

# 基于 WOA-VMD 与 SOC 自恢复的混合储能二次调频策略

郑家曜<sup>1,2</sup>, 李培强<sup>1,2</sup>, 吴凯威<sup>1,2</sup>, 苏杰义<sup>1</sup>

(1. 福建理工大学 电气与信息工程学院, 福建 福州 350118;

2. 智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118)

**摘要:** 混合储能辅助常规机组参与电网调频, 可有效改善常规机组爬坡速率低和响应速度慢的问题。为此, 提出一种储能电池参与含抽水蓄能电网的混合储能二次调频策略, 以减小系统频率偏差、改善系统出力。首先, 引入鲸鱼优化算法对变分模态分解的分解层数和惩罚因子进行参数优化, 实现调频指令的合理分配。其次, 构建荷电状态 (state of charge, SOC) 自恢复曲线, 并设计抽水蓄能剩余容量辅助电池 SOC 恢复的新方法。最后基于实测的区域控制误差信号进行对比仿真。结果表明, 所提方法在最大频率偏差控制方面较无储能场景提升 35.12%, 电池 SOC 维持能力提升 46.31%, 验证了所提方法的可行性和有效性。

**关键词:** 二次调频; 混合储能; 变分模态分解; 鲸鱼优化算法; 荷电状态

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)03-0281-09

## Hybrid energy storage secondary frequency regulation strategy based on WOA-VMD and SOC self recovery

ZHENG Jiayao<sup>1,2</sup>, LI Peiqiang<sup>1,2</sup>, WU Kaiwei<sup>1,2</sup>, SU Jieyi<sup>1</sup>

(1. School of Electric and Information Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Simulation Analysis and Integrated Control of Smart Grid Engineering Research Center of Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Hybrid energy storage assisting conventional generating units in power system frequency regulation can effectively overcome the limitations of low ramping rates and slow response of conventional units. Therefore, a hybrid energy storage secondary frequency regulation strategy for power systems with pumped storage units is proposed, in which battery energy storage participates in frequency regulation to reduce system frequency deviations and improve power output performance. First, the whale optimization algorithm is introduced to optimize the decomposition number and penalty factor of variational mode decomposition, enabling a rational allocation of frequency regulation commands. Second, a state-of-charge (SOC) self-recovery curve is constructed, and a novel method is designed in which the remaining capacity of pumped storage assists battery SOC recovery. Finally, comparative simulations are conducted based on measured area control error (ACE) signals. Results demonstrate that, compared with the scenario without energy storage, the proposed method improves the maximum frequency deviation control performance by 35.12% and enhances the battery SOC maintenance capability by 46.31%, thereby verifying the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

**Keywords:** secondary frequency modulation; hybrid energy storage; variational mode decomposition; whale optimization algorithm; state of charge

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (52377097)

第一作者简介: 郑家曜 (2000—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向: 储能建模及其在电力系统中的应用。

通信作者: 李培强 (1975—), 男, 山西忻州人, 教授, 博士, 研究方向: 电力系统运行与控制及负荷建模。

储能是一种快速调节电源,可以有效优化传统电源调频能力不足的问题。近年来学术界探索将两种互补性储能技术整合为复合型系统,并将其引入电力系统频率调节领域。文献[1]基于飞轮储能和电池储能组成混合储能系统,使用模糊控制考虑混合储能电池荷电状态(state of charge, SOC)的综合调频策略。文献[2]提出飞轮储能辅助抽水蓄能进行调频,通过优化飞轮储能出力优化混合储能整体调频性能。文献[3]通过使用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)一次分解获得直接并网量和混合储能任务量,后对混合储能进行二次分配。文献[4]通过采用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法分解得到不同类型储能设备需要平抑的风电功率,然后使用超前模糊控制进行修正。然而,现有研究在调频领域仍较为有限,传统滤波方法存在时序失配风险,EMD方法易产生模态混叠,而EEMD虽可改善混叠问题却计算复杂度较高,不利于实时应用。变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)在一定程度上可缓解上述问题,但其分解层数 $K$ 和惩罚因子 $\alpha$ 难以合理确定<sup>[5]</sup>。再者,目前混合储能系统研究还比较欠缺,较少研究将电池储能与抽水蓄能相结合,充分发挥其互补优势。

