

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241419

# 基于 CEEMDAN-SAOA 的平抑风电波动混合储能系统 定容优化配置

黄冬梅<sup>1</sup>, 吴冰<sup>1</sup>, 时帅<sup>1</sup>, 李媛媛<sup>1</sup>, 宋巍<sup>2</sup>, 王晓亮<sup>3</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306;

3. 自然资源部东海海域海岛中心, 上海 200136)

**摘要:** 为解决风力发电直接并网所产生的功率波动问题, 提出了一种基于改进阿基米德优化算法融合自适应噪声完全集合经验模态分解(complete ensemble EMD with adaptive noise, CEEMDAN)的容量配置方法。采用由限幅与滑动平均结合的加权滤波算法平滑风电出力, 同时减小平滑结果的滞后性, 得到风电并网功率和混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)参考功率。为了合理分配 HESS 的内部功率, 借助 CEEMDAN 分解 HESS 的参考功率, 得到高低频分量。综合考虑 HESS 功率和容量、荷电状态(state of charge, SOC)与负荷缺点率等因素, 构建以年综合成本最小为目标的容量优化配置模型并采用改进阿基米德优化算法求解。基于实际算例进行仿真分析, 结果表明, 与原始风电并网相比, HESS 配置方案将波动率减少了 13.538%, 平滑度提高了 16.057%。相较于传统单一储能平抑效果更加明显, 减少了容量配置。同时, 对比传统阿基米德优化算法节省了 15.325%的投资成本。

**关键词:** 改进阿基米德算法; 自适应噪声完全集合经验模态分解; 风力发电; 平抑功率波动; 混合储能; 容量配置

## Capacity optimization of a hybrid energy storage system for wind power fluctuation suppression based on CEEMDAN-SAOA

HUANG Dongmei<sup>1</sup>, WU Bing<sup>1</sup>, SHI Shuai<sup>1</sup>, LI Yuanyuan<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>2</sup>, WANG Xiaoliang<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. East China Sea Area and Island Center, MNR, Shanghai 200136, China)

**Abstract:** To address the problem of power fluctuations caused by direct grid connection of wind power, this paper proposes a capacity optimization algorithm based on improved Archimedes optimization algorithm with complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN). A weighted filtering algorithm, combining amplitude limiting and moving average, is used to smooth wind power output and reduce the lag in the smoothed signal, thus generating the reference power for grid-connected wind power and the hybrid energy storage system (HESS). To allocate HESS's internal power, the reference power is decomposed into high- and low-frequency components using CEEMDAN. Taking into account factors such as HESS power and capacity, state of charge (SOC), and load defect rate, a capacity optimization model aiming at the minimum annual comprehensive cost is constructed and solved by improved Archimedes optimization algorithm. Simulation analysis based on real case data shows that, compared with the original grid-connected wind power, the proposed HESS configuration scheme reduces power fluctuation by 13.538% and increases smoothness by 16.057%. Compared with the traditional single energy storage, the proposed method achieves better fluctuation mitigation and reduces the required capacity. Moreover, it lowers investment cost by 15.325% compared to the conventional Archimedes optimization algorithm.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC3101602).

**Key words:** improved Archimedes algorithm; complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN); wind power; power fluctuation suppression; hybrid energy storage; capacity allocation

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFC3101602); 华能集团总部科技项目资助(HNKJ20-H66)

## 0 引言

风力发电作为一种新能源发电方式,与传统能源相比具有显著优势,拥有广阔的发展潜力。然而,风力发电具有间歇性、随机性和波动性等特点,其大规模接入电网将导致功率波动,严重威胁电网的安全与稳定<sup>[1-4]</sup>。

储能系统以其动态收放能量、响应迅速等优点已被风电场广泛应用。引入储能系统到风电场中,可以有效地克服风电的间歇性和波动性缺陷,大大提高风电场输出功率的稳定性。然而,使用单一的储能介质,在平抑波动时不可避免地会导致储能容量配置过大以及投资成本增加等问题,随着储能技术的发展,风电并网功率和混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)被广泛应用于抑制风电功率波动。其中,超级电容器作为功率型储能介质,因其较高的功率密度和快速充放电能力而被用以平抑高频分量;而蓄电池作为高能量密度和高循环效率的储能介质,则被用以平抑低频分量<sup>[5]</sup>。本文选取技术相对成熟的超级电容和蓄电池组成 HESS 用于平抑电网波动。

目前,国内外众多专家和学者对 HESS 的平抑波动和容量分配策略进行了深入研究,并取得了丰硕的成果。文献[6]提出一种基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的电-氢混合储能系统策略,用于缓解风电波动的影响并减少欠补偿量。然而,EMD 中的模态混叠问题可能会影响结果的准确性。文献[7]建立压缩空气储能和全钒液流电池组成的 HESS 双层模型,并通过典型日的数据证明其有效性。文献[8]提出自适应滑动平均算法与 EMD 相结合的 HESS,并采用模糊控制修正蓄电池与超级电容的功率指令,确保并网功率满足波动限制。文献[9]采用变系数指数平滑算法的氢和超级电容储能的 HESS 控制策略,并引入最优分配修正法进行功率分配,来达到风电波动平抑效果。文献[10]针对源-网-荷-储系统,建立电-氢混合储能荷电状态(state of charge, SOC)模型的优化方法来提高消纳水平并降低系统成本。文献[11]充分利用储能介质自身优势,解决了 HESS 中小波变换的小波基选取和分解层数的选择问题。文献[12]采用中值平均法对风电功率进行平滑,并利用离散傅里叶变换(discrete Fourier transformation, DFT)解决传统 EMD 精度低的问题,实现储能容量的合理分配,但是中值平均法会有一定的滞后性。文献[13]采用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)实现 HESS 的优化配置,以解决模态混叠问题,但 VMD

需要自行设定所需模态分解个数。文献[14]考虑容量配置经济性和功率分配的嵌套式双层优化配置,采用基于元模型优化算法进行求解。

文献[15]提出了指数平滑滤波与自适应噪声完全集合经验模态分解(complete ensemble EMD with adaptive noise, CEEMDAN)相结合的混合储能控制策略,克服了传统集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)计算成本高的难题,并有效减小了信号重构过程带来的误差。文献[16]基于概率预测的两阶段随机优化模型,有效解决了 EMD 模态混叠问题,但该模型需要足够长度的数据支撑。文献[17]利用改进的 IEEE33 节点系统,建立了微电网的多目标优化模型,并以信息熵确定权重,最后采用 TOPSIS 法选取最优方案。文献[18]通过不同实验证明了三组电池储能相比双电池储能更有利于提高蓄电池循环寿命。文献[19]提出一种基于电-氢混合储能的两级优化协调调度模型,该模型相比传统算法能够更有效地提升系统的鲁棒性。文献[20-22]基于不同智能算法求解 HESS 中的容量配置问题,证明了这些算法在经济性和平抑效果方面的优势。

与现有文献中提及的方法相比,CEEMDAN 在处理信号时可有效避免小波变换中小波基选取的问题以及 EMD、VMD、EEMD 等信号分解伪模态数多的问题,同时,凭借更好的完备性以及残差中加入成对白噪声,更有效地解决高低频混叠问题,因此本文选取 CEEMDAN 来获取 HESS 的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)。同时,对比常见的优化算法,阿基米德优化算法(Archimedes optimization algorithm, AOA)通过逐步逼近最优解来确保准确性,避免了过早收敛到最优解的风险,其在精度和逼近能力上有显著优势,但是传统 AOA 存在初始化种群多样性差和局部易陷入停滞现象等问题,本文对其进行优化改进,进一步发挥其优越性,提高收敛速度和有效性,更有利于求解目标函数。

