

DOI: 10.19666/j.rlfid.202302031

基于粒子群算法的制氢电解槽 运行控制策略

张潇桐¹, 戈阳阳¹, 姚红雨², 袁铁江²

(1.国网辽宁省电力科学研究所, 辽宁 沈阳 116023; 2.大连理工大学电气工程学院, 大连 辽宁 116081)

[摘要] 新能源制氢系统的优化调度、经济性与制氢效率密切相关, 针对现有新能源制氢系统制氢效率低的问题, 提出一种基于粒子群算法的新能源制氢系统控制策略。首先, 基于质子交换膜电解槽模型, 分析电解槽工作特点与制氢效率的关系, 提出一种基于粒子群算法的制氢系统运行控制策略, 提高制氢效率; 然后, 建立了考虑系统制氢效率的新能源制氢系统优化调度模型, 并采用粒子群算法求解最佳制氢功率; 最后通过电网实际运行数据的仿真分析, 证明所提出制氢系统控制策略相较于传统的启停控制策略能够有效提高系统制氢量, 提高系统收益。这为制氢系统在电网中的大规模应用提供了理论依据。

[关键词] 制氢效率; 粒子群优化算法; 电解水制氢; 优化调度

[引用本文格式] 张潇桐, 戈阳阳, 姚红雨, 等. 基于粒子群算法的制氢电解槽运行控制策略[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 115-122. ZHANG Xiaotong, GE Yangyang, YAO Hongyu, et al. Operation control strategy of electrolytic cell based on particle swarm optimization algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 115-122.

Operation control strategy of hydrogen production electrolytic cell based on particle swarm optimization algorithm

ZHANG Xiaotong¹, GE Yangyang¹, YAO Hongyu², YUAN Tiejia²

(1.State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 116023, China;
2.School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China)

Abstract: The optimal scheduling and economy of new energy hydrogen production systems are closely related to hydrogen production efficiency. Aiming at the problem of low hydrogen production efficiency in existing new energy hydrogen production systems, this paper proposes a control strategy for new energy hydrogen production systems based on particle swarm optimization (PSO). Firstly, based on the polymer electrolyte membrane (PEM) electrolytic cell model, the relationship between the operating point of the electrolytic cell and the hydrogen production efficiency is analyzed. Secondly, a hydrogen production system operation control method based on particle swarm optimization algorithm is proposed to improve the hydrogen production efficiency of the hydrogen production system. Furthermore, an optimal scheduling model for new energy hydrogen production systems considering the efficiency of system hydrogen production was established, and particle swarm optimization algorithm was also used to solve the optimal hydrogen production power. Finally, through simulation analysis of actual power grid operation data, it is proved that the proposed control strategy can effectively improve the hydrogen production capacity and system revenue compared to traditional startup and shutdown strategies, providing a theoretical basis for the large-scale application of hydrogen production systems in power grids.

Key words: hydrogen production efficiency; particle swarm optimization algorithm; hydrogen production by electrolysis of water; optimize scheduling

收稿日期: 2023-02-13

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究所项目 (SLGNDK00XXJS2200064)

Supported by: State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute Project (SLGNDK00XXJS2200064)

第一作者简介: 张潇桐 (1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源并网及检测技术, 734069940@qq.com。

通信作者简介: 姚红雨 (2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用, 2869681072@qq.com。

构建新型电力系统,对于实现“双碳”目标具有重要意义^[1]。以风、光为代表的新型能源资源丰富、清洁、效率高,可供人类永久使用^[2],但由于其固有的波动性和间歇性为电网带来了更多挑战^[3]。当调峰困难时,必须弃风弃光以维持电网安全稳定^[4],导致能源的极大浪费,而储能技术的发展对于解决该问题具有重要意义。在现有储能技术中,氢能凭借热值高、来源广泛、无污染等特点被誉为21世纪最具潜力的能源^[5],因此氢储能技术受到了国内外学者的广泛关注。

当前,我国已是世界第一产氢国,然而由于电解水制氢需要消耗大量电能导致较高的制氢成本,我国“绿氢”产量仅占总产氢量的1%,利用弃风弃光产生的富裕电能制氢,不仅降低了制氢的成本而且减少了生产过程中的碳排放,同时解决了能源浪费的问题。

