

面向海上风电高效利用的水下抽水蓄能 容量优化配置分析

王晰, 苏开元, 谢小荣

(新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084)

Underwater Hydro Pumped Storage Optimized Capacity Configuration for Offshore Wind Power Utilization

WANG Xi, SU Kaiyuan, XIE Xiaorong

(State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University),
Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Underwater energy storage is receiving increasing attention to address the challenges of integrating marine renewable energy, represented by offshore wind power, into the power grid. Underwater pumped hydro storage (UPHS) is typical of these energy storage methods. However, the focus of existing research on UPHS is far from the electrical and energy field, and there is no in-depth analysis of capacity allocation and planning of real energy storage projects yet. To solve this problem, this paper researches the UPHS optimization configuration problem from the (quasi-) steady state perspective. Firstly, the structure of the offshore wind farm (OWF) and UPHS combined system is clarified, and a system model is established based on the principle of UPHS and wind turbine characteristics. After that, a mathematical model to derive the optimal capacity allocation is built to maximize investment return. Optimal capacities and real-time outputs of OWF and UPHS are solved under certain wind speed conditions. Finally, a comparative analysis of some key parameters is carried out to show their impacts on energy storage planning. Results show that UPHS can significantly improve the construction scale and investment returns of OWFs; meanwhile, the size and utilization hours also have multi-dimensional influences on the planning decision.

KEY WORDS: underwater pumped hydro storage (UPHS); underwater energy storage; capacity configuration; offshore wind power

摘要: 为应对以海上风电为代表的海洋新能源并网挑战, 水

下抽水蓄能(underwater pumped hydro storage, UPHS)受到日益广泛的关注。然而, 现有 UPHS 研究聚焦点距能源电气领域较远, 尚无对现实储能工程的容量配置和规划的深入分析。针对此问题, 立足(准)稳态视角, 围绕水下抽蓄的容量优化配置开展研究。首先, 明确海上风电-UPHS 系统结构, 基于水下抽蓄原理与风电出力特性建立系统模型; 之后, 以最大化投资收益为目标, 构建 UPHS 容量优化配置模型, 求解目标算例风速条件下风电机组、水下储能的最佳容量与实时出力; 最后, 围绕 UPHS 关键参数对规划结果的影响开展对比分析。结果表明, 水下储能的引入可以大幅提升远海风电场的建设规模与投资收益; 同时建设尺寸、利用小时数等储能参数亦会对规划结果产生多角度影响。

关键词: 水下抽水蓄能; 水下储能; 容量配置; 海上风电

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1849

0 引言

当下以海上风电为代表的海洋可再生能源正迎来蓬勃发展。据测算, 2023—2027 年全球海上风电装机将以年均 26GW 的速度持续增长^[1], 超出现有增长量的最高水平(2021 年 21.1GW)。我国也于 2021 年跃居海上风电装机容量世界第一^[2], 并在近年来制定颁布了一系列纲领性文件推动海上风电的规模开发与高效利用^[3]。然而, 海上风电等能源形式高间歇性、强波动性的特征, 使未来的电力系统面临多种可靠性与稳定性挑战^[4]。为应对此类挑战, 改善新能源出力特性和利用效率, 通过配置储能资源构建海上风电与储能联合外送系统成为一种理想的解决方案。

不同于陆上, 海上风电所处环境特殊, 水上平台建设成本高、安全风险大^[5]; 因此水下成为储能设备地点选择和能量来源的主导场景。目前, 水下

基金项目: 国家自然科学基金项目(51925701, U22B20100); 清华大学-丰田联合研究基金专项资助(20223930081)。

Project Sponsored by National Natural Science Foundation of China (51925701, U22B20100); Tsinghua-Toyota Joint Research Fund (20223930081).

储能的实现方法包括电化学储能、重力/浮力储能、水下压缩空气储能 (underwater compressed air energy storage, UCAES)、水下抽水蓄能 (underwater pumped hydro storage, UPHS) 等^[6-7]。文献[6]对上述方法做了较详细的介绍和总结: 相比于环境污染和组件腐蚀风险较高的水下电化学储能和结构可靠性欠缺的重力/浮力储能, UPHS 的大储能容量和高安全性为解决深远海能源开发、能量存储问题提供了高适配度的解决方案。

目前有关 UPHS 的研究仍集中于原理设计、经济评估、结构制造等方面。文献[8]评估了水下抽蓄的成本-收益关系; 文献[9-10]记录了 UPHS 的首次实地测试及其结果; 文献[11-12]阐述了 UPHS 球壳的建设加工工艺。在应用领域, 文献[13-15]设计并实验了面向稳定波浪能发电出力的 UPHS 并网系统及对应控制策略。扩展到原理和场景相近的海水抽蓄技术(在海岸或海岛以海洋为下水库建造抽蓄电站), 文献[16-17]分别面向多时间尺度调度和孤岛供电出力策略设计的情景开展了计算分析。尚无对于海上风电-UPHS 外送系统容量规划问题的深入分析。