在综合考虑 HESS 容量配置问题基础上,本文以风电场为研究对象,提出了基于 CEEMDAN 融合 sin 混沌和指数衰减分段的阿基米德优化算法(sin chaos and diminishing index weights of Archimedes optimization algorithm, SAOA)的风电场 HESS 容量优化配置方法。本文选取超级电容和蓄电池组成的混合储能介质,采用由限幅与滑动平均结合的加权滤波算法平滑风电出力并减小平滑结果的滞后性,得到风电并网功率和 HESS 参考功率。其次,借助 CEEMDAN 分解 HESS 的参考功率,得到高低频分量。最后,本文以 HESS 在整个生命周期内的经济

性为目标, 在满足风电功率平抑要求的前提下, 综合考虑储能容量和功率、SOC、负荷缺点率以及不确定性机会约束等约束条件, 构建了 HESS 年综合成本最小的容量优化配置模型, 并通过算例分析验证了该模型的经济性和有效性。

## 1 风电 HESS 模型

### 1.1 风-储系统拓扑结构

为满足风电并网标准对风电场输出功率的要求, 引入储能系统, 图 1 为风-储并网系统拓扑结构<sup>[23]</sup>。

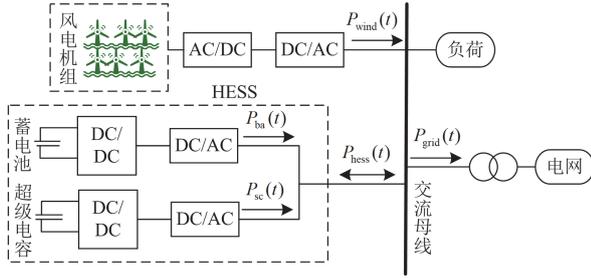


图 1 风-储并网系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of wind-storage and grid connection system

根据图 1 功率关系, 可得

$$\begin{cases} P_{\text{hess}}(t) = P_{\text{grid}}(t) - P_{\text{wind}}(t) \\ P_{\text{hess}}(t) = P_{\text{ba}}(t) + P_{\text{sc}}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{hess}}(t)$  是 HESS 参考功率;  $P_{\text{grid}}(t)$  是并网参考功率;  $P_{\text{wind}}(t)$  是风力发电系统原始输出功率;  $P_{\text{ba}}(t)$  是蓄电池参考功率;  $P_{\text{sc}}(t)$  是超级电容参考功率。

由式(1)可知, HESS 参考功率为风电并网参考功率与其原始输出功率之差, 且当  $P_{\text{hess}}(t) > 0$  时, HESS 放电, 反之 HESS 充电。

### 1.2 风电并网标准

我国风电场风电并网有功功率变化标准如表 1 所示, 风电场并网有功功率数据应符合表 1 中电力系统的运行要求。

表 1 风电场有功功率变化的最大限值

Table 1 Maximum limits of active power variation in wind farms

风电场装机 容量/MW	1 min 功率变化		10 min 功率变化	
	最大值/MW	最小值/MW	最大值/MW	最小值/MW
<30	3		10	
30~150	装机容量/10		装机容量/3	
>150	15		50	

依据表 1 风电场功率变化限值, 定义  $t$  时刻经过 HESS 平抑后接入电网功率为  $P(t)$ , 风电场装机容量为 102 MW, 采样时间  $\Delta t$  为 10 min, 采样的总

时间为一周, 即 168 h, 对应采样点为 1008 个, 则在时间尺度为 10 min 时, 整个风电场的风电并网功率允许波动的范围是  $[P_{10,\min}(t), P_{10,\max}(t)]$ , 表达式为<sup>[24]</sup>

$$\begin{cases} P_{10,\min}(t) = \max_{i=1,2,\dots,1008} P[t - (i-1) \times \Delta t] - \frac{P_{\text{wind}}(t)}{3} \\ P_{10,\max}(t) = \min_{i=1,2,\dots,1008} P[t - (i-1) \times \Delta t] + \frac{P_{\text{wind}}(t)}{3} \end{cases} \quad (2)$$

用波动率来衡量加入混合储能后的平抑效果, 表达式为

$$\omega(t) = \frac{P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{wind}}(t - \Delta t)}{P_{\text{wind},n}} \quad (3)$$

式中:  $\omega(t)$  是风电波动率;  $P_{\text{wind},n}$  是风电机组额定装机容量;  $P_{\text{wind}}(t - \Delta t)$  为 10 min 间隔的采样点原始输出功率。

用平滑度  $S$  来量化风电机组并网功率的平滑程度, 如式(4)<sup>[25]</sup>所示。

$$\begin{cases} S = \frac{T}{\Delta t} \sum_{k=1}^{T/\Delta t} \left[ \frac{\Delta P_{\text{grid}}(k)}{P_{\text{wind},n}} \right]^2 \\ \Delta P_{\text{grid}}(k) = |P_{\text{grid}}(t_0 + k\Delta t) - P_{\text{grid}}[t_0 + (k-1)\Delta t]| \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $T$  是采样点总时间;  $\Delta P_{\text{grid}}(k)$  是风电机组并网功率差的绝对值;  $t_0$  是初始时刻;  $k$  是整数, 它是采样点的倍数。  $S$  越小表示平滑效果越好, 并网时对电网冲击就越小。

## 2 风电波动平抑

通过对相邻采样周期内的风力发电功率差值的限制实现对风力发电系统的平滑滤波, 称为限幅滤波算法<sup>[26]</sup>, 该算法能够降低并网功率的滞后性, 具有良好的实时性, 表达式为

$$P_{\text{lim}}(t) = \begin{cases} P_{\text{grid}}(t-1) + \Delta Y_{\text{pos}}, & P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{grid}}(t-1) > \Delta Y_{\text{pos}} \\ P_{\text{wind}}(t), & \Delta Y_{\text{neg}} < P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{grid}}(t-1) < \Delta Y_{\text{pos}} \\ P_{\text{grid}}(t-1) + \Delta Y_{\text{neg}}, & P_{\text{wind}}(t) - P_{\text{grid}}(t-1) < \Delta Y_{\text{neg}} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{\text{lim}}(t)$  表示经限幅滤波后所得的风电功率;  $\Delta Y_{\text{pos}}$ 、 $\Delta Y_{\text{neg}}$  分别是风电功率波动正、负限幅。

滑动平均滤波算法通过对当前采样点到其采样点之前区间的风电均值进行滤波处理, 得到平滑滤波结果, 表达式为

$$P_{\text{sl}}(t) = \frac{P_{\text{wind}}(t-L+1) + P_{\text{wind}}(t-L+2) + \dots + P_{\text{wind}}(t)}{L} \quad (6)$$

式中:  $P_{\text{sl}}(t)$  表示经滑动平均滤波后所得的风电功率;  $L$  是滑动窗口宽度。

该算法易受到滑动窗口大小的影响,当滑动窗口增大时,系统的并网功率会呈现更平滑的变化趋势,这有助于有效地抑制风电功率的波动,但同时可能会影响风电功率的跟踪效果。为满足 10 min 时间尺度的并网标准,滑动窗口通常设置较大,容易增加并网滞后时间,从而影响 HESS 的有功参考功率。

综合考虑两种算法的优缺点,本文提出了一种融合限幅与滑动平均滤波的加权滤波算法(简称加权滤波算法),该算法能够根据风电波动的程度动态调整权重。在 10 min 时间尺度功率波动率较小时,增大限幅滤波权重,确保短时(如 1 min)范围内的功率变化满足国家标准,同时减少并网滞后时间;反之,功率波动较大时,增大滑动平均滤波的权重来抑制长周期振荡。

考虑加权系数,根据风电 10 min 功率波动率,得到加权滤波算法功率表达式,如式(7)所示。

$$P_{\text{grid}}(t) = (1-\gamma)P_{\text{lim}}(t) + \gamma P_{\text{sl}}(t) \quad (7)$$

式中:  $\gamma$  是滑动平均滤波权重,表达式为

$$\gamma = \frac{\bar{P}_t - \bar{P}_{t-10}}{0.3P_{\text{wind},n}}, \gamma \in [0,1] \quad (8)$$