目前,电解水制氢技术主要有碱性水电解、质子交换膜电解槽水电解(polymer electrolyte membrane electrolytic cell, PEMEC)、固体氧化物水电解3种^[6],其中PEMEC具有调节范围宽、启动速度快、安全性能好等特点,更适用于具有高渗透可再生能源发电的电力系统^[7]。因此,本文对其进行详细研究。在电解槽控制策略方面,国内外诸多学者采用启停控制策略,如文献[8-9]提出了电解槽启停特性的出力优化模型,建立了以系统运行成本最低的电解槽运行优化模型。然而传统的启停策略未考虑电解槽工作点对于其制氢效率的影响,使得制氢系统虽能实现新能源消纳,却未能提高产氢量。在新能源制氢系统优化调度方面,文献[10]基于改进郊狼优化算法,以微电网功率过剩和不足量最小为目标函数,优化制氢系统的运行功率。文献[11]考虑电网经济性、电解槽安全性、供电可靠性,制定了电解槽运行策略。文献[12]建立了风电制氢系统模型,研究了电解槽功率和氢气价格对回收期的影响,验证了水电解制氢的经济可行性。文献[13]根据乌克兰风电的特点,提出风电制氢的计算方法,并对风电制氢系统的经济效益进行了研究。然而上述研究均未考虑制氢系统效率对于调度结果的影响。

综上所述,可以发现现有研究对于制氢系统控制策略均采用传统的启停控制方法,且未考虑电解槽产氢效率对于系统优化调度的影响。本文在现有研究的基础上主要工作为:1)基于PEMEC产氢效率模型,提出基于粒子群优化算法的制氢系统控制策略;2)建立新能源制氢系统优化调度模型,制氢

系统分别采用启停控制策略与基于粒子群优化^[14](particle swarm optimization algorithm, PSO)的控制策略并做出对比,通过实际运行数据的仿真分析,证明所提控制策略相较于传统的启停策略能够有效提高系统产氢量,提高系统收益,为制氢系统在电网中的大规模应用提供了理论依据。

1 PEMEC 数学模型

1.1 PEMEC 电化学反应模型

单个PEMEC电解总电压 U_{el} ^[15]可表示为:

$$U_{el} = U_{rev} + U_{ohm} + U_{act} + U_{diff} \quad (1)$$

式中: U_{rev} 为可逆电压; U_{ohm} 为欧姆过电势; U_{act} 为活化过电势; U_{diff} 为扩散过电势。其中, U_{diff} 占比较小,通常忽略^[16]。

参考文献[17], U_{rev} 计算公式为:

$$U_{rev} = 1.229 - 0.009(T_{el} - 298.15) + \frac{RT_{el}}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{\alpha_{H_2O}} \right) \quad (2)$$

式中: p_{H_2} 与 p_{O_2} 分别为氢气与氧气的分压; R 为气体常数; α_{H_2O} 为水的活度,本文取1; F 为法拉第常数; T_{el} 为电解温度。

U_{act} 由阳极过电势 U_{act-a} 和阴极过电势 U_{act-c} 构成,计算公式^[17]为:

$$U_{act} = U_{act-a} + U_{act-c} \quad (3)$$

$$U_{act-a} = \frac{RT_a}{\alpha_a F} \ln \left(\frac{j}{2j_{o,a}} + \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2j_{o,a}} \right)^2} \right) \quad (4)$$

$$U_{act-c} = \frac{RT_c}{\alpha_c F} \ln \left(\frac{j}{2j_{o,c}} + \sqrt{1 + \left(\frac{j}{2j_{o,c}} \right)^2} \right) \quad (5)$$

式中: T_a 、 T_c 分别为阳极与阴极的温度; α_a 、 α_c 分别为阳极与阴极的电荷转移系数; $j_{o,a}$ 、 $j_{o,c}$ 分别为阳极与阴极的交换电流密度; j 为电流密度。

PEMEC通常以膜电阻为主而忽略其他电阻,于是得到 U_{ohm} 计算方法^[16]为:

$$U_{ohm} = \frac{j\delta_m}{(0.005139\lambda - 0.00326)\exp\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{el}}\right)} \quad (6)$$

式中: δ_m 为质子交换膜厚度; λ 为质子交换膜含水量。上面公式中所涉及参数取值见表1^[16]。

综合式(1)~式(6)与表1,可以得到PEMEC在不同电解温度下电流密度 j 与电解总电压 U_{el} 关系,结果如图1所示。

表 1 PEMEC 参数
Tab.1 PEMEC parameter table

参数	类型	取值
p_{H_2}	常量	3.5 MPa
p_{O_2}	常量	0.1 MPa
T_c	变量	与 T_{el} 一致
T_a	变量	与 T_{el} 一致
α_a	常量	2.0
α_c	常量	0.5
$j_{o,c}$	常量	10^{-3} A/cm^2
$j_{o,a}$	常量	10^{-6} A/cm^2
δ_m	常量	200 μm
λ	常量	20

