

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.05.005

# 计及海水淡化制氢的微电网混合储能优化规划

Optimal planning of hybrid energy storage systems in microgrids considering seawater desalination and hydrogen production

杜欣烨, 王建喜, 孙永辉, 何逸, 吴鹏鹏, 周伟

DU Xinye, WANG Jianxi, SUN Yonghui, HE Yi, WU Pengpeng, ZHOU Wei

(河海大学 能源与电气学院, 南京 210098)

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**摘要:**电氢混合储能系统优化规划是解决沿海地区大规模海上风电并网消纳问题的有效途径。综合考虑海上风电优先就地消纳及氢能绿色制取与高效利用,构建含海上风电微电网内电氢混合储能系统的运行模型及全生命周期成本(LCC)模型,提出一种以经济最优为目标函数,计及海水淡化制氢的微电网电氢混合储能系统双层规划模型,应用于含海上风电微电网的容量配置和运行调度优化问题,并分别采用 CPLEX 求解器和改进粒子群优化算法(PSO)对内、外层模型进行求解。最后,以某地区海上风电场为例进行仿真计算,结果表明,含海上风电微电网经电氢混合储能系统优化规划后总成本降低 19.5%,同时海上风电场弃风率减少 9.3%,验证了所提模型的有效性与可行性。

**关键词:**海上风电;海水淡化;电氢混合储能系统;双层规划;改进粒子群优化算法;混合储能系统;制氢;微电网

**中图分类号:**TK 91:TM 732

**文献标志码:**A

**文章编号:**2097-0706(2022)05-0049-07

**Abstract:** Making optimal planning for electricity-hydrogen hybrid energy storage systems is an effective way to solve the problem of large-scale offshore wind power consumption in coastal areas. Local consumption and hydrogen's green production and efficient application are given priority in offshore wind power utilization, and an operation model and a life cycle cost(LCC) model for a hybrid energy storage system in an offshore wind power-connected microgrid are constructed. Then, a bi-level planning model for the hybrid energy storage system considering seawater desalination and hydrogen production is proposed. The model taking economic optimization as its objective function can solve the capacity allocation and scheduling optimization of the offshore wind power-connected microgrid. And CPLEX solver and improved particle swarm optimization(PSO) are used to solve the inner and outer models respectively. Finally, a simulation is carried out on an offshore wind farm, and the results show that the total cost of the offshore wind power-connected microgrid has dropped by 19.5% and the wind power curtailment ratio of the offshore wind farm has reduced by 9.3% after the optimal planning for the hybrid energy storage system. The simulation prove the validity and feasibility of the proposed model.

**Keywords:** offshore wind power; seawater desalination; hybrid electric-hydrogen energy storage system; bi-level programming; improved particle swarm algorithm; hybrid energy storage system; hydrogen production; microgrid

## 0 引言

我国海上风电资源丰富,同时具有运行效率高、输电距离短、就地消纳方便、适宜大规模开发等特点,海上风电将成为我国大力发展可再生能源的必然选择<sup>[1-2]</sup>。然而海上风电的反调峰、不可控等不利特性使得大规模海上风电集群并网对电力网络产生不可忽视的负面影响。

通过配置混合储能系统改善新能源出力的波

动性及间歇性成为解决这一问题的重要技术路线,已有学者针对混合储能系统进行了诸多研究<sup>[3-6]</sup>。文献[7]研究分析了不同类型储能的特点及储能系统用于提升电网稳态和动态电能质量技术的研究现状及发展趋势,并提出了一种新型串并联并网结构的混合储能系统。文献[8-9]提出利用包括电解槽、燃料电池及储氢罐等元件的氢储能系统与蓄电池共同构成的电氢混合储能系统实现新能源微电网的经济稳定运行,并建立微电网的容量优化配置模型。文献[10]提出了一种由全钒液流电池和先进绝热压缩空气储能组成的混合储能系统,并建立

收稿日期:2021-11-18;修回日期:2022-04-07

基金项目:国家自然科学基金项目(62073121)

了考虑大规模风电接入的混合储能系统双层容量优化配置模型。上述文献就新能源微电网中混合储能系统的模型建立及容量配置方法进行了研究,然而针对以海上风电为主要电源的微电网中混合储能系统的优化规划则较少提及,储能系统的类型选择、容量配置以及如何进一步实现其运行优化调度已成为含海上风电微电网规划领域亟待解决的关键问题之一。