式中:  $\bar{P}_t$  是前 10 min 风电场的平均功率;  $\bar{P}_{t-10}$  是前 20 min 风电场的平均功率。

动态调整限幅参数,得到  $t$  时刻的正、负限幅参数表达式,如式(9)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Y_{\text{pos}}(t) = \frac{P_{\text{wind},n}}{10} - 60 \times C_{\text{hess}}(t-1), \\ \Delta Y_{\text{pos}}(t) \in \left[ 0, \frac{P_c}{10} \right] \\ \Delta Y_{\text{neg}}(t) = -\frac{P_{\text{wind},n}}{10} - 60 \times C_{\text{hess}}(t-1), \\ \Delta Y_{\text{neg}}(t) \in \left[ -\frac{P_c}{10}, 0 \right] \end{array} \right. \quad (9)$$

式中:  $P_c$  是风电场额定功率;  $C_{\text{hess}}(t-1)$  是  $t-1$  时刻 HESS 累计放电量,表达式为

$$C_{\text{hess}}(t-1) = \int_0^{t-1} P_{\text{hess}}(t) dt \quad (10)$$

### 3 HESS 功率分解与额定容量配置

#### 3.1 基于 CEEMDAN 的 HESS 功率分解

CEEMDAN 是一种递归迭代分解方法,该方法在每一次迭代过程中,首先针对已计算的一阶 IMF 成分,将白噪声添加至残差部分,然后对其进行再次分解,直至预设的迭代函数呈现单调性。与传统

分解方法相比,CEEMDAN 更强调在分解过程中对残差部分添加白噪声,以有效解决白噪声在高低频之间传递的问题。

CEEMDAN 在得到首个 IMF 后就进行平均计算,这种处理方法有效地减少了白噪声对最终结果的影响。CEEMDAN 信号重构的完备性更好,同时获得完备原始信号所需的集成平均处理次数较少,整体计算精度得到提升。

图 2 是 HESS 功率分配策略图,其中  $m_i$  和  $m_k$  分别表示代表高、低频分量,  $i$  和  $k$  都是整数,分别代表高频和低频分量的个数。以  $P_{\text{hess}}(t)$  作为待分解的 HESS 参考功率,则 CEEMDAN 的分解步骤如下。

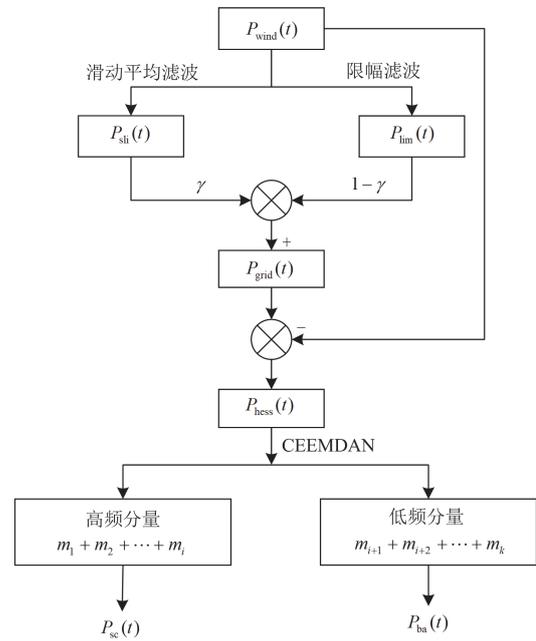


图 2 HESS 功率分配策略

Fig. 2 HESS power distribution strategy

1)  $P_{\text{hess}}(t)$  中加入高斯白噪声,得  $P_{\text{hess}}(t) \pm \sigma b_i(t)$ , 对其进行 EMD 分解,得第 1 阶  $I_{\text{MFI},i}$ , 表达式为

$$E_1[P_{\text{hess}}(t) \pm \sigma b_i(t)] = I_{\text{MFI},i}(t) + r_i, i = 1, 2, \dots \quad (11)$$

式中:  $E_1(\cdot)$  是第 1 阶 IMF;  $\sigma$  是信噪比;  $b_i(t)$  是加入的高斯白噪声;  $I_{\text{MFI},i}(t)$  是经 EMD 分解所得第  $i$  个固有模态函数;  $r_i$  是分解所得余量。

2) 对步骤 1) 中  $N$  阶 IMF 相加并求均值,得到 CEEMDAN 的第 1 阶 IMF, 即

$$\overline{I_{\text{MFI}}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\text{MFI},i}(t) \quad (12)$$

3) 将原始信号与步骤 2) 的第 1 阶 IMF 作差,得

第 1 阶余量  $r_1(t)$ , 如式(13)所示。

$$r_1(t) = P_{\text{hess}}(t) - \overline{I_{\text{MF1}}}(t) \quad (13)$$

4) 在步骤 3) 中加入高斯白噪声, 并进行步骤 1) 的分解, 得到新的  $N$  阶 IMF, 即

$$E[r_1(t) \pm \sigma b_i(t)] = I_{1,i}(t) \quad (14)$$

式中:  $I_{1,i}(t)$  表示对第 1 阶余量进行 EMD 得到的新的  $N$  阶固有模态函数。

5) 对步骤 4) 中的  $N$  阶 IMF 相加并求均值, 得到 CEEMDAN 的第 2 阶 IMF, 即

$$\overline{I_{\text{MF2}}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{1,i}(t) \quad (15)$$

6) 步骤 3) 所得余量与步骤 5) 第 2 阶 IMF 作差, 得第 2 阶余量  $r_2(t)$ , 如式(16)所示。

$$r_2(t) = r_1(t) - \overline{I_{\text{MF2}}}(t) \quad (16)$$

7) 重复步骤 5) 和步骤 6), 当  $r(t)$  为单调函数时分解结束。结果共有  $K$  个 IMF, 原始信号  $P_{\text{hess}}(t)$  最终分解结果为

$$P_{\text{hess}}(t) = \sum_{k=1}^K \overline{I_{\text{MF},k}}(t) + r(t) \quad (17)$$

### 3.2 HESS 额定容量配置

利用 CEEMDAN 对 HESS 参考功率进行分解, 得到多个具有不同时间尺度的 IMF 成分, 并确定一个分界点用于将高于该分界点的 IMF 叠加分配给功率型储能介质, 其余 IMF 则分配给能量型储能介质。最后依据理论公式得到超级电容与蓄电池的额定功率与容量。

设超级电容与蓄电池的额定功率分别是  $P_{\text{sc,rate}}$ 、 $P_{\text{ba,rate}}$ , 额定容量分别是  $E_{\text{sc,rate}}$ 、 $E_{\text{ba,rate}}$ , 考虑其充放电效率, 则额定功率配置表达式为

$$P_{\text{sc,rate}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P_{\text{grid}}(t)| \eta_{\text{sc,c}}, \\ \max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P_{\text{grid}}(t)| \\ \eta_{\text{sc,f}} \end{array} \right\} \quad (18)$$

$$P_{\text{ba,rate}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P_{\text{grid}}(t)| \eta_{\text{ba,c}}, \\ \max_{t \in (t_0, t_0+T)} |P_{\text{grid}}(t)| \\ \eta_{\text{ba,f}} \end{array} \right\} \quad (19)$$

式中:  $\eta_{\text{sc,c}}$ 、 $\eta_{\text{sc,f}}$  是超级电容充、放电效率;  $\eta_{\text{ba,c}}$ 、 $\eta_{\text{ba,f}}$  是蓄电池充、放电效率。