综上, 本文针对海上风电-UPHS 联合外送系统的储能容量规划配置展开研究: 首先, 明确海上风电-UPHS 联合外送系统结构, 基于 UPHS 与海上风电的物理特性推导其数学模型; 之后, 以最大化投资收益为目标建立 UPHS 容量优化配置模型, 在所选算例下求解了风电机组、水下储能的最佳容量与实时出力; 最后, 围绕系列关键参数对规划结果的影响进行了比较分析。

1 海上风电-UPHS 系统构建

1.1 系统结构

选取远海风电大规模送出的场景, 构建海上风电-UPHS 联合外送系统如图 1 所示。风电场(总装机容量 S_w)经柔直或传统直流(输电容量 S_T)向陆地输电, 风电场配套安装数量为 N_U , 单机容量为 S_U 的 UPHS。风电机组的实时出力为 P_w ; 海上风电场外送至陆地的功率为 P_T ; UPHS 在发电工况下的供电功率为 P_G , 在抽水工况下的负荷功率为 P_P 。电网调度运行机构根据即时和预测的风电出力情况, 按需调节 UPHS 的输出功率(P_G 或 P_P)。

海上风电和配套水下储能设施的装机容量需经过综合统筹优化以最大化投资效益, 解决运营中的成本回收问题。系统中输电线路容量 S_T 给定, S_w 、 N_U 、 S_U 为容量优化配置问题的待求解量。

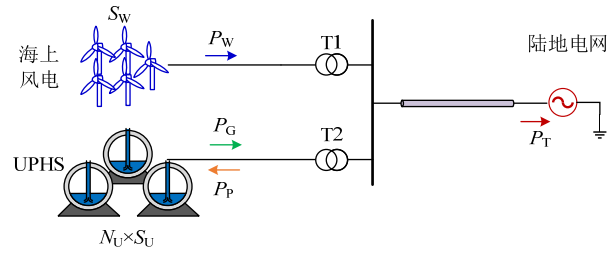


图1 海上风电-UPHS 外送系统

Fig. 1 Offshore wind and UPHS power delivery system

1.2 海上风电出力模型

风电机组的最大输出功率受自身容量和实际风速的制约:

$$P_{W_{\max,i}} = S_w \gamma(v_i) \quad (1)$$

式中: $\gamma(v_i)$ 描述风电机组在风速为 v_i 的情形下的实时出力和装机容量的比值; $P_{W_{\max,i}}$ 是 i 时刻海上风电的最大输出功率。

$\gamma(v_i)$ 按如下规律计算:

$$\gamma(v_i) = \begin{cases} 0, & v_i < v_{ci} \\ \frac{v_i^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leq v_i < v_r \\ 1, & v_r \leq v_i \leq v_{co} \\ 0, & v_i > v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中 v_{ci} 、 v_{co} 、 v_r 、 v_i 分别代表风机的切入风速、切出风速、额定风速和 i 时刻的瞬时风速。

风速在不同大气高度存在分布差异, 而通常的气象数据又在邻近地面处测量获得; 因此 v_i 须根据不同的海拔高度信息进行换算。

$$\frac{v(h_2)}{v(h_1)} = \frac{\lg h_2 - \lg z_0}{\lg h_1 - \lg z_0} \quad (3)$$

式中: $v(h_1)$ 、 $v(h_2)$ 分别代表 h_1 和 h_2 高度处的风速; z_0 表征不同地貌对空气流动的摩擦作用, 在特定地域内为常数, 对于面积较大的海洋水域, z_0 可取 0.0002。

1.3 UPHS 模型

水下抽水蓄能的基本原理是根据不同工况, 将周围水体从储能容器泵出或使海水驱动水轮机发电, 进而实现水的势能和电能转换。

UPHS 的运行工况由发电出力与负荷间的功率关系决定。以图 1 系统为例, 在风速条件较差, P_w 水平偏低时, UPHS 工作于发电工况, 海水涌入并驱动水轮机状态下的可逆式水泵水轮机(reversible pump-turbine, RPT)发电; 而若瞬时风能资源相对充裕, P_w 偏高乃至超出设定的外送容量时, UPHS 将转为抽水工况, 将壳内海水通过泵工况的 RPT 抽至周围海洋, 储存能量的同时也为后续内外循环创造空间。以抽水工况为例, UPHS 工作状态如图 2 所示。