尽管鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)与变VMD的组合近年来在信号处理与调频策略研究中已有一定研究基础,但现有工作多侧重算法性能优化,较少结合储能运行特性与SOC约束开展系统级调频建模与控制设计。

本研究将WOA-VMD用于分解区域控制误差(ACE)信号,并结合模态频谱特征将其高低频分量

合理分配,增强系统的响应效率与稳定性。此外,本研究还引入了SOC自恢复控制策略。不同于已有文献中简单考虑SOC阈值限制或静态控制逻辑,本研究提出基于Logistic回归模型构建的SOC自恢复曲线,并设计抽水蓄能辅助电池SOC恢复机制,增强系统经济性和保护电池的寿命。

# 1 混合储能系统的两区域调频响应模型

## 1.1 混合储能系统的控制方式

由文献[6]可知,区域控制误差(area control error, ACE)信号在改善暂态频率偏差方面效果较好,适合由响应速度快的电池储能承担;而区域控制需求(area regulation requirement, ARR)信号更有利于稳态频率偏差调节,适合由备用容量大的抽水蓄能机组参与。基于此,本研究分别采用ACE与ARR控制方式实现混合储能协同调频。具体控制方式如图1所示。

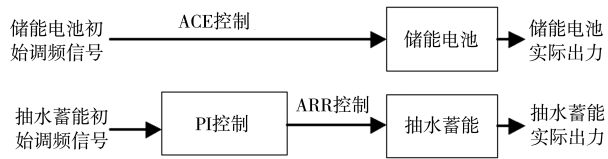


图 1 混合储能控制方式

Fig.1 Hybrid energy storage control method

## 1.2 混合储能参与区域电力系统二次调频模型

依据所提策略使用后续给出的等效调频模型,采用联络线频率偏差控制(tie-line and frequency bias control, TBC)策略,设计了一种混合储能系统与常规火电机组协同参与电网频率调节的系统控制架构,如图2所示。

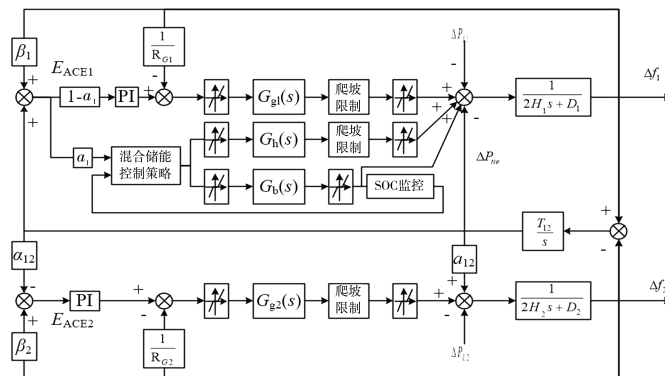


图 2 混合储能两区域互联系统模型

Fig.2 Two-area interconnected system model of hybrid energy storage

图2中, $H_i$ 为时间常数(其中 $i=1,2$ 分别代表两区域); $D_i$ 为阻尼系数; $\beta_i$ 为偏差系数; $E_{ACEi}$ 为ACE调频信号; $a_{12}$ 为容量系数; $T_{12}$ 为延迟系数; $G_{gi}(s)$ 和 $R_{Gi}$ 分别为火电机组频率响应模型和其调差系数; $G_h(s)$ 为抽水蓄能机组模型; $G_b(s)$ 为储能电池模型; $\Delta f_{Li}$ 为负荷扰动; $\Delta f_i$ 为频率偏差; $\Delta P_{tie}$ 为联络线功率偏差; $a_1$ 为分配因子。