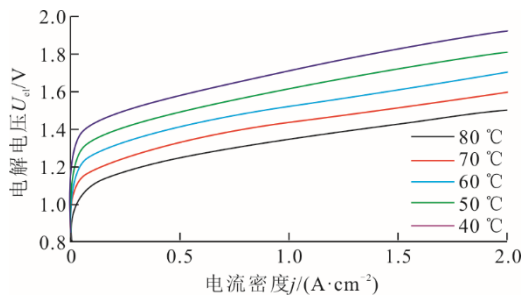


图 1 PEMEC 外特性曲线

Fig.1 External characteristic curve of PEMEC

1.2 PEMEC 产氢效率分析

参考文献[17], PEMEC 产氢量计算公式为:

$$n_{H_2} = \eta_F \frac{3 \ 600 V_{H_2} j A}{2F} \quad (7)$$

$$\eta_F = \frac{(j)^2}{f_1 + (j)^2} f_2 \quad (8)$$

式中: n_{H_2} 为制氢量, mol/h; A 为 PEMEC 活性面积, 取 100 cm^2 ; V_{H_2} 为氢气的摩尔体积; η_F [17] 为电流效率; f_1 与 f_2 均为法拉第相关参数。

综合 PEMEC 电化学反应模型, 可得其制氢量与运行功率关系如图 2 所示。

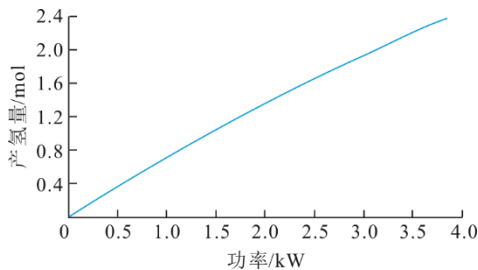


图 2 PEMEC 制氢量与运行功率关系

Fig.2 Relationship between hydrogen production and operating power of PEMEC

由图 2 可见, PEMEC 制氢量与运行功率并非线性关系, 因此当给定制氢系统功率时, 使其开启部分电解槽并以额定功率运行并非最好选择, 因此

本文提出一种基于粒子群算法的制氢系统运行控制策略, 来提高制氢量。

2 基于 PSO 算法的电解槽控制策略

并网型制氢系统结构如图 3 所示[18], 通过 AC/DC 变换器, 可控制电解槽开启的数目以及电解槽的运行功率。目前大多数制氢系统均采用启停控制策略, 本文主要与该控制策略进行对比。

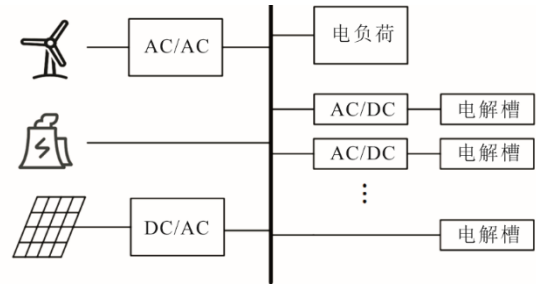


图 3 并网制氢系统结构

Fig.3 Structural diagram of grid connected hydrogen production system

2.1 PEMEC 启停控制策略

假设 PEMEC 的额定功率为 P_{rate} , 最小安全运行功率为 P_{min} , 制氢系统功率为 P_{el} , 启停控制策略过程如下[19]:

- 1) 当 $P_{el} \leq P_{min}$ 时, 无电解槽开启;
- 2) 当 $P_{min} < P_{el} \leq P_{rate}$ 时, 开启 1 个电解槽, 运行功率为 P_{el} ;
- 3) 当 $P_{rate} < P_{el} \leq P_{rate} + P_{min}$ 时, 仍仅有 1 个电解槽工作, 运行功率为 P_{rate} ;
- 4) 当 $P_{rate} + P_{min} < P_{el} \leq 2P_{rate}$ 时, 开启第 2 个电解槽, 运行功率分别为 P_{rate} 和 $P_{el} - P_{rate}$, 最终, 直到全部 P_{el} 分配完毕或所有电解槽均以 P_{rate} 运行。

该控制策略下, 电解槽启动方式大多为冷启动, 其运行温度需运行一段时间才能达到预期, 使得产氢效率降低。

2.2 基于 PSO 的电解槽控制策略

当给定制氢系统功率 P_{el} , 系统可控变量为接入 PEMEC 的数量 n 与 PEMEC 的工作点, 由于 PEMEC 产氢量、工作电压等均与电流密度 j 有关, 因此 PSO 算法的控制变量可表示为 $[n, j]$ 。

