



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2308478

引用格式:荆捷,董砚,杨富荃.孤岛风电制氢系统日前及实时能量管理[J].科学技术与工程,2025,25(1):210-218.

Jing Jie, Dong Yan, Yang Fuquan. Day-ahead and real-time energy management of island wind power hydrogen production system[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 210-218.

孤岛风电制氢系统日前及实时能量管理

荆捷,董砚*,杨富荃

(河北工业大学电气工程学院,天津300131)

摘 要 为解决风能间歇性和波动性对系统经济性、可靠性的影响,提出了一种含有储能电池的孤岛风电制氢系统日前及实时能量管理策略。在日前能量管理阶段,采用碱性电解槽功率分级能量管理策略,并以系统日收益最大为目标函数,建立孤岛风电制氢系统经济性能量管理模型,提出一种改进灰狼优化算法对系统能量管理模型进行求解,优化系统能量流动,提高系统经济性。在实时能量管理阶段,为保证系统在非计划功率波动时可以维持稳定运行,设计了一种基于工况识别的孤岛风电制氢系统实时能量管理策略,根据系统实时运行工况及时调整系统运行状态。实验结果表明:基于改进灰狼优化算法的日前阶段能量管理有效增加系统日收益,提高了系统的经济性。基于工况识别的实时阶段能量管理在日前计划下风功率波动时可以维持系统功率平衡,实现电解槽全天稳定制氢。

关键词 风电制氢;电解槽;能量管理;灰狼算法

中图分类号 TM73;

文献标志码 A

Day-ahead and Real-time Energy Management of Island Wind Power Hydrogen Production System

JING Jie, DONG Yan*, YANG Fu-quan

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

[Abstract] In order to solve the influence of intermittent and fluctuating wind energy on the economy and reliability of the system, a day-ahead and real-time energy management strategy for islanded wind power hydrogen production system with energy storage battery was proposed. In the day-ahead energy management stage, the energy management strategy of alkaline electrolytic cell power classification was adopted, and the economic energy management model of isolated wind power hydrogen production system was established with the maximum daily profit of the system as the objective function. An improved grey wolf optimization algorithm was proposed to solve the system energy management model, optimize the system energy flow and improve the system economy. In the real-time energy management stage, in order to ensure that the system can maintain stable operation when unplanned power fluctuations occur, a real-time energy management strategy for island wind power hydrogen production system based on condition identification was designed, which can adjust the system operation status in time according to the real-time operating conditions of the system. The experimental results show that the day-ahead energy management based on the improved grey wolf optimization algorithm effectively increases the daily revenue of the system and improves the economy of the system. The real-time stage energy management based on condition identification can maintain the system power balance when the wind power fluctuates under the day-ahead plan, and realize the stable hydrogen production of the electrolytic cell throughout the day.

[Keywords] hydrogen production from wind power; electrolyzer; energy management; grey wolf algorithm

随着全球能源需求的不断增长,传统能源的供应压力越来越大,同时全球气候变化和环境污染问题也日益严重,发展可再生能源已成为全球共识^[1]。随着可再生能源制氢研究的不断深入,风力发电直接制氢成为可再生能源制氢发展的新模式。相比于并网发电制氢、大规模离网互补制氢,进行

孤岛模式的单机就地制氢,可不再受制于上网电价、可再生能源比例、电网建设程度和规模的影响,解决风电限制上网的尴尬处境、多能互补高投资成本的困扰^[2-4]。

孤岛风电制氢系统依赖于自然风能,系统的稳定性和经济性易受风能变化的影响。针对孤岛风

收稿日期:2023-10-31 修订日期:2024-10-08

基金项目:河北省重点研发计划(21314303D);河北省科技重大专项(23284502Z)

第一作者:荆捷(1998—),男,汉族,河南洛阳人,硕士研究生。研究方向:新能源装备与智能控制。E-mail:1396238503@qq.com。

*通信作者:董砚(1973—),女,汉族,黑龙江绥化人,博士,教授。研究方向:新能源装备与智能控制。E-mail:dongyan73@hebut.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

电直接制氢系统能量管理问题,文献[5]在孤岛系统中加入储能电池,通过储能电池与电解槽的相互配合,减弱风能波动对孤岛系统的影响。文献[6]在含有风力发电机、制氢电解槽和储能电池的孤岛制氢系统,提出了一种稳定直流母线电压的能量管理策略,能够实现全天稳定制氢。文献[7]针对孤岛风氢混合发电系统实时运行稳定性问题,设计了一种基于模糊状态机(fuzzy state machine, FSM)的实时阶段能量管理策略,使系统在多个运行场景下保持稳定运行。以上研究只针对系统稳定性角度,没有对其经济性进行研究。

对于风电制氢技术经济性研究,一些学者通过建立系统经济性能量管理模型,对系统模型进行求解优化,进一步提高系统经济性。文献[8]提出了一种以氢能为能源枢纽的多能量耦合的能量管理模型,以运营净收益最大为目标函数,使用矩阵耦合的方法实现系统的功率协调控制,并提高系统净收益。文献[9]以经济性最优为目标函数,考虑储能荷电状态状态,构建了日前能量管理经济性模型,提出了一种电氢耦合系统能量管理方法,有效提高了系统的经济性。近年来,元启发式优化算法在求解非线性问题中的应用日益广泛,利用此类算法求解系统非线性模型已成为一个重要的研究领域^[10]。文献[11]以微电网的日收益最大化为目标函数,建立了经济性优化模型,利用鲸鱼优化算法进行求解,提高了系统日收益。但其目标函数只考虑了系统的运维成本,未考虑到系统的日投资成本。文献[12]利用灰狼优化算法优化风-氢-储微电网的经济运行问题,证明了灰狼优化算法在解决风电制氢经济性问题上的有效性,但存在收敛速度慢、易陷入局部最优的缺点。