根据其各自补偿或吸收的功率, 计算超级电容或蓄电池在  $t_0 \sim t$  内吸收或补偿的功率  $\Delta E(t)$ , 表达式为(20), 若  $\Delta E(t) < 0$ , 则储能设备对风电并网系统进行功率补偿; 反之, 则储能设备吸收功率。

$$\begin{cases} \Delta E_{\text{sc}}(t) = \int_0^t P_{\text{sc}}^+(t) \times \eta_{\text{sc,c}} + \frac{P_{\text{sc}}^-(t)}{\eta_{\text{sc,f}}} dt \\ \Delta E_{\text{ba}}(t) = \int_0^t P_{\text{ba}}^+(t) \times \eta_{\text{ba,c}} + \frac{P_{\text{ba}}^-(t)}{\eta_{\text{ba,f}}} dt \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_{\text{sc}}^+(t)$  和  $P_{\text{ba}}^+(t)$  分别是超级电容和蓄电池  $t$  时刻充电功率;  $P_{\text{sc}}^-(t)$  和  $P_{\text{ba}}^-(t)$  分别是超级电容和蓄电池  $t$  时刻放电功率。对吸收或者补偿的功率在  $0 \sim t$  内取绝对值, 并取绝对值后的最大值作为额定容量, 表达式为

$$\begin{cases} E_{\text{sc,rate}} = \max_0^t \{ |\Delta E_{\text{sc}}(t)|, t = 0, 1, 2, \dots, t \} \\ E_{\text{ba,rate}} = \max_0^t \{ |\Delta E_{\text{ba}}(t)|, t = 0, 1, 2, \dots, t \} \end{cases} \quad (21)$$

## 4 HESS 经济性分析与求解

为确保储能容量配置最优, 在考虑超级电容和蓄电池的 IMF 分界点情况下, 结合储能配置的成本因素, 构建 HESS 全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)<sup>[27-28]</sup>优化配置模型, 并进行定容求解。

### 4.1 目标函数

LCC 是指在固定的系统使用寿命期内, 所产生的直接或间接支出的总和<sup>[29-30]</sup>。以此为基础, 构建 HESS 经济性评估模型。建立 HESS 全寿命周期成本最优配置目标函数, 如式(22)所示。

$$\min C = C_{\text{in}} + C_{\text{ma}} - C_{\text{rep}} - C_{\text{earn}} \quad (22)$$

式中:  $C$  是 HESS 年综合成本;  $C_{\text{in}}$ 、 $C_{\text{ma}}$ 、 $C_{\text{rep}}$ 、 $C_{\text{earn}}$  分别是投资成本、维护成本、回收残值收益、风电波动补偿收益。

1) 投资成本: 储能介质投资成本主要包括容量配置成本和功率配置成本。

$$\begin{cases} C_{\text{in}} = C_{\text{in}}^{\text{sc}} + C_{\text{in}}^{\text{ba}} \\ C_{\text{in}}^{\text{sc}} = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{\text{sc}}}(k_p^{\text{sc}} P_{\text{in}}^{\text{sc}} + k_e^{\text{sc}} E_{\text{in}}^{\text{sc}})}{\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{\text{sc}}} - 1} \\ C_{\text{in}}^{\text{ba}} = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{\text{ba}}}(k_p^{\text{ba}} P_{\text{in}}^{\text{ba}} + k_e^{\text{ba}} E_{\text{in}}^{\text{ba}})}{\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{\text{ba}}} - 1} \\ L'_c = L_c e^{x_2 \left(1 - \frac{D}{D_n}\right)} \left(\frac{D_n}{D}\right)^{x_1} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $C_{\text{in}}^{\text{sc}}$ 、 $C_{\text{in}}^{\text{ba}}$  分别是超级电容和蓄电池年投资成本;  $\varepsilon$  是贴现率;  $T_{\text{sc}}$ 、 $T_{\text{ba}}$  分别是超级电容和蓄电池运行寿命;  $k_p^{\text{sc}}$ 、 $k_e^{\text{sc}}$  分别是超级电容单位功率和容量成本;  $P_{\text{in}}^{\text{sc}}$  和  $P_{\text{in}}^{\text{ba}}$  分别是超级电容和蓄电池配置功率;  $k_p^{\text{ba}}$ 、 $k_e^{\text{ba}}$  分别是蓄电池单位功率和容量成本;

$E_{in}^{sc}$  和  $E_{in}^{ba}$  分别是超级电容和蓄电池配置容量； $D_n$  和  $D$  分别是额定和实际放点深度； $L_c$  和  $L'_c$  分别是  $D_n$  和  $D$  对应的循环次数； $x_1$  和  $x_2$  是系数。

依据等效循环寿命法，得到折算后蓄电池运行寿命  $T_{ba}$ ，如式(24)所示。

$$\begin{cases} T_{ba} = \frac{L_c}{\sum_{i=1}^m L'_i} \\ L'_i = \frac{L_c}{L'_c} \end{cases} \quad (24)$$

2) 维护成本：维护成本按容量投资成本以及维护系数计算。

$$\begin{cases} C_{ma} = C_{ma}^{sc} + C_{ma}^{ba} \\ C_{ma}^{sc} = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{sc}} k_{ma}^{sc} k_e^{sc} E_{in}^{sc}}{(1+\varepsilon)^{T_{sc}} - 1} \\ C_{ma}^{ba} = \frac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{ba}} k_{ma}^{ba} k_e^{ba} E_{in}^{ba}}{(1+\varepsilon)^{T_{ba}} - 1} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $C_{ma}^{sc}$ 、 $C_{ma}^{ba}$  分别是超级电容和蓄电池的维护成本； $k_{ma}^{sc}$ 、 $k_{ma}^{ba}$  分别是超级电容和蓄电池维护成本估算系数。

3) 回收残值收益：储能达到使用年限回收利用，其回收残值表达式为

$$\begin{cases} C_{rep} = C_{rep}^{sc} + C_{rep}^{ba} \\ C_{rep}^{sc} = \frac{\varepsilon k_{rep}^{sc} (1+\varepsilon)^{T_{sc}} (k_p^{sc} P_{in}^{sc} + k_e^{sc} E_{in}^{sc})}{[(1+\varepsilon)^{T_{sc}} - 1][\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{sc}} - 1]} \\ C_{rep}^{ba} = \frac{\varepsilon k_{rep}^{ba} (1+\varepsilon)^{T_{ba}} (k_p^{ba} P_{in}^{ba} + k_e^{ba} E_{in}^{ba})}{[(1+\varepsilon)^{T_{ba}} - 1][\varepsilon(1+\varepsilon)^{T_{ba}} - 1]} \end{cases} \quad (26)$$

式中： $C_{rep}^{sc}$ 、 $C_{rep}^{ba}$  分别是超级电容和蓄电池残值收益； $k_{rep}^{sc}$ 、 $k_{rep}^{ba}$  分别是超级电容和蓄电池残值回收率。

4) 风电波动补偿收益：平滑风电波动可降低考核罚款，储能产生的年波动补偿收益表达式为

$$C_{earn} = \delta C_{pri} C_{und}^{24h} \quad (27)$$

式中： $\delta$  是一年中的总天数； $C_{pri}$  是上网电价； $C_{und}^{24h}$  是 HESS 单日降低的波动考核处罚电量。

## 4.2 约束条件

1) 储能系统容量约束

$$\begin{cases} E_{sc,min} < E_{sc}(t) < E_{sc,max} \\ E_{ba,min} < E_{ba}(t) < E_{ba,max} \end{cases} \quad (28)$$

式中： $E_{sc}(t)$  和  $E_{ba}(t)$  分别是超级电容和蓄电池的容量； $E_{sc,max}$  和  $E_{sc,min}$  分别是超级电容的容量最大值和

最小值； $E_{ba,max}$  和  $E_{ba,min}$  分别是蓄电池的容量最大值和最小值。

2) 储能系统功率约束

为了保证储能系统正常工作，超级电容和蓄电池的充电功率不应超过其功率最值，即

$$\begin{cases} P_{sc,min} \leq P_{sc}(t) \leq P_{sc,max} \\ P_{ba,min} \leq P_{ba}(t) \leq P_{ba,max} \\ P_{ba}(t) \leq \mu \times \Delta P \end{cases} \quad (29)$$

式中： $\Delta P$  是不平衡功率； $\mu$  是  $\Delta P$  中基本功率系数。

3) SOC 约束

为了避免超级电容电压过高以及蓄电池过充过放，需要将其 SOC 控制在一定范围内。

$$\begin{cases} S_{OCsc,min} \leq S_{OCsc}(t) \leq S_{OCsc,max} \\ S_{OCba,min} \leq S_{OCba}(t) \leq S_{OCba,max} \end{cases} \quad (30)$$