系统优化的目标为最大化制氢量, 因此, 基于式(7)、式(8)目标函数可表示为:

$$f = - \max \left(\eta_F n \frac{3 \ 600 V_{H_2} j A}{2F} \right) \quad (9)$$

同时, 为保证系统正常运行, 仍需设立以下约束条件。

1) PEMEC 安全运行约束

当 PEMEC 运行在较低电流密度点时易发生爆炸问题^[20-21], 当其工作在较高电流密度下时会加剧电解槽的不可逆衰减^[22-23], 减少其使用寿命, 因此对 PEMEC 电流密度加以限制: $0.2 < j < 2.0$ 。

2) PEMEC 投入数量约束

PEMEC 同时工作的数量应不超过其最大规模: $0 < n < n_{\max} \circ n_{\max}$ 为 PEMEC 数量上限值, 本文取 2 000。

3) 制氢系统运行功率约束

PEMEC 运行功率的总和应不超过制氢系统的功率 P_{el} , 基于式(1)一式(6)与 j 可计算 U_{el} , 于是得该约束条件: $njAU_{el} < P_{el}$ 。

上述约束中, 约束 1) 与约束 2) 为对控制变量的约束, 可通过其取值范围对其约束, 约束 3) 为对状态变量的约束, 当约束条件不满足时, 该粒子的适应度函数将增加 1 个较大的惩罚项 M 。

2.3 控制策略对比

制氢系统功率由 0 变化到 62 MW 时, 2 种策略下系统制氢量对比如图 4 所示。

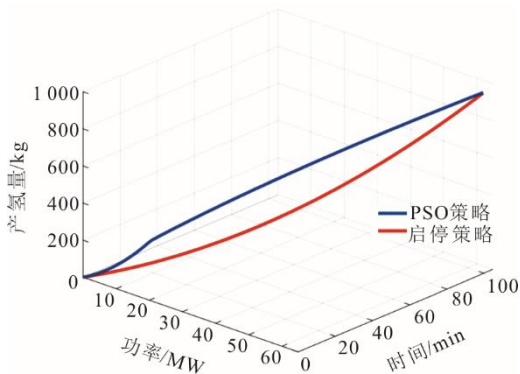


图 4 2 种策略制氢量对比

Fig.4 Hydrogen production comparison of two strategies

由图 4 可见, 当制氢功率为 20、30、40、50 MW 时, 本文基于 PSO 的制氢系统控制策略制氢量比传统启停策略制氢量分别多 190.11、211.49、191.76、133.48 kg, 可见当给定制氢系统运行功率时, 本文控制策略能够有效提升制氢系统的制氢量。

3 多电解槽协同控制

为增加制氢系统收益并验证所提控制策略在并网条件下的工作效果, 建立新能源制氢系统优化调度模型。在该场景中, 制氢系统电力来源有弃风弃光的电能 P_p 和购买的火电电能 P_{qf} , 优化调度问题的控制变量为火电购电量 P_{qf} 。优化调度的目标为系统的总收益最高, 由于系统的初始投资不影响调度结果^[24], 因此不考虑该部分支出。于是建立目标函数:

$$f_{op} = \min(\sum_{i=1}^{24} P_{i,qf} e_i - M_{H_2}^i c_h + M_{H_2}^i c_a) \quad (10)$$

式中: $P_{i,qf}$ 为 i 时刻购电量; e_i 为 i 时刻电价; $M_{H_2}^i$ 为 i 时刻的制氢量; c_h 为氢气售价; c_a 为生产 1 kg 氢气所需的制氢系统操作成本及维护成本。

对于各个时刻, 制氢系统的功率 P_{el} 为:

$$P_{el} = P_{qf} + P_p \quad (11)$$

进而, 基于前述的启停控制策略和本文的 PSO 算法控制策略得到该时刻下制氢系统的最优结构及 PEMEC 工作点, 从而计算产氢量 $M_{i,H}$, 优化调度求解算法同样采取 PSO 算法。