氢能具有清洁、高效、能量密度高、便于运输与存储等优势,发展氢能是我国能源转型的重要路径。海水制氢技术能够缓解因大量消耗淡水所引起的资源分配问题,得到了国内外学者的广泛关注和深入研究。目前海水直接电解制氢技术仍处于研究阶段,催化剂的选择成为亟待突破的关键核心技术<sup>[11-13]</sup>,相比而言,海水淡化制氢技术更加成熟,在可靠性、经济性方面也更具优势。文献[14]提出将热脱盐技术与电力和氢气生产相结合,建立了多级闪蒸脱盐、太阳能制氢的协同运行模型,算例分析表明该模型能够在太阳能丰富而淡水资源匮乏的地区实现淡水和电力的连续供应。文献[15]研究分析了铜-氯循环与用于制氢的核能海水淡化装置的耦合系统,并针对各种配置方案对该耦合系统进行了热力学分析及参数研究。此外,文献[16]分析了海水淡化产生的副产品浓盐水资源化利用的可行性,提出了海洋能电解浓盐水制氢技术。可以发现,现有研究从海水淡化制氢系统参数、运行机制等方面展开,然而如何将海水淡化制氢技术应用于含海上风电微网有待进一步研究。海上风电与海水淡化制氢联合优化运行的实现对合理高效利用海水资源、提升微网系统运行经济性以及提高新能源消纳能力意义重大。

为实现削峰填谷,提升海上风电利用率,本文综合考虑海上风电优先就地消纳及氢能绿色制取与高效利用,将海水淡化制氢技术应用于含海上风电微网,提出针对以海上风电为主要电源的微电网中混合储能系统的优化规划方法。

首先,建立了含海上风电微电网内电氢混合储能系统的运行模型及全寿命周期成本(LCC)模型。然后,提出一种以经济最优为目标,计及海水淡化制氢的微电网电氢混合储能系统双层规划模型,并分别采用 CPLEX 求解器和改进粒子群优化算法(PSO)对内、外层模型进行求解,生成成本最优的电氢混合储能系统容量配置方案及微网运行控制策略。最后,以某地区海上风电场为例,验证所提模型的有效性与其可行性。

## 1 微电网系统结构及运行模型

### 1.1 微电网系统结构

海水淡化制氢的主要步骤包括利用海水淡化系统使海水脱盐,以及通过电解槽将产生的淡水分解为氢气和氧气。海水淡化制氢的微电网系统结构如图1所示,其中分布式电源为海上风力发电,混合储能系统包括以蓄电池为主的电储能系统和以燃料电池、电解槽、储氢罐为主的氢储能系统。海水淡化系统、电解槽,储氢罐等设备均可配置于经改造的海上油气平台<sup>[17-18]</sup>。

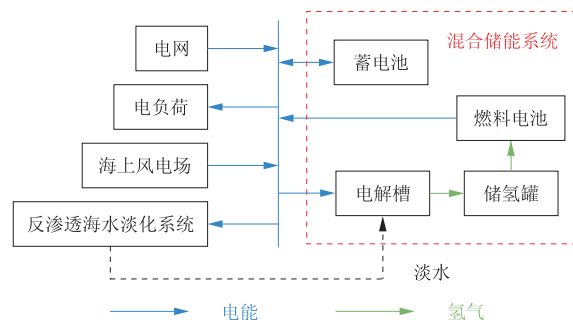


图1 微电网系统结构

Fig. 1 Microgrid structure

### 1.2 微电网运行模型

#### 1.2.1 海水淡化系统

海水淡化技术依据机理可分为2种:热法(蒸馏法)和膜法,其中膜法主要包括反渗透和电渗析技术。反渗透作为目前应用最广泛的海水淡化技术,同时具有建设成本和能耗低、占地面积小等优势,采用反渗透方式进行海水淡化的电力消耗可表示为

$$P_{de}(t) = \alpha P_{el}(t), \quad (1)$$

式中: $P_{de}(t)$ 为时段 $t$ 反渗透海水淡化系统的耗电功率; $P_{el}(t)$ 为时段 $t$ 电解槽的耗电功率; $\alpha$ 为反渗透海水淡化系统的电力消耗与电解水所需电量的比值。

