

# 考虑海上风电不同时间尺度功率波动的源侧电-氢混合储能多目标规划

符杨<sup>1</sup>, 周颖龙<sup>2</sup>, 葛晓琳<sup>1</sup>, 刁冠勋<sup>3</sup>, 费斐<sup>3</sup>, 黄阮明<sup>3</sup>

(1. 教育部海上风电技术工程研究中心(上海电力大学), 上海市 杨浦区 200090;

2. 上海电力大学电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090;

3. 国网上海市电力公司, 上海市 浦东新区 200122)

## Multi-objective Planning of Source-side Electro-hydrogen Hybrid Energy Storage for Offshore Wind Power Fluctuations Across Time Scales

FU Yang<sup>1</sup>, ZHOU Yinglong<sup>2</sup>, GE Xiaolin<sup>1</sup>, DIAO Guanxun<sup>3</sup>, FEI Fei<sup>3</sup>, HUANG Ruanming<sup>3</sup>

(1. Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education (Shanghai University of Electric Power), Yangpu District, Shanghai 200090, China;

2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;

3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Pudong New Area, Shanghai 200122, China)

**ABSTRACT:** To mitigate the impact of wind power fluctuations on the grid, deploying energy storage on the wind farm side is effective. However, with diverse and costly storage technologies, finding an economically viable solution is challenging for offshore wind grid parity. To address this, a hybrid electro-hydrogen energy storage planning method considering multi-time-scale wind power fluctuations is proposed. First, variational mode decomposition (VMD) is combined with a fluctuation spectrum to decompose and allocate different time-scale fluctuations for storage. A modal allocation matrix maps fluctuations in the time-frequency domain to storage capacities. Second, a life cycle cost model is developed, considering the differences in lifespan and costs of electro-hydrogen storage between offshore and onshore locations. Additionally, overall conversion efficiency and cost-reduction benefits to transmission equipment are included. Finally, an improved normalized normal constraint (INNC) method optimizes the planning model by expanding the Pareto frontier. Simulation results validate the method's effectiveness.

**KEY WORDS:** offshore wind power; spectrum analysis; electro-hydrogen storage; energy storage optimal configuration; multi-objective planning

**摘要:** 在风电场源侧配备储能可以缓解风电随机波动对电网的冲击, 然而储能种类繁多、价格昂贵, 在海上风电平价上网时代下经济合理地配置储能面临巨大挑战。为此, 提出一

种考虑海上风电多时间尺度出力波动的源侧电-氢混合储能规划方法。首先, 针对风电出力多尺度波动难以准确拆分、有效分配给混合储能的问题, 提出变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)结合波动特征频谱以准确分解不同时间尺度波动分量, 再通过构建模态分配矩阵模型刻画时频域波动分量与储能容量的映射关系。其次, 针对海陆不同位置配置电氢混合储能的差异性, 计及电-氢储能不同寿命、海-陆储能差异成本等因素进行全生命周期成本建模; 此外综合考虑海上储能对输变电设备的间接降本效益以及储能系统整体转化效率, 建立了适应海上风电多时间尺度功率波动的混合储能多目标规划模型。最后, 针对所构建的规划模型提出一种改进规格化法平面约束法(improved normalized normal constraint, INNC), 通过空间投影适当拓展乌托邦面, 在分布更广的 Pareto 前沿解中选择最优规划方案。通过算例仿真验证了所提方法的有效性, 结果表明随着风场建设远海化, 海上配储的经济性将逐渐显露。

**关键词:** 海上风电; 频域分析; 电-氢混合储能; 储能优化配置; 多目标规划

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1776

## 0 引言

我国海岸线绵长、海上风资源优渥, “双碳”目标下正在大力发展海上风电: 截至 2024 年第 3 季度我国海上风电累计建成并网 39.10GW, 已连续 3 年位居全球首位<sup>[1]</sup>。然而, 海上风电出力在时间尺度上存在多重不平衡波动: 日内短尺度波动和季节长尺度波动。这给电网安全稳定运行带来显著挑战, 混合储能系统(hybrid energy storage system,

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202499315A-1-3-ZB)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202499315A-1-3-ZB).

HESS)能发挥不同储能的优势,是平滑风电出力的主流方向<sup>[2-5]</sup>。新型电力系统下,海上风电等新能源项目要求建成时同步落地配套储能设施。为此,亟须开展平抑海上风电出力波动的混合储能规划研究。

混合储能容量匹配方面的研究可分为时域模拟和频域分析2类。时域方面,文献[6]对HESS精细化建模后,对全年8760h逐时模拟运行得出规划结果。但当时序规模较大时,难以准确求解。有研究通过K-means<sup>[7]</sup>、KD等聚类方法来有效求解时序规划问题。然而,海上风电出力波动具有季节特性,削减后的时域场景难以刻画长尺度的储能容量规划问题。将时域数据转换到频域进行分配将不再受时间尺度的限制,文献[8]利用离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)对不平衡功率进行频谱分析,将补偿频段拆解为高、低频2部分由不同储能设备承担;文献[9]提出一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的分配方法,将分解得到的高、低频模态分量作为储能的期望平抑功率值。尽管以上频域方法取得了相对有效的分解结果,但都局限于短期的波动数据处理和日内的储能分配,缺乏在长期规划布局中的应用。分解分配长周期大量波动数据时易出现模态混叠和冗余配置的问题。因此,如何在规划中准确拆解出力波动并有效分配给不同储能形式仍需要进一步研究。

海上风电源侧储能规划方面,大量学者展开了研究。在高比例海上风电系统中,文献[10]以运维成本最低为目标建立了源侧储能规划模型。文献[11]将以氢储能和锂电池构成混合储能系统,结果表明,相较于单一形式储能,混合储能方案更具经济效益。然而,上述研究均未考虑储能位置对规划成本的影响,随着沿海地区土地资源的趋紧,有学者提出在海上建设部分储能。文献[12]考虑在风电场侧建设水下抽水蓄能来解决深远海风电开发和能量存储的问题。文献[13]在海上配备气固两相氢储以确保风电安全运行,同时实现了海上能源的多元化需求。此外,海上储能还可以作为风电场的独立黑启动电源。不同于陆上,海洋恶劣环境条件将对储能设备的建设回收和运行维护过程产生影响,使得海上储能配置的成本构成更为复杂。深远海背景下,有必要对海上风电源侧海陆储能经济规划展开深入分析。

源侧储能规划目标方面,现有研究多以储能设备安装运行过程中产生的直接成本最优作为规划

的依据<sup>[10-13]</sup>,未考虑储能规划对其他规划投资的影响以及储能的运行效果。为保证规划结果的全面性需要综合考虑多个优化目标。多目标规划分为2大类:矢量法和标量法。矢量法不依赖模型,通过智能算法随机搜索直接获取完整Pareto前沿,但往往误差较大;标量法的基本思路是将多目标降维后求解前沿,主要包括加权法和 $\varepsilon$ -约束法<sup>[14]</sup>、 $\varepsilon$ -约束法<sup>[15]</sup>和平面约束法(normalized normal constraint, NNC)<sup>[16]</sup>,其中加权法和偏主观而 $\varepsilon$ -约束法难以获得均匀的前沿分布,NNC法可以克服以上缺陷,但在求解多维目标问题时难以获取完整前沿,这会影响到后续决策的全局性。

基于以上背景,本文提出一种用于平抑海上风电多时间尺度波动的源侧电-氢HESS多目标规划方案。首先,对于风电波动与储能配置间的映射关系,提出一种改进的变分模态分解方法来准确分解得到波动的频域分组,通过引入模态分配矩阵以实现HESS的精细分配。然后,计及配置地理位置差异化对海陆电-氢HESS进行全生命周期成本建模,在此基础上,提出海上风电源侧海陆两点的电-氢HESS规划模型:综合考虑储能成本、降本效益和能量损耗率3个目标。针对传统NNC法求解多目标问题的弊端,通过空间投影适当拓展乌托邦面后并行求解完整Pareto前沿。最后,通过算例仿真验证了所提方法的有效性,并对风场离岸距离等关键参数进行了灵敏度分析为设计规划远海风电储能配备工程提供了可靠性见解。

## 1 海上风电源侧混合储能系统架构

我国海上风电开发多位于东南部沿海经济发达地区,大多沿海地区不具备抽水蓄能的建设条件。氢储能具备大容量、高密度的特性<sup>[17]</sup>,不仅能够实现长时间尺度和大空间范围的能源转移,还有望带动当地电力、工业等领域的碳减排。同时电池储能短时充放电能力强,转换效率高被广泛应用于日内调峰或调频<sup>[18]</sup>。为实现两者的优势互补,以电储能和氢储能构建HESS。

在大规模海上风电开发场景下,为挖掘源侧储能经济开发路径,提出如图1所示的HESS规划框架。海上风电场发出功率 $P_{wind}$ ,汇集到综合平台经海上储能设备平抑后通过柔性直流系统输送 $P_{tran}$ 至陆上,在并入大电网前经陆上储能设备平抑,最终并入大电网的功率为 $P_{grid}$ 。本文中源侧储能系统配置位置除陆上并网点附近,还考虑与海上升压换流设备共同建设于综合平台上。海上风电的源侧两点

储能规划问题即是, 已知规划海域风资源情况, 综合考虑储能对波动的平抑效果和投资运行的经济性, 协调海陆电-氢 HESS 配置以获得最优解的过程。该问题的研究将助力海上风电向规模化、深远海化推进。