综上, 本文完整优化调度流程包含 2 个优化过程, 外层为基于 PSO 算法的优化调度, 内层为基于 PSO 算法的制氢系统优化, 具体流程如图 5 所示。

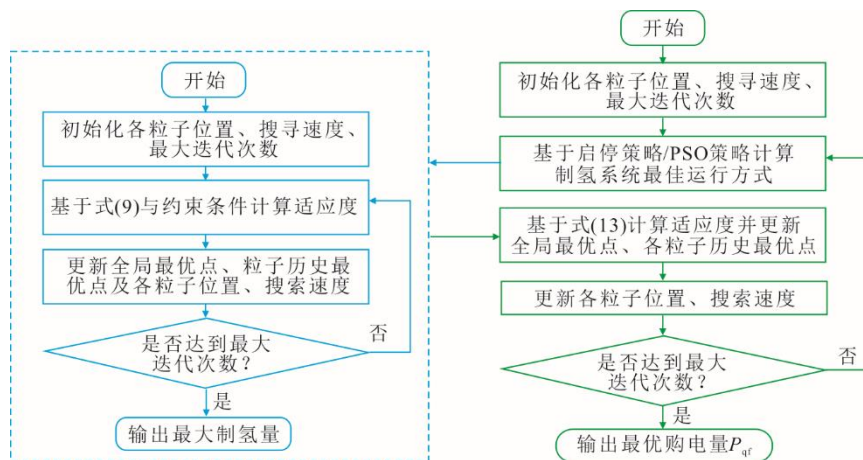


图 5 基于 PSO 的优化调度流程

Fig.5 PSO based optimal scheduling flow

4 算例分析

4.1 算例设置

选取新疆某地 1 天内实际负荷数据、新能源发电数据、火电发电数据为例, 3 种数据如图 6 所示。

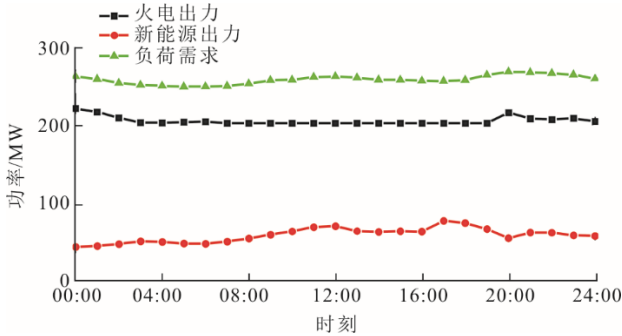


图 6 典型日负荷数据和发电数据

Fig.6 Load data and power generation data of typical day

为验证所提控制策略的优越性, 分别在电价固定、电价实时变化、售氢价格变化 3 种情况下进行典型日运行模拟。算例中售氢价格^[25]为 36 元/kg, 2 组对照实验售氢价格分别为 34、38 元/kg, 典型日的售电电价如图 7 所示。

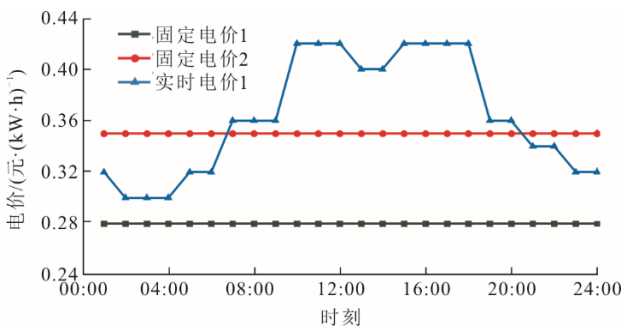


图 7 典型日的售电电价

Fig.7 Electricity selling price in typical days

4.2 实时电价结果分析

在实时电价下, 当售氢价格 c_h 为 36 元/kg 时, 2 种控制策略的制氢系统功率曲线如图 8 所示。在该场景下, 在弃电量较大时间段 (12:00—17:00), 制氢系统几乎满负荷工作, 尤其在 11:00—14:00。由图 3 的制氢量对比可知, 启停控制策略下, 制氢系统满负荷工作时其制氢效率最高, 因此启停控制策略在此时购电能够增加系统的总收益。而在其他弃电量较少的时段, 由于电价较高, 通过购电制氢并不会为系统带来正收益, 因此制氢系统处于关闭状态。对于 PSO 算法控制策略, 由图 4 可知, 制氢系统满负荷工作制氢效率并不是最高, 因此在电价

较高时仅利用弃电制氢, 在其他电价较低的时间段, 由于 PSO 算法控制策略在较低制氢功率时制氢效率更高, 因此通过购电制氢更符合经济性。

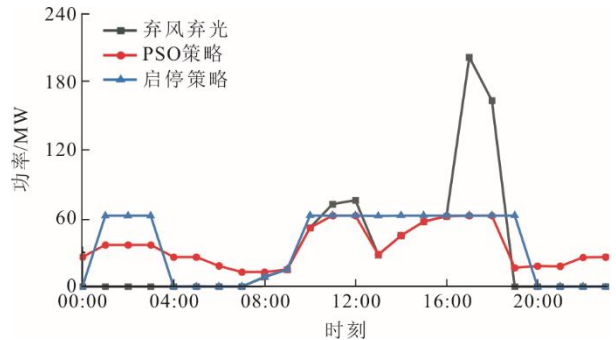


图 8 实时电价下制氢系统功率曲线

Fig.8 Power curve of hydrogen production system under real-time electricity price

实时电价下制氢系统经济性对比见表 2, 表 2 中 2 种控制策略的弃电量均为 262.90 MW·h。这是由于在 11:00—12:00、16:00—18:00 时段, 富裕的新能源发电功率大于制氢系统最大运行功率, 因此只能通过弃风弃光以维持系统稳定。