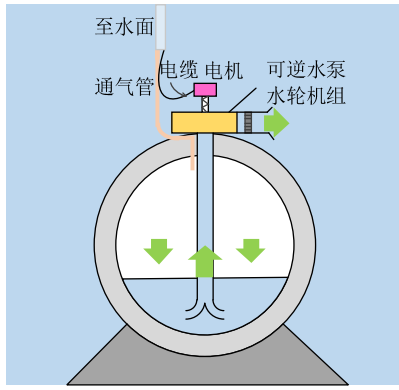


图2 泵工况下 UPHS 状态示意图

Fig. 2 Schematic view of one unit of UPHS working at pump mode

依据 UPHS 利用深海中水的静压实现能量转换的基本原理，其电能存储容量 E_{\max} 表示如下：

$$E_{\max} = \frac{4}{3} \pi R_s^3 \eta_T (\rho g d - p_0) \quad (4)$$

式中： R_s 为球壳内径； η_T 为水轮机工况的综合效率； d 为安装深度； ρ 为海水密度； g 为重力加速度； p_0 为海面处的大气压强。

由于 d 一般在 200m 以上，海水压强已经接近 20 个标准大气压，远大于 p_0 ；同时储能装置结构可能存在设计差异(如图 2 通气管的有无^[11])。因此计算 E_{\max} 时可适当忽略 p_0 的影响，使用简化的式(5)：

$$E_{\max} = \frac{4}{3} \pi R_s^3 \eta_T \rho g d \quad (5)$$

和常规的抽水蓄能电站相比，海洋相当于一座容积足够大的上水库；而功能类似下水库的球壳内腔需要在运行中考虑容积约束。以 V_i 表示 i 时段内球壳中的海水体积， $P_{G,i}$ 、 $P_{P,i}$ 表示 i 时段对应的发电功率和抽水功率， V_i 按下式迭代求得：

$$V_{i+1} = V_i + \frac{1}{N_U} \left(\frac{P_{G,i}}{\eta_T \rho g d} - \frac{\eta_P P_{P,i}}{\rho g d} \right) \Delta t \quad (6)$$

式中： η_T 、 η_P 分别是 UPHS 工作在发电工况、泵工况下的综合效率； Δt 表示相邻两次计算的时间间隔。依据式(6)所计算的 UPHS 内部海水体积，本质是由海水做功的机械能与电能的转换关系推导得出，更倾向于描述长期、稳态下的 UPHS 状态。

2 UPHS 的容量优化配置模型

2.1 目标函数

海上风电-UPHS 系统的运行目标为最大化投资收益 π 。收益的时间尺度取为 1 天，表示为上网风电每天的售电收入与分摊到日的各项成本之差。其中各项成本包含每日 UPHS 机组的启停成本 C_{op} ，风电场(包含海上风电机组与配套的 UPHS 装置)投资成本 C_{inv} 、风电场运维成本 C_{mtc} 、装备的淘汰更

换成本 C_{rep} 。

$$\max \pi = \sum_{i=1}^{N_d} \lambda_{grid,i} P_{T,i} \Delta t - C_{op} - \frac{1}{N_a T_a} \cdot (C_{inv} + C_{mtc} + C_{rep}) \quad (7)$$

式中： $\lambda_{grid,i}$ 为 i 时刻的海上风电上网电价； $P_{T,i}$ 为 i 时刻风电外送至陆地的功率； N_d 为一日内的计算次数，取 $\Delta t=15\text{min}$ ，则 $N_d=96$ ； T_a 为工程寿命； N_a 为 1 年天数。4 个成本项的含义与计算方法如下。

1) 每日启停成本 C_{op} 。

风电机组的动力来源于自然界，建成投运后基本无需为风能资源的使用付出成本。 C_{op} 产生于水下抽蓄的启停操作：

$$C_{op} = s c_{onoff} \quad (8)$$

式中： s 为一天内总的开停机次数； c_{onoff} 是每次开/关机操作的花费。

2) 总投资成本 C_{inv} 。

C_{inv} 与施工、建设相关，主要由 3 类内容组成：UPHS 球壳的建造与安装、UPHS 水泵水轮机和电机系统的购置与安装、海上风电机组及其附属设备(如电缆、变压器、汇集站等)的购置与安装。

投资成本在风电场的建设阶段产生，时间分布较为集中，无需考虑不同时间段的折现。因此 C_{inv} 直接表示为 3 类成本之和：

$$C_{inv} = N_U (c_{inv,con} V_{concrete} + c_{inv,rpt} S_U) + c_{inv,wind} S_W \quad (9)$$

式中： $c_{inv,con}$ 指建造单位体积 UPHS 的投资额； $c_{inv,rpt}$ 指水泵水轮机单位装机容量的投资额； $c_{inv,wind}$ 指风电机组及附属设备单位容量的投资额。

3) 总运维成本 C_{mtc} 。

运维成本涵盖日常运行中对设备监测、巡检、维护保养等操作产生的费用，可继续按划分 C_{inv} 的类别计算。运维成本覆盖了海上风电场的全生命周期，需按规则折现以更严谨地开展评估。折现率记为 r ， C_{mtc} 计算式为

$$C_{mtc} = \sum_{n=1}^{T_a} \frac{1}{(1+r)^n} (N_U c_{mtc,con} V_{concrete} + N_U c_{mtc,rpt} S_U + c_{mtc,wind} S_W) \quad (10)$$