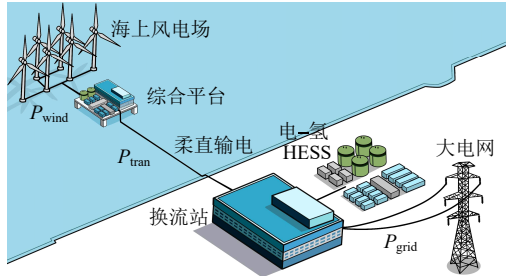


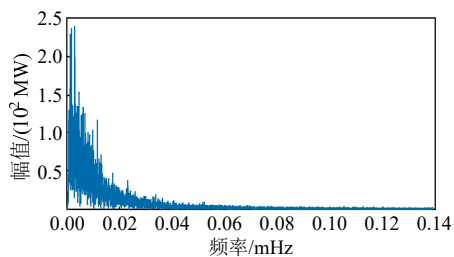
图1 适应海上风电接入的源侧电-氢 HESS 框架  
Fig. 1 Offshore wind power supply side's electro-hydrogen HESS framework

## 2 频域风电出力波动拆分与储能功率分配

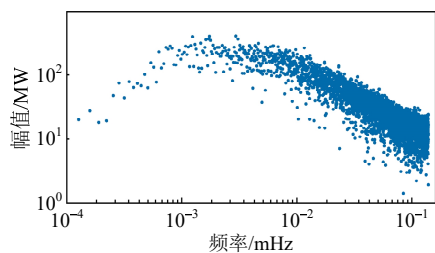
### 2.1 风电功率预处理与分析

与陆上风电不同, 海上障碍物较少, 风电出力短时间内更加稳定; 与此同时受洋流潮汐等因素影响, 海上风电功率的长周期变化显著。风电场出力数据  $P_{wind}$  可以根据规划海域风资源情况结合风场规划结果计算得到, 也可参照海域地理位置相近的已投运风场历史数据。依据我国海上风电并网波动要求<sup>[19]</sup>, 利用抗脉冲平均滤波法<sup>[20]</sup>对输出功率进行平滑得到符合要求的并网功率  $P_{grid}$  和需要平抑的波动功率  $P_{HESS}$ 。

为得到波动功率的组成情况, 将时域数据转换到频域得到如图2所示的幅频特性图。可以看出海上风电波动频谱具有如下特征:



(a) 波动的幅频特性曲线图



(b) 波动的对数幅频特性散点图

图2 海上风电波动功率的频谱分析结果

Fig. 2 Spectral analysis results of the fluctuation of offshore wind power

1) 低频长周期的波动幅值远大于高频短周期波动, 频谱整体上呈现频率越高幅值越小的趋势。

2) 频谱曲线存在“呈峰”现象, 即存在幅值明显高于附近频率的特征波动分量, 这些特征波动分量具有地域特性, 与该海域的地理、气候等因素相关<sup>[21]</sup>。

### 2.2 基于改进 VMD 分解波动分量

针对风电场长周期的大量波动数据频域分解问题, VMD 法可以提供高时频分辨率和处理效率。与传统递归方法不同, VMD 是一种多分辨率、完全非递归的模态变分和信号处理方法<sup>[22]</sup>, 其本质是将原始信号中频率相近的子频谱聚类起来从而得到  $K$  个有限带宽的本征模态函数 (intrinsic modal functions, IMFs)。该方法需要预设模态分解数  $K$ , 其取值过大会造成过分解, 过小会造成欠分解。关于模态分解数的确定方法, 现有研究多为经验值判断或通过智能算法迭代确定。前者偏主观, 而后者结果与所构造的适应度函数有关, 往往缺乏现实意义且难以找到最优解。

为避免模态分解数选择不准确, 进而造成后续储能配置不合理的问题, 提出通过提取波动特征频谱来准确选择分解数。所提基于特征谱的改进 VMD 法分解波动  $P_{HESS}$  的具体步骤如下。

1) 确定模态分解数。

各 IMF 分量的中心频率与  $P_{HESS}$  中幅值较大且集中分布的分量相关联, 因此可以通过风电波动特征频谱来确定模态分解数。采用多重信号分类法 (multiple signal classification, MUSIC) 来有效决策出  $P_{HESS}$  的特征频谱。

$$P_{MUSIC}(\omega) = \frac{1}{a^H(\omega) \left( \sum_{l=m+1}^p V_l V_l^H \right) a(\omega)} \quad (1)$$

式中:  $P_{MUSIC}$  为 MUSIC 功率谱密度函数;  $\omega$  为频率;  $a(\omega) = [1, e^{-j\omega}, \dots, e^{-j(p-1)\omega}]$ ;  $\{V_{m+1}, V_{m+2}, \dots, V_p\}$  为噪声子空间。

将  $P_{HESS}$  作为原始信号输入, 对原始信号数据的自相关矩阵进行特征分解, 排序后得到信号子空间和噪声子空间, 通过式(1)利用两者的正交性计算得到  $P_{MUSIC}$ , 当其在频率轴上呈现明显尖峰时, 说明该峰值对应频率相比于邻近频率幅值更高, 将该频率作为邻近区域波动分量的特征频率。通过全频段谱峰搜索得到所有特征波动的频率估计, 将所有特征频率数确定为分解数。

2) 构建  $P_{HESS}$  变分问题。

确定模态分解数后, 为使模态估计的带宽之和

最小，充分聚类分离频率接近的波动分量，构建如下约束变分模型。

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \quad \sum_k u_k = P_{\text{HES}} , k = 1, 2, \dots, K \end{cases} \quad (2)$$

式中：\*表示卷积运算； $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$ 为分解得到的子模态分量； $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$ 为各模态分量的中心频率； $\delta(t)$ 为脉冲函数。

### 3) 求解变分问题。

引入拉格朗日乘子，将变分问题转化为非约束变分问题，参考文献[23]完成变分问题的求解，输出分解得到的波动分量。

### 2.3 波动分量与储能功率分配映射

针对不同储能形式间的波动量分配问题：传统频域分配方法默认整段波动分量由某一储能承担，极易导致储能过量规划、低利用率等问题。本文所提方法，不仅在时域上利用氢储能功率调节范围广而电储能响应速度快实现了优势互补，在频域上引入模态分配系数矩阵计及多种储能形式协同平抑大幅值波动。模态分配系数矩阵 $\lambda_{\text{HES}}$ 表示如下：

$$\lambda_{\text{HES}} = \begin{bmatrix} \lambda_{\text{bat,on}} \\ \lambda_{\text{bat,off}} \\ \lambda_{\text{hyd,on}} \\ \lambda_{\text{hyd,off}} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \lambda_{\text{bat,on}}^1 \cdots \lambda_{\text{bat,on}}^k \cdots \lambda_{\text{bat,on}}^K \\ \lambda_{\text{bat,off}}^1 \cdots \lambda_{\text{bat,off}}^k \cdots \lambda_{\text{bat,off}}^K \\ \lambda_{\text{hyd,on}}^1 \cdots \lambda_{\text{hyd,on}}^k \cdots \lambda_{\text{hyd,on}}^K \\ \lambda_{\text{hyd,off}}^1 \cdots \lambda_{\text{hyd,off}}^k \cdots \lambda_{\text{hyd,off}}^K \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

$$\sum_{i,j} \lambda_{i,j}^k = 1, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

式中： $\lambda_{\text{bat,on}}$ 、 $\lambda_{\text{hyd,on}}$ 、 $\lambda_{\text{bat,off}}$ 和 $\lambda_{\text{hyd,off}}$ 分别表示海陆电、氢储能的模态分配系数序列，其中同一模态分量的分配系数和为 1。模 $\lambda_{\text{HES}}$ 中的系数通过后续规划模型优化得到。

通过模态分配系数矩阵将波动分量分配给海陆电-氢 HESS 中的各储能模块。各储能负责承担的波动频域分量  $U_{\text{HES}}$  和时域分量  $P_{\text{HES}}$  计算如下。其中各子模态分量的频域复序列与时域功率序列可以通过 DFT 及其逆变换得到。

$$U_{\text{HES}} = [U_{\text{bat,on}} \ U_{\text{bat,off}} \ U_{\text{hyd,on}} \ U_{\text{hyd,off}}]^T = \lambda_{\text{HES}}^T U_{\Sigma} \quad (5)$$

$$P_{\text{HES}} = [P_{\text{bat,on}} \ P_{\text{bat,off}} \ P_{\text{hyd,on}} \ P_{\text{hyd,off}}]^T = \lambda_{\text{HES}}^T P_{\Sigma} \quad (6)$$

式中： $U_{\text{HES}}$ 、 $P_{\text{HES}}$  分别表示海陆电-氢 HESS 的频域复序列矩阵和时域分配功率矩阵； $U_{\Sigma} = [u_1(\omega) \cdots u_k(\omega) \cdots u_K(\omega)]^T$  表示分解后子模态的频域复序列； $P_{\Sigma} = [u_1(t) \cdots u_k(t) \cdots u_K(t)]^T$  表示分解后子模态的时域功率序列； $u_k(\omega)$ 、 $u_k(t)$  分别表示第  $k$  个模态分量的子频谱序列和时域数据。