表 2 2 种控制策略下系统经济性对比

Tab.2 System economy comparison of two strategies

经济性指标	启停控制策略	PSO 控制策略
购电量/(MW·h)	302.16	313.12
购电费用/万元	10.10	9.99
制氢量/t	12.35	13.50
制氢系统成本/万元	18.53	20.25
售氢收益/万元	44.16	48.60
制氢系统利用率/%	54.2	100.0
制氢系统总用电量/(MW·h)	834.79	845.48
弃电量/(MW·h)	262.90	262.90

基于 PSO 的控制策略购电花费 9.99 万元, 售氢获得收益 48.60 万元, 系统操作成本 18.53 万元, 不考虑系统初始投资的情况下, 系统总收益为 18.36 万元。而传统的启停控制策略系统总收益为 15.53 万元, 即本文控制系统增加了 2.83 万元的收益。此外, PSO 控制策略下制氢系统的利用率为 100%, 而传统启停控制策略仅在 08:00—19:00、01:00—3:00 开启, 系统利用率为 54.2%, 且在某些工作状态下, 部分 PEMEC 还会处于未开启状态, 实际利用率会更低。

4.3 固定电价结果分析

当电价固定为 0.35、0.28 元/(kW·h), 售氢价格 c_h 为 36 元/kg 时, 2 种控制策略制氢系统功率曲线如

图9所示。对于 PSO 控制策略, 根据不同电价, 制氢系统会选择不同购电量以最大化系统效益(表3)。对于启停控制策略, 由图4可知, 当制氢系统满负荷工作时其制氢效率最高, 因此仅当电价低于一定阈值时, 制氢系统才会购电且满负荷工作。

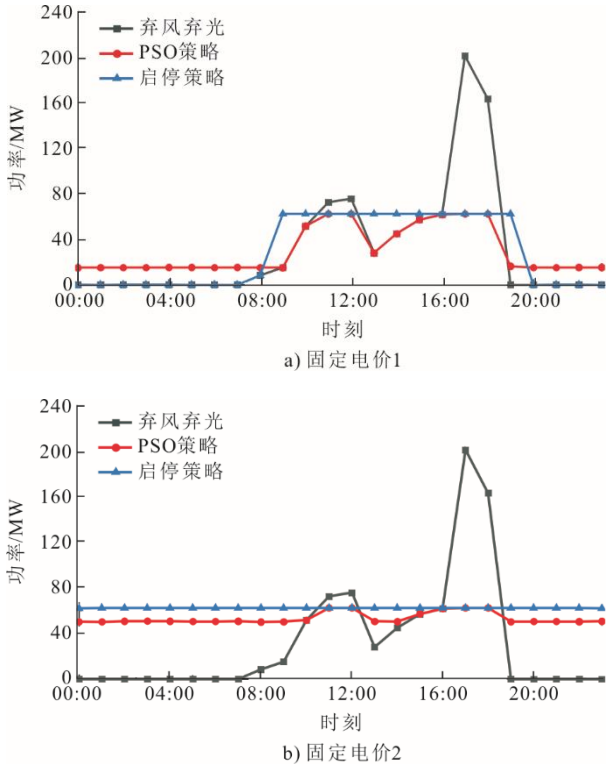


图9 固定电价下制氢系统功率曲线
Fig.9 Power curve of hydrogen production system under fixed electricity price

表3 不同电价下系统经济性比较
Tab.3 System economy comparison under different electricity prices

经济性指标	不同电价启停策略/ (元·(kW·h) ⁻¹)		不同电价 PSO 策略/ (元·(kW·h) ⁻¹)	
	0.28	0.35	0.28	0.35
购电量/(MW·h)	963.18	163.85	746.11	190.94
购电费用/万元	26.97	5.73	20.89	6.68
制氢量/t	22.49	10.38	19.75	11.60
制氢系统成本/万元	33.74	15.57	29.625	17.4
售氢收益/万元	80.96	37.38	71.09	41.77
制氢系统利用率/%	100	50	100	100
制氢系统总用电量/ (MW·h)	1 495.69	696.06	1 278.70	723.63
弃电量/(MW·h)	262.90	262.90	262.90	262.90

4.4 售氢价格对系统影响

在实时电价下, 当售氢价格 c_h 为 38、34 元/kg 时, 2 种控制策略的制氢系统功率曲线如图 10 所示。由图 10 可见, 由于启停控制策略下制氢效率在

满负荷工作时最高, 因此售氢价格较高且电价较低时, 制氢系统满负荷工作以最大化系统收益。而在售氢价格较低时购电制氢并不会为系统带来收益, 因此制氢系统仅在存在弃电时开启, 在其他时段系统关闭。对于 PSO 控制策略, 由于其制氢效率高于启停控制策略, 因此即使在售氢价格较低时仍可通过购电制氢为系统带来正收益。