式中： $c_{mtc,con}$ 指单位体积 UPHS 的运维费用； $c_{mtc,rpt}$ 指水泵水轮机单位容量的运维费用； $c_{mtc,wind}$ 指风电机组及附属设备单位容量的运维费用。

4) 淘汰更换成本 C_{rep} 。

水泵水轮机、电机等机械结构的寿命 T_{rpt} 通常小于 UPHS 的混凝土外壳和锚固基础，如典型取值为 $T_{rpt}=15$ 年， $T_a=25$ 年。因此在工程的生命周期内需进行 1 次水泵水轮机系统的更换。用 $c_{rep,rpt}$ 表示

水泵水轮机单位装机容量的更换费用并考虑折现， C_{rep} 表示为

$$C_{\text{rep}} = \frac{c_{\text{rep,rpt}} N_U S_U}{(1+r)^{T_{\text{rpt}}}} \quad (11)$$

2.2 约束条件

1) 输出功率。

海上风电机组存在输出功率上限，该上限由机组容量、实时风速等因素决定：

$$0 \leq P_{W,i} \leq P_{W_{\text{max},i}} \quad (12)$$

选取变速机组作为 UPHS 的 RPT-电机系统，使水下抽蓄的输出功率在上下限之间可调；分别用 $\sigma_{P,\text{min}}(\sigma_{G,\text{min}})$ 、 $\sigma_{P,\text{max}}(\sigma_{G,\text{max}})$ 表示 UPHS 在抽水(发电)工况下最小出力和最大出力与额定值之比。

$$N_U S_U \sigma_{P,\text{min}} \leq P_{P,i} \leq N_U S_U \sigma_{P,\text{max}} \quad (13)$$

$$N_U S_U \sigma_{G,\text{min}} \leq P_{G,i} \leq N_U S_U \sigma_{G,\text{max}} \quad (14)$$

$P_{P,i}$ 和 $P_{G,i}$ 的存在是矛盾的，应限制 UPHS 只能处于单一工作状态。

$$P_{P,i} P_{G,i} = 0 \quad (15)$$

风电场任时刻的外送功率 P_T 不应超出线路的输电容量 S_T 。

$$0 \leq P_{T,i} \leq S_T \quad (16)$$

2) 有功平衡。

在 UPHS 的发电工况下，外送功率为机组出力与储能放电功率之和；而在 UPHS 的抽水工况下，外送功率为机组出力与储能装置充电功率之差。将汇集、升压、输送各环节的损耗 $P_{\text{loss},i}$ 纳入分析，则有有功平衡约束表示为

$$P_{T,i} = P_{W,i} - P_{P,i} + P_{G,i} - P_{\text{loss},i} \quad (17)$$

近似认为网损和拟送出的电量(式(17)的前 3 项)成线性关系。

3) 风电利用率。

考虑新能源消纳技术和能力的客观要求以及相关规定与标准限制，海上风电弃风率不得大于预设值 β 。

$$\frac{E_W}{S_W \sum_{i=1}^{N_d} \gamma(v_i) \Delta t} \geq 1 - \beta \quad (18)$$

式中： β 取 5%； E_W 为所取时段内风电机组发出的电能。

$$E_W = \sum_{i=1}^{N_d} P_{W,i} \Delta t \quad (19)$$

4) 风电场有功功率变化。

风电场的输出功率应能实现连续平滑调节。按国家标准《风电场接入电力系统技术规定》，设置功率变化的限定值 $P_{\text{restr},i} = 50\text{MW}^{[18]}$ 。

$$|P_{T,i+1} - P_{T,i}| \leq P_{\text{restr},i} \quad (20)$$

5) UPHS 内部状态。

UPHS 球壳内的海水存在天然的深度限制：

$$z_{\text{min}} \leq z_i \leq z_{\text{max}} \quad (21)$$

式中 z_{min} 、 z_{max} 分别取球壳内直径的 10% 和 99%。对于给定的球壳几何结构，深度限制可用体积限制替代以简化计算。

$$V_{\text{min}} \leq V_i \leq V_{\text{max}} \quad (22)$$

UPHS 每日的初始状态相同，以保证模型以日为周期具有可重复性。

$$V_{\text{init}} = V_{\text{end}} \quad (23)$$

对于式(23)，当时间尺度为 24h 且调度间隔为 15min 时， $V_{\text{init}} = V_1$ ， $V_{\text{end}} = V_{96}$ 。