### 1.3 常规机组响应等值模型

常规机组由火电机组构成,调频模型包含调速系统与再热式汽轮机组两大核心模块,其动态响应特性可通过式(1)表示。

$$G_g(s) = \frac{1+sF_{HP}T_{RH}}{(1+T_{CH}s)(1+T_{RH}s)(1+T_Cs)} \quad (1)$$

式中, $F_{HP}$ 为再热器增益; $T_{RH}$ 为再热器时间常数; $T_{CH}$ 为汽轮机时间常数; $T_C$ 为火电机组调速器时间常数。

### 1.4 混合储能等效调频模型

本研究的混合储能采用储能电池联合抽水蓄能的模型。其中电池储能采用简化通用模型,用一阶惯性环节进行等效<sup>[7]</sup>,其传递函数表示为:

$$G_b(s) = \frac{1}{1+sT_B} \quad (2)$$

式中, $G_b$ 表示为电池储能的传递函数模型; $T_B$ 为电池储能响应时间常数。

储能电池SOC变化表示为:

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t-t_0) + \frac{\int_{t-t_0}^t P_B(t) dt}{E_{BN}} \quad (3)$$

式中, $S_{OC}(t)$ 为 $t$ 时刻电池储能SOC大小; $t_0$ 为一个时间采样周期; $P_B(t)$ 为在 $(t-t_0)$ 到 $t$ 充/放电功率; $E_{BN}$ 为储能电池总容量。

本研究聚焦传统可逆式水泵水轮机组特性分析。运行特性表明:在电动水泵模式下,机组呈现稳态功率运行特性,其功率输出与电网频率动态波动解耦;而在发电模式时,机组输出功率受水轮机调速系统动态特性调控,与电网频率变化呈现耦合响应关系<sup>[8]</sup>。

水轮机传递函数模型可表示为:

$$G_i(s) = \frac{1-T_w(s)}{1+0.5T_w(s)} \quad (4)$$

式中, $T_w$ 为水流惯性时间常数。

调速器传递函数模型可表示为:

$$G_d(s) = \frac{1}{1+T_Hs} \cdot \frac{K_i+K_d s^2+K_p s}{K_i+K_d s^2+\left(\frac{1}{R_H}+K_p\right)s} \quad (5)$$

式中, $K_i$ 为积分系数; $K_d$ 为微分系数; $K_p$ 为调速器比例; $T_H$ 为调速器时间常数; $R_H$ 为调差系数。

所采用的抽水蓄能机组频率响应模型为:

$$G_h(s) = G_i(s)G_d(s) \quad (6)$$

## 2 基于 WOA-VMD 的调频指令分配

在新型电力系统频率动态调节场景中,常规机组受制于动态爬坡受限及暂态响应迟滞等动态性能约束,难以实现高标准的暂态调节精度与动态跟踪性能要求。在混合储能辅助火电机组参与二次调频中,应尽可能发挥不同储能各自的优点。本研究利用 WOA-VMD 对原始调频功率指令进行分配。

### 2.1 变分模态分解(VMD)

在电力系统动态调频场景中,调频指令具有非平稳和多时间尺度特性,传统频域方法易产生模态混叠。VMD 作为一种非递归、自适应信号分解方法,相比 EMD 和 EEMD 能有效抑制模态混叠问题<sup>[9]</sup>。

对初始调频信号进行 VMD 分解,得到  $K$  个中心频率不同的子序列  $u_k(t)$ ,相应的表达式为:

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_k \left| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right|_2^2 \right\} \\ \text{s.t. } \sum_k u_k(t) = f \end{cases} \quad (7)$$