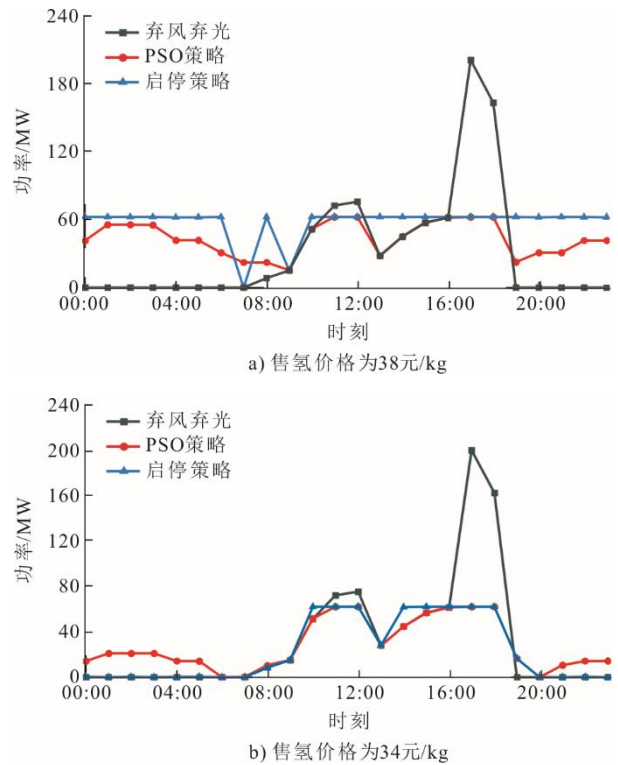


图10 不同售氢价格下制氢系统功率曲线
Fig.10 Power curve of hydrogen production system under different hydrogen selling prices

不同售氢价格下制氢系统经济性见表4。

表4 不同售氢价格制氢系统经济性
Tab.4 Comparison results of economies of different hydrogen selling price systems

经济性指标	不同氢价启停策略/ (元·(kW·h) ⁻¹)		不同氢价 PSO 策略/ (元·(kW·h) ⁻¹)	
	34	38	34	38
购电量/(MW·h)	35.93	854.31	139.86	509.71
购电费用/万元	1.50	28.36	4.37	16.34
制氢量/t	8.05	20.73	10.68	16.39
制氢系统成本/万元	12.08	31.10	16.02	24.59
售氢收益/万元	27.38	78.77	36.31	62.27
系统总收益/万元	13.80	19.31	15.92	21.34
制氢系统利用率/%	45.8	100.0	87.5	100.0
制氢系统总用电量/ (MW·h)	568.43	1 386.68	672.56	1 042.31
弃电量/(MW·h)	262.90	262.90	262.90	262.90

由表 4 可见, 同样不考虑系统初始投资, 当售氢价格为 34 元/kg 时, 启停控制策略下系统总收益为 13.80 万元, PSO 控制策略下系统总收益为 15.92 万元, 对比增加了 2.12 万元的收益。当售氢价格为 38 元/kg 时, 启停控制策略下系统总收益为 19.31 万元, PSO 控制策略下系统总收益为 21.34 万元, 对比增加了 2.03 万元收益, 可见本文 PSO 控制策略能够有效提升制氢系统利用率, 提高系统收益。

5 结 论

1) 本文提出基于 PSO 的制氢系统控制策略在制氢系统运行功率固定时, 相较于传统的启停控制策略制氢量更多, PEMEC 利用率更高。

2) 在实际工况下, 由于本文控制策略制氢效率更高, 因此在电价较低时会通过购电的方式制氢, 增加系统总收益, PEMEC 利用率更高。

3) 氢气价格与电价信息对本文控制策略影响较大, 当电价较低或氢气价格较高时, 本文控制策略在经济性方面更优, 启停控制策略在制氢量方面更优, 因此需根据具体需求做出决策。当电价较高或氢气价格较低时, 本文所提控制策略仍能通过购电制氢以增加系统收益, 提高制氢系统利用率。

【参 考 文 献】

- [1] 任大伟, 肖晋宇, 侯金鸣, 等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3831-3839.
REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.
- [2] 武昭原. 高比例新能源电力系统灵活运行的市场机制设计研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
WU Zhaoyuan. Research on market mechanism design for flexible operation of high proportion new energy power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [3] 马喜平, 贾嵘, 梁琛, 等. 高比例新能源接入下电力系统降损研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4305-4315.
MA Xiping, JIA Rong, LIANG Chen, et al. Review of researches on loss reduction in context of high penetration of renewable power generation[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4305-4315.
- [4] 魏繁荣, 随权, 林湘宁, 等. 考虑制氢设备效率特性的煤风氢能源网调度优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1428-1439.
WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Energy control scheduling optimization strategy for coal-wind-hydrogen energy grid under consideration of the efficiency features of hydrogen production equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1428-1439.
- [5] YU M, WANG K, VREDENBURG H. Insights into low-

