿命的电/热/氢混合储能系统容量优化配置[J].电网技术,2025,49(3):998-1006.
- [21] 孔令国,陈钥含,万燕鸣,等.计及调峰辅助服务的风电场/群经济制氢容量计算[J].电工技术学报,2023,38(16):4406-4420.