6) UPHS 机组启停。

水泵水轮机和同步电机过于频繁的启停操作和工况转换会损害机组性能。因而，在固定时段内 UPHS 的开停机次数须受到限制。引入 0-1 变量 $I_{P,i}$ 、 $I_{G,i}$ 表征 i 时刻储能装置的工作状态。指示变量取 1 时即代表 i 时刻 UPHS 处于对应的工况；则启停次数 s 表示为

$$s = \sum_{i=1}^{N_d-1} |I_{P,i+1} - I_{P,i}| + |I_{G,i+1} - I_{G,i}| \leq K_{\text{max}} \quad (24)$$

式中 K_{max} 是一天中 UPHS 允许启停的最大次数。显然 $I_{G,i}$ 、 $I_{P,i}$ 也是互斥的：

$$I_{P,i} I_{G,i} = 0 \quad (25)$$

7) UPHS 的建造数目。

风电场所占海域有限，从施工建设和海洋生态角度均难以支持建造过多数量的 UPHS。

$$N_{\text{min}} \leq N_U \leq N_{\text{max}}, N_U \in \mathbb{N}^+ \quad (26)$$

参考文献[8]关于 UPHS 建设数目的讨论， $N_{\text{min}} = 5$ ， $N_{\text{max}} = 150$ 。

3 算例选取与求解结果

3.1 模型参数的选取

依据前述场景与规划模型，为使问题的求解现实可行，需选取并确定海上风电场与 UPHS 在技术和经济两方面的若干实际参数。

技术性数据方面，选取海南岛东南海域(记为 A 地)作为假定的海上风电-UPHS 系统建设地点^[6]。UPHS 相关参数取值见附表 A1；其中，输电容量 S_T 、 R_S 、 η_T 、 η_P 等量的取值参考现有的海上风电场工程和水下抽蓄试验项目，其余参数如储能出力限值按当前变速抽水蓄能机组的性能确定。对于风电机组的型号参数，参照 A 地邻近区域部分海上风电项目的风机选型^[19-20]，其关键参数见附表 A2。查

找并获取 A 地近年来的每日风速数据，并按式(3)求得风机预装轮毂高度处的实际风速。

经济性数据方面：参考有关政策和案例^[21]，上网电价取 $\lambda_{grid}=0.5$ 元/(kW·h)；则每日售电收入 R 表示为海上风电场向内陆输送的电量 E_T 与上网电价 λ_{grid} 之积。

$$R = \sum_{i=1}^{N_d} \lambda_{grid,i} P_{T,i} \cdot \Delta t = \lambda_{grid} \sum_{i=1}^{N_d} P_{T,i} \cdot \Delta t = \lambda_{grid} E_T \quad (27)$$

另外，式(8)–(11)中各成本系数的具体数值如附表 A3 所示。UPHS 混凝土部分每年的运维成本取为建设成本的 1.5%；电气和机械部分(风电机组、水泵水轮机等)每年的运维成本取为建设成本的 3%；淘汰更换成本和初始投资相同。

3.2 典型日条件下的优化配置结果

鉴于风电出力曲线的形态特征会对规划结果造成较大影响^[22]，因此所选取的算例需充分考虑出力(或风速等)数据的代表性。取某年中每天各时段的风速，按式(1)–(3)计算每日各时刻出力，之后进行场景聚类与削减；生成的最具代表性的典型日风电出力特性曲线如图 3 所示。

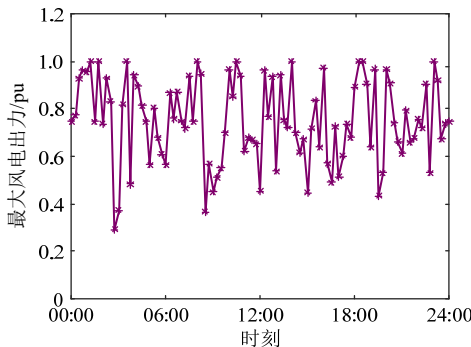


图 3 典型日风电出力特性曲线

Fig. 3 Output power characteristic curve of the offshore wind farm in a typical day

在图 3 所表征的风能资源分布情形下，分别就水下抽蓄安装与否两种情景下求解了 S_W 、 N_U 、 S_U 、 π 等规划变量。求解结果和对应的发(输)电量、盈利、成本等信息见表 1。

表 1 典型日条件下的规划结果对比

Table 1 Comparison of planning results in a typical day

参数名称	规划结果	
	安装 UPHS	不安装 UPHS
S_W /MW	1258.78	219.83
S_U /MW	8.48	0
N_U	59	0
E_W /(MW·h)	21518.9	3758.0
E_U /(MW·h)	19708.5	0
$\pi/10^4$ 元	578.9	123.7
$C_{op}/10^4$ 元	59	0
$(C_{inv}/N_a T_a)/10^4$ 元	241.8	38.5
$(C_{mtc}/N_a T_a)/10^4$ 元	100.2	16.3
$(C_{rep}/N_a T_a)/10^4$ 元	5.5	0