在以上研究的基础上,现提出一种孤岛风电制氢系统日前及实时能量管理策略,旨在缓解风功率波动对系统稳定性和经济性的不利影响。在日前阶段能量管理中,将电解槽进行功率分级管理,考虑系统的日投资成本、日运维成本、日售氢收益,建立系统经济性能量管理模型,并利用改进灰狼优化算法进行求解。在实时阶段能量管理中,根据风力发电机和电解槽的功率以及储能电池的荷电状态,将系统划分为5种运行工况,对日前计划进行实时调整。通过日前与实时能量管理优化,以期能够在保证经济性最优的前提下,提高系统的稳定性。

1 孤岛风电制氢系统结构

孤岛风电制氢系统结构如图1所示,此系统主要

由风力发电机、储能电池及碱性电解槽3个部分组成。

风力发电机、碱性电解槽和储能电池通过直流母线相连。孤岛风电制氢系统的拓扑结构图如图2所示。

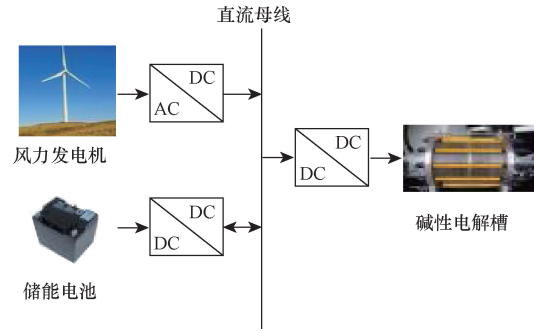
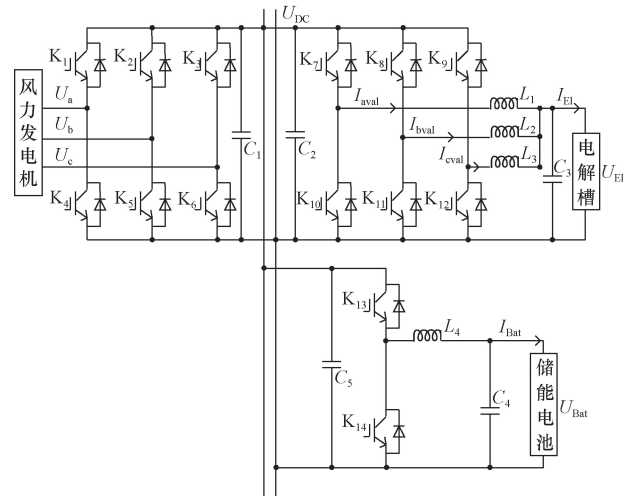


图1 孤岛风电制氢系统结构图

Fig. 1 Island wind power hydrogen production system structure diagram



U_a 、 U_b 和 U_c 分别为风力发电机输出的三相交流电压; U_{DC} 为直流母线电压; I_{aval} 、 I_{bval} 和 I_{eval} 分别为三相交错变流器每一相的电流; U_{EI} 和 I_{EI} 分别为电解槽的电压和电流; U_{Bat} 为储能电池的

电压; $K_1 \sim K_{14}$ 为功率变换器中的全控器件

图2 孤岛风电制氢系统拓扑结构图

Fig. 2 Topology structure diagram of island wind power hydrogen production system

1.1 风力发电机数学模型

风力发电机的输出功率为

$$P_{WG} = \begin{cases} 0, & V < V_{in} \\ P_{rated} \left(\frac{V - V_{in}}{V_{rated} - V_{in}} \right)^3, & V_{in} \leq V \leq V_{rated} \\ P_{rated}, & V_{rated} \leq V \leq V_{out} \\ 0, & V > V_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: P_{rated} 为风力发电机的额定输出功率; V 为风速; V_{rated} 为额定风速; V_{in} 和 V_{out} 分别为风力发电机的

切入风速和切出风速; P_{WG} 为风力发电机的输出功率。

1.2 碱性电解槽数学模型

碱性电解槽的输出电压与工作电流、工作温度和电极表面积有关^[13]。输出电压方程表示为

$$V_{cell} = V_{rev} + (r_1 + r_2 T) \frac{I_{cell}}{A} + \lg \left[\left(k_1 + \frac{k_2}{T} + \frac{k_3}{T^2} \right) \frac{I_{cell}}{A} + 1 \right] \quad (2)$$

式(2)中: T 为电解槽温度; I_{cell} 为碱性电解槽电流; A 为电极面积; r_1 、 r_2 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 s 为经验系数; V_{rev} 为碱性电解槽的可逆电压。

碱性电解槽的输入直流电压 U_{El} 和运行功率 P_{El} 可表示为

$$U_{El} = NV_{cell} \quad (3)$$

$$P_{El} = U_{El} I_{cell} \quad (4)$$

式中: N 为电解小室数, 取 100。

碱性电解槽的制氢效率与电解槽的功率有关, 制氢量与电解槽的工作电流有关^[14]。分别由式(5)和式(6)表示为

$$\eta_{El} = \frac{H_{LHV} M_{H_2, El}}{W_{El}} \quad (5)$$

$$M_{H_2, El} = \frac{\mu_{El} I_{cell}}{2F} \quad (6)$$

式中: η_{El} 为碱性电解槽的制氢效率; H_{LHV} 为氢气的热量; W_{El} 为电解槽消耗的电能; μ_{El} 为电流效率; $M_{H_2, El}$ 为电解槽的制氢量; F 为电磁法拉第常数。

1.3 储能电池数学模型

储能电池选用磷酸铁锂电池, 储能电池 t 时刻的剩余电量由式(7)所示。

$$SOC(t) = \begin{cases} SOC(t-1) + \frac{\eta^- P_{Bat}(t)}{E_{Bat}}, & P_{Bat}(t) < 0 \\ SOC(t-1) + \frac{P_{Bat}(t)}{\eta^+ E_{Bat}}, & P_{Bat}(t) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: η^- 、 η^+ 分别为充放电效率; $P_{Bat}(t)$ 为 t 时刻储能电池的充放电功率, $P_{Bat}(t) > 0$ 为放电, $P_{Bat}(t) < 0$ 为充电。