#### 1.2.2 氢储能系统

##### 1.2.2.1 电解槽

电解水技术中,碱水电解槽具有成本低、可靠性高等优点,较需要使用贵金属催化剂以及超高纯水进料的质子交换膜电解槽更加适用于海水制氢,电解槽输出功率可表示为

$$P_{el,H_2}(t) = \eta_{el} P_{el}(t), \quad (2)$$

式中: $P_{el,H_2}(t)$ 为时段 $t$ 电解槽的制氢功率; $\eta_{el}$ 为电解槽的制氢效率。

##### 1.2.2.2 储氢罐

储气罐储氢因具备成本低、技术成熟、运输方便等优势成为目前应用最广泛的储氢方式,储氢罐

可储存电解水产生的氢气,并为燃料电池提供氢气,从而提高系统的灵活性,其储能数学模型可表示为

$$E_{H_2}(t) = E_{H_2}(t-1) + \left( \eta_{cha, H_2} P_{el, H_2}(t) - \frac{P_{fc, H_2}(t)}{\eta_{dis, H_2}} \right) \Delta t, \quad (3)$$

式中:  $E_{H_2}(t)$  为时段  $t$  储氢罐的存储能量;  $P_{fc, H_2}(t)$  为时段  $t$  燃料电池的耗氢功率;  $\eta_{cha, H_2}$ 、 $\eta_{dis, H_2}$  分别为氢气充入和放出的效率;  $\Delta t$  为调度时间间隔,步长为 1 h。

### 1.2.2.3 燃料电池

燃料电池可将清洁能源氢气转化为电能,其数学模型可表示为

$$P_{fc}(t) = \eta_{fc} P_{fc, H_2}(t), \quad (4)$$

式中:  $P_{fc}(t)$  为时段  $t$  燃料电池的发电功率;  $\eta_{fc}$  为燃料电池的氢发电效率。

### 1.2.3 电池储能

蓄电池可有效平抑微电网内负荷需求突变引起的波动,其数学模型为

$$E_{bat}(t) = E_{bat}(t-1)(1-\delta) + \left[ P_{cha, bat}(t) \eta_{cha, bat} - \frac{P_{dis, bat}(t)}{\eta_{dis, bat}} \right] \Delta t, \quad (5)$$

式中:  $P_{cha, bat}(t)$ 、 $P_{dis, bat}(t)$  为时段  $t$  蓄电池的充、放电功率;  $\eta_{cha, bat}$ 、 $\eta_{dis, bat}$  为蓄电池充、放电效率;  $E_{bat}(t)$  为时段  $t$  蓄电池的存储能量;  $\delta$  为蓄电池自放电损耗率。

## 2 电氢混合储能系统双层规划模型

本文采用双层规划模型对含海上风电微电网的容量配置和运行调度进行优化。其模型结构如图2所示。首先,外层模型将电氢混合储能系统的容量配置方案传递给内层模型,内层模型根据外层模型传递的系统容量优化运行控制策略,生成成本最优的运行调度方案,并将最小成本结果返回给外层模型;然后,外层模型根据返回结果优化容量配置;最后,通过模型内、外层优化迭代,求解成本最优的混合储能系统的最优容量配置及微网运行调度方案。

### 2.1 外层容量配置模型

本文从实现经济性最优的角度进行微网系统协调规划,以包含混合储能系统 LCC  $C_{cm}$ 、电网购电费用  $C_{pur}$  及弃风惩罚成本  $C_{cur}$  在内的系统总成本最小为目标函数,其数学模型为

$$\min C_{out} = C_{cm} + C_{pur} + C_{cur} \quad (6)$$

混合储能系统 LCC 包括设备投资建设成本及运行维护成本,并通过折现率分摊到计划寿命周期中的每一个调度周期内,文中以 1 d 为 1 个调度周

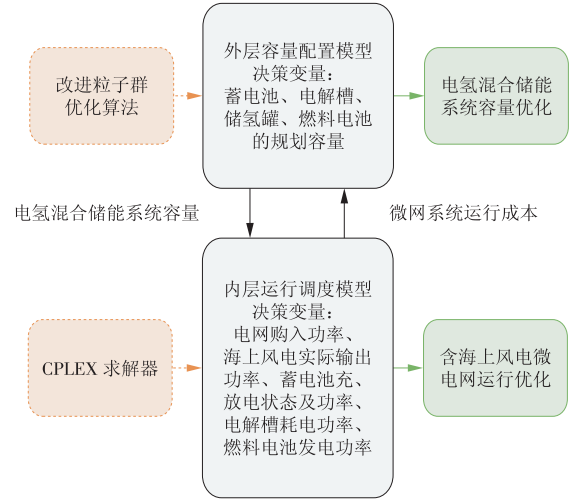


图2 双层规划模型结构

Fig. 2 Structure of the bi-level planning model

期,其数学模型可描述为

$$C_{cm} = \sum_{\varphi} p_{\varphi} W_{\varphi} \frac{\lambda(1+\lambda)^{l_{\varphi}}}{365[(1+\lambda)^{l_{\varphi}} - 1]} (1 + \beta_{\varphi}), \quad (7)$$

