

面向海上可再生能源的水下压缩空气储能深度配置策略

王子晨^{1*}, 张成旭², 周镇江¹

(1.青海大学, 青海省西宁市, 810016;

2.上海电力大学, 上海市, 201306; * 通讯作者, 1695297291@qq.com)

摘 要: 针对海上可再生能源消纳难题, 水下压缩空气储能成为潜在解决方案。不同于陆上定容存储, 直接沿用陆上配置策略或简单采用经验性参数设定, 会引发系统功率阈值与能源波动的系统性失配问题。为此, 提出一种基于海域可再生能源特性的水下压缩空气储能深度优化配置方法, 建立储气深度-压比-功率的耦合模型, 通过遗传算法对系统储气深度进行优化, 仿真结果表明所提配置策略较传统直接给定深度方案具有优势。

关键词: 可再生能源; 水下压缩空气储能; 储气深度; 优化配置

引言

随着全球能源需求的不断增加和环境污染问题的日益严峻, 探索构建低碳、环境友好型能源体系已成为能源战略转型的核心议题[1]。“双碳”目标提出以来, 我国以风光为主体的可再生能源装机规模迅速扩张, 成为满足新增电力能源需求增长的主力。然而, 可再生能源的波动性与间歇性导致其并网消纳困难, 造成了大量可再生能源的浪费。在可再生能源集成应用领域, 储能技术发展迅猛, 能有效解决可再生能源利用难题。同时, 海洋作为能源开发新蓝海, 虽具备超陆地的风/光资源储量, 海上能源系统却面临特殊的储能瓶颈。当前主流储能方案中, 电池储能受限于成本与寿命, 难以支撑海上能源系统的大规模部署需求; 抽水蓄能则因海域条件限制适用性不足。如何高效存储海上波动性电力, 成为实现海洋能源规模化开发的核心挑战。

目前, 商业化大规模的储能技术除抽水蓄能外, 还有压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)[2]。CAES 因其零碳排, 可靠性高等特点逐步成为近年来的研究热点。同时, 作为其分支技术之一的水下压缩空气储能(Underwater Compressed Air Energy Storage, UWCAES), 因其独特的深海环境适应性及高储能密度的优势, 被视为海上风光消纳的潜在解决方案。现有水下压缩空气储能的研究主要集中在系统组件以及与其他发电或储能系统的联合运行等方面, 在系统配置方面的理论探讨仍显不足。与陆上压缩空气储能储气依赖盐穴、矿洞等不同, 水下压缩空气储将压缩空气存储于海底容器或柔性气囊中, 利用海水静水压力实现恒压存气, 其储气深度直接决定了储气压强[3]。具体而言, 若压缩机最后一级出口压力不足以克服目标深度的静水压力时, 则压缩空气无法正常输送存储水下储气囊中; 而当空气被过度压缩时, 则会导致气体在水下储气囊中的膨胀扩散, 造成能量浪费。同时, 对于完全依赖海上可再生能源供电的离岸系统而言, 直接给定水下压缩空气储能的储气深度或沿用陆上压缩空气储能系统配置策略, 忽视深度参数对系统储能的影响, 会引发功率阈值僵化问题: 深度过浅导致功率阈值过低引发频繁停机, 过深则因高压比需求迫使压缩机功率阈值上升, 当海上可再生能源功率波动至阈值以下时, 系统难以通过流量调节维持压比稳定而被迫弃电。因此, 传统方法在海洋可再生能源适配性上的结构性缺陷亟需调整。

针对上述问题, 本文提出一种基于目标海域资源特性的深度配置方法, 突破传统静态设计范式, 实现储能系统对海上可再生能源波动的主动适配, 为水下压缩空气储能的后续发展提供理论参考。

1 水下压缩空气储能系统

1.1 系统工作原理

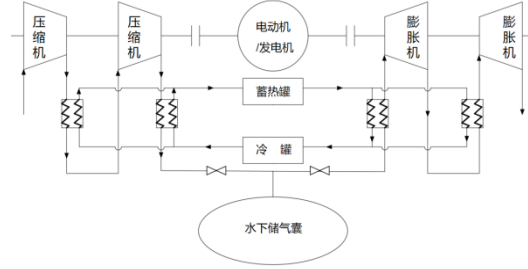


图 1 水下压缩空气储能系统典型结构

水下压缩空气储能系统的结构如图 1 所示，系统主要组成部分包括电动机、压缩机组、级间换热器、蓄热罐、冷罐、膨胀机组及水下储气囊。对于离网系统，UWCAES 可在储能阶段利用富余的海上可再生能源，如海上漂浮光伏及海上风电等，驱动电动机带动压缩机将空气压缩存储至水下储气囊中；压缩过程产生的热量经级间换热储存至蓄热罐中，在释能阶段用于加热释放的高压气体以增强气体做功能力，提升系统效率；在海岛或海上平台等有能量需求时，释放压缩空气，驱动膨胀机发电，直接供给本地负载，形成闭环能源系统。