2 孤岛风电制氢系统日前能量管理

日前阶段能量管理主要关注系统的长期经济效益。并通过碱性电解槽功率分级控制策略, 减少电解槽功率频繁波动, 提高电解槽的制氢稳定性。

2.1 系统日前能量管理模型

2.1.1 优化目标函数设计

构建孤岛风电制氢系统优化模型, 考虑整个系统的日运维成本、日投资成本和日售氢收益, 以系

统一天的收益最大化为目标函数。

$$f_{max} = C_{H_2} - C_R - C_I \quad (8)$$

式(8)中: C_{H_2} 为系统一天的售氢收益; C_R 为系统的运维成本; C_I 为系统的每日等价投资成本。

$$C_{H_2} = M_{H_2} G_{H_2} \quad (9)$$

式(9)中: M_{H_2} 为系统一天的产氢量; G_{H_2} 为氢气价格。

$$\begin{cases} C_R = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in X} C_{R,i} |P_i(t)| \\ X = \{WG, Bat, El\} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $C_{R,i}$ 为不同类别设备的单位运维成本; $P_i(t)$ 为不同类别设备在 t 时刻的功率。

$$\begin{cases} C_I = \mu_1 \sum_{i \in X} C_{I,i} s_i \\ \mu_1 = \frac{1}{n} \frac{b(1+b)^{L_s}}{(1+b)^{L_s} - 1} \\ X = \{WG, Bat, El\} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $C_{I,i}$ 为不同类别设备的装配投资成本; s_i 为不同设备的容量; μ_1 为折旧回收率; b 为折旧价格; L_s 为系统设计使用年限; n 为设备更换周期。

2.1.2 系统约束条件

功率平衡约束为

$$P_{WG}(t) = P_{El}(t) + P_{Bat}(t) \quad (12)$$

风力发电机出力约束为

$$P_{WG, min} \leq P_{WG}(t) \leq P_{WG, max} \quad (13)$$

式(13)中: $P_{WG, max}$ 为风力发电机输出的最大功率; $P_{WG, min}$ 为风力发电机输出的最小功率。

碱性电解槽运行功率约束为

$$P_{El, min} \leq P_{El}(t) \leq P_{El, max} \quad (14)$$

式(14)中: $P_{El, min}$ 为电解槽的最小运行功率; $P_{El, max}$ 为电解槽的最大运行功率。

为保证储能电池能够在安全范围内进行周期循环, 应对电池的充放电功率与荷电状态进行限制, 因此储能电池约束为

$$P_{Bat, min} \leq P_{Bat}(t) \leq P_{Bat, max} \quad (15)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (16)$$

$$SOC(0) = SOC(T) \quad (17)$$

式中: $P_{Bat, min}$ 为储能电池的最小充放电功率; $P_{Bat, max}$ 为储能电池的最大充放电功率; SOC_{min} 和 SOC_{max} 分别为储能电池运行时允许的最小和最大荷电状态。式(17)为储能电池周期性运行限制, 保证可以周期性运行。

2.2 电解槽功率分级能量管理策略

为了提升电解制氢的效率, 确保氢气的纯度, 减少电解水制氢过程中功率的频繁波动以及增强碱性电解槽制氢的稳定性, 在日前阶段能量管理中

采用碱性电解槽功率分级控制策略。

将碱性电解槽的运行区间分为 n 级,功率分级表达式为

$$P_{El, \min} + \frac{1}{n}m(P_{El, \max} - P_{El, \min}) \leq P_{El} \leq P_{El, \min} + \frac{1}{n}(m+1)(P_{El, \max} - P_{El, \min}) \quad (18)$$

式(18)中: m 为 $0 \sim n$ 的整数。

电解槽运行功率表达式为

$$P_{El} = \begin{cases} P_{El, \min}, & P_{WG} < P_{El, \min} \\ P_{El, \min} + \frac{m}{n}(P_{El, \max} - P_{El, \min}), & P_{El, \min} > P_{WG} > P_{El, \max} \\ P_{El, \max}, & P_{WG} > P_{El, \max} \end{cases} \quad (19)$$

当风功率处于电解槽运行区间时,电解槽运行功率为分级运行区间的上限值,储能电池放电;当风功率大于电解槽的额定运行功率时,电解槽运行在额定运行功率,储能电池充电;当风功率小于电解槽最小运行功率时,电解槽运行在最小运行功率,储能电池放电。

2.3 灰狼优化算法求解系统模型

灰狼算法(grey wolf algorithm, GWO)灵感来源于灰狼的狩猎行为和领导特征。这种算法具有控制参数较少、易于实现等优点^[15]。在孤岛风电制氢系统中,通过这种算法,可以找到电解槽和储能电池的功率的最优解。传统灰狼优化算法求解孤岛风电制氢系统日前能量管理模型过程如下。

2.3.1 功率初始化

在给定的功率范围上下限内随机产生功率,产生功率的个数为算法的种群数,然后按照所产生功率的适应度的优劣将功率进行排序,目标函数值最优的功率记为 P_α ,次优的功率记为 P_β ,第三优的功率记为 P_δ ,其他的被记为 P_{ω_i} 。

2.3.2 系统寻优过程

模仿灰狼包围猎物过程,其他功率值 $P_{\omega_i}(t)$ 追踪最优功率 $P_\alpha(t)$,寻优过程为

$$D = |CP_\alpha(t) - P_{\omega_i}(t)| \quad (20)$$

$$P_{\omega_i}(t+1) = P_\alpha(t) - AD \quad (21)$$

式中: D 为每次迭代中其他功率值与最优功率值的差值(即猎物与灰狼的距离); $P_{\omega_i}(t+1)$ 为一次迭代后的其他功率值; A 和 C 为协同系数。 A 和 C 的计算方法为

$$A = 2QR_1 - Q \quad (22)$$

$$C = 2R_2 \quad (23)$$

式中: $R_1, R_2 \in [0, 1]$, 为随机变量; Q 的初始值为 2,

在迭代过程中按照 $Q = 2 - 2t/N$ 线性递减, N 为最大迭代次数。

2.3.3 最优功率更新

在算法寻优过程中,搜索空间较大,直接寻找最优解是比较困难的。模仿灰狼群狩猎的过程,每一迭代的功率值都由最优解 P_α 、次优解 P_β 、第三优解 P_δ 以及随机扰动两部分组成,更新公式为

$$\begin{cases} D_\alpha = |CP_\alpha - P_{\omega_i}| \\ D_\beta = |CP_\beta - P_{\omega_i}| \\ D_\delta = |CP_\delta - P_{\omega_i}| \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} P_1 = P_\alpha - A_1 D_\alpha \\ P_2 = P_\beta - A_2 D_\beta \\ P_3 = P_\delta - A_3 D_\delta \end{cases} \quad (25)$$

$$P_{\omega_i}(t+1) = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (26)$$

式中: D_α, D_β 和 D_δ 分别为最优解、次优解、第三优解与其他解之间的差值; $P_{\omega_i}(t+1)$ 为 P_α, P_β 和 P_δ 共同决定的其他功率的值。