综上所述，实现待平抑波动功率分解和电-氢

HESS 功率分配的过程如图 3 所示。

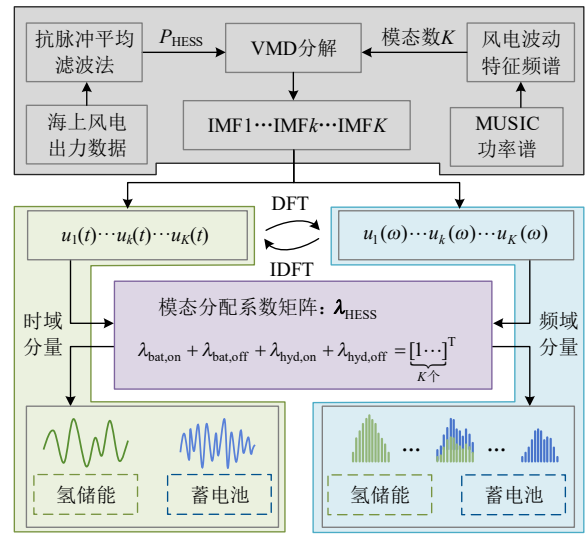


图 3 波动时频域转换关系和 HESS 功率分配示意图

Fig. 3 Time-frequency transformation and HESS power allocation diagram

## 3 海陆电-氢 HESS 多目标规划

### 3.1 海陆电-氢 HESS 联合生命周期成本

成本问题是影响规划决策的主要因素。储能的成本构成复杂，涉及前期设备采购、安装建设、运行维护和后期重置回收各个阶段。全生命周期成本 (life cycle cost, LCC) 模型能够从长远角度评估储能规划的整体经济性。

传统电、氢储能的成本模型多基于单一的陆上配置场景，难以用于海上风电源侧储能规划问题的研究。与陆上配置场景不同，海洋环境复杂多变，海上储能在安装建设、运行维护和回收退役阶段均面临更艰难的环境，这将产生额外的成本。为此对海陆电-氢 HESS 全生命过程展开分析，构建如图 4 所示框架。

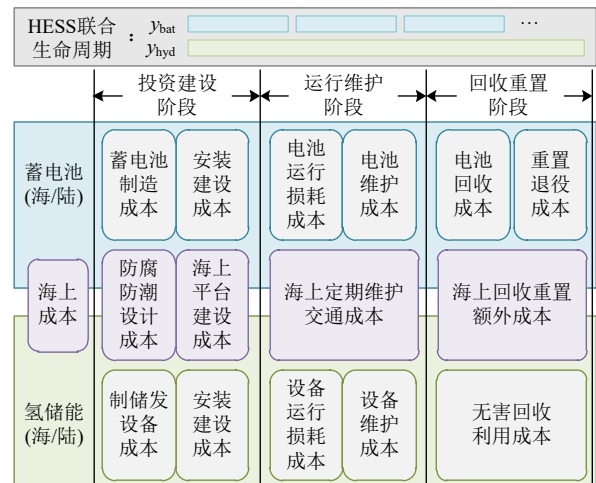


图 4 海陆混合储能系统 LCC 分析

Fig. 4 Hybrid energy storage system LCC basic framework

### 3.1.1 投资建设成本

投资建设成本为一次性投资，通常按年利率折算为初始年化成本后进行计算。相比于陆上储能，海上储能建设阶段需要建设海上平台以满足安装需求，此外还需要考虑额外的运输安装费用。海陆电-氢 HESS 的投资建设成本为

$$C_{\text{HESS}}^{\text{inv}} = \sum_{i \in \{\text{on, off}\}} (\zeta_i^{\text{inv}} C_{\text{HESS},i}^{\text{inv}} + z_i C_{\text{plat}}^{\text{inv}} + z_i C_{\text{build}}^{\text{inv}}) \quad (7)$$

$$z_i = \begin{cases} 0, & i = \text{on} \\ 1, & i = \text{off} \end{cases} \quad (8)$$

$$C_{\text{plat}}^{\text{inv}} = n_{\text{plat}} \nu C_{\text{plat}}^{\text{unit}} \quad (9)$$

$$C_{\text{build}}^{\text{inv}} = n_{\text{inv}} C_{\text{build}}^{\text{unit}} \quad (10)$$

式中： $C_{\text{plat}}^{\text{inv}}$  和  $C_{\text{build}}^{\text{inv}}$  分别表示海上平台和额外建设成本；为满足海上储能防腐防潮的更高设计要求，引入海上储能投资成本系数  $\zeta^{\text{inv}}$ ； $\nu$  为平台体积系数； $n_{\text{plat}}$  和  $n_{\text{inv}}$  为平台面积和建设天数； $C_{\text{HESS},i}^{\text{inv}}$  的详细计算公式见附录 A；下标“on”和“off”分别代表在陆上和海上配置储能的情况。

### 3.1.2 运行维护成本

海上储能容易受到海水侵蚀，寿命损耗更快。海陆电-氢 HESS 的运行维护成本为

$$C_{\text{HESS}}^{\text{o\&m}} = \sum_{i \in \{\text{on, off}\}} (\zeta_i^{\text{o\&m}} C_{\text{HESS},i}^{\text{o\&m}} + z_i C_{\text{labor}}^{\text{o\&m}} + z_i C_{\text{ship}}^{\text{o\&m}}) \quad (11)$$

$$C_{\text{labor}}^{\text{o\&m}} = n_{\text{o\&m}} C_{\text{labor}}^{\text{unit}} \quad (12)$$

$$C_{\text{ship}}^{\text{o\&m}} = n_{\text{o\&m}} C_{\text{ship}}^{\text{unit}} \quad (13)$$

式中： $C_{\text{labor}}^{\text{o\&m}}$  和  $C_{\text{ship}}^{\text{o\&m}}$  分别表示运维人员额外成本和海上运维船的租赁成本； $\zeta^{\text{o\&m}}$  为海上储能基础运维的额外成本系数； $n_{\text{o\&m}}$  为海上额外运维持续时间； $C_{\text{HESS},i}^{\text{o\&m}}$  的详细计算公式见附录 A。

### 3.1.3 回收重置成本

在一个电-氢 HESS 联合生命周期中，考虑折算到初始规划年的回收效益和重置成本如下。

$$C_{\text{HESS}}^{\text{rep\&rec}} = C_{\text{HESS}}^{\text{rep}} - C_{\text{HESS}}^{\text{rec}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_{\text{HESS}}^{\text{rep}} = \sum_{i \in \{\text{on, off}\}} \sum_{n=1}^N \frac{\zeta_i^{\text{rep}} C_{\text{bat},i}^{\text{inv}}}{(1+r)^{ny_{\text{bat}}}} \\ C_{\text{HESS}}^{\text{rec}} = \sum_{i \in \{\text{on, off}\}} \frac{\zeta_i^{\text{rec}} C_{\text{bat},i}^{\text{inv}} [(N+1)y_{\text{bat}} - y_{\text{hyd}}]}{y_{\text{bat}} (1+r)^{y_{\text{hyd}}}} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $\zeta_i^{\text{rep}}$  和  $\zeta_i^{\text{rec}}$  分别表示海陆 HESS 的重置成本系数和回收成本系数， $N$  表示联合生命周期内电储能重置的次数，详见附录 A。

## 3.2 海陆电-氢 HESS 多目标规划

为了综合考虑储能规划的经济性和利用效率，规划模型除了将储能配置的直接成本作为目标函数外，还将海上储能对输变电设备的间接降本效益

和混合储能年能量损耗率纳入目标中进行择优。

### 3.2.1 目标函数

1) HESS 全寿命周期成本。

海上风电源侧电-氢 HESS 规划以经济性作为第一目标。HESS 规划运行成本  $C_{\text{HESS}}^{\text{total}}$  的构成如下：

$$\min F_1 = C_{\text{HESS}}^{\text{total}} = C_{\text{HESS}}^{\text{inv}} + C_{\text{HESS}}^{\text{o\&m}} + C_{\text{HESS}}^{\text{rep\&rec}} + C_{\text{HESS}}^{\text{loss}} \quad (16)$$

式中： $C_{\text{HESS}}^{\text{loss}}$  表示缺电损耗成本，由储能运行过程中缺电量乘以单位补偿电价得到。

2) 海上储能对输变电系统的降本效益。

海上输变电系统的容量通常根据传输功率的最大值设计，海上储能从风电源头对波动功率“削峰”平抑后可以降低海上输变电系统的设计容量，保障设备利用率的同时提升了经济性。为实现降本最大化，将海上储能对输变电设计的降本效益作为本模型的第二目标，具体量化过程如下：

$$\max F_2 = \Delta C_{\text{tran}} = C_{\text{tran, on}} - C_{\text{tran, on+off}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} C_{\text{tran}} = LC_{\text{tran}}^{\text{unit}} P_{\text{tran}}^{\text{set}} + C_{\text{cs}}^{\text{unit}} P_{\text{tran}}^{\text{set}} \\ L = \alpha d \\ P_{\text{tran}}^{\text{set}} = \beta \max P_{\text{tran},t} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $C_{\text{tran, on+off}}$ 、 $C_{\text{tran, on}}$  分别表示同时配置海陆 HESS 和仅配置陆上 HESS 的海上输变电系统设计成本； $C_{\text{tran}}^{\text{unit}}$ 、 $C_{\text{cs}}^{\text{unit}}$  表示柔直输电系统、交流站的单位成本； $P_{\text{tran}}^{\text{set}}$  表示输变电装置设计容量； $L$  为输电海缆的规划长度， $d$  为海上风场离岸距离， $\max P_{\text{tran},t}$  表示传输功率的最大值； $\alpha$  为海缆设计系数， $\beta$  表示传输系数。

3) 能量损耗率。

新能源发电领域一般不考虑能源利用情况，然而储能装置在存储释电能过程中的损耗却不容忽视。电、氢储能的能源转化效率差异显著，须通过优化储能配比以提升电-氢 HESS 的整体能源转化效率，为此，在满足平抑需求前提下，计算配置混合储能系统后的海上风电场年能量损耗率，作为规划模型的第三目标：

$$\min F_3 = 1 - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{P_{\text{HESS},t}} [\eta_{\text{bat}}^+ \eta_{\text{bat}}^- |P_{\text{bat},t}| + \eta_{\text{EL}} \eta_{\text{FC}} |P_{\text{hyd},t}|] \times 100\% \quad (19)$$