表 1 可见，水下抽水蓄能机组的安装使所规划的远海风电场最优规模从 219.83MW 增长至 1258.78MW，达 5.73 倍之多；风电发电量亦增长到原先的 5.73 倍；日均投资收益增长了 3.68 倍。规模与收益的巨幅增长，意味着水下抽蓄能够为深远海风电场建设开发提供技术性与经济性的强力支撑。

对于安装 UPHS 的情形，在典型日的 24h 内风电场的外送功率、风电出力、UPHS 出力、UPHS 内部海水体积随时间的详细变化如图 4；外送功率 P_T 与自然条件下直接按照风电出力特性曲线求取的功率 P_{Wmax} 对比如图 5。

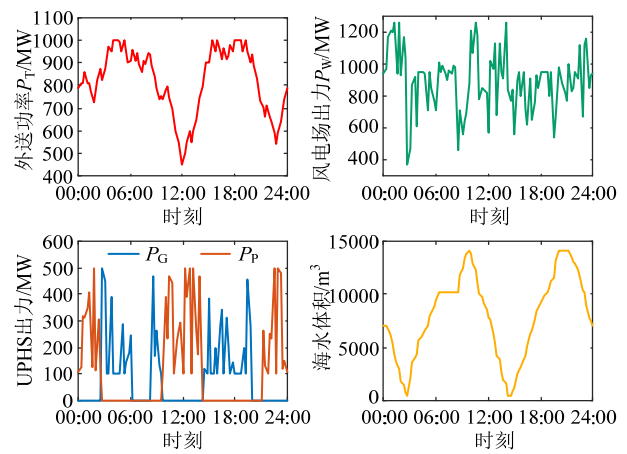


图 4 典型日 24h 内的各物理量变化

Fig. 4 Changes of several physical quantities over 24h in a typical day

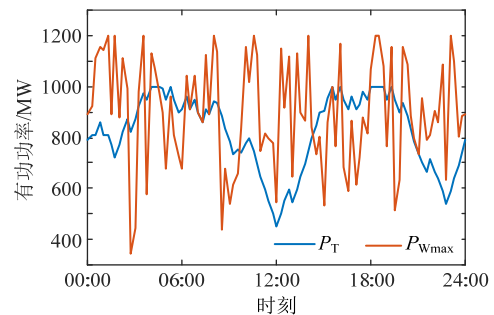


图 5 外送功率与自然条件下风电出力的比较

Fig. 5 Comparison between transmission power and wind output in natural conditions

根据图 5 中两条曲线的对比计算，UPHS 的配置使外送风电出力的标准差由 222.8MW 下降至 144.2MW，波动率由 24%下降至 17%。可见 UPHS 作为储能手段有效地实现了对电能的“削峰填谷”；在提升风能利用效率的同时亦为新能源电力系统的调度运行提供了便利。

4 储能参数的比较分析

4.1 UPHS 建设尺寸

按照(5)式，UPHS 球壳内径 R_S 的取值将直接影

响单个设备的储能能力 E_{\max} 。令 R_S 在原有 15m 邻近区间变化, 求解结果如表 2。不同 R_S 取值下, 风电场的外送功率变化如图 6 所示。

表 2 不同 R_S 取值下的规划结果
Table 2 Solving results under different R_S values

R_S/m	S_W/MW	S_U/MW	N_U	$S_W/N_U S_U$	$\sigma(P_T)^*$	$\pi/10^4$ 元
13	1256.65	3.96	111	2.86	17.67%	547.2
15	1258.78	8.48	59	2.52	17.56%	578.9
16	1272.02	8.22	54	2.87	16.64%	591.8
18	1272.63	11.73	38	2.86	16.63%	608.0

*注: $\sigma(P_T)$ 表示 24h 内外送功率 P_T 的波动率

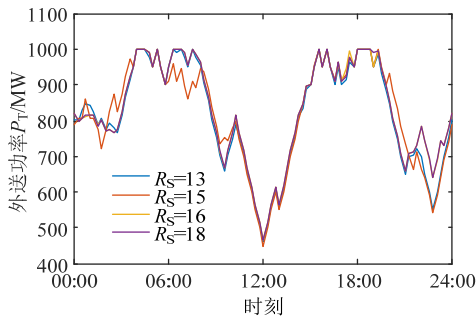


图 6 不同 R_S 取值下的外送功率

Fig. 6 Delivered power curves under different R_S values

从上述图表可见, 一定范围内更大的 R_S 减少了所安装的 UPHS 设备数量, 配套的风电机组和 UPHS 的最优容量也均有所增加; 同时 $\sigma(P_T)$ 和 π 的变化表明, 建造储能能力更强的 UPHS 设备有助于增进供电盈利、降低供电功率波动。

这一趋势的原因在于储能能力的增加使 UPHS 对海上风电削峰填谷的效果更显著, 风电场的上网功率在波动中与线路容量 S_T 的差距变小, 达到了更高的平均水平。然而, 过大的球壳尺寸也会不可避免地带来建设施工的困难, 这点需在工程的规划设计阶段充分地考虑, 避免因片面地追求产出和经济效益导致某些负面影响。