1.2 系统模型

本研究聚焦于水下压缩空气储能系统的压缩阶段储能过程建模与优化，核心目标在于通过配置储气深度实现压缩机功率需求与海上可再生能源出力的相对匹配，从而最大化储能降低弃电，故不考虑膨胀释能阶段的能量转换特性。

对于第*i*级压缩机，功率可表示为（式1）：

$$W_i = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot T_{i,in}}{\eta_{i,comp}} \left(r_i^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (1)$$

其中， W_i 表示第*i*级压缩机功率(kW)； $\dot{m}$ 表示空气质量流量(kg/s)； c_p 表示空气定压比热容(kJ/(kg·K))；表示压缩机进口温度(K)； r_i 表示第*i*级压比； $\eta_{i,comp}$ 表示压缩机等熵效率； γ 表示空气比热比。

压缩机出口温度与进口温度的关系可表示为（式2）：

$$T_{i,out} = T_{i,in} \cdot \left(1 + \frac{r_i^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{\eta_{i,comp}} \right) \quad (2)$$

其中， $T_{i,out}$ 表示第*i*级压缩机出口温度。

第*i*级压缩机后接级间换热器，其进出口温度可表示为（式3）：

$$T_{i,heat,in} = T_{i,out} \quad (3)$$

其中， $T_{i,heat,in}$ 表示第*i*级换热器的入口温度，忽略管道散热，等于其前一级压缩机的出口温度。出口温度可表示为（式4）：

$$T_{i,heat,out} = T_{i,out} - \varepsilon \cdot (T_{i,heat,in} - T_{cool,in}) \quad (4)$$

其中， $T_{i,heat,out}$ 表示第*i*级换热器的出口温度； ε 表示换热器效率； $T_{cool,in}$ 表示低温介质的入口温度。出口温度则为下一级压缩机入口温度（式5）：

$$T_{i,\text{heat,out}} = T_{i,\text{in}} \quad (5)$$

在压缩机及换热器模型的基础上,需进一步建立海水深度与系统压力、压比之间的耦合关系。储气压力随水下储存深度增加的特性是水下压缩空气储能的核心物理基础[4],其关系可表示(式6):

$$P_{\text{back}} = \rho gh + P_{\text{atm}} \quad (6)$$

其中, P_{back} 表示水下气囊储气压力(kPa); ρ 表示海水密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²); h 表示储气深度(m), P_{atm} 表示大气压力。

系统总压比则可表示为:

$$r_{\text{total}} = \frac{P_{\text{back}}}{P_{\text{atm}}} \quad (7)$$

式(7)中, r_{total} 表示系统总压比。

每级压缩机压比满足:

$$r_{\text{total}} = \prod_{i=1}^m r_i \quad (8)$$

式(8)中每级压比可独立分配。

在大多数压缩空气储能系统研究中,为最小化压缩功耗,常采用等压比多级压缩结构。因此,本文采用等压比结构进行研究。在此背景下,储气深度与压缩系统的耦合关系通过静水压力主导的储气压强与压缩机总压比匹配实现。当目标深度确定后,总压比被唯一约束,进而通过等压比分配生成各级压缩机的压比参数,驱动功率需求模型计算功耗。

2 储能配置模型

基于前一节构建的模型,定义压缩机组功率运行区间,根据设备安全运行阈值设定压缩机组上限功率 $W_{\text{comp,max}}(h)$,结合海上可再生能源出力曲线 $P_{\text{re}}(t)$ 逐时段判断功率利用状态并计算弃电量(式9):

$$P_{\text{c}}(t) = \begin{cases} P_{\text{re}}(t) - W_{\text{comp,max}}(h), & \text{当 } P_{\text{re}}(t) > W_{\text{comp,max}}(h) \\ P_{\text{re}}(t), & \text{当 } P_{\text{re}}(t) < W_{\text{comp, rated}}(h) \\ 0, & \text{安全运行区间} \end{cases} \quad (9)$$

则在综合海上可再生能源长期历史数据的典型功率曲线下,全天弃电率通过累加各时段弃电功率并除以总发电量计算,形成优化目标函数可表示为(式10):

$$R_{\text{curtail}}(h) = \frac{\sum_{t=1}^{t=T} P_{\text{c}}(t) \cdot \Delta t}{\sum_{t=1}^T P_{\text{re}}(t) \cdot \Delta t} \times 100\% \quad (10)$$

其中, $R_{\text{curtail}}(h)$ 表示与深度相关的海上可再生能源储能弃电率。

目标水域可完成气囊布置安装的深度范围为(式11):

$$h_1 \leq h \leq h_2 \quad (11)$$

其中, h_1 、 h_2 分别表示目标水域可完成储气囊部署安装的储气深度上下限。

采用遗传算法[5]对储气深度进行全局寻优。首先将深度参数 h 编码为实数型染色体个体,初始化种群并在可行域内随机生成初始解集。每个个体适应度由受目标函数影响,在种群的不断的迭代中,寻找最优个体,输出最佳储能深度。