式中： $\eta_{\text{bat}}^+$ 、 $\eta_{\text{bat}}^-$ 、 $\eta_{\text{EL}}$ 、 $\eta_{\text{FC}}$  分别表示蓄电池的充放电效率，电解槽和氢燃料电池的能量转换效率； $P_{\text{HESS},t}$  表示  $t$  时刻的待平抑波动功率； $P_{\text{bat},t}$  和  $P_{\text{hyd},t}$  分别表示电储能和氢储能  $t$  时刻的功率值。

### 3.2.2 约束条件

1) 功率平衡约束。

$$P_{\text{HESS},t} = P_{\text{bat},t} + P_{\text{hyd},t} \quad (20)$$

2) 能量传输平衡约束。

$$\begin{cases} P_{wind,t} = P_{tran,t} + P_{HESS,off,t} \\ P_{tran,t} = P_{grid,t} + P_{HESS,on,t} \end{cases} \quad (21)$$

式中： $P_{wind,t}$ 、 $P_{tran,t}$ 、和 $P_{grid,t}$ 分别表示 $t$ 时刻海上风电场发出功率、海缆输送功率和并网功率； $P_{HESS,off,t}$ 和 $P_{HESS,on,t}$ 分别表示 $t$ 时刻海上和陆上电氢混合储能系统的充电功率。

3) 地理资源禀赋约束。

储能规划建设受到海陆区域的地理资源条件的限制，对电-氢 HESS 的容量设置如下约束：

$$\begin{cases} E_{bat,on}^{min} \leq E_{bat,on} \leq E_{bat,on}^{max} \\ E_{bat,off}^{min} \leq E_{bat,off} \leq E_{bat,off}^{max} \\ V_{hyd,on}^{min} \leq V_{hyd,on} \leq V_{hyd,on}^{max} \\ V_{hyd,off}^{min} \leq V_{hyd,off} \leq V_{hyd,off}^{max} \end{cases} \quad (22)$$

式中： $E_{bat,on}$ 和 $E_{bat,off}$ 分别表示陆上和海上的电储能能量容量； $V_{hyd,on}$ 和 $V_{hyd,off}$ 分别表示陆上和海上氢储能的储氢容量。

4) 模态分配系数约束。

由于氢储能适合平抑长周期的大幅度波动，而蓄电池储能适合擅长高频小幅度的调节，可表示为如下约束：

$$\begin{cases} \lambda_{bat}^k = 0, \min f_{u_k} < f_{bat} \\ \lambda_{hyd}^k = 0, \max f_{u_k} > f_{hyd} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $\min f_{u_k}$ 、 $\max f_{u_k}$ 分别表示子模态 $u_k$ 的最小和最大频率； $f_{bat}$ 为蓄电池储能可承担的波动频率下限； $f_{hyd}$ 为氢储能可承担的波动频率上限。模态分配系数与各类储能负责承担功率的耦合关系，还需满足 2.3 节式(3)–(6)。

5) 储能容量匹配约束。

对电-氢 HESS 的时域充放电功率序列和能量序列进行如下计算可以匹配确定储能的功率容量和能量容量：

$$\begin{cases} P_{bat} = \max |P_{bat,t}| \\ P_{EL} = \max P_{hyd,t} \\ P_{FC} = \max(-P_{hyd,t}) \\ E_{bat} = \frac{\max E_{bat,t} - \min E_{bat,t}}{S_{bat}^{up} - S_{bat}^{low}} \\ V_{hyd} = \frac{\max V_{hyd,t} - \min V_{hyd,t}}{S_{hyd}^{up} - S_{hyd}^{low}} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} E_{bat} = \frac{\max E_{bat,t} - \min E_{bat,t}}{S_{bat}^{up} - S_{bat}^{low}} \\ V_{hyd} = \frac{\max V_{hyd,t} - \min V_{hyd,t}}{S_{hyd}^{up} - S_{hyd}^{low}} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $P_{bat}$ 、 $P_{hyd}$ 分别表示电、氢储能的功率容量； $P_{EL}$ 、 $P_{FC}$ 分别表示氢储能系统中电解槽和燃料电池的功率容量； $E_{bat}$ 、 $V_{hyd}$ 分别表示电、氢储能的能量

容量； $S_{bat}^{up}$ 、 $S_{bat}^{low}$ 和 $S_{hyd}^{up}$ 、 $S_{hyd}^{low}$ 分别表示电储能荷电状态和储氢罐填充率的限值。

6) 储能状态约束。

为避免充放电过程中过充过放对电储能健康状态产生影响，保证储氢罐的安全储存，电、氢储能需要满足如下约束：

$$\begin{cases} E_{bat,t} = E_{bat,t-1} + P_{bat,t} \Delta t \\ V_{hyd,t} = V_{hyd,t-1} + \frac{\sigma P_{hyd,t}}{Q_{H_2}} \Delta t \\ S_{bat}^{low} E_{bat} \leq E_{bat,t} \leq S_{bat}^{up} E_{bat} \\ S_{hyd}^{low} V_{hyd} \leq V_{hyd,t} \leq S_{hyd}^{up} V_{hyd} \end{cases} \quad (26)$$

式中： $Q_{H_2}$ 表示标况下单位体积氢气的低位热值； $\sigma$ 为能量单位折算系数。

## 4 INNC 法求解多目标规划

### 4.1 问题描述

上述海上风电源侧电-氢 HESS 多目标规划模型可以写成如下紧凑形式：

$$\begin{cases} \min \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x})\} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \\ \underline{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

式中： $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ 分别代表风电源侧储能规划模型中的等式约束和不等式约束； $\mathbf{x}$ 表示由海陆电-氢储能的功率容量和能量容量等规划变量组成的向量。

### 4.2 INNC 法求解多目标规划问题

在求解多目标问题中，NNC 法通过在目标空间构造法平面施加约束，求解一系列单目标问题，可以得到均匀分布的 Pareto 前沿，详见文献[16]。

如图 5 所示，传统 NNC 法在端点确定的三角形内部均匀取点，通过取点处沿乌托邦面法线方向投影得到的 Pareto 前沿为图中浅蓝色区域。但在大

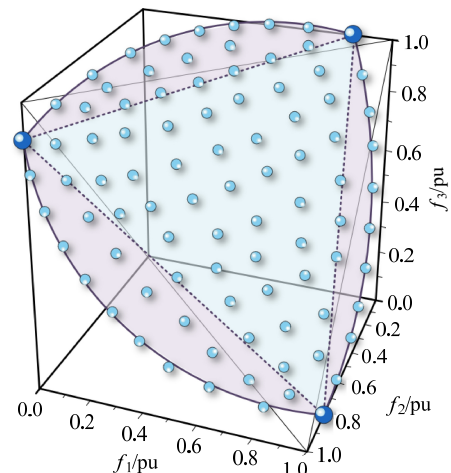


图 5 Pareto 前沿示意图  
Fig. 5 Pareto front region

多数情况下完整的前沿应包含图中紫色圈出区域。前沿的残缺将导致 Pareto 解集的分布广度大打折扣,进而不能为决策者提供完整的决策信息。为此,本文提出改进 NNC 法,利用空间投影拓展乌托邦面,均匀取点后并行求取完整的 Pareto 前沿。具体改进步骤如下。

1) 规格化乌托邦面:在所建立的多目标 HESS 规划问题中,当某一目标最优时,其他 2 个目标通常无法同时达到最差,为得到具有一般性的目标空间,通过线性变换矩阵  $M$  将乌托邦面变换到标准位置。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} f^{1*} - f^U \\ f^{2*} - f^U \\ f^{3*} - f^U \end{bmatrix}^T \quad (28)$$

式中:  $f^{1*}$ 、 $f^{2*}$ 、 $f^{3*}$  分别表示求解单目标问题  $\min f_i(x)$   $i=1,2,3$  所得最优解对应空间中的 3 个点;  $f^U$  为乌托邦点。

如图 6(a)所示,等边  $\Delta A_2 A_4 A_6$  为规格化乌托邦面  $P_1$ ,此时仍无法覆盖整个 Pareto 前沿。

2) 拓展乌托邦面:在规格化空间下,由  $A_0$ — $A_6$  围成的空间多面体  $S_A$  内的点对应的 3 个目标函数值均小于 1 且较为均衡,因此认为多面体  $S_A$  内的这些点所对应的可行解更优。