此外, 结合表 2 中 $S_W/N_U S_U$ 这一反映海上风电装机容量与水下储能装机总量比例关系的指标可以发现, 尽管球壳内径在给定区间内发生了变化, 但最优装机的比例始终处在(2.5:1)~(3:1)的范围内。这一规律或可为风电场和储能装置的规划决策工作提供一定的参考。

4.2 利用小时数约束

在一些情形下, 需对储能的利用小时数进行约束, 使其避免长期处于连续的工作状态中, 影响设备寿命和预期性能。该约束的表达式如下:

$$T_U = \frac{E_U N_a}{S_U} \leq T_{\max} \quad (28)$$

$$E_U = \sum_{i=1}^{N_d} (P_{P,i} + P_{G,i}) \Delta t \quad (29)$$

E_U 为 UPHS 总的能量变化(储存与释放的能量之和)。根据式(28), 未施加利用小时数约束时 UPHS 的 T_U 为 3505h。因而分别取 $T_U=3300$ 、3100、2900h 作进一步考察。4 种 T_U 取值下, 对应的规划求解结果见表 3; 风电场外送功率的变化如图 7。

表 3 不同利用小时数约束下的规划结果
Table 3 Solving results under different utilized hour constraints

T_U/h	S_W/MW	S_U/MW	N_U	$S_W/N_U S_U$	$\pi/10^4$ 元
3505	1258.78	8.48	59	2.52	578.9
3300	1261.84	9.01	60	2.33	577.0
3100	1252.62	9.36	62	2.16	567.2
2900	1241.06	9.79	66	1.92	551.5

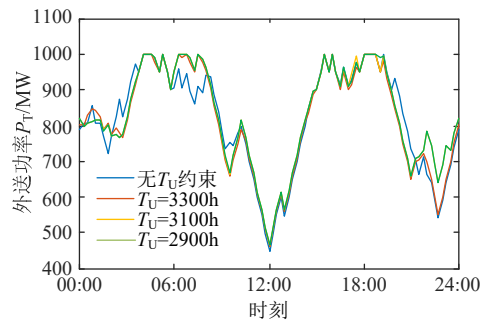


图 7 不同利用小时数约束下的外送功率曲线

Fig. 7 Power curves under different utilized hour constraints

由于添加 T_U 约束后储能对风电出力调节的参与程度受到了不同程度的限制, 风电场的每日盈利 π 随 T_U 的减小呈下降趋势。同时, 系统需配置的最优储能容量 S_U 亦有所增加, 以弥补收紧的利用小时数约束对整体供电收入带来的负面效应。另外表 3 对容量比例的计算结果表明, $S_W/N_U S_U$ 呈现随利用小时数缩短而减小的趋势, 且均小于表 2 未添加 T_U 约束时的对应数值; 即在同等的风电装机水平下, 最优规划决策需要配置更大的水下储能规模。这同样体现了利用小时数约束收紧带来的上述影响。

5 结论

本文在准稳态视角下, 基于远海风电场配套安装水下抽水蓄能外送的场景构建了 UPHS 的容量优化模型, 所得结论如下:

1) 相较于未投运储能装置的情形, UPHS 使远海风电场的规模和投资经济性得到数倍的大幅提升; 同时典型日内的调度结果表明, UPHS 的配置能够有效提高风电利用率, 降低其输出功率波动, 改善并网性能。