式中:  $W_{\varphi}$ 、 $p_{\varphi}$  分别为电氢混合储能系统内第  $\varphi$  类设备的规划容量和单位容量建设成本,具体包括蓄电池、电解槽、储氢罐及燃料电池;  $\beta_{\varphi}$  为第  $\varphi$  类设备运维成本占建设成本比例;  $l_{\varphi}$  为第  $\varphi$  类设备的计划寿命周期;  $a$ ;  $\lambda$  为折现率。

外层容量配置模型考虑电氢混合储能系统内设备容量约束,其数学模型可描述为

$$W_{\varphi, \min} \leq W_{\varphi} \leq W_{\varphi, \max}, \quad (8)$$

式中:  $W_{\varphi, \max}$ 、 $W_{\varphi, \min}$  分别为电氢混合储能系统内第  $\varphi$  类设备规划容量的上、下限。

### 2.2 内层运行调度模型

#### 2.2.1 目标函数

为促进微网经济运行以及最大化消纳海上风电,内层运行调度模型的目标函数考虑电网购电费用及弃风惩罚成本,以调度周期内成本之和最小为目标,其数学模型可描述为

$$\min C_{inn} = C_{pur} + C_{cur}, \quad (9)$$

$$C_{pur} = \sum_{t=1}^T p_{net}(t) P_{pur}(t), \quad (10)$$

$$C_{cur} = C_{wind} \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_w} [P_{wf, w}(t) - P_{wind, w}(t)], \quad (11)$$

式中:  $p_{net}(t)$  为时段  $t$  从电网购电的价格;  $P_{pur}(t)$  为时段  $t$  从电网购入的功率;  $C_{wind}$  为单位弃风电价;  $P_{wf, w}$  为时段  $t$  海上风电机组  $w$  的预测输出功率;  $P_{wind, w}(t)$  为时段  $t$  海上风电机组  $w$  的实际输出功率;  $N_w$  为海上风电机组数;  $T$  为 1 个调度周期的时段数。

#### 2.2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束为

$$\sum_{w=1}^{N_w} P_{wind,w}(t) + P_{pur}(t) + P_{dis,bat}(t) + P_{fc}(t) = P_{load}(t) + P_{cha,bat}(t) + P_{el}(t) + P_{de}(t), \quad (12)$$

式中:  $P_{load}(t)$  为时段  $t$  的电负荷总和。

(2) 氢储能系统运行约束。

电解槽利用电能电解水制氢, 并将氢气储存在储氢罐中, 因此时段  $t$  电解槽的耗电功率上限受其容量及时段  $t$  储氢罐剩余储能容量的约束, 可表示为

$$P_{el}(t) \leq \min \left\{ \frac{W_{el}}{\Delta t}, \frac{E_{H_2, \max} - E_{H_2}(t)}{\Delta t \eta_{el} \eta_{cha, H_2}} \right\}, \quad (13)$$

式中:  $W_{el}$  为电解槽的容量;  $E_{H_2, \max}$  为储氢罐存储能量的上限。

储氢罐需满足储能容量约束及始末状态一致约束, 可表示为

$$E_{H_2, \min} \leq E_{H_2}(t) \leq E_{H_2, \max}, \quad (14)$$

$$E_{H_2}(0) = E_{H_2}(T), \quad (15)$$

式中:  $E_{H_2, \min}$  为储氢罐存储能量的下限。

燃料电池以储氢罐中的氢气为燃料进行发电, 因此, 时段  $t$  燃料电池的输出功率受其容量及时段  $t$  储氢罐剩余储能容量的约束, 可表示为

$$P_{fc}(t) \leq \min \left\{ \frac{W_{fc}}{\Delta t}, \frac{E_{H_2}(t) - E_{H_2, \min}}{\Delta t} \eta_{fc} \eta_{dis, H_2} \right\}, \quad (16)$$