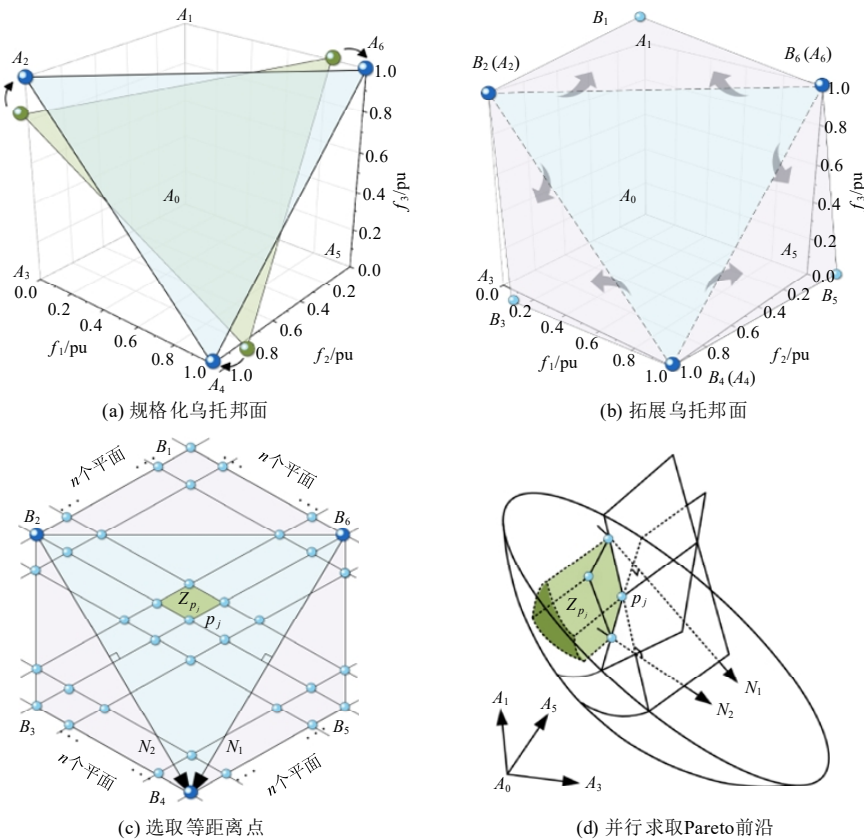


图 6 INNC 法求解多目标问题

Fig. 6 Flow chart of NNC method for solving multi-objective problem

$$S_A: \begin{cases} (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, \\ 0 \leq z \leq 1, x + y + z \leq 1 \end{cases} \quad (29)$$

为获取完整前沿,本文将空间多面体  $S_A$  沿  $P_1$  垂直投影到乌托邦面  $P_1$  上,如图 6(b)所示,投影面为  $\Delta A_2 A_4 A_6$  向外拓展而形成的正六边形  $P_2(B_1 \sim B_6)$ ,穿过  $P_2$  的法向量将沿多面体  $S_A$  边缘完全覆盖其所在区域。因此,在拓展乌托邦面  $P_2$  内部均匀取点后将获得完整的 Pareto 前沿。

3) 选取等距离点:图 6(c)中拓展乌托邦面  $P_2$  上的任意一点  $p_j$  可以用如下公式表达:

$$p_j = \sum_{i=1}^6 \gamma_{ij} B_i, 0 \leq \gamma_{ij} \leq 1 \quad (30)$$

式中:  $\sum \gamma_{ij} = 1$ ,  $B_i$  为  $P_2$  6 个顶点的坐标。选取等距离点时,系数  $\gamma_{ij}$  满足如下等式关系:

$$\gamma_{ij} = \frac{\kappa}{2n+2}, \kappa \in \{0,1,\dots,2n+2\} \quad (31)$$

式中:  $\sum \kappa = 2n+2$ ,  $n$  为  $P_2$  相邻端点间的内插法平面数,  $n$  的取值根据需求确定,选取均匀点数为  $(3n^2+9n+7)$  个。如图 6(c)所示,  $n=2$  时,均匀点数为 37 个。

4) 并行求取 Pareto 前沿:过所有均匀点  $p_j$  作垂直于向量  $N_1$ 、 $N_2$  的平面束,如图 6(c)所示,这些平面束将可行域空间划分为较小的网格区域,在所

有格栅划分区域并行求解一系列  $\min f_3(\mathbf{x})$  的单目标问题, 模型如下,  $p_j$  所确定的空间网格区域  $Z_{p_j}$  为图 6(d) 中绿色填充区域。

$$\begin{cases} \min f_3(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \\ \underline{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{h}}(\mathbf{x}) \\ p_j \in Z_{p_j} \end{cases} \quad (32)$$

值得注意的是, 所取均匀点位于前沿边界外时, 求解结果有 2 种情况: 当均匀点确定的约束空间与可行域有交集时, 非劣解会落到前沿边界上; 当两者没有交集时, 不存在非劣解。将得到的局部最优解储存在非劣解库中, 最后判断库中所有解的支配关系, 对分布聚集的非劣解进行筛选, 更新确定最终的 Pareto 前沿。

改进方法在由规格化空间多面体投影确定的拓展乌托邦面上进行取点, 因而可以适应由于多目标函数和约束条件导致的复杂化 Pareto 前沿边缘求解场景。对于海上风电储能优化配置研究而言, 改进方法对海陆储能建设运行过程中的复杂能量、功率约束具有良好的适应性, 进而能够更全面地求解出 HESS 规划容量的 Pareto 前沿解集。

综上所述, 通过所提 INNC 法高效求解出完整 Pareto 前沿解集后, 采用文献[15]中的平衡决策方法从所得到的海陆电-氢 HESS 规划方案中选取合适的折中均衡解, 规划模型求解流程如图 7 所示。

## 5 算例分析

### 5.1 算例概况

本文参考某海上风电场相关数据进行算例分析。根据全年风电出力情况, 对海上平台和陆上并网点的电-氢 HESS 容量进行规划; 针对未来风电远海化布局趋势构建场景, 随着储能技术的发展给出了对应的电-氢 HESS 容量匹配方案, 验证了本文所提方法的有效性。

所选风电场中心位置离岸距离 100 km, 规划装机容量为 540 MW, 由 54 台风电机组组成。选取附近海域已投运风电场全年历史出力数据(附图 A1)进行分析。风电功率波动满足并网要求<sup>[23]</sup>。电-氢 HESS 中磷酸铁锂电池和氢储能设备相关参数设置见附表 A1, 折现系数  $r$  取 6%。

### 5.2 基于改进 VMD 的频谱拆分结果

按照 2.1 节预处理方法得到风电场待平抑功率  $P_{\text{HESS}}$ , 将其输入得到 MUSIC 功率谱, 对曲线进行归一化处理便于观察, 通过谱峰搜索得到该海域风电波动特征频谱。

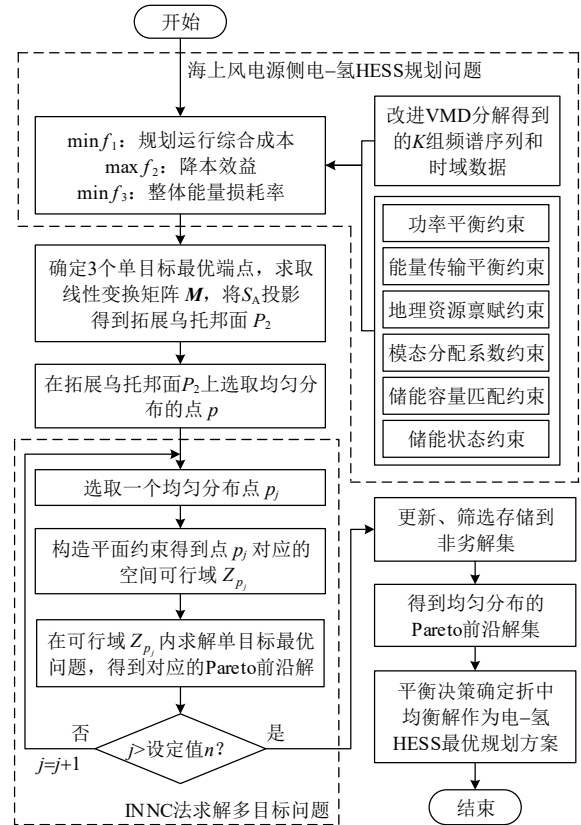


图 7 规划求解流程

Fig. 7 Planning solution process chart

如图 8 所示功率谱呈现较为明显的 16 个特征峰, 峰值点对应的横坐标即风电波动特征频率。

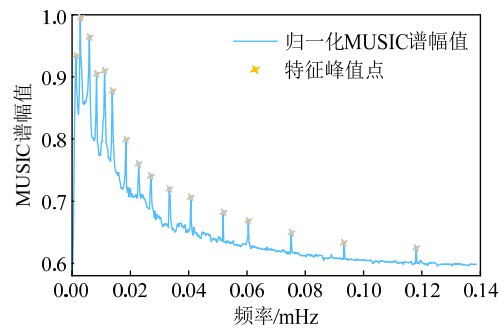


图 8 归一化的 MUSIC 功率谱

Fig. 8 Normalized MUSIC power spectrum

为验证所提改进 VMD 法在处理大范围频域跨度的海上风电出力波动拆分问题时的优势, 分别采用所提方法和 EMD 法对风电出力波动进行分解。根据风电波动特征频率数确定 VMD 分解模态数  $K=16$ , EMD 法参数设置参考文献[9]。

如图 9 所示, 为便于比较 2 种分解方法的拆分效果, 分别将得到的 2 组时域序列通过离散傅里叶逆变换(inverse discrete fourier transform, IDFT)得到各自的频域序列。由图 9(a)可以看出, 采用所提改进 VMD 法分解得到的 IMF 幅值随着频率增大呈现下降趋势。此外, 可以清晰地辨别各 IMF 的频率分

布,不同 IMF 间频域分界明显,呈现峰值由高到低,带宽由窄到宽依次排列的规律。从图 9(b)中可以看出,经过 EMD 分解得到的各 IMF 的频带分布较宽,导致不同 IMF 间频率成分混叠现象严重,无法确定清晰的频段界限。此外,与原始风电波动的幅频曲线相对比,EMD 分解结果在频段端点处出现了许多新的数据,这是其固有的端点效应造成的,而本文所提方法分解结果与原始频谱曲线具有较高重合度。