2) 根据本文算例的气象与地理条件, 若使规划建设在经济收益达到最优, 海上风电与水下抽蓄

的容量配比取值范围基本处于(2.5:1)~(3:1)。

3) 储能参数的比较分析方面, 建设尺寸的增加有助于减少储能设备的建造数量, 增进供电盈利、更显著地平滑输电功率波动; 更严格的利用小时数约束会在一定程度上削减收益并增加需配置的储能容量。但额外的约束(如利用小时数)可能会改变海上风电和 underwater 抽水蓄能的最优装机比例。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] GWEC. Global offshore wind report 2023[R/OL]. [2023-08-28]. <https://gwec.net/gwecs-global-offshore-wind-report-2023/>.
- [2] 国家能源局. 国家能源局举行新闻发布会 发布 2021 年可再生能源并网运行情况等并答问[EB/OL]. 北京: 国家能源局, (2022-01-29)[2023-08-28]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/29/content_5671076.htm.
- [3] 国家发展和改革委员会. “十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. (2022-06-01)[2023-08-28]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202206/P020220602315308557623.pdf>.
- [4] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-168. XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168(in Chinese).
- [5] KLAR R, STEIDL B, SANT T, et al. Buoyant energy—balancing wind power and other renewables in Europe’s oceans[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14: 246-255.
- [6] 王晰, SHAIR J, 谢小荣. 水下储能技术综述与展望[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4121-4130. WANG Xi, SHAIR J, XIE Xiaorong. Underwater grid-scale energy storage: review and prospect[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4121-4130(in Chinese).
- [7] 王志文. 水下压缩空气储能系统设计与能效分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- [8] HAHN H, HAU D, DICK C, et al. Techno-economic assessment of a subsea energy storage technology for power balancing services[J]. Energy, 2017, 133: 121-127.
- [9] PUCHTA M, BARD J, DICK C, et al. Development and testing of a novel offshore pumped storage concept for storing energy at sea-Stensea[J]. Journal of Energy Storage, 2017, 14: 271-275.
- [10] DICK C, PUCHTA M, BARD J. StEnSea - results from the pilot test at Lake Constance[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42: 103083.
- [11] FENNELL G E. System design and manufacturability of concrete spheres for undersea pumped hydro energy or hydrocarbon storage[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [12] MEREDITH J D C. Design, construction and testing of an ocean renewable energy storage scaled prototype[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [13] JAFARISHIADEH S, FARASAT M, MEHRAEEN S. Grid-connected operation of direct-drive wave energy converter by using HVDC line and undersea storage system[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati: IEEE, 2017: 5565-5571.
- [14] JAFARISHIADEH S, FARASAT M. Modeling and sizing of an undersea energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(3): 2727-2739.
- [15] FORESTIERI J N, FARASAT M. Integrative sizing/real-time energy management of a hybrid supercapacitor/undersea energy storage system for grid integration of wave energy conversion systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3798-3810.
- [16] 武荷月, 邓长虹, 李定林, 等. 海上风电与海蓄联合运行多时间尺度优化调度方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(4): 361-368. WU Heyue, DENG Changhong, LI Dinglin, et al. A multi - time scale optimal dispatching method for combined operation of offshore wind power and seawater pumped storage[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(4): 361-368(in Chinese).
- [17] KATSAPRAKAKIS D A, CHRISTAKIS D G. Seawater pumped storage systems and offshore wind parks in islands with low onshore wind potential. a fundamental case study[J]. Energy, 2014, 66: 470-486.
- [18] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第 1 部分: 陆上风电: GB/T 19963.1-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] 国家电投集团徐闻风力发电有限公司. 湛江徐闻海上风电场项目海洋环境影响报告书[EB/OL]. [2023-08-28]. <http://gdec.gd.gov.cn/attachment/0/392/392635/2995277.PDF>.
- [20] 广东粤电阳江海上风电有限公司. 粤电阳江青洲二海上风电场项目环境影响报告书[EB/OL]. [2023-08-28]. <http://gdec.gd.gov.cn/attachment/0/471/471833/3585309.pdf>.
- [21] 国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于完善风电上网电价政策的通知[EB/OL]. (2019-05-21)[2023-08-28]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201905/t20190524_962453.html.
- [22] 谢小荣, 王晰. 面向海上风电高效利用的水下抽水蓄能容量优化配置方法: CN202311272301.5[P]. 2023-09-28.



王晰

在线出版日期: 2024-03-10。

收稿日期: 2023-10-17。

作者简介:

王晰(2001), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, E-mail: wangxi23@mails.tsinghua.edu.cn;

苏开元(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, E-mail: sky22@mails.tsinghua.edu.cn;

谢小荣(1975), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, 可再生能源, 柔性输电系统等, E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 王金芝)

附录 A

表 A1 水下抽蓄参数取值

Table A1 Parameters of UPHS

参数名称	取值	参数名称	取值
计算间隔 $\Delta t/\text{min}$	15	重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.81
UPHS 内半径 R_s/m	15	水轮机工况综合效率 η_T	0.89
安装深度 h/m	500	水泵工况综合效率 η_P	0.82
输电容量 S_T/MW	1000	最小出力 $\sigma_{P,\text{min}}/\sigma_{G,\text{min}}$	0.2
海水密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1025	最大出力 $\sigma_{P,\text{max}}/\sigma_{G,\text{max}}$	1.0

表 A2 所选用风机参数取值

Table A2 Parameters of selected offshore wind turbines

参数名称	取值	参数名称	取值
额定容量/ kW	6450	切出风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	25
预装轮毂高度/ m	108	额定风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	10.5
叶片长度/ m	83.6	极限风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	79.8
切入风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3	额定电压/ V	720

表 A3 各成本系数取值

Table A3 Values of the cost coefficients

参数名称	取值	参数名称	取值
$c_{\text{onoff}}/\text{元}$	1000	$c_{\text{mtc,con}}/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1})$	22.89
$c_{\text{inv,con}}/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	1526.2	$c_{\text{mtc,rpt}}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	63
$c_{\text{inv,rpt}}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	2100	$c_{\text{mtc,wind}}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	480
$c_{\text{inv,wind}}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	16000	$c_{\text{rep,rpt}}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	2100