式中： $S_{OCsc,max}$  和  $S_{OCsc,min}$  分别是超级电容的荷电状态最大值和最小值； $S_{OCba,max}$  和  $S_{OCba,min}$  分别是蓄电池的荷电状态最大值和最小值。

4)  $f_{psp}$  约束

负荷缺电率  $f_{psp}$  评估 HESS 的供电可靠性， $f_{psp}$  越小，供电可靠性越高；反之，可靠性越低。

$$\begin{cases} f_{psp} = \frac{\int_0^{t_n} \{P_{load}(t) - [P_{wind}(t) + P_{hess}(t)\eta_1\eta_2]\} dt}{\int_0^{t_n} P_{load}(t) dt} \\ f_{psp} \leq f_{psp,max} \leq 0.05 \end{cases} \quad (31)$$

式中： $t_n$  是不同采样点对应的的时间； $\eta_1$  是直流变换器转换效率； $\eta_2$  是储能系统放电转换效率； $P_{load}(t)$  为负荷功率。

5) 不确定性机会约束

允许风电的实际发电量与预测值之间存在一定的差异。

$$P_x(P_{wind,t} - \hat{P}_{wind,t} \leq \xi) \geq 1 - \delta \quad (32)$$

式中： $P_x$  表示风电实际发电量与预测值之间偏差的概率水平； $P_{wind,t}$  和  $\hat{P}_{wind,t}$  分别是  $t$  时刻风电的实际发电量和预测发电量； $\xi$  是允许的风电预测偏差范围； $\delta$  是允许超出预测偏差约束的阈值水平。

## 4.3 求解方法

将上述混合储能系统储能设备容量优化模型转换为求最小成本问题，采用单目标优化求解，对 AOA 进行改进，针对其初始化种群多样性差、全局搜索能力精度低以及局部易陷入停滞现象等问题，引入混沌映射进行优化<sup>[31-32]</sup>，在混沌变量空间[0,1]中建立映射关系，并将其映射到个体的最优变量空间中。

其中, 加入的  $\sin$  混沌映射为

$$\begin{cases} X_{n+1} = \sin\left(\frac{2}{X_n}\right), n=0,1,2,\dots,N \\ -1 \leq X_n \leq 1, X_n \neq 0 \end{cases} \quad (33)$$

将  $\sin$  混沌序列映射到解空间, 求出种群  $X$  及其种群个体  $X_{i+1,j}$ 。

$$\begin{cases} X = (X_i, X_j), i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,d_{im} \\ X_{i+1,j} = \sin\left(\frac{2}{X_{i,j}}\right) \end{cases} \quad (34)$$

式中:  $X_{i+1,j}$  是第  $i+1$  个种群的第  $j$  维值;  $d_{im}$  为解空间的维度。

加入指数递减权值  $\mathcal{G}$  来更新 AOA 以避免局部最优问题, 则全局搜索阶段的个体位置为

$$x_i^{g+1} = \mathcal{G}x_i^g + r_{\text{rand}} \times c_1 da_{i-\text{norm}}^{g+1} (x_{\text{rand}} - x_i^g) \quad (35)$$

局部搜索阶段的个体位置为

$$\begin{cases} x_i^{g+1} = \mathcal{G}x_{\text{best}}^g + r_{\text{rand}} \times c_2 dF \times \\ a_{i-\text{norm}}^{g+1} (c_3 \times T_F \times x_{\text{best}}^g - x_i^g) \\ a_i^{g+1} = \frac{\rho_{\text{rand}} + v_{\text{rand}} + a_{\text{rand}}}{\rho_i^{g+1} v_i^{g+1}} \\ T_F = e^{-\frac{g-g_{\text{max}}}{g_{\text{max}}}} \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $x_i^g$  是第  $i$  个个体在第  $g$  代的位置;  $r_{\text{rand}}$  是随机数,  $r_{\text{rand}} \in (0,1)$ ;  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$  都是常数;  $d$  是密度因子;  $x_{\text{rand}}$  是第  $i$  个随机个体在第  $g$  代的位置;  $x_{\text{best}}^g$ 、 $x_{\text{best}}$  分别表示第  $g$  代的最优个体、全局最优个体;  $F$  取  $\pm 1$  用于决定个体位置更新的方向;  $T_F$  是转移因子;  $a_i^{g+1}$  是第  $i$  个个体在第  $g+1$  代的加速度;  $\rho_{\text{rand}}$ 、 $v_{\text{rand}}$  和  $a_{\text{rand}}$  分别是随机碰撞个体的密度、体积和加速度;  $\rho_i^{g+1}$  是第  $i$  个个体在第  $g+1$  代的密度;  $v_i^{g+1}$  分别是第  $i$  个个体在第  $g+1$  代的体积;  $g$  表示当前迭代次数;  $g_{\text{max}}$  表示总的迭代次数。

对加速度标准化为

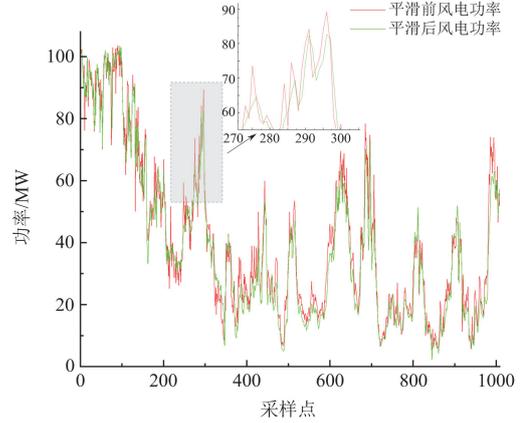
$$a_{i-\text{norm}}^{g+1} = l + u \times \frac{a_i^{g+1} + a_{\text{min}}}{a_{\text{max}} \times a_{\text{min}}} \quad (37)$$

式中:  $l$  和  $u$  为常数;  $a_{\text{max}}$  和  $a_{\text{min}}$  分别表示加速度的最大值和最小值。

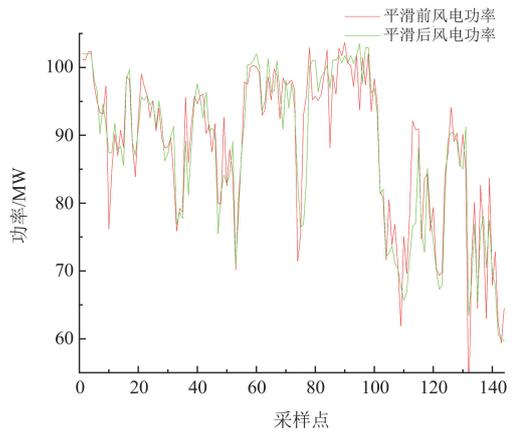
## 5 算例分析

本文以我国某 102 MW 实际风电场为研究对象, 选取某年单周实测数据(间隔 10 min)为研究对象, 在 MATLAB 2019a 中进行仿真验证。根据并网

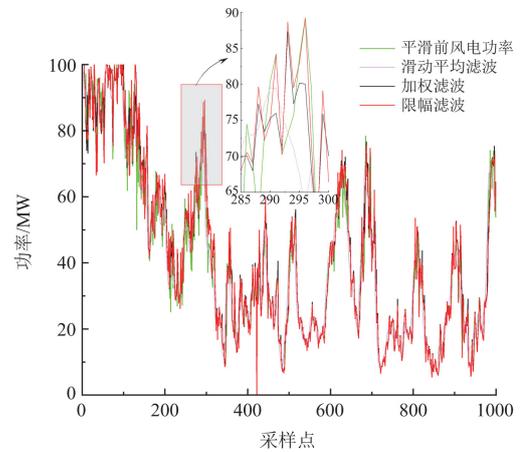
标准, 确定滤波窗口长度为 7, 采用加权滤波算法平抑风电原始出力, 将 10 min 内功率波动限制在并网标准以下。图 3(a)和图 3(b)是经加权滤波后的并网功率曲线图, 图 3(c)和图 3(d)则是对比滑动平均滤波算法、加权滤波算法、限幅滤波算法、平滑风电功率波动的曲线图。