在每次迭代后,根据每个功率的适应度重新更新最优功率、次优功率和其他功率,适应度较好的前 3 个功率升级为 P_α, P_β 和 P_δ ,其他功率降级为 P_ω 。直到算法达到最大迭代次数结束,输出最优解 P_α 。

由于传统灰狼优化算法在求解高维度模型时,全局搜索能力不足,易陷入局部最优等缺点。因此,对算法进行以下改进。

2.4 改进灰狼优化算法求解系统模型

2.4.1 功率初始化改进

利用 Sobol 序列初始化种群,可以生成均匀分布的初始化功率,可以避免种群中出现过多相似的功率,防止算法在运行中陷入局部最优。假设初始解的取值范围为 $[P_{\min}, P_{\max}]$,由 Sobol 序列产生的随机数 $\varphi_n \in [0, 1]$,则种群初始位置为

$$P_n = P_{\min} + \varphi_n(P_{\max} - P_{\min}) \quad (27)$$

2.4.2 引入动态权重

由式(26)可以看出,功率寻优过程仅由 P_α, P_β 和 P_δ 决定,但是忽略了 3 种解的不同特征,最优解 P_α 所占的比例没有得到更好的体现。引入动态权重来衡量不同优解的重要性,对式(26)进行改进,改进后的功率更新公式为

$$P_{\omega_i}(t+1) = \sum_{j=\alpha, \beta, \delta} d_j P_j \quad (28)$$

式(28)中: d_j 为 P_α, P_β 和 P_δ 基于适应度的权重系数,权重系数计算公式为

$$d_j = \frac{f[P_j(t)]}{f[P_\alpha(t)] + f[P_\beta(t)] + f[P_\delta(t)]} \quad (29)$$

式(29)中: $f[P_j(t)]$ 为 P_α, P_β 和 P_δ 的适应度值。

2.4.3 莱维飞行改进

莱维飞行是一种短步距搜索和长步距搜索结合的随机搜索策略,增加了空间随即搜索的多样性,这种符合莱维分布的搜索方法使莱维飞行具有良好的全局搜索能力。加入动态权重比例在改进的灰狼优化算法中,在每次的迭代步骤中根据一定概率引入莱维飞行操作,可以是灰狼优化算法跳出局部最优区域,可以在更大的范围内搜索最优解。其他功率 $P_{\omega i}$ 的功率更新公式为

$$P_{\omega i}(t+1) = \begin{cases} \sum_{j=\alpha, \beta, \delta} d_j P_j + I \otimes \text{Levy}(\gamma), & |A| \geq 0.5 \\ \sum_{j=\alpha, \beta, \delta} d_j P_j, & |A| < 0.5 \end{cases} \quad (30)$$

$$I \otimes \text{Levy}(\gamma) \sim 0.01 \frac{\mu}{|\nu|^{1/\gamma}} [P(t) - P_{\alpha}(t)] \quad (31)$$

式中: $I = 0.01 \frac{\mu}{|\nu|^{1/\gamma}}$; $\otimes$ 表示点乘运算; $\gamma = 1.5$; μ 和 ν 服从正态分布,表达式为

$$\mu \sim N(0, \sigma_{\mu}^2) \quad (32)$$

$$\nu \sim N(0, \sigma_{\nu}^2) \quad (33)$$

$$\sigma_{\mu} = \left\{ \frac{\Gamma(1+\gamma) \sin(\pi\gamma/2)}{2^{(\gamma-1)/2} \Gamma[(1+\gamma)/2] \gamma} \right\}^{1/\gamma} \quad (34)$$

$$\sigma_{\nu} = 1 \quad (35)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 表示伽马函数。

2.4.4 贪婪策略改进

贪婪选择策略可以保留每次迭代更新中适应度最好的功率。在求解中,通过式(30)产生的新群体用 $P_{\omega i_new}(t)$ 表示,然后通过式(36)来判断是否保留更新后的功率值来完成一次迭代。如果更新后的功率可以使目标函数的值更优,则被保留使种群更加丰富;如果使目标函数的值更差,则被抛弃,进行下一次迭代。直到满足算法终止条件,然后输出最优解,使算法拥有更强的搜索能力。

$$P_{\omega i}(t+1) = \begin{cases} P(t), & f[P_{\omega i_new}(t)] < f[P(t)], r_{new} < Q \\ P_{\omega i_new}(t), & \text{其他} \end{cases} \quad (36)$$

式(36)中: $f(P)$ 为所求目标函数的值; r_{new} 为 $[0, 1]$ 的随机数。

2.5 算法求解流程

改进灰狼优化算法的孤岛风电制氢系统日前能量管理模型求解过程如下。

(1)输入系统参数和算法参数。

(2)使用 Sobol 序列初始化种群。

(3)计算目标函数,得到最优解 P_{α} 、优解 P_{β} 和第三优解 P_{δ} 。

(4)根据动态权重和莱维飞行更新其他功率 $P_{\omega i}$ 的值。

(5)执行贪婪策略,保留满足最优目标函数的功率。

(6)更新 A 、 Q 和 C 的值。

(7)计算目标函数值。更新最优解 P_{α} 、优解 P_{β} 和第三优解 P_{δ} 。

(8)迭代次数如果满足最大迭代次数则输出全局最优解 P_{α} ; 如果不满足则返回步骤4。

改进后的 GWO 算法记为 GL-GWO。

3 孤岛风电制氢系统实时能量管理

实时阶段能量管理更注重系统的实时运行状态和安全性。在日前能量管理计划的框架下,当系统中出现非计划的瞬时波动功率时,系统会根据不同的运行工况对日前计划中的风力发电机、电解槽和储能电池的功率进行调整,以确保系统中的功率实时平衡、直流母线电压稳定,并保持储能电池的荷电状态在安全范围内。孤岛风电制氢实时能量管理控制图如图3所示。