式中, $u_k = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$ 为表示第 $k$ 个分解的分量; $\omega_k = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$ 为对应分量的中心频率; $\partial_t$ 为梯度运算; $\delta(t)$ 为狄克拉函数; $\cdot$ 为卷积运算; $u_k(t)$ 为 $t$ 时刻的第 $k$ 个分量; $f$ 为原始信号; $j$ 为虚数单位; $t$ 为时间。

引入拉格朗日惩罚算子 $\lambda(t)$ 和惩罚系数 $\alpha$ ,将带约束的变分模型转换为无约束优化形式,其表达式为:

$$L = (\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) =$$

$$\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \rangle + \left| f(t) - \sum_k u_k(t) \right|_2^2 + \alpha \sum_k \left| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot u_k(t) \right] e^{-j\omega t} \right|_2^2 \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为惩罚系数;  $\lambda$  为拉格朗日惩罚算子;  $\omega$  为中心频率。

对  $u_k$ ,  $\omega_k$  和  $\lambda$  进行迭代修正, 在交替方向惩罚算法的基础上结合傅里叶变换, 寻找其鞍点, 交替更新  $\lambda^{n+1}$ ,  $u_k^{n+1}$ ,  $\omega_k^{n+1}$  表达式为:

$$u_k^{n+1}(\omega) = \frac{f(\omega) - \sum_{i < k} u_i(\omega) + \frac{\lambda(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (9)$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^{+\infty} \omega |u_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^{+\infty} |u_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \quad (10)$$

$$\lambda^{n+1}(\omega) = \lambda^n(\omega) + \tau(f(\omega) - \sum_k u_k^{n+1}(\omega)) \quad (11)$$

式中,  $\tau$  为带宽;  $u_k^{n+1}(\omega)$  为  $n+1$  次模态的分量函数;  $\omega_k^{n+1}$  为模态函数功率谱的重心;  $\lambda^{n+1}$  为拉格朗日算子。

收敛条件:

$$\sum_k \frac{u_k^{n+1}(\omega) - u_k^n(\omega)}{u_k^{n+1}(\omega)} < \varepsilon \quad (12)$$

式中,  $\varepsilon$  为预先设定的收敛精度。

当满足迭代收敛条件(12)时, 迭代停止。

## 2.2 鲸鱼算法优化变分模态分解 (WOA-VMD)

在 VMD 分解中存在两个重要参数: 分解层数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$ , 这两个参数对 VMD 的分解结果起到至关重要的作用。如果  $K$  值过小, 就会产生欠分解, 反之, 就会产生过分解。如果  $\alpha$  值过小, 就会导致信息冗杂, 反之, 就会抑制高频信号。因此选择确定合适的  $[K, \alpha]$  组合至关重要。

鲸鱼优化算法 (WOA) 通过模拟座头鲸捕食行为在解空间中迭代搜索全局最优解<sup>[10]</sup>, 其数学建模主要包含 3 个核心操作算子: 包围猎物、螺旋气泡网及寻找猎物策略, 共同构建了多维解空间的智能搜索框架。

其位置更新的公式可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}(m+1) = \mathbf{P}'(m) - A\mathbf{D} \\ \mathbf{D} = |\mathbf{C}\mathbf{P}'(m) - \mathbf{P}(m)| \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $m$  为当前迭代次数;  $\mathbf{P}(m)$  为当前鲸鱼位置向量;  $\mathbf{P}'(m)$  为当前最佳鲸鱼位置向量;  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{C}$  为系数, 表示参数向量。

其中上式中  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{C}$  的计算公式为:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = 2\alpha\gamma - \alpha \\ \mathbf{C} = 2\gamma \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\alpha = 2 - \frac{2t}{T_{\max}}$ ;  $T_{\max}$  为最大迭代次数;  $\gamma$  为  $(0, 1)$  之间任意随机数字。