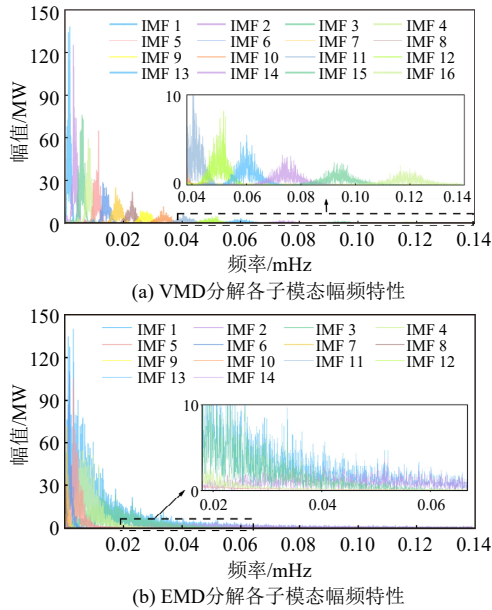


图 9 VMD 与 EMD 分解结果对比分析

Fig. 9 Analysis of VMD and EMD decomposition results

$$\left\{ \begin{aligned} S_1 &= \frac{\sum (u_k - \bar{u}_k)(l - \bar{l})}{\sqrt{\sum (u_k - \bar{u}_k)^2} \sqrt{\sum (l - \bar{l})^2}} \\ S_2 &= \frac{\|l - \sum \bar{u}_k\|_2}{\|l\|_2}, k=1,2,\dots,K \end{aligned} \right. \quad (33)$$

式中:  $S_1$  为相关系数;  $S_2$  为能量损失系数;  $\bar{u}_k$  和  $\bar{l}$  表示子模态  $u_k$  和风电波动原始信号  $l$  的均值。

为具体衡量分解效果和还原度,采用如上所示的 2 个参数做指标进一步评估分解效果。 $S_1$  值越大表示模态混叠越严重,  $S_2$  值越大表示重构信号还原度越低,分别计算 EMD 法和模态数  $K=15$ 、16、17 时 VMD 法评价指标如表 1 所示。

表 1 分解效果评价指标对比  
Table 1 Comparison of decomposition effects

评价指标	EMD	VMD(K=15)	VMD(K=16)	VMD(K=17)
$S_1$	0.214	0.094	0.053	0.059
$S_2$	0.053	0.010	0.009	0.015

从表 1 中的 4 组分解评价指标结果可以看出,EMD 分解法在处理复杂风电波动数据时模态混叠现象明显,且能量损失占比超过 5%。对比 VMD 法的 3 组指标可以看出当模态数  $K=16$  时,评价指

标  $S_1$ 、 $S_2$  均为最优,这表明此时不仅能量损失程度最低,模态混叠程度也降到了最低。由此可见,所提根据风电波动特征频谱确定 VMD 分解模态数的方法,相比于传统主观确定方法考虑了风电波动的本征特性,实现了精准高效分离波动数据中的高低频分量,为后续 HESS 容量规划做好铺垫。

### 5.3 INNC 法求解三目标问题

INNC 法求解时设置  $n=2$ ,在乌托邦面上共选取 37 个均匀点,NNC 法求解时参考文献[16]设置共选取 21 个均匀点,最后判断筛选确定最终的 Pareto 前沿解如图 10 所示,红色点表示平衡决策出的折中均衡解。

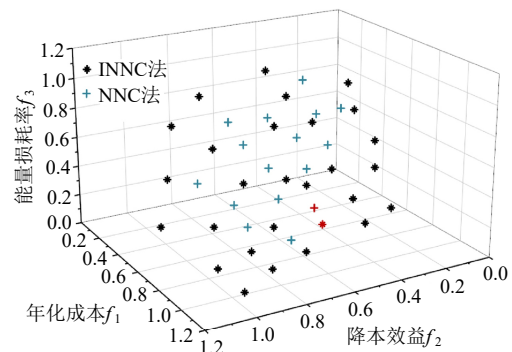


图 10 NNC 与 INNC 法 Pareto 前沿  
Fig. 10 Pareto front of NNC and INNC methods

为对比 2 种方法所求 Pareto 前沿完整性,引入分布广度系数(spread indicator, SI)<sup>[24]</sup>(记为  $I_{SI}$ )作为判断依据。 $I_{SI}$  值越大表明分布越广泛, Pareto 前沿边界越完整。

由图 10 可以看出,INNC 法所求前沿分布更加完整,覆盖范围更广,而传统 NNC 法求得前沿解分布集中在中心三角区域,无法捕捉范围外的 Pareto 解。由表 2 对比通过两法所求折中最优解与单目标解发现:相同决策策略下 INNC 求得的最优解较 NNC 法更优,这是由于传统 NNC 法难以映射完整前沿,遗漏了部分更优规划结果;对比分布广度系数  $I_{SI}$  值发现,所提改进方法提升了前沿 17.72% 的分布广度,为决策者提供了更多样的规划方案。

由表 2 可知,单目标最优得到的结果较为极端。如以储能年化成本最小为优化目标时,储能全部布局在陆上,这会占用并网点附近的土地资源,阻碍

表 2 单目标解与折中最优解  
Table 2 Single objective and compromise optimal solution

优化目标	$f_1$ /万元	$f_2$ /100 万元	$f_3$ %	$I_{SI}$
$\min f_1$	5280.4	0	32.9	—
$\min f_2$	10 331.6	708.3	37.5	—
$\min f_3$	7855.3	243.6	21.7	—
NNC 法折中解	5842.2	364.2	29.2	0.7938
INNC 法折中解	5618.7	415.8	28.1	0.9345

周边发展，导致实际经济效益下降。以海上储能的降本效益最大为优化目标时，由于未考虑其他 2 个目标配置了较多昂贵的海上储能，导致储能年化成本较大。以储能年能量损耗率最小为优化目标时，转换效率较低的氢储能被大量的电储能取代，系统失去了氢储能大容量优势，导致年化成本和降本效益不佳。折中解协调 3 个目标，它的 3 个目标函数值对应单目标最优值都比较接近，并且另外 2 个目标函数值明显更优，因此更适合作为最后的规划方案。

5.4 电-氢 HESS 规划方案对比

为验证通过模态分配矩阵进行规划的效果，设置如下 3 种规划方案对比分析。

方案 1：采用传统截止频率法确定电-氢混合储能的分配关系，最佳频率分段点采用文献[10]所提

方法在模态分界点集合中寻优。

方案 2：采用所提模态分配矩阵模型确定储能分配关系，对年化成本进行单目标寻优。

方案 3：在方案 2 的基础上，进行三目标规划，采用所提 INNOC 法确定折中解。

3 种规划方案求得储能配置情况如表 3 所示。将单目标优化配置结果代入可以得到其他目标的值。为了客观表示各储能系统的容量利用情况，分别计算对应的容量利用率。

$$S_{\eta} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left( \frac{S_t}{S_N} \times 100\% \right) \quad (34)$$

式中：当储能形式为电储能时， $S_t$  和  $S_N$  分别代表实时和规划的容量；当储能形式为氢储能时， $S_t$  和  $S_N$  为储氢罐实时和规划的储存体积。

表 3 电-氢 HESS 规划结果对比  
Table 3 Comparison of planning results for electro-hydrogen HESS

HESS 参数	陆上电储能			海上电储能			陆上氢储能				海上氢储能				优化目标		
	$P_{bat}/$	$E_{bat}/$	$S_{\eta}/$	$P_{bat}/$	$E_{bat}/$	$S_{\eta}/$	$P_{EL}/$	$P_{FC}/$	$V_{hyd}/$	$S_{\eta}/$	$P_{EL}/$	$P_{FC}/$	$V_{hyd}/$	$S_{\eta}/$	$f_1/$	$f_2/$	$f_3/$
	MW	(MW·h)	%	MW	(MW·h)	%	MW	MW	m <sup>3</sup>	%	MW	MW	m <sup>3</sup>	%	万元	100 万元	%
方案 1	70.3	130.8	9.3	—	—	—	90.4	92.2	4318.6	16.5	—	—	—	—	11 284.2	0	33.1
方案 2	35.8	62.2	24.9	—	—	—	54.8	55.1	2406.4	30.4	—	—	—	—	5280.4	0	32.9
方案 3	30.4	49.7	25.3	5.7	9.6	20.4	42.6	45.5	2157.7	30.9	4.2	6.4	208.2	35.1	5618.7	415.8	28.1

在表 3 中，方案 1 采用传统截止频率法，只能确定电、氢 2 种储能的分配关系，因此认为 2 种储能都规划在陆上。结果显示方案 1 的储能配置规模较大，计算储能容量利用率发现电、氢 2 种储能形式的储能利用率都较低。这是由于截至频率法只通过单一频率分段点来实现波动分量的划分，无法进一步对波动精细划分。当某一分段出现较大幅值波动时，只能通过增加储能的规划量来实现平抑，进而造成了容量配置的冗余，导致较高规划成本和较低利用率。方案 2 采用所提模态分配矩阵确定储能分配关系，以年化成本最低为目标计算得到的储能全部规划在陆上。相比于方案 1，该方案下储能利用率和规划成本都显著降低：储能年规划成本降低了 53.21%，电、氢储能，电、氢储能预计容量利用率分别提升至方案 1 的 2.68 倍和 1.84 倍。

方案 3 为考虑海陆两点的 HESS 配置三目标配置结果，对比前两种方案，方案 3 保持了方案 2 储能设备的高容量利用率，这说明所提模态分配系数矩阵法的优越性：通过构建 HESS 对各波动子模态的分配系数，精细划分波动分量的同时，实现了不同储能形式共同平抑同一波动，避免了传统方法的弊端。对比方案 3 和方案 2，发现方案 3 的海陆合计的电储能配置和氢储能配置与方案 2 相当，但年化成本高于方案 2，这是由于海上储能在全生命周