式中:  $W_{fc}$  为燃料电池的容量。

(3) 蓄电池运行约束。

蓄电池需满足储能容量约束、始末状态一致约束及充放电功率约束, 可表示为

$$E_{bat, \min} \leq E_{bat}(t) \leq E_{bat, \max}, \quad (17)$$

$$E_{bat}(0) = E_{bat}(T), \quad (18)$$

$$P_{cb, \min} \leq P_{cha, bat}(t) \leq P_{cb, \max}, \quad (19)$$

$$P_{db, \min} \leq P_{dis, bat}(t) \leq P_{db, \max}, \quad (20)$$

$$B_{cha, bat}(t) + B_{dis, bat}(t) \leq 1, \quad (21)$$

式中:  $E_{bat, \max}$ ,  $E_{bat, \min}$  分别为蓄电池存储能量的上、下限;  $P_{cb, \min}$ ,  $P_{cb, \max}$  分别为蓄电池最小、最大充电功率;  $P_{db, \min}$ ,  $P_{db, \max}$  分别为蓄电池最小、最大放电功率;  $B_{cha, bat}(t)$ ,  $B_{dis, bat}(t)$  为状态变量, 分别表示时段  $t$  蓄电池充电、放电状态。式(21)保证蓄电池不能同时工作在充电和放电状态。

(4) 电网购电约束为

$$0 \leq P_{pur}(t) \leq P_{pur, \max}, \quad (22)$$

式中:  $P_{pur, \max}$  为联络线的最大传输功率。

## 2.3 模型求解

上述模型属于混合整数线性双层规划模型, 本文采用改进 PSO 迭代寻优求解外层模型, 得到经济

最优的混合储能容量配置方案。PSO 中粒子迭代更新速度和位置公式为<sup>[19]</sup>

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_d^k - x_{id}^k), \quad (23)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^k, \quad (24)$$

式中:  $v_{id}^k$ ,  $x_{id}^k$  分别为第  $i$  个粒子第  $d$  维第  $k$  次迭代的速度和位置;  $\omega$  为惯性权重;  $c_1, c_2$  分别为每个粒子的个体学习因子和社会学习因子;  $r_1, r_2$  为介于 (0, 1) 之间的随机数;  $p_{id}^k$  为第  $k$  次迭代中第  $i$  个粒子在第  $d$  维的个体极值点的位置;  $g_d^k$  为第  $k$  次迭代中粒子群在第  $d$  维的全局极值点的位置。

上述 PSO 中的惯性权重  $\omega$  为非负定值, 表示粒子维持上一次迭代速度的能力。当  $\omega$  较大, 全局寻优能力强, 局部寻优能力弱; 当  $\omega$  较小, 全局寻优能力弱, 局部寻优能力强。通过调整  $\omega$  可对全局和局部寻优性能进行调整。本文采用线性递减权重策略改进下的 PSO 求解双层规划模型的外层容量配置模型, 改进的 PSO 能够在迭代前期提高算法全局搜索能力, 在后期针对局部增加收敛精度, 利用动态权重提高算法全局和局部搜索能力, 兼顾算法搜索速度与收敛精度。线性递减惯性权重为

$$\omega^{k+1} = \omega_{\max} - k(\omega_{\max} - \omega_{\min}) / (M - 1), \quad (25)$$

式中:  $\omega_{\max}$ ,  $\omega_{\min}$  分别为惯性权重的最大、最小值;  $M$  为最大迭代次数。

电氢混合储能系统双层规划模型内层为混合整数线性规划问题, 基于外层模型传递的储能容量调用 CPLEX 求解器进行求解, 得到含海上风电微电网的最优运行控制策略。微电网电氢混合储能系统双层规划流程如图 3 所示。

## 3 算例分析

### 3.1 场景设置

以某地区海上风电场为例, 含海上风电微电网内配置海水淡化系统及电氢混合储能系统, 并对混合储能系统的容量和微网的运行控制策略进行优化。典型日的负荷及海上风电场预测出力曲线如图 4 所示。

海水淡化制氢实际运行过程中, 反渗透海水淡化系统的电力消耗与电解水所需电量的比值取 0.07%, 联络线最大传输功率取 400 MW, 单位购电电价、单位弃风电价分别取 0.070, 0.007 万元/MW, 折现率取 6.7%, 蓄电池、电解槽、储氢罐、燃料电池的建设成本、运维成本占建设成本比例及计划寿命周期见表 1。设置 2 种场景进行对比分析: 场景 1 不考虑氢储能系统, 仅考虑以蓄电池为主的电储能系统; 场景 2 考虑电氢混合储能系统。