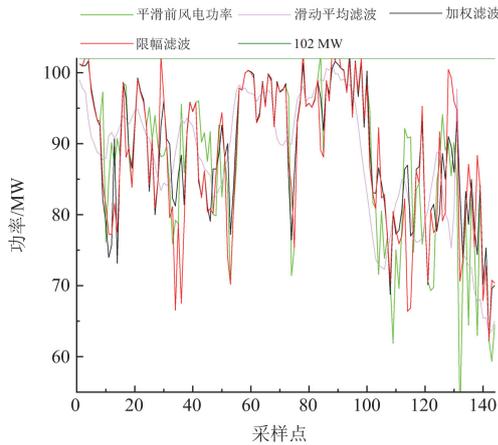
(a) 风电场功率波动平抑曲线图(单周)



(b) 风电场功率波动平抑曲线图(单周某天)



(c) 滤波对比图(单周)



(d) 滤波对比图(单周某天)

图 3 不同滤波算法平抑风电波动效果图

Fig. 3 Wind power fluctuations suppression with different filter algorithms

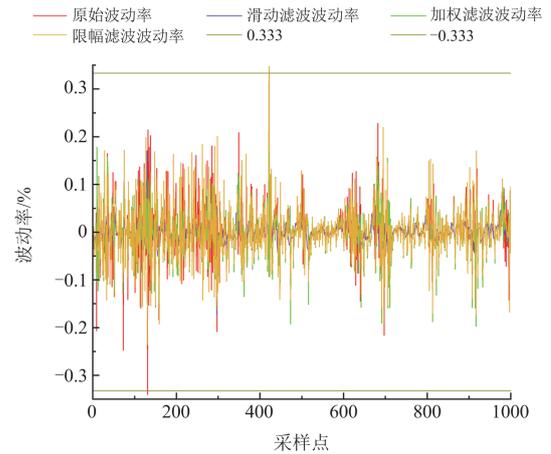
由图 3 可知, 经加权滤波算法平滑后风电并网功率相对于原始功率有明显的优化, 不仅减少了滑动平均滤波带来的滞后性, 而且提升了限幅滤波算法的平滑性。由图 4 波动率效果图可知, 经加权滤波平滑后并网波动率均在  $(-0.333\%, 0.333\%)$  范围内, 风电出力均满足我国并网要求。

表 2 是风电采样点计算效果, 将特殊点(即原始采样点中波动率最大的点)与其对应并网结果进行对比。由表 2 结果可知, 平抑前 10 min 内风电波动量超过并网标准最大值 34 MW, 并网后最大波动量为 20.959 MW, 同时平滑度提高了 16.057%。图 3(c)和图 3(d)对比了不同滤波算法的风电平抑效果, 经本文加权滤波算法后, 10 min 内功率变化最大值下降至 20.959 MW, 最大波动率下降至 20.548%, 对应样本点 131 处(对应时间 21:40), 原始风电功率由 84.833 MW 经滑动平均滤波和限幅滤波后的并网功率分别为 97.735 MW 和 94.768 MW, 而经加权滤波算法平滑后的并网功率为 93.154 MW, 混合储能系统分别节省了 4.581 MW 和 1.614 MW 的风电出力, 从而降低了 HESS 容量配置, 减少了投资成本。因此, 本文所提方法对长时间尺度的波动平抑效果更好。

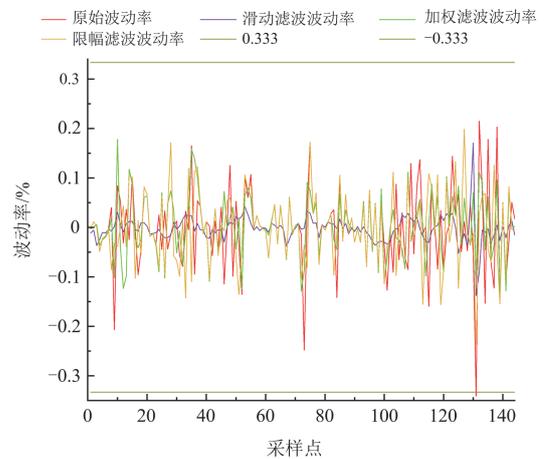
表 2 风电采样点计算效果

Table 2 Calculation effect of wind power sampling points

参数	10 min 最大 波动量/MW	10 min 最大 波动率/%	平滑度 指标/%
原始	34.768	34.086	30.553
并网	20.959	20.548	14.496



(a) 滤波算法的波动率(单周)



(b) 滤波算法的波动率(单周某天)

图 4 不同滤波算法波动率对比图

Fig. 4 Comparison of volatility of different filter algorithms

在获得风电并网的参考功率后, 依据功率关系得到 HESS 的参考功率, 则对应各采样点的 HESS 工作状态如图 5 所示。

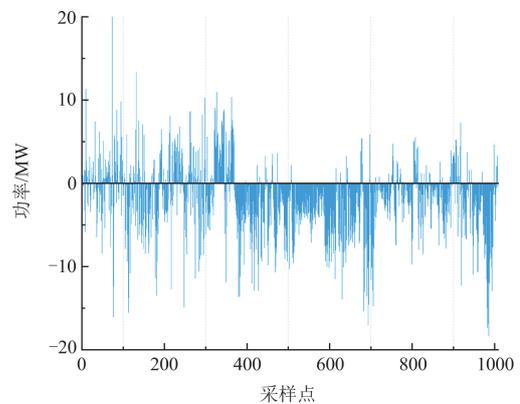


图 5 HESS 工作状态

Fig. 5 HESS working state

利用 CEEMDAN 对图 5 中 HESS 工作状态进行分解, 得到频率由高到低的 9 个 IMF, 如图 6 所示。图 7 是图 6 对应的 IMF 的瞬时频率-采样点曲线, 通过分析,  $I_{MF6}$  与  $I_{MF7}$  模态混叠最小, 则取  $k=6$  作为频率划分分界点重构  $P_{hess}(t)$ , 将低于  $I_{MF6}$  频率的分配给蓄电池参考功率, 大于或等于  $I_{MF6}$  频率的分配为超级电容参考功率, 对应储能介质输出功率参考值为

$$P_{ba}(t) = I_{MF7} + I_{MF8} + I_{MF9} \quad (38)$$

$$P_{sc}(t) = I_{MF1} + I_{MF2} + I_{MF3} + I_{MF4} + I_{MF5} + I_{MF6} \quad (39)$$

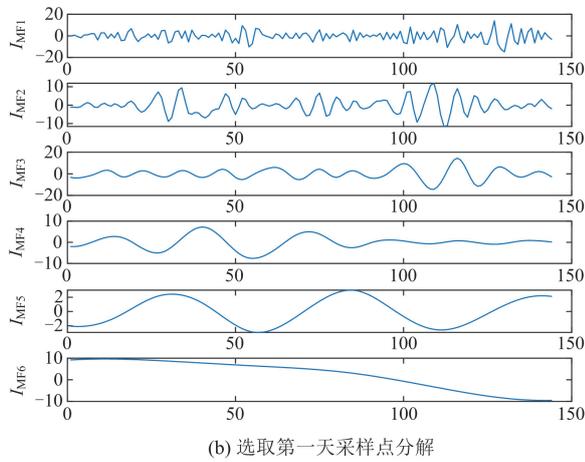
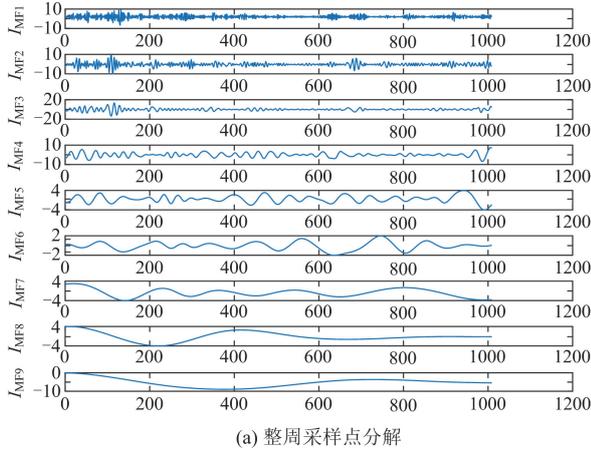