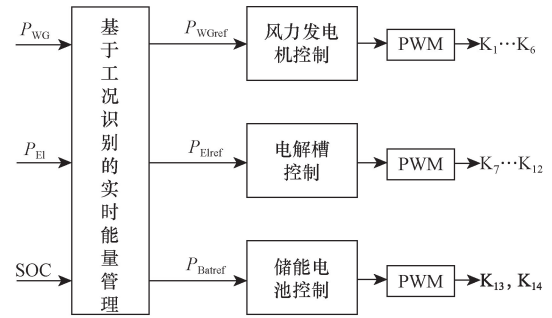


图3 孤岛风电制氢系统实时能量管理控制图

Fig. 3 Island wind power hydrogen production system real-time energy management control chart

3.1 系统运行工况分类

根据风机输出功率与电解槽功率的差值以及储能电池的荷电状态,将运行工况分为以下5种。

(1)工况1:风机输出功率和电解槽的功率满足 $P_{WG} > P_{El, max}$, 且储能电池荷电状态满足 $SOC > SOC_{max}$ 时,风机退出最大功率功率跟踪状态,并处于恒功率运行状态,储能电池处于停机状态。风机输出功率等于电解槽额定功率。

(2)工况2:风机输出功率和电解槽的功率满足 $P_{WG} > P_{El, max}$, 且储能电池荷电状态满足 $SOC < SOC_{max}$ 时,风机运行在最大功率跟踪状态,电解槽额定功率运行,储能电池充电。

(3)工况3:风机输出功率和电解槽的功率满足 $P_{WG} < P_{El, min}$, 且储能电池荷电状态满足 $SOC < SOC_{min}$ 时,风机运行在恒功率状态,电解槽停机,储

能电池充电。风机功率输出功率等于储能电池的充电功率。

(4) 工况 4: 风机输出功率和电解槽的功率满足 $P_{WG} < P_{El, min}$, 且储能电池荷电状态满足 $SOC > SOC_{min}$ 时, 风机运行在最大功率跟踪状态, 电解槽运行在最低运行功率, 储能电池放电。电解槽运行功率等于风机功率输出功率与储能电池的输出功率之和。

(5) 工况 5: 风机输出功率和电解槽的功率满足 $P_{El, min} < P_{WG} < P_{El, max}$ 时, 风机运行在最大功率跟踪状态, 储能电池停止工作, 电解槽运行功率等于风机输出功率。

3.2 基于工况识别的实时能量管理策略

孤岛风电制氢系统在实际运行过程中, 通过实时监测系统内风力发电机、电解槽的功率以及储能电池的荷电状态, 获取系统的实时运行参数。根据不同的运行工况, 将系统运行状态映射到相应的参考功率, 以实时调整系统的运行状态。基于工况识别的实时能量管理策略流程图如图 4 所示。

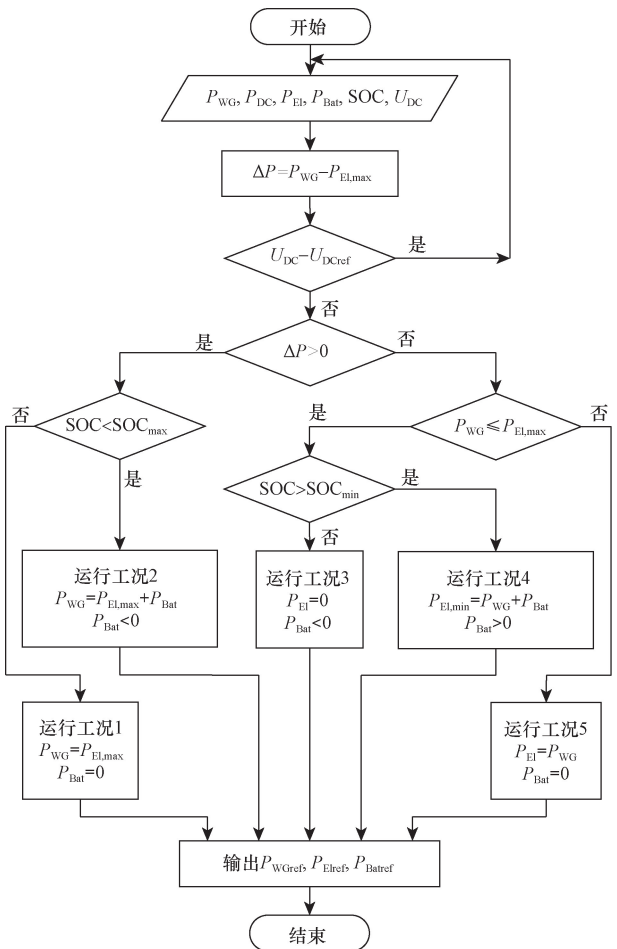


图 4 基于工况识别的实时能量管理策略流程图
Fig. 4 Flow chart of real-time energy management strategy based on condition recognition

4 仿真实验与结果分析

风速数据来源于 EirGrid Group, 并且取冬季一个典型日数据进行实验, 仿真间隔为 15 min, 按照 96 个时段来进行仿真。风速波形如图 5 所示。电解槽功率分级区间如表 1 所示。系统运行仿真参数如表 2 所示。