期内会产生额外的成本，但与此同时海上储能配置也带来了可观的降本效益。随着未来海上风电的开发，近海土地资源将趋于窘迫，方案 3 将有利于分担陆上配储的压力。

5.5 电-氢 HESS 容量配置经济性分析

方案 3 所得海陆电-氢 HESS 规划结果的年化成本构成如图 11 所示。

由图 11 可知，陆上氢储能与电储能成本占比最大，分别为 28.45% 和 38.78%，这是由于大部分储能规划建设在陆上，虽然海上储能规划容量只占小部分，但是成本几乎达到了陆上储能的一半，这是因为海上环境恶劣，建设运行维护成本较陆上十分昂贵。电储能充放电频繁，寿命相较于氢储能较短，因此电储能 LCC 中的置换成本占了很大一部

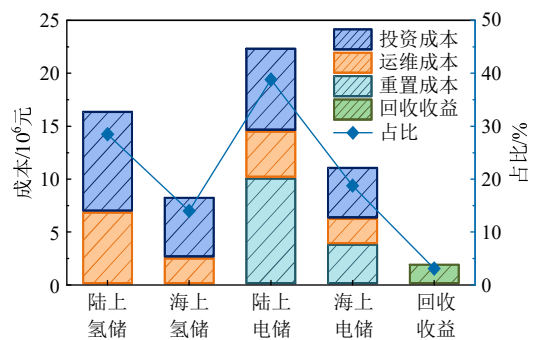


图 11 HESS 联合 LCC 构成柱状图  
Fig. 11 HESS life cycle cost structure graph

分, 陆上电储的置换成本占对应总成本的 45.31%, 海上电储能置换成本占对应总成本的 34.25%。目标函数的收益主要为储能设备回收收益 173.42 万元, 只占了综合年化成本的 3.09%。

## 5.6 电、氢储能分配结果分析

### 5.6.1 海陆电-氢 HESS 模态分配系数的分布

方案 3 规划结果对应的 4 个储能模块的模态分配系数的值如图 12 所示。分配系数的值为负表示某一储能模块负责承担与该模态分量相位相反的波动。

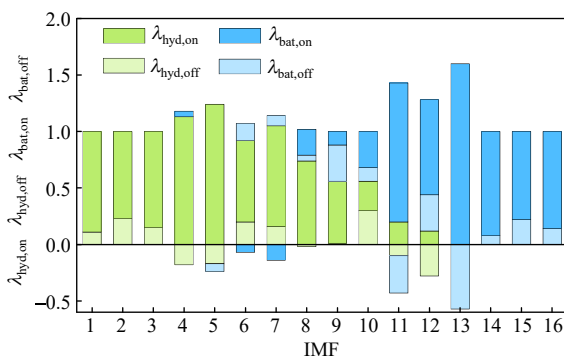


图 12 各子模态分配系数计算结果

Fig. 12 Diagram of calculation results for allocation coefficients of each IMF

由图 12 可知, 氢储能主要承担了频率较低的波动平抑任务(IMF1—IMF3), 而蓄电池储能主要负责平抑高频波动分量(IMF13—IMF16), 2 种储能共同承担了频域中部的波动分量(IMF4—IMF12), 两者频域的相互配合可以有效避免单一储能形式冗余配置的情况, 提高利用率。从整体来看, 几乎所有波动分量都主要由岸上的 2 个储能模块承担, 这是海上储能的高额投资建设成本所导致的。

### 5.6.2 离岸距离对储能分配的影响

“双碳”目标下, 海上风电发展正由浅海向深远海推进, 为探究风电场离岸距离对配置结果的影响, 分别对风电场离岸 70、100、130km 3 个场景进行分析, 计算海、陆电氢储能对应各波动模态的分配系数如图 13 所示。

子模态数越高对应的波动频率越高, 方格颜色越深代表承担比例越高。由图 13 可以看出, 电储能主要集中在高频区域, 氢储能则主要承担低频波动; 颜色较深区域主要集中在  $\lambda_{bat,on}$  和  $\lambda_{hyd,on}$  序列上, 这说明陆上储能规划容量占比较高。对比离岸 70km 和 100km 2 个场景, 发现离岸距离减少, 海上储能的经济性将大打折扣, 这是输变电系统经济占比减少造成的, 进而导致近海岸需要建设大面积的储能设备。对比离岸 130km 和 100km 2 个场景, 发现随着离岸距离的增加, 海上储能比重变高, 在

近海岸土地资源趋紧的背景下可以有效分担陆上储能配置压力。

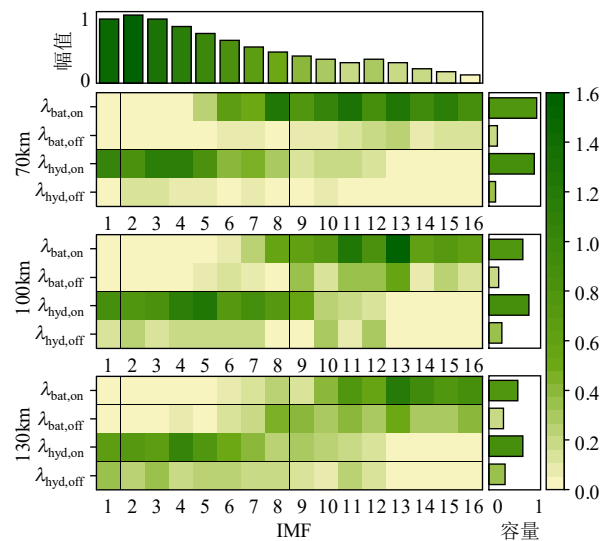


图 13 随离岸距离变化热值

Fig. 13 Energy storage allocation coefficient variation graph with offshore distance

## 6 结论

针对海上风电配储需要考虑风电多时间尺度出力波动的问题, 提出了一种源侧电-氢 HESS 配置的多目标规划方法, 通过算例分析得出如下结论:

1) 所提改进 VMD 分解方法能够结合风资源特征频率确定分解模态数, 与原有方法相比, 可以在分解不同时间尺度的波动量过程中降低能量损失和模态混叠度, 实现不同波动量的有效分解。

2) 通过引入模态分配系数矩阵进行电-氢 HESS 容量分配, 精细地考虑了储能间不同频域配合, 在同样满足波动平抑的前提下, 所需配置的电、氢储能容量更低, 总规划成本减少了 53.21%, 实现了经济有效的储能规划。

3) 所提 INNC 法利用空间投影拓展乌托邦面, 提升了 Pareto 前沿解 17.72% 的分布广度, 可以更全面地提供综合考虑经济性和能量利用率的储能配置方案。

4) 研究表明现阶段与陆上相比海上储能配置成本仍然较高, 然而随着海上风电向深远海推进海上储能对海上输电通道的降本效益逐渐凸显, 在离岸 100km 以上的远海大规模风场侧配置储能将具有经济性。

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

## 参考文献

- [1] 王浩. 截至今年第三季度我国海上风电累计建成并网 3910 万千瓦 [N]. 人民日报, 2024-11-18(14).