图 6 采样点经 CEEMDAN 分解

Fig. 6 Sampling points via CEEMDAN decomposition

为验证本文 SAOA 的经济性优势, 将其与传统 AOA 进行对比分析。方案 1 采用本文所提出的 HESS(超级电容和蓄电池), 滤波环节采用加权滤波算法, IMF 的提取采用 CEEMDAN, 经济性求解采用传统 AOA; 方案 2 在经济性求解上采用了本文 SAOA, 其余条件均与方案 1 保持一致, 从而保证实验的严谨性。同时, 为进一步验证本文算法的可行性, 加入粒子群算法(particle swarm optimization,

PSO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、模拟退火算法(simulated annealing, SA)进行对比实验。储能优化参数设置如表 3<sup>[30]</sup>所示, 优化配置结果如表 4 所示。

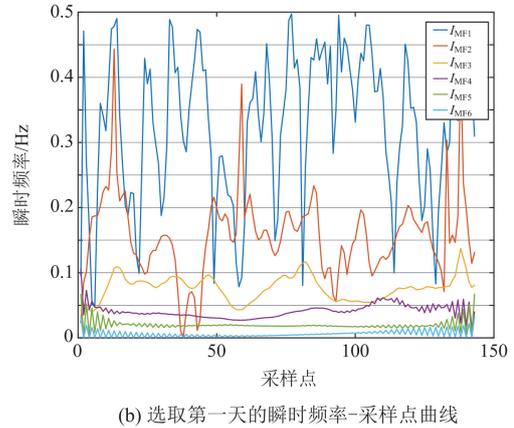
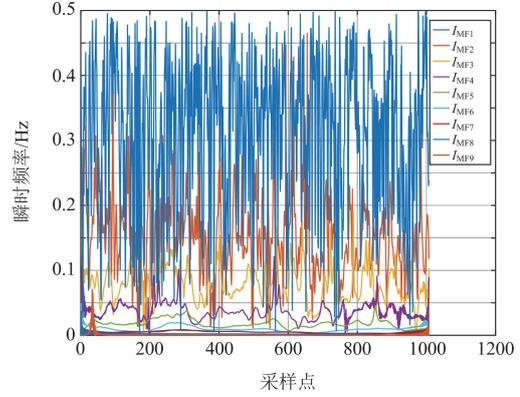


图 7 CEEMDAN 的瞬时频率-采样点曲线

Fig. 7 Instantaneous frequency-sampling point curve of CEEMDAN

表 3 储能优化参数设置

Table 3 Optimal configuration parameters of energy storage

参数	超级电容	蓄电池
单位功率成本/(万元/MW)	150	270
单位容量成本/(万元/MWh)	2700	64
SOC 调节范围	0.1~0.9	0.2~0.8
充放电效率	0.9	0.9
残值回收率	0.03	0.03
维护成本估算系数	0.005	0.005
贴现率	0.07	0.07
运行年限/年	20	—

其中, 方案 2 通过 MATLAB 的仿真结果如图 8 所示, 由表 4 结果可知, 传统 AOA 的最优解中超级电容和蓄电池的容量配置相对较大, 导致其最终投资成本增加。相比之下, 改进的 SAOA 算法具有

初始化种群多样性好、全局搜索能力强以及不易陷入局部最优解等优势，其储能配置更加合理。同时，与 PSO、GA 和 SA 算法的储能配置结果相比，SAOA 算法在 HESS 定容配置中所得结果均最低，且迭代次数均低于其余 4 种算法，充分表明 SAOA 算法具

有更快的收敛速度和更高的计算效率。此外，蓄电池使用年限的提升也反映了模型在优化储能配置方面的有效性，进一步减少了储能介质容量配置和总投资成本。

表 4 储能优化配置结果

Table 4 Results of optimal configuration of energy storage

参数	AOA	SAOA	PSO	GA	SA
超级电容配置功率/MW	3.6457	4.0602	6.3178	6.4746	6.3770
超级电容配置容量/MWh	1.5431	1.2136	2.2000	1.9896	1.9963
蓄电池配置功率/MW	4.2238	4.7803	8.0761	7.9733	7.3797
蓄电池配置容量/MWh	3.1537	3.1380	5.2131	5.1962	5.1034
蓄电池运行年限/年	3.5810	4.0725	3.5142	2.8761	3.9415
迭代次数	145	21	23	45	100
投资成本/万元	5899.4831	4995.4107	5148.8453	5109.4146	5648.7134

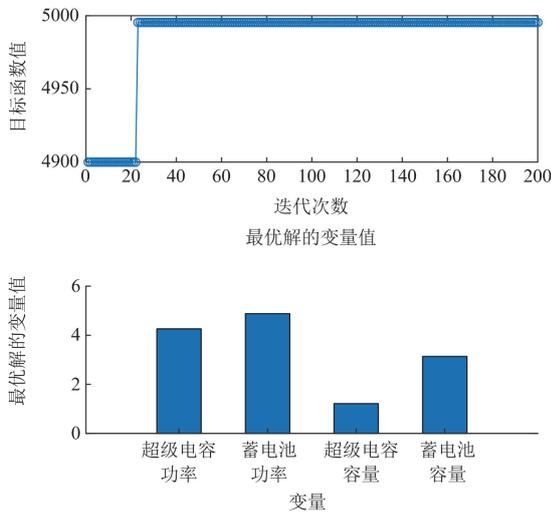


图 8 SAOA 仿真图

Fig. 8 SAOA simulation diagram

### 6 结论

以平抑风电的并网功率波动问题为目标，本文在风电并网处配置混合储能设备，基于实际风电出力数据构建了风-储并网拓扑结构模型，并提出了一种基于 CEEMDAN-SAOA 的风电功率波动平抑方法。

1) 相较于单一滤波算法，本文采用限幅与滑动平均相结合的加权滤波算法平滑风电原始出力，使得功率最大波动率从 34.086%降至 20.548%，平滑度指标从 30.553%降为 14.496%，从而有效提高了风电功率波动的平滑性并降低了滞后性。

2) 本文采用 CEEMDAN 获取固有模态函数和瞬时频率曲线，能够直观反映各模态相关性，同时将高低频段信号有效分离，实现储能介质的优势互补，从而达到更合理的定容配置。

3) 相较于其他传统算法，本文基于 SAOA 算法求解最小成本模型不仅节约了投资成本，还具有更好的收敛精度，实现了储能配置与经济性的双重优化。

综上，本文所提方法可为平抑风电功率波动的混合储能系统配置提供理论依据，具有一定的参考价值。本文优化算法中参数设置还有进一步优化的空间，需要进一步推进在实际电网中的应用。

### 参考文献

[1] 赵欣雨, 张云晓, 万乐, 等. 平抑百兆瓦级风电场功率波动的混合储能充放电协同控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 23-29, 68.  
ZHAO Xinyu, ZHANG Yunxiao, WAN Le, et al. Charge-discharge cooperative control strategy for hybrid energy storage system for suppressing power fluctuation of hundred megawatt level wind farm[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 23-29, 68.

[2] 杨京渝, 罗隆福, 阳同光, 等. 计及谷时段风电消纳的储能系统平抑风电功率波动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 131-141.  
YANG Jingyu, LUO Longfu, YANG Tongguang, et al. Smoothing wind power fluctuation control strategy for an energy storage system considering wind power consumption in the valley period[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 131-141.

[3] ZHANG Yu, ZHANG Yongkang, WU Tiezhou. Integrated strategy for real-time wind power fluctuation mitigation and energy storage system control[J]. Global Energy Interconnection, 2024, 7(1): 71-81.