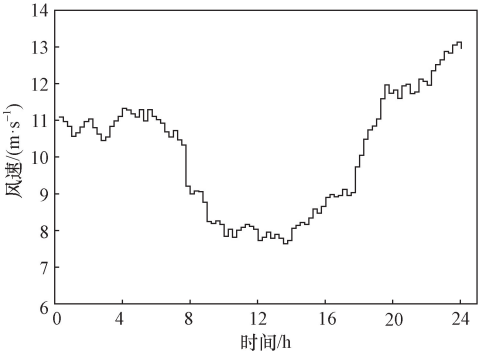


图 5 风速波形
Fig. 5 Wind speed waveform

表 1 电解槽功率分级区间	
Table 1 Electrolyzer power classification interval	
电解槽功率分级区间	功率范围/kW
区间一	180 ~ 200
区间二	160 ~ 180
区间三	140 ~ 160
区间四	120 ~ 140
区间五	100 ~ 120

表 2 仿真参数		
Table 2 Simulation parameter		
项目	参数名称	数值
风力发电机	额定风速/($m \cdot s^{-1}$)	12
	额定功率/kW	250
	最小功率/kW	0
	日投资成本/(元 $\cdot d^{-1}$)	500
	日运营成本/[元 $\cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	0.07
碱性电解槽	使用年限/a	20
	额定功率/kW	200
	最小功率/kW	100
	日投资成本/(元 $\cdot d^{-1}$)	760
	日运营成本/[元 $\cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	0.12
储能电池	使用年限/a	10
	充电效率/%	97
	放电效率/%	97
	最大荷电状态	0.8
	最小荷电状态	0.2
直流母线	额定功率/kW	100
	总容量/($kW \cdot h$)	300
	日投资成本/(元 $\cdot d^{-1}$)	100
	日运营成本/[元 $\cdot (kW \cdot h)^{-1}$]	0.05
	使用年限/a	10
其他	氢气价格 C_{H_2} /(元 $\cdot kg^{-1}$)	40

4.1 日前阶段能量管理结果分析

采用改进灰狼优化算法对模型进行求解,算法参数设置种群规模为 30,最大迭代次数为 300。日前阶段能量管理优化后的系统功率曲线如图 6 所示,通过观察可以发现,在风功率波动的情况下,电解槽按照功率分级策略稳定运行,在不同功率区间以功率上限值进行制氢,有效提高系统的制氢量。

储能电池荷电状态如图 7 所示,在 00:00—04:00,电解槽运行功率大于风机输出功率,储能电池处于放电状态,对应荷电状态呈下降趋势;在 04:00—06:00,风机输出功率大于电解槽额定运行功率,储能电池充电,荷电状态呈上升趋势;在 06:00—19:00,风机输出功率小于电解槽运行功率,储能电池放电,荷电状态呈下降趋势;在 19:00—24:00,风机输出功率大于电解槽额定运行功率,且在 22:00 之后风机达到额定功率输出,储能电池充电,荷电状态呈上升趋势。

日前阶段能量管理优化前和优化后的日运行成本、日售氢收益、日收益如图 8 所示。日投资成本

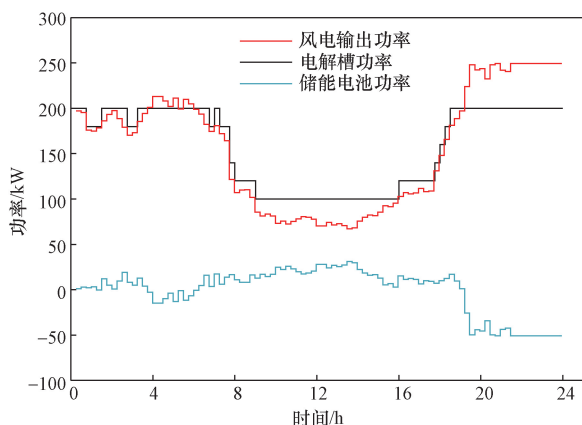


图 6 日前阶段能量管理功率优化曲线

Fig. 6 Day-ahead energy management power optimization curve

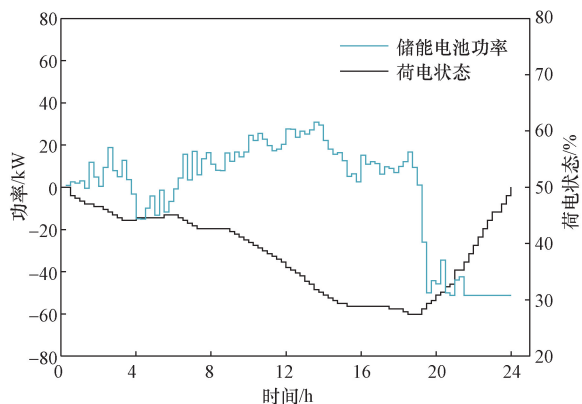


图 7 日前阶段储能电池充放电功率与荷电状态曲线

Fig. 7 Charging and discharging power and state of charge curve of energy storage battery in day-ahead stage

都为 1 310 元;优化前日运维成本为 774.56 元,优化后日运维成本为 759.81;优化前日售氢收益 2 745.44 元,优化后日售氢收益为 2 924.91 元;优化前日收益为 660.88 元,优化后日收益为 855.10 元。日前阶段能量管理模型优化后的系统运行成本降低了 1.9%,售氢收益增加了 6.54%,总体日收益提高了 29.39%。

为了验证 GL-GWO 算法的有效性,将 GL-GWO、GWO 和粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 在本文模型上进行对比实验分析。粒子群算法的种群规模与最大迭代次数与灰狼算法一致,其余参数为粒子群算法标准参数。优化结果如图 9 所示。GL-GWO 的收敛速度要比 GWO 和 PSO 快,算法具有更好的优化效果,避免了算法陷入局部最优,提高了算法的搜索能力。

为表明所提算法在孤岛风电制氢系统日前阶段能量管理上的普适优越性,对实验运行 20 次并求平均值。运行结果如图 10 所示。

在运行结果中,GL-GWO 的日运营成本比 GWO 和 PSO 分别低 1.49% 和 2.86%;日售氢收益比 GWO 和 PSO 分别高 2.39% 和 4.02%;日收益比 GWO 和 PSO 分别高 2.39% 和 4.02%。