鲸鱼利用螺旋气泡网进行攻击狩猎, 该过程可以用以下模型表示:

$$\mathbf{P}(m+1) = \begin{cases} \mathbf{P}'(m) - A\mathbf{D}, p < 0.5 \\ \mathbf{P}(m) + D'e^{z'l} \cos(2\pi l), p \geq 0.5 \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $D'$  为鲸鱼所处位置与目前鲸鱼最佳位置接近的迭代距离;  $z$  为定义螺旋线形状的值, 默认为 1;  $l$  为  $(-1, 1)$  之间任意随机数字;  $p$  为  $(0, 1)$  之间任意随机数字。

该算法在捕食策略选择机制层面, 设计了包围捕食与泡网攻击的自适应切换策略。在全局探索阶段, 鲸鱼个体通过群体位置信息共享机制执行随机搜索, 此时算法参数向量  $\mathbf{A}$  满足  $|\mathbf{A}| > 1$  的约束条件, 驱动搜索代理脱离当前最优邻域, 在解空间内执行广域探索。这种参数化设计有效规避了局部极值陷阱, 显著增强了算法的全局收敛特性<sup>[11]</sup>。具体模型可以表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{P}(m+1) = \mathbf{P}_{\text{rand}} - A\mathbf{D} \\ \mathbf{D} = |\mathbf{C}\mathbf{P}_{\text{rand}} - \mathbf{P}(m)| \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\mathbf{P}_{\text{rand}}$  为随机选择的鲸鱼位置向量。

为了解决 VMD 本身存在的问题, 对其进行改进, 本研究提出 VMD-WOA 算法对其两个重要参数分解层数  $K$  和惩罚因子  $\alpha$  进行优化, 具体流程如图 3 所示。

本研究采用基于群体智能的优化框架包含以下关键环节: 首阶段集成鲸鱼优化算法 (WOA) 对鲸鱼群向量位置  $[K, \alpha]$  进行初始化; 继而基于信息熵理论构建包络熵指标作为目标函数, 执行精英保留策略更新最优解集; 在迭代寻优过程中, 通过动态收敛因子调控机制自适应选择位置更新算子, 循环执行种群进化操作

直至满足预设收敛阈值,最终输出 VMD 模态分解的最优参数配置集。

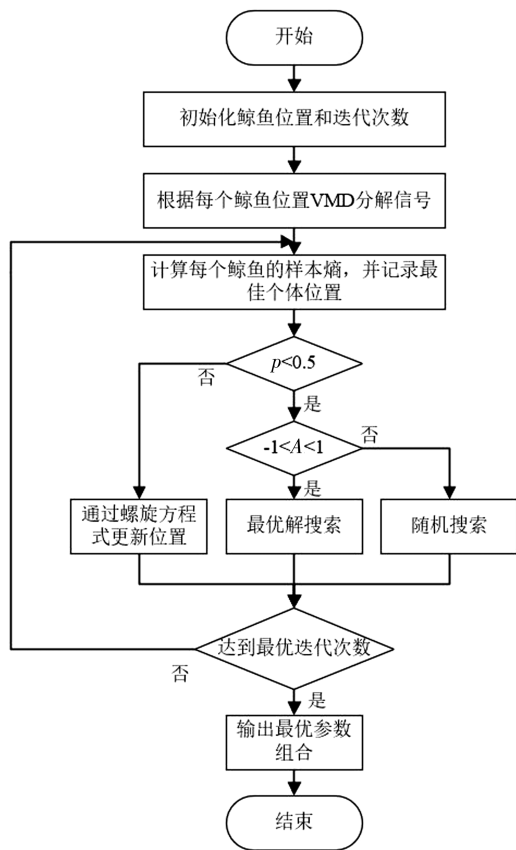


图 3 VMD-WOA 算法流程图

Fig.3 VMD-WOA algorithm flowchart

### 3 混合储能二次调频出力优化策略

基于抽水蓄能联合电池的混合储能系统,本研究研究构建计及 SOC 运行边界的双层调频功率协调策略:首先分配两类储能调频指令,继而通过状态约束反馈实现二次调频动态校正。