- carbon hydrogen production methods: green, blue and aqua hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(41): 21261-21273.
- [6] KUMAR S S, HANKWON L. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production[J]. Energy Reports, 2022, 8(1): 13793-13813.
- [7] RAKOUSKY C, REIMER U, WIPPERMANN K, et al. Polymer electrolyte membrane water electrolysis: restraining degradation in the presence of fluctuating power[J]. Journal of Power Sources, 2017, 342(1): 38-47.
- [8] 万志. 新能源制氢系统运行控制策略研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021: 1.
WAN Zhi. Research on operation control strategy of new energy hydrogen production system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021: 1.
- [9] 袁铁江, 万志, 王进君, 等. 考虑电解槽启停特性的制氢系统日前出力计划[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 101-109.
YUAN Tiejia, WAN Zhi, WANG Jinjun, et al. The day-ahead output plan of hydrogen production system considering the start-stop characteristics of electrolytic cell[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 101-109.
- [10] 雷兆明, 杨佳祺, 董砚. 基于改进郊狼算法的新能源制氢能量优化调度[J]. 现代电力, 2022, 39(5): 514-520.
LEI Zhaoming, YANG Jiaqi, DONG Yan. Energy optimal scheduling of new energy hydrogen production based on improved coyote algorithm[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(5): 514-520.
- [11] 杜晔. 独立微电网制氢系统优化调度的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019: 1.
DU Ye. Research on optimal scheduling of hydrogen production system in independent micro grid[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019: 1.
- [12] XIAO P F, HU W H, XU X, et al. Optimal operation of a wind-electrolytic hydrogen storage system in the electricity/hydrogen markets[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(46): 24412-24423.
- [13] KUDRIA S, IVANCHENKO I, TUCHYNSKYI B, et al. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(1): 157-168.
- [14] SHAIKH P W, ELABD M, KHANAFER M, et al. A review on swarm intelligence and evolutionary algorithms for solving the traffic signal control problem[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(1): 48-63.
- [15] MAROUFMASHAT A, SAYEDIN F, KHAVAS S S. An imperialist competitive algorithm approach for multi-objective optimization of direct coupling photovoltaic-electrolyzer systems[J]. Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(33): 18743-18757.
- [16] 戴凡博. PEM 电解水制氢催化剂及直接耦合光伏发电系统建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020: 1.
DAI Fanbo. Research on PEM water electrolysis hydrogen production catalyst and modeling of direct coupled photovoltaic power generation system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 1.
- [17] 李军舟, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 具有动态调节特性的光伏制氢双阵列直接耦合系统优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1712-1721.
LI Junzhou, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. Optimization strategy of photovoltaic hydrogen production dual array direct coupling system with

- dynamic regulation characteristics[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1712-1721.
- [18] 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): 2187-2201.
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): 2187-2201.
- [19] HONG Z P, WEI Z X, HAN X J. Optimization scheduling control strategy of wind-hydrogen system considering hydrogen production efficiency[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 47(8): 13793-13813.
- [20] 马晓锋, 张舒涵, 何勇, 等. PEM 电解水制氢技术的研究现状与应用展望[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 420-427.
MA Xiaofeng, ZHANG Shuhan, HE Yong, et al. Research status and application prospect of PEM electrolysis water technology for hydrogen[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2022, 43(6): 420-427.
- [21] 张翔. 质子交换膜电解池 (PEMEC) 热力学模型构建及系统性能分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 5.
ZHANG Xiang. Thermodynamic model construction and system performance analysis of proton exchange membrane electrolytic cell (PEMEC)[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 5.
- [22] GARCIATORRES F, BORDONS C. Optimal economical schedule of hydrogen-based microgrids with hybrid storage using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5195-5207.
- [23] CAI X, LIN R, XU J, et al. Construction and analysis of photovoltaic directly coupled conditions in PEM electrolyzer[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(10): 6494-6507.
- [24] 据上纯. 考虑电制氢多模式利用的综合能源系统优化调度[D]. 南宁: 广西大学, 2022: 5.
JU Shangchun. Optimal scheduling of integrated energy systems considering multimodal utilization of electricity for hydrogen production[D]. Nanning: Guangxi University, 2022: 5.
- [25] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 等. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 10-17.

(责任编辑 杜亚勤)