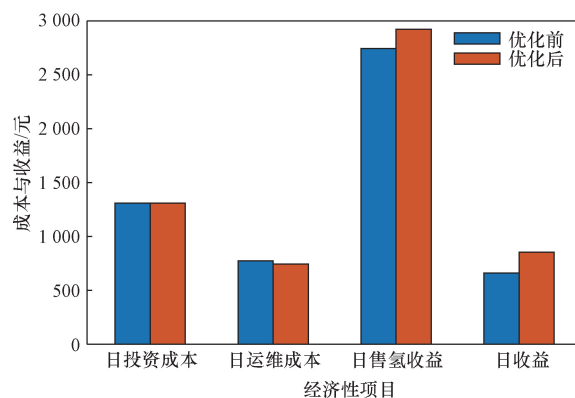


图 8 日前阶段优化前与优化后的系统经济性对比图

Fig. 8 The comparison diagram of system economy before and after optimization in the day-ahead stage

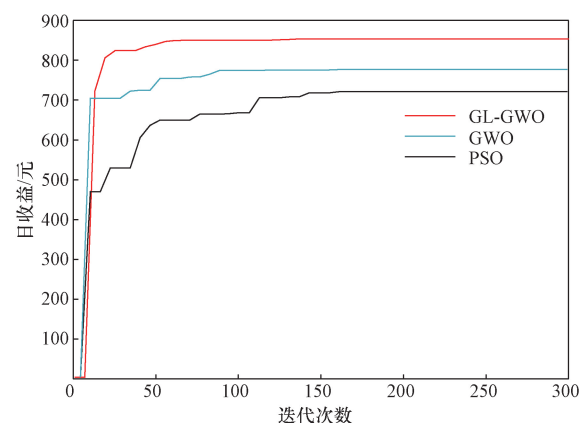


图 9 算法最终收敛曲线

Fig. 9 The final convergence curve of the algorithm

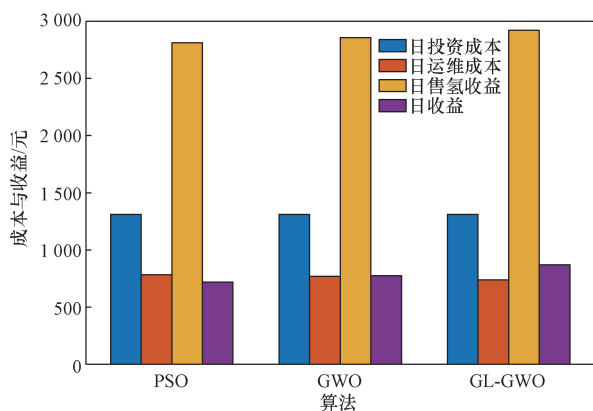


图 10 3种算法下系统经济性对比图

Fig. 10 System economic comparison diagram under three algorithms

PSO 分别高 10.3% 和 18.81%。通过对比可以看出,所提出的 GL-GWO 算法更加适合孤岛风电制氢系统日前能量管理模型求解,使系统具有更好的经济性。

4.2 实时能量管理结果分析

在系统实时阶段能量管理的仿真中,设置系统初始风速为 12 m/s,在 $t=2$ s 时升为 13 m/s,在 $t=4$ s 时降为 8 m/s,在 $t=6$ s 时升高到 10 m/s,在 $t=8$ s 时降为 6.5 m/s。系统实时功率曲线如图 11 所示,在 0~2.8 s 系统工作在工况 2;在 2.8~4 s 系统运行在工况 1;4~6 s 和 8~10 s 系统运行在工况 4;6~8 s 系统工作在工况 5。当风功率变化时,系统在不同运行工况都可以维持系统功率实时平衡。在工况切换时也可以快速响应。

储能电池荷电状态如图 12 所示,在 0~2.8 s 储能电池充电,荷电状态呈上升趋势荷电状态;在 2.8 s 时,储能电池荷电状态达到最大值,2.8~4 s 储能电池停止工作。4~6 s 和 8~10 s 储能电池放电,荷电状态呈下降趋势;6~8 s 风机输出功率等于

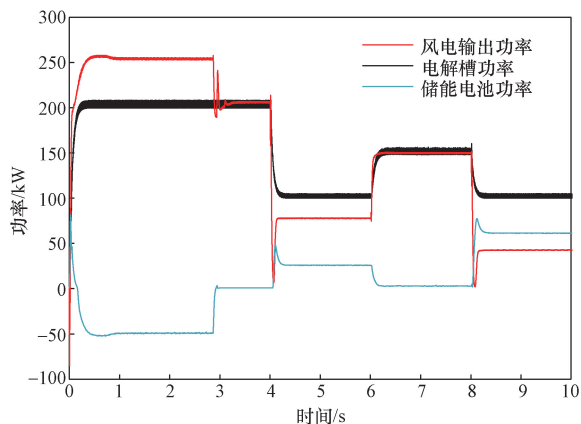


图 11 系统运行工况切换时的功率曲线

Fig. 11 The power curve of the system when the operating conditions are switched

电解槽功率,储能电池停止工作。工况变化时储能电池可以维持在安全范围运行。

不同工况下的碱性制氢电解槽的制氢速率如图 13 所示,可以看出在不同工况下,电解槽都可以维持稳定制氢。

系统直流母线电压如图 14 所示。在系统运行在不同工况和不同工况之间切换时,仍然可以维持系统直流母线电压稳定。

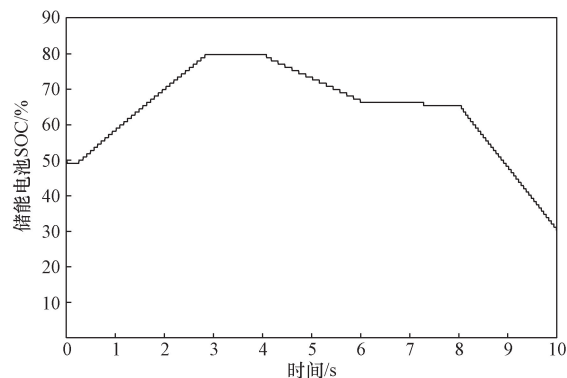


图 12 系统运行工况切换时的储能电池荷电状态

Fig. 12 The state of charge of the energy storage battery during the switching of the system operating conditions