#### 3.1 电池储能 SOC 自恢复控制策略

当系统调频需求不大且电池储能 SOC 状态较差时,以恢复电池储能 SOC 为首要目标(即 SOC 恢复阶段)。此时仅抽水蓄能参与二次调频,并利用抽水蓄能剩余容量辅助电池储能 SOC 进行自恢复控制。可以有效保障电池储能系统的健康和寿命,维持系统调频能力的持续性。

Logistic 回归模型的数学特征曲线呈现典型的 S 型分布规律,这种形态能够有效维持系统输出动态平稳性,还可充分保留其灵敏响应的优

势<sup>[12]</sup>。所以本研究引入 Logistic 回归模型构建储能电池 SOC 自恢复曲线,如图 4 所示,其自恢复充放电功率模型可以表示为:

$$\begin{cases} P_d = \frac{P_{BN} P_0 e^{\frac{n(SOC - SOC_{min} - SOC_1 + SOC_0)}{SOC_{low} - SOC_{min}}}}{P_{BN} + P_0 e^{\frac{n(SOC - SOC_{min} - SOC_1 + SOC_0)}{SOC_{low} - SOC_{min}} - 1}} \\ P_c = \frac{P_{BN} P_0 e^{\frac{n(SOC_{max} - SOC - SOC_1 + SOC_0)}{SOC_{max} - SOC_{high}}}}{P_{BN} + P_0 e^{\frac{n(SOC_{max} - SOC - SOC_1 + SOC_0)}{SOC_{max} - SOC_{high}} - 1}} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $SOC_{max}$ 、 $SOC_{min}$ 、 $SOC_{high}$ 、 $SOC_{low}$ 、 $SOC_1$ 、 $SOC_0$  分别为电池储能 SOC 的最大值、最小值、较高值、较低值、高中间值、低中间值;  $P_c$  和  $P_d$  分别为储能自恢复充、放电功率;  $n$  和  $P_0$  为自适应因子。

由文献[13]可知,当取  $n = 15$  且  $P_0 = 0.01$  时可以保证电池储能具有平滑的出力效果,同时兼顾储能快速响应的特性,所以本研究取其数值。

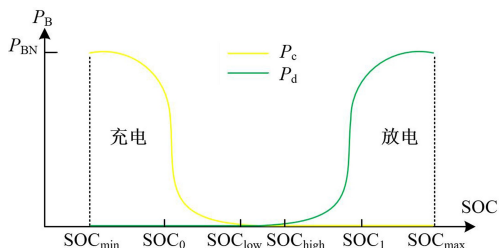


图 4 储能电池自恢复曲线

Fig.4 Self-recovery curve of energy storage battery

设置死区是为了减少无谓的调节动作,提高系统的稳定性,但死区范围过小会造成机组调节动作频繁;范围过大会让系统波动变大,稳定性下降。通过仿真系统频率响应和历史运行数据分析,本研究死区范围  $\Delta f_{db}$  选取 0.033 3 Hz。

当储能电池 SOC 处于不良状态时(较高或较低),这时其自恢复功率会过大,可能使得系统频率跌出死区,造成系统稳定性下降。为此,本研究提出抽水蓄能剩余容量对储能电池进行 SOC 辅助恢复新方法:通过调节抽水蓄能出力来抵消电池储能功率的变化,从而解决跌出死区的问题,其自恢复充放电功率模型可以表示为:

$$P_{ref,HI} = \begin{cases} P_{ref,H} + P_c \\ P_{ref,H} - P_d \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $P_{ref,H}$  为原先抽水蓄能二次调频信号;  $P_{ref,HI}$  为调节后的抽水蓄能二次调频信号。