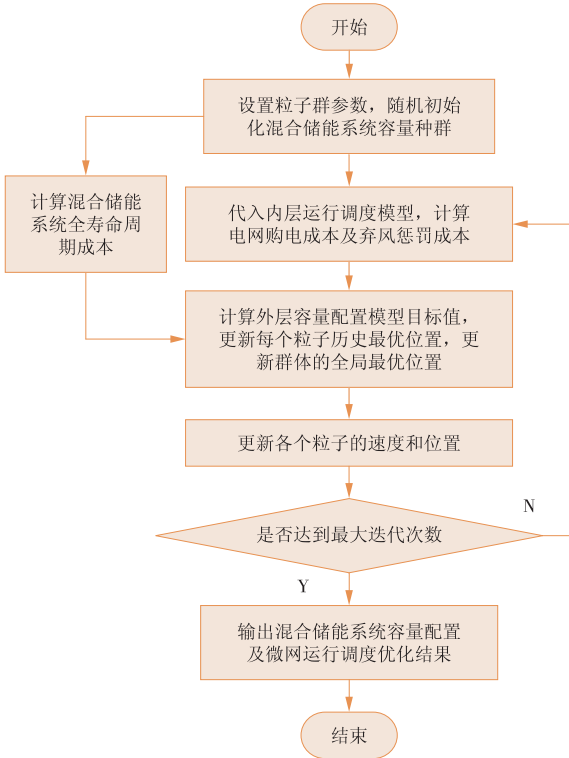


图 3 混合储能系统双层规划流程

Fig. 3 Flow chart of the bi-level programming for the hybrid energy storage system

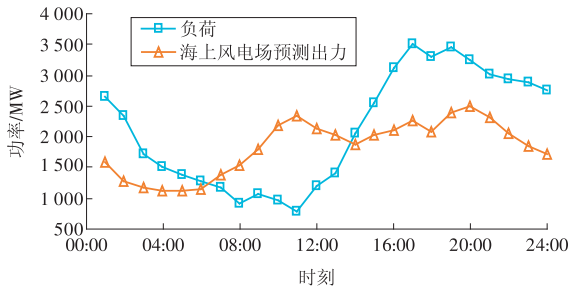


图 4 负荷及海上风电场预测出力曲线

Fig. 4 Load and output power forecasting of the offshore wind farm

表 1 各设备参数

| Table 1 Parameters of appliances |                                 |          |          |
|----------------------------------|---------------------------------|----------|----------|
| 名称                               | 建设成本/<br>(万元·MW <sup>-1</sup> ) | 运维成本比例/% | 计划寿命周期/a |
| 蓄电池                              | 64                              | 40       | 1.36     |
| 电解槽                              | 221                             | 40       | 15.00    |
| 储氢罐                              | 45                              | 10       | 25.00    |
| 燃料电池                             | 300                             | 10       | 5.78     |

3.2 仿真结果与分析

根据本文所提双层规划模型,针对场景 1 分别采用传统 PSO、改进 PSO 求解外层容量配置模型,设置粒子群数量为 50,迭代次数为 50,PSO 惯性权重  $\omega$  分别取 0.4、0.6、0.8,改进 PSO 最大、最小权重因子分别取 0.8、0.4,得到微电网优化规划总成本收敛曲线如图 5 所示。

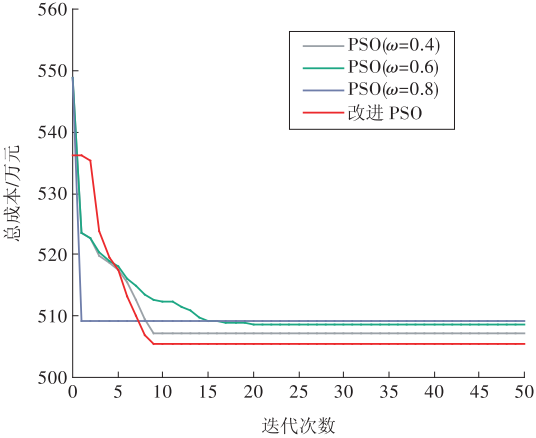


图 5 不同算法下规划总成本对比

Fig. 5 Total planning cost of different algorithm

改进 PSO 算法的迭代次数约为 9 次,收敛速度较快,且求解得的微电网规划方案的总成本最低。可以看出,采用线性递减权值策略对 PSO 的惯性权重进行动态调整可提升算法全局和局部搜索能力,验证了采用改进 PSO 算法求解双层规划模型中外层容量配置模型的有效性和优越性。