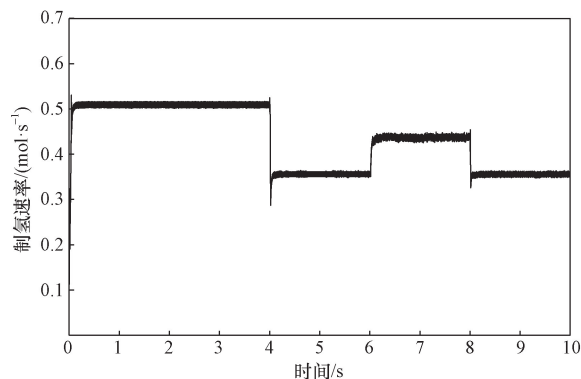


图 13 制氢速率曲线

Fig. 13 Hydrogen production rate curve

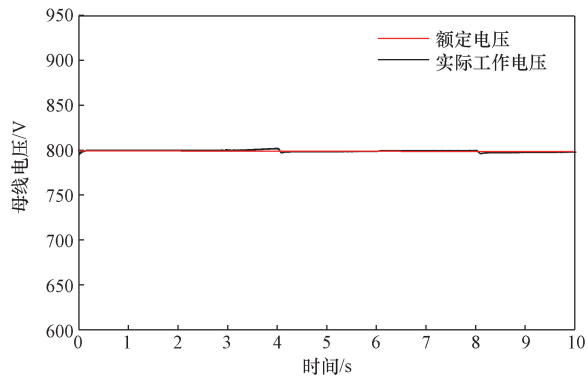


图 14 系统运行工况切换时的直流母线电压

Fig. 14 The DC bus voltage when the system operating conditions are switched

5 结论

针对风能间歇性和波动性对孤岛风电制氢系统经济性和稳定性的影响,提出了含有储能电池的孤岛风电制氢系统日前及实时能量管理策略。经过仿真验证,得出以下结论。

(1) 日前阶段能量管理,通过电解槽功率分级能量管理策略,减小了电解槽制氢的功率波动。通过构建基于系统日收益最大化的能量管理模型,利用改进灰狼优化算法进行求解。优化后的系统的日收益比优化前提高了 29.39%,即日前阶段能量管理可以有效提高系统的经济性。

(2) 将改进后的灰狼优化算法与其他算法对比。改进后的算法提高了优化效果,提高了收敛速度,避免算法陷入局部最优,对解决孤岛风电制氢系统日前能量管理问题具有现实意义。

(3) 通过对系统在不同运行工况下的仿真实验,验证了所提出的基于工况识别的实时能量管理策略的优越性。该策略能够实时感知系统的运行状态,并根据实际情况进行精确的工况切换。同时,在不同运行工况下,该策略也能够有效保障系统的稳定性和安全性,使系统能够持续、高效地运行。

参 考 文 献

- [1] 孟照鑫, 何青, 胡华为, 等. 我国氢能产业发展现状与思考[J]. 现代化工, 2022, 42(1): 1-6, 12.
Meng Zhaoxin, He Qing, Hu Huawei, et al. Development situation and consideration of hydrogen energy industry in China[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(1): 1-6, 12.
- [2] 曹芳, 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): 2187-2201.
Cao Fang, Guo Tingting, Chen Kunyang, et al. Progress and development prospects of wind power coupled hydrogen production technology[J]. Proceeding of the CSEE, 2021, 41(6): 2187-2201.
- [3] 余紫薇. 风电制氢系统并/离网运行控制技术 & 稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
Yu Ziwei. Control strategy and stability analysis of wind-to-hydrogen system in island and grid-connected modes[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [4] Phan L V, Do K C, Nguyen T D. Review of hydrogen technologies based microgrid: energy management systems, challenges and future recommendations[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(38): 14127-14148.
- [5] Tebibel H. Methodology for multi-objective optimization of wind turbine/battery/electrolyzer system for decentralized clean hydrogen production using an adapted power management strategy for low wind speed conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 238: 114125.
- [6] Gu X F, Ying Z, Zheng X Y, et al. Photovoltaic-based energy system coupled with energy storage for all-day stable PEM electrolytic hydrogen production[J]. Renewable Energy, 2023, 209: 53-62.
- [7] 牟亚雪. 风氢混合发电系统的协调控制及能量管理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Mou Yaxue. Research on coordinated control and energy management of wind-hydrogen hybrid power generation system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [8] Maghami M R, Hassani R, Gomes C, et al. Hybrid energy management with respect to a hydrogen energy system and demand response[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(3): 1499-1509.
- [9] 蒲雨辰, 李奇, 陈维荣, 等. 计及最小使用成本及储能状态平衡的电-氢混合储能孤岛直流微电网能量管理[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 918-927.
Pu Yuchen, Li Qi, Chen Weirong, et al. Energy management for islanded DC microgrid with hybrid electric-hydrogen energy storage system based on minimum utilization cost and energy storage state balance[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 918-927.
- [10] 王侃宏, 赵政通, 罗景辉. 风光氢储系统的两阶优化匹配分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10790-10794.
Wang Kanhong, Zhao Zhengtong, Luo Jinghui. Two-order optimization matching analysis of scenery hydrogen storage system[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26): 10790-10794.
- [11] Huang W T, Zhang B H, Ge L J, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy for electrolytic water to hydrogen production in zero-carbon parks type microgrid for optimal utilization of electrolyzer[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107653.
- [12] Wang X B, Song W L, Wu H T, et al. Microgrid operation relying on economic problems considering renewable sources, storage system, and demand-side management using developed gray wolf optimization algorithm[J]. Energy, 2022, 248: 123472.
- [13] Zheng Y, You S, Bindner H W, et al. Optimal day-ahead dispatch of an alkaline electrolyser system concerning thermal-electric properties and state-transitional dynamics[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118091.
- [14] Meng Z X, He Q, Shi X P. Research on energy utilization of wind-hydrogen coupled energy storage power generation system[J]. Separation and Purification Technology, 2023, 313: 123439.
- [15] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A D. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.