[4] 魏韡, 范越, 谢睿, 等. 平抑高比例新能源发电功率波动的风-光-储容量最优配比[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 138-147.

- WEI Wei, FAN Yue, XIE Rui, et al. Optimal ratio of wind-solar-storage capacity for mitigating the power fluctuations in power system with high penetration of renewable energy power generation[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(3): 138-147.
- [5] KADRI A, MARZOUGUI H, AOUITI A, et al. Energy management and control strategy for a DFIG wind turbine/fuel cell hybrid system with super capacitor storage system[J]. *Energy*, 2020, 192.
- [6] 袁铁江, 郭建华, 杨紫娟, 等. 平抑风电波动的电-氢混合储能容量优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(4): 1397-1406.
- YUAN Tiejia, GUO Jianhua, YANG Zijuan, et al. Optimal allocation of power electric-hydrogen hybrid energy storage of stabilizing wind power fluctuation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(4): 1397-1406.
- [7] 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.
- [8] 姜有华, 赵小林, 唐杰. 基于蓄电池-超级电容混合储能的风电功率平滑控制[J]. *电工技术*, 2022(9): 26-31.
- JIANG Youhua, ZHAO Xiaolin, TANG Jie. Wind power smoothing control based on battery-super capacitor hybrid energy storage[J]. *Electric Engineering*, 2022(9): 26-31.
- [9] 王森, 蔺红. 基于变系数 ES 的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(11): 3204-3212.
- WANG Sen, LIN Hong. Control strategy of hybrid energy storage to stabilize wind power fluctuation based on variable coefficient exponential smoothing method[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(11): 3204-3212.
- [10] 姜智霖, 郝峰杰, 袁志昌, 等. 考虑 SOC 优化设定的电-氢混合储能系统的运行优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(8): 65-76.
- JIANG Zhilin, HAO Fengjie, YUAN Zhichang, et al. Optimal operation of an electro-hydrogen hybrid energy storage system considering SOC optimization setting[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 65-76.
- [11] 程龙, 张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(3): 100-104, 128.
- CHENG Long, ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for hybrid energy storage system smoothing power fluctuation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(3): 100-104, 128.
- [12] 冯磊, 杨淑连, 徐达, 等. 考虑风电输出功率波动性的混合储能容量多级优化配置[J]. *热力发电*, 2019, 48(10): 44-50.
- FENG Lei, YANG Shulian, XU Da, et al. Multistage optimal capacity configuration of hybrid energy storage considering wind power fluctuation[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(10): 44-50.
- [13] 李亚楠, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 58-65.
- LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(7): 58-65.
- [14] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(7): 157-167.
- HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(7): 157-167.
- [15] 周强, 蔡嘉炜, 江修波, 等. 基于指数平滑与 CEEMDAN 的混合储能控制策略研究[J]. *可再生能源*, 2020, 38(6): 846-852.
- ZHOU Qiang, CAI Jiawei, JIANG Xiubo, et al. Hybrid energy storage control strategy based on exponential smoothing and CEEMDAN[J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(6): 846-852.
- [16] WAN C, QIAN W, ZHAO C, et al. Probabilistic forecasting based sizing and control of hybrid energy storage for wind power smoothing[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(4): 1841-1852.
- [17] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(15): 116-124.
- LU Limin, CHU Guowei, ZHANG Tao, et al. Optimal configuration of energy storage in a microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(15): 116-124.
- [18] 邓坤, 温拥军, 胡攀, 等. 改进鲸鱼优化算法的微电网混合储能容量配置研究[J]. *智能计算机与应用*, 2023, 13(2): 194-199.
- DENG Kun, WEN Yongjun, HU Pan, et al. Research on hybrid energy storage capacity allocation for microgrid based on improved whale optimization algorithm[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2023, 13(2): 194-199.

- [19] QIU Y, LI Q, AI Y, et al. Two-stage distributionally robust optimization-based coordinated scheduling of integrated energy system with electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 1-14.
- [20] 于运永, 金钧. 基于改进粒子群算法混合储能优化调度[J]. 电气应用, 2024, 43(2): 1-6, 8.  
YU Yunyong, JIN Jun. Hybrid energy storage optimization scheduling based on improved particle swarm algorithm[J]. Electrotechnical Application, 2019, 43(2): 1-6, 8.
- [21] 吴成明, 扬臻辉. 基于改进鲸鱼算法的混合储能系统容量优化配置[J]. 电工材料, 2024(1): 84-89.  
WU Chengming, YANG Zhenhui. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system based on improved whale algorithm[J]. Electrical Engineering Materials, 2024(1): 84-89.
- [22] 程昱明, 孟高军, 贾鹏, 等. 用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法[J/OL]. 电源学报: 1-13 [2024-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230106.1644.003.html>.  
CHENG Yuming, MENG Gaojun, JIA Peng, et al. Optimal capacity configuration of hybrid energy storage system for mitigating fluctuations of wind power outputs[J/OL]. Journal of Power Supply: 1-13[2024-03-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230106.1644.003.html>.
- [23] 闫群民, 刘语忱, 董新洲, 等. 基于 CEEMDAN-HT 的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 43-53.  
YAN Qunmin, LIU Yuchen, DONG Xinzhou, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [24] 唐杰, 姜有华. 基于自适应小波变换与 HHT 的混合储能容量配置[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 224-230.  
TANG Jie, JIANG Youhua. Hybrid energy storage capacity allocation based on adaptive wavelet transform and HHT[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 224-230.
- [25] 冯江霞, 梁军, 冯益坤. 基于风电功率 min 级分量波动特性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 1-6.  
FENG Jiangxia, LIANG Jun, FENG Yikun. Optimization calculation of wind farm storage capacity based on minute-scale wind power characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 1-6.
- [26] 赵靖英, 乔珩埔, 姚帅亮, 等. 考虑储能 SOC 自恢复的风电波动平抑混合储能容量配置策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5206-5219.  
ZHAO Jingying, QIAO Hengpu, YAO Shuailiang, et al. Hybrid energy storage system capacity configuration strategy for stabilizing wind power fluctuation considering SOC self-recovery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5206-5219.
- [27] 刘禹彤, 赵琳, 王鑫太. 基于 SE-improved SGMD 的混合储能容量优化配置方法研究[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 78-85, 103.  
LIU Yutong, ZHAO Lin, WANG Xintai. Research on optimal configuration method of hybrid energy storage capacity based on SE-improved SGMD[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 78-85, 103.
- [28] 胡雪莹, 李琳. 基于全寿命周期成本和综合故障率的油浸式变压器经济寿命评估[J]. 智慧电力, 2024, 52(1): 47-54.  
HU Xueying, LI Lin. Economic life evaluation of oil-immersed transformer based on life cycle cost and comprehensive failure rate[J]. Smart Power, 2024, 52(1): 47-54.
- [29] 杨晓辉, 袁志鑫, 肖锦扬, 等. 考虑电池寿命的混合储能微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 22-31.  
YANG Xiaohui, YUAN Zhixin, XIAO Jinyang, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage microgrid considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 22-31.
- [30] LI J, MU G, ZHANG J, et al. Dynamic economic evaluation of hundred megawatt-scale electrochemical energy storage for auxiliary peak shaving[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 1-18.
- [31] 李浩, 张禄亮, 麦章渠, 等. 基于改进离散型麻雀搜索算法的配电网恢复重构方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(7): 16-22, 30.  
LI Hao, ZHANG Luliang, MAI Zhangqu, et al. Distribution network recovery reconfiguration method based on improved discrete sparrow search algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(14): 63-72.
- [32] LEI S, HE Y, ZHANG J, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity in a microgrid based on variational mode decomposition[J]. Energies, 2023, 16.

收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2025-01-27

作者简介:

黄冬梅(1964—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为海洋与电力时空信息技术; E-mail: dmhuang\_dl@163.com

吴冰(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为混合储能优化配置; E-mail: 810423853@qq.com

时帅(1987—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为风电并网可靠性. E-mail: shishuai@shiep.edu.cn

(编辑 周金梅)