采用改进 PSO 和 CPLEX 求解器求解双层规划模型,得到 2 个场景下的最优储能容量配置结果见表 2,优化结果见表 3。

表 2 不同场景下容量优化配置结果

| 场景 | 容量/MW   |       |       |       |
|----|---------|-------|-------|-------|
|    | 蓄电池     | 电解槽   | 储氢罐   | 燃料电池  |
| 1  | 2 859.7 | —     | —     | —     |
| 2  | 1 791.3 | 371.9 | 200.0 | 428.3 |

表 3 不同场景下优化结果对比

| Table 3 Comparison of optimization results under different scenarios |            |            |             |             |       |
|----------------------------------------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|-------|
| 场景                                                                   | 总成本/<br>万元 | LCC/<br>万元 | 购电费用/<br>万元 | 弃风成本/<br>万元 | 弃风率/% |
| 1                                                                    | 627.5      | 557.1      | 33.6        | 36.8        | 10.3  |
| 2                                                                    | 505.4      | 468.2      | 33.5        | 3.8         | 1.0   |

结合表 2、表 3 可知,场景 2 较场景 1 增加了氢储能系统后电网购电费用基本相同,海上风电场弃风率从场景 1 的 10.3% 减少到场景 2 的 1.0%,对应的弃风惩罚成本大幅下降,此外储能系统 LCC 降低 88.9 万元,总成本由场景 1 的 627.5 万元减少至场景 2 的 505.4 万元,下降了 19.5%,说明氢储能系统能提高含海上风电微电网的经济性,并大幅提升海上风电消纳能力。

场景 1 下含海上风电微电网的运行调度优化结果如图 6 所示。

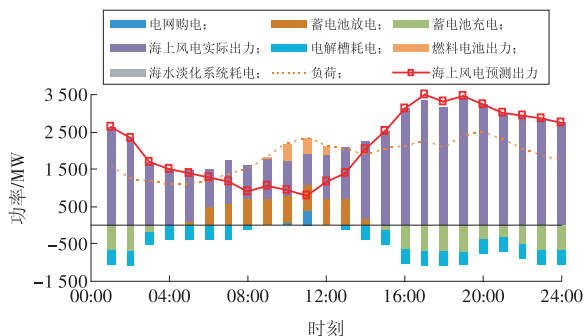


图 6 情景 1 下微电网运行调度优化结果

Fig. 6 Microgrid operation scheduling optimization results under scenario 1

海上风电作为微电网主要电源在所有电源中占主导出力,氢储能系统的充、放电优先级最高,蓄电池次之。结合图 4、图 6 可知,当海上风电场风电功率值大于负荷时,首先利用海水淡化系统和电解槽进行海水淡化制氢,并将氢气存储在储氢罐中,其次进行蓄电池充电,将多余电能转变为负荷需求量大时的高价值电能。海上风电场预测出力在时段 05:00—14:00 相对负荷具有明显反调峰特性,负荷需求较大而海上风电供不应求,此时蓄电池优先放电进行电力供应。当时段 9 蓄电池供应不足时,燃料电池以储氢罐中存储的氢气为燃料进行发电从而满足负荷需求,而当时段 11:00—12:00 上述设备所供能量仍不足以满足负荷缺额功率时,则从电网购电以满足微电网的负荷需求。由运行调度优化结果可知,本文所提模型能够为含海上风电的微电网提供有效运行控制策略,实现了微电网的灵活安全运行,有效解决了电网高峰、低谷之间的供需矛盾。

#### 4 结论

本文综合考虑海上风电优先就地消纳及氢能绿色制取与高效利用,研究了含海上风电微电网内电氢混合储能系统的运行模型及经济模型,提出了一种计及海水淡化制氢的微电网电氢混合储能系统双层规划模型,以经济最优为目标对含海上风电的微电网进行了容量配置及运行调度优化。

以某地区海上风电场为例进行分析,结果表明,在含海上风电的微电网中,较单一电储能系统,配置电氢混合储能系统后储能系统 LCC 降低 88.9 万元,总成本减少 19.5%,同时海上风电场弃风率从 10.3% 减少到 1.0%。