3 算例分析

3.1 仿真参数设定

基于文献[6]提供的实测数据，假设其表征目标海域长期海上光伏出力特性，如图 2 所示。通过区域可再生能源集群化开发构建目标海域出力特性：假设海域内分布式部署 7 座同规格海上光伏电站，以驱动压缩机组可在部分区间内正常运行。

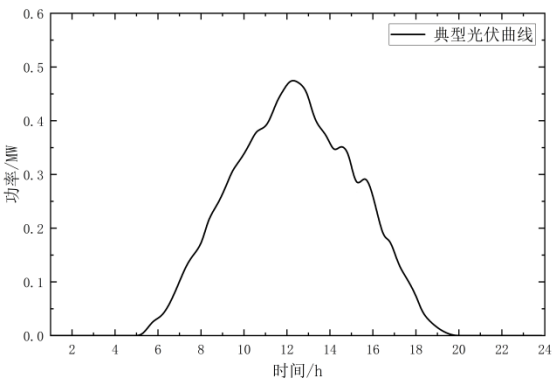


图 2 典型光伏功率曲线

其余系统运行及仿真参数设定如表 1 所示：

表 1 系统仿真参数设定

名称	单位	数值
大气压力	kPa	101.325
大气温度	K	298
海水密度	kg/m ³	1025
海水温度	K	280
重力加速度	m/s ²	9.81
压缩级数	/	3
等熵效率	/	0.85
额定质量流量	kg/s	6.5
换热效率	/	0.75
定压比热容	kJ/(kg · K)	1.005
空气比热比	/	1.4

3.2 结果分析

压缩空气输送至目标深度需严格维持储气压力所要求，当海上可再生能源功率较低时，系统难以通过流量调节实现压比稳定，气体注入无法正常进行；而功率超出设备耐受过载上限时，为避免喘振与机械超损又需主动弃电，这种“双端功率约束”使得系统有效运行区间显著收窄，尤其在可再生能源波动剧烈的离岸场景下，储能阶段的弃电率居高不下，因此，有必要对深度进行优化配置以降低弃电率。深度优化迭代结果如图 3 所示，该场景下，系统最佳储能深度 143m，储能阶段弃电率 33.7%。

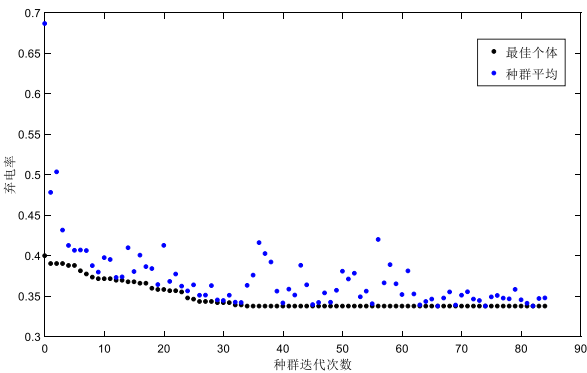


图 3 种群优化迭代过程

为验证所提深度优化方法的有效性，本研究将最优解与相关研究中常用的直接给定固定深度进行对比分析。通过仿真获得如表 2 所示的对比结果。

表 2 不同配置方案结果对比

储气深度	储能弃电率
优化深度（h=143m）	33.75%
固定深度（h=100m）	41.99%
固定深度（h=200m）	45.17%

优化深度方案储能弃电率为 33.75%，较固定深度 100m 方案的 41.99% 与 200m 方案的 45.17% 分别降低 8.24% 与 11.42%。通过以上对比可知，本文提出的水下压缩空气储能深度配置策略在面向海上风电消纳存储避免了浅层方案的低效停机，同时规避了深层方案的严苛启机条件，验证了所提策略的有效性。

4 结语

本研究提出了一种水下压缩空气储能深度配置方法，通过建立储气深度一功率的耦合模型，对储气深度进行优化，与固定方案对比，验证了配置策略在储能阶段降低弃电方面的优势，为水下压缩空气储能的配置提供了新思路。未来研究可进一步耦合储能容量规划与压缩机级数进行配置优化，此外，探索与电池储能等短时储能技术结合，有望在复杂海洋环境下实现更高比例的可再生能源消纳。

参考文献

[1] 王强, 党牛, 蒋子龙, 等. 碳中和背景下能源转型研究综述与展望 [J]. 地理学报, 2025, 80(03): 586-604.

[2] 刘笑驰, 梅生伟, 丁若晨, 等. 压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 38-47+102.

[3] 王志文, 熊伟, 王海涛, 等. 水下压缩空气储能研究进展 [J]. 储能科学与技术, 2015, 4(06): 585-598.

[4] 余思贤, 周允康, 刘雷伟, 等. 海上风电-水下压缩空气储能系统建模及经济性分析 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44(10): 71-82.

[5] 梅运东, 刘丽娜, 代军, 等. 基于遗传算法的农机服务资源优化配置方法 [J]. 中国农机化学报, 2025, 46(03): 323-327.

[6] 王莲, 简子淋, 张晓斌, 等. 基于 CNN-BiLSTM 和多目标函数优化的省级光伏日内保障出力预测 [J/OL]. 高电压技术, 1-13 [2025-04-14]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241185>.