- [2] 李子晨, 夏杨红, 孙勇, 等. 考虑氢能长短期储能特性的电氢综合能源系统容量配置方法[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 12-21. LI Zichen, XIA Yanghong, SUN Yong, et al. Optimal sizing of electricity-hydrogen integrated energy system considering multi-timescale operation of hydrogen storage system[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 12-21(in Chinese).
- [3] 高宇歌, 任洲洋, 程欢, 等. 考虑电解槽动态效率特性的电-氢混合储能优化运行方法[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 533-541. GAO Yuge, REN Zhouyang, CHENG Huan, et al. Optimized operation of hybrid electric-hydrogen energy storage considering dynamic efficiency characteristics of electrolyzers[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 533-541(in Chinese).
- [4] 秦磊, 董海鹰, 王润杰. 基于卡尔曼滤波和模型预测控制的混合储能平抑风电功率波动策略[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4286-4297. QIN Lei, DONG Haiying, WANG Runjie. Hybrid energy storage based on Kalman filter and model predictive control to smooth out wind power fluctuation strategy[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4286-4297(in Chinese).
- [5] 王永利, 向皓, 郭璐, 等. 面向多能互补的分布式光伏与电氢混合储能规划优化研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 564-576. WANG Yongli, XIANG Hao, GUO Lu, et al. Research on planning optimization of distributed photovoltaic and electro-hydrogen hybrid energy storage for multi-energy complementarity[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 564-576(in Chinese).
- [6] 房珂, 周明, 武昭原, 等. 面向低碳电力系统的长期储能优化规划与成本效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8282-8294. FANG Ke, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Optimal planning and cost-benefit analysis of long-duration energy storage for low-carbon electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8282-8294(in Chinese).
- [7] 杨天蒙, 宋卓然, 娄素华, 等. 用于提高风电渗透率的复合储能容量优化研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1488-1494. YANG Tianmeng, SONG Zhuoran, LOU Suhua, et al. Sizing of hybrid energy storage system for improving wind power penetration[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1488-1494(in Chinese).
- [8] 黄金鑫, 李华强, 陆杨. 基于蒙特卡洛模拟和频谱分析法的孤岛微电网储能容量配置[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1622-1629. HUANG Jinxin, LI Huaqiang, LU Yang. Energy storage capacity configuration of isolated microgrid based on Monte Carlo simulation and spectrum analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1622-1629(in Chinese).
- [9] 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(in Chinese).
- [10] YU Hao, YANG Xiaojuan, CHEN Honglin, et al. Energy storage capacity planning method for improving offshore wind power consumption[J]. Sustainability, 2022, 14(21): 14589.
- [11] GIOVANNIELLO MA, WU Xiaoyu. Hybrid lithium-ion battery and hydrogen energy storage systems for a wind-supplied microgrid[J]. Applied Energy, 2023, 345: 121311.
- [12] 王晰, 苏开元, 谢小荣. 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[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1428-1434. WANG Xi, SU Kaiyuan, XIE Xiaorong. Underwater hydro pumped storage optimized capacity configuration for offshore wind power utilization[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1428-1434(in Chinese).
- [13] 姜文瑾, 刘巧妹, 杨晓东, 等. 计及气固两相储氢特性的海上风电-多元储能系统优化配置[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 103-112. JIANG Wenjin, LIU Qiaomei, YANG Xiaodong, et al. Optimal allocation of offshore wind power-multiple energy storage system considering gas-solid two-phase hydrogen storage characteristics[J]. Electric Power, 2024, 57(9): 103-112(in Chinese).
- [14] AHMADI B, CEYLAN O, OZDEMIR A, et al. A multi-objective framework for distributed energy resources planning and storage management[J]. Applied Energy, 2022, 314: 118887.
- [15] 李远征, 任潇, 葛磊蛟, 等. 基于可逆固体氧化物电池的氢耦合微电网全生命周期规划-运营研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5169-5184. LI Yuanzheng, REN Xiao, GE Leijiao, et al. Research for entire lifecycle planning-operation of electric-hydrogen coupled microgrid based on reversible solid oxide cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5169-5184(in Chinese).
- [16] 米阳, 周杰, 卢长坤, 等. 基于改进生成对抗网络与碳足迹的配电网多目标双层规划[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8421-8434. MI Yang, ZHOU Jie, LU Changkun, et al. A multi-objective bi-level planning of distribution network based on improved generative adversarial network and carbon footprint[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8421-8434(in Chinese).
- [17] GUO Xinyang, CHEN Xinyu, CHEN Xia, et al. Grid integration feasibility and investment planning of offshore wind power under carbon-neutral transition in China[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2447.
- [18] KEBEDE A A, KALOGIANNIS T, VAN MIERLO J, et al. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112213.
- [19] 国家市场监督管理总局. 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第2部分: 海上风电: GB/T 19963.2—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [20] 王丹阳. 飞轮储能系统在风力发电系统中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- [21] LOPEZ-VILLALOBOS C A, RODRIGUEZ-HERNANDEZ O, MARTÍNEZ-ALVARADO O, et al. Effects of wind power spectrum analysis over resource assessment[J]. Renewable Energy, 2021, 167: 761-773.
- [22] DRAGOMIRETSKIY K, ZOZZO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [23] 颜晨煜, 樊艳芳, 姚波. 采用自适应变分模态分解的混合储能平滑光伏出力波动控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1898-1906. YAN Chenyu, FAN Yanfang, YAO Bo. Strategy for smoothing photovoltaic power fluctuation of hybrid energy storage system using self-adaptive variational mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1898-1906(in Chinese).
- [24] 瞿凯平, 李昊飞, 余涛. 邻近均分轴线法及其在电气互联系统帕累托优化运行中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1990-2000. QU Kaiping, LI Haofei, YU Tao. Adjoin uniform axes method and its application to the Pareto optimal operation of electric and natural gas combined systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1990-2000(in Chinese).



符杨

在线出版日期: 2024-12-24.

收稿日期: 2024-09-27.

作者简介:

符杨(1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为海上风电优化规划、运维、调度等, E-mail: mfdong@126.com;

周颖龙(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为海上风电储能系统规划运行, E-mail: zyl\_bmt@126.com;

葛晓琳(1988), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行, E-mail: gexiaolin2005@126.com;

刁冠勋(1979), 男, 高级工程师, 从事电力系统设备管理方面的工作;

费斐(1976), 男, 高级工程师, 从事电力系统分析与控制方面的工作;

黄阮明(1980), 男, 高级工程师, 从事电网规划及新能源并网技术方面的工作。

(责任编辑 邱丽萍 马晓华)

## 附录 A

海陆电-氢 HESS 的投资建设成本  $C_{\text{HESS},i}^{\text{inv}}$  的详细计算公式如下:

$$C_{\text{HESS},i}^{\text{inv}} = C_{\text{bat},i}^{\text{inv}} + C_{\text{hyd},i}^{\text{inv}} = \frac{r(1+r)^{y_{\text{bat}}}}{(1+r)^{y_{\text{bat}}}-1} (C_{\text{bat},p}^{\text{inv,unit}} P_{\text{bat},i} + C_{\text{bat,e}}^{\text{inv,unit}} E_{\text{bat},i}) + \sum_j \frac{r(1+r)^{y_{\text{hyd}}}}{(1+r)^{y_{\text{hyd}}}-1} C_{\text{hyd},i,j}^{\text{inv,unit}} M_{\text{hyd},i,j} \quad (\text{A1})$$

其中:  $i \in \{\text{on, off}\}, j \in \{\text{EL, FC, TANK}\}$

式中:  $P_{\text{bat}}$  和  $E_{\text{bat}}$  分别为电储能规划功率容量和能量容量;  $j$  表示氢储能系统主要设备, 包括电解槽 EL、氢燃料电池 FC 和储氢罐 TANK;  $C_{\text{hyd},i,j}^{\text{inv,unit}}$  和  $M_{\text{hyd},i,j}$  分别为氢储能系统中设备  $j$  的单位投资成本和规划规模;  $y_{\text{bat}}$ 、 $y_{\text{hyd}}$  分别为电储能、氢储能系统使用年限,  $r$  为投资折现系数。

海陆电-氢 HESS 的投资建设成本  $C_{\text{HESS},i}^{\text{o\&m}}$  的详细计算公式如下:

$$C_{\text{HESS},i}^{\text{o\&m}} = C_{\text{bat},i}^{\text{o\&m}} + C_{\text{hyd},i}^{\text{o\&m}} = C_{\text{bat},p}^{\text{o\&m,unit}} P_{\text{bat},i} + C_{\text{bat,e}}^{\text{o\&m,unit}} E_{\text{bat},i} + \sum_j C_{\text{hyd},i,j}^{\text{o\&m,unit}} M_{\text{hyd},i,j} \quad (\text{A2})$$

式中:  $C_{\text{bat},p}^{\text{o\&m,unit}}$  和  $C_{\text{bat,e}}^{\text{o\&m,unit}}$  分别表示配置单位电储能功率和能量成本;  $C_{\text{hyd},i,j}^{\text{o\&m,unit}}$  表示氢储能系统中设备  $j$  的单位运维成本。

海陆电-氢 HESS 中蓄电池充放电频率高, 性能下降快, 而氢储能寿命较长。由于两者寿命不匹配, 考虑在氢储能寿命周期内对蓄电池进行更换重置。

蓄电池的预计寿命通过规划年运行过程的老化程度评估得到, 采用雨流计数法统计时域功率运行曲线得到充放电深度  $D$  与次数  $Y$  信息。蓄电池在

$D_x$  时折算到额定充放水平下的等效循环次数为

$$N_{\text{eq}}(D_x) = \frac{N_C(D_b)}{N_C(D_x)} = \left(\frac{D_x}{D_b}\right)^{\alpha_1} e^{\alpha_2(1-\frac{D_x}{D_b})} \quad (\text{A3})$$

式中:  $N_C(D_b)$  和  $N_C(D_x)$  表示蓄电池在额定充放电深度  $D_b$  和实际充放电深度  $D_x$  下的循环次数;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为拟合系数。

统计年的总等效循环次数通过等效循环次数求和得到, 蓄电池的预计寿命可以折算为

$$y_{\text{bat}} = \frac{N_{\text{life}}}{\sum Y(D_x) N_{\text{eq}}(D_x)} \quad (\text{A4})$$

式中:  $N_{\text{life}}$  表示蓄电池寿命周期内以额定放电深度运行的总循环次数。

因此, 在电氢 HESS 联合生命周期中, 电储能需要进行重置的次数  $N$  为

$$N = \left\lceil \frac{y_{\text{hyd}}}{y_{\text{bat}}} \right\rceil - 1 \quad (\text{A5})$$

表 A1 电-氢 HESS 技术经济参数  
Table A1 Technical and economic parameters of electro-hydrogen HESS

设备	指标	参数
蓄电池	单位功率容量成本/(元/kW)	1400
	单位能量容量成本/(元/kW·h)	1600
	单位功率运维成本/(元/kW)	30
	单位能量运维成本/(元/kW·h)	5
	充放电效率/%	95
	$S_{\text{SOClow}}/S_{\text{SOCup}}$	0.1/0.9
电解槽	单位功率成本/(元/kW)	3000
	单位运维成本/(元/kW)	60
	法拉第效率/%	96.5
	额定充放次数/次	13 000
燃料电池	单位功率成本/(元/kW)	4800
储氢罐	单位体积投资成本/(元/m <sup>3</sup> )	15 000
	设计寿命/年	30

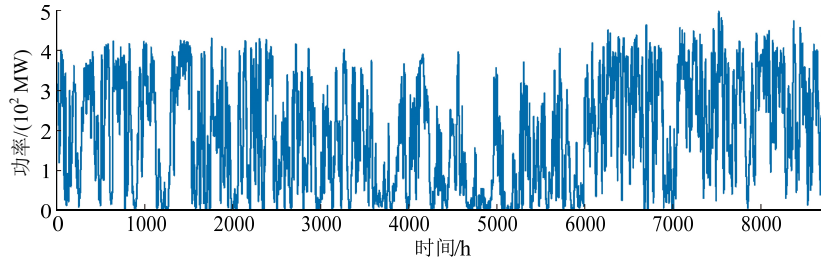


图 A1 海上风电场 8760h 功率曲线

Fig. A1 8760h power curve of offshore wind farm