由此可见,所提模型在满足含海上风电微电网安全稳定运行的前提下,经济效益和风电利用率具有明显优势。

#### 参考文献:

- [1] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149–159.  
LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, et al. Offshore wind power supports China's energy transition[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149–159.
- [2] 王峰, 芮守娟, 王小合, 等. 66 kV 海上风电交流集电方案的研究与发展前景[J]. 华电技术, 2020, 42(5): 61–65.  
WANG Feng, RUI Shoujuan, WANG Xiaohe, et al. Research and prospects of 66 kV offshore wind power AC collection scheme[J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 61–65.
- [3] SANTOS Y A, NUNES M, LEMES L, et al. Evaluation of hybrid energy storage systems using wavelet and stretched-thread methods[J]. IEEE Access, 2020, 8: 171882–171891.
- [4] 王晗雯, 鲁胜, 周照宇. 光伏-混合储能微电网协调控制及经济性分析[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 31–36.  
WANG Hanwen, LU Sheng, ZHOU Zhaoyu. Coordinated control and economic analysis on a PV-hybrid energy storage micro-grid system[J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 31–36.
- [5] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177–187.  
ZHANG Yuhuan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177–187.
- [6] 李军徽, 付英男, 李翠萍, 等. 提升风电消纳的储热电混合储能系统经济优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4547–4557.  
LI Junhui, FU Yingnan, LI Cuiping, et al. Economic optimal configuration of hybrid energy storage system for improving wind power consumption[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4547–4557.
- [7] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15–24.  
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15–24.
- [8] 李彦哲, 郭小嘉, 董海鹰, 等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 123–128.  
LI Yanzhe, GUO Xiaojia, DONG Haiying, et al. Optimal capacity configuration of wind/PV/storage hybrid energy storage system in microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 123–128.
- [9] 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.
- LI Qi, ZHAO Shudan, PU Yuchen, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage microgrid considering electricity-hydrogen coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 486-495.
- [10] 齐晓光, 姚福星, 朱天瞳, 等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 11-19.
- QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 11-19.
- [11] PARK Y S, LEE J, JANG M J, et al. High-performance anion exchange membrane alkaline seawater electrolysis [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(15): 9586-9592.
- [12] YU L, ZHU Q, SONG S W, et al. Non-noble metal-nitride based electrocatalysts for high-performance alkaline seawater electrolysis [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1-10.
- [13] WANG C Z, ZHU M Z, CAO Z Y, et al. Heterogeneous bimetallic sulfides based seawater electrolysis towards stable industrial-level large current density [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 291(15): 1-9.
- [14] GENCER E, AGRAWAL R. Toward supplying food, energy, and water demand: Integrated solar desalination process synthesis with power and hydrogen coproduction [J]. Resources Conservation & Recycling, 2018, 133: 331-342.
- [15] ORHAN M F, DINCER I, NATERER G F, et al. Coupling of copper-chloride hybrid thermochemical water splitting cycle with a desalination plant for hydrogen production from nuclear energy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(4): 1560-1574.
- [16] 李伟, 杨易嘉, 顾亚京, 等. 基于海洋能的海水资源综合利用研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 33-38.
- LI Wei, YANG Yijia, GU Yajing, et al. Comprehensive utilization of seawater resources based on ocean energy [J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 33-38.
- [17] CRIVELLARI A, COZZANI V. Offshore renewable energy exploitation strategies in remote areas by power-to-gas and power-to-liquid conversion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(4): 2936-2953.
- [18] 徐世华, 刘萍, 邱睿, 等. 海上微型综合能源系统能效评价与提升关键问题研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 21-27.
- XU Shihua, LIU Ping, QIU Rui, et al. Research on the key issues in energy efficiency evaluation and improvement of offshore micro-integrated energy systems [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 21-27.
- [19] 赵鑫, 郑文禹, 侯智华, 等. 基于粒子群优化算法的多能互补系统经济调度研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 14-20.
- ZHAO Xin, ZHENG Wenyu, HOU Zhihua, et al. Research on economic dispatch of multi-energy complementary system based on particle swarm optimization [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 14-20.
- (本文责编: 张帆)

#### 作者简介:

杜欣烨(1998), 女, 在读硕士研究生, 从事综合能源系统建模与优化方面的研究, duxinye1018@163.com;

王建喜(1989), 男, 在读博士研究生, 从事综合能源系统建模与优化方面的研究, j.x.wang2022@gmail.com;

孙永辉(1980), 男, 教授, 博士, 从事电网规划与运行优化、综合能源系统建模与优化的研究, sunyonghui168@gmail.com;

何逸(1999), 女, 在读硕士研究生, 从事综合能源系统建模与优化方面的研究, 2209762542@qq.com;

吴鹏鹏(1993), 女, 在读博士研究生, 从事综合能源系统建模与优化方面的研究, 210206030011@hhu.edu.cn;

周伟(1997), 男, 在读硕士研究生, 从事综合能源系统建模与优化方面的研究, 2926547720@qq.com。