相比于原先 SOC 自恢复方法,加入此设计可以有效的提高抽水蓄能剩余容量的利用率,同时减少常规机组的波动幅度和次数增加其寿命,具有非常好的经济性和必要性。

### 3.2 混合储能综合控制策略流程

综上可得整体混合储能系统结构图如图 5 所示。

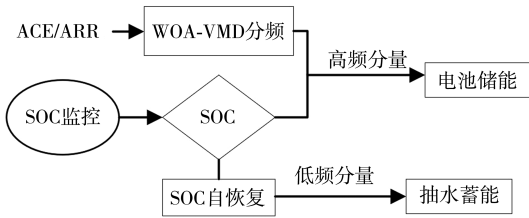


图 5 混合储能系统结构图

Fig.5 Structural diagram of hybrid energy storage system

混合储能综合控制策略流程如图 6 所示。系统根据频率偏差与电池 SOC 状态在调频模式与 SOC 恢复模式间切换。调频阶段采用 WOA-VMD 分解调频指令,高频分量由电池承担、低频分量由抽水蓄能承担;SOC 恢复阶段由抽水蓄能辅助电池 SOC 回归稳定区间。

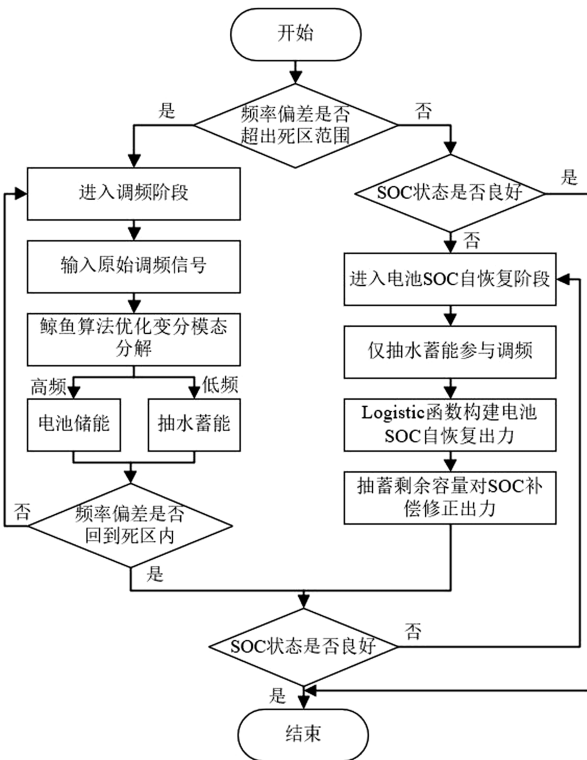


图 6 混合储能综合控制策略流程图

Fig.6 Flowchart of integrated control strategy for hybrid energy storage

## 4 实验仿真

### 4.1 仿真系统设置

基于 MATLAB/SIMULINK 仿真平台构建了如图 2 所示的包含两个互联区域的混合储能系统模型,具体控制方式如图 1 所示。系统模型中,常规火电机组容量为 1 000 MW,其中在区域一中配置抽水蓄能与电池储能装置相结合的储能方案。具体参数配置为:抽水蓄能机组功率调节区间设置为 -100~100 MW,储能电池额定功率为 20 MW、容量为 0.5 MW·h,其初始 SOC 设定为 0.5。仿真采用 1 000 MW 和 50 Hz 作为基准值建立标么值系统,参数设置综合参考了典型工况下的运行条件,并结合系统频率响应分析与历史运行数据进行多轮仿真实验。通过不断调整参数并评估其对系统动态性能的影响,最终选取当前最优且适用的参数组合。具体技术参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 系统仿真参数

参数	数值	参数	数值
$H_1, H_2/s$	5	$D_1 p.u., D_2 p.u.$	1, 1
$\beta_1 p.u., \beta_2 p.u.$	21	$a_{12} p.u., T_{12} p.u.$	1.18, 1.6
$R_C p.u., R_H p.u.$	0.05, 0.04	$T_C, T_H, T_B/s$	0.1, 0.1, 0.01
$F_{HP} p.u.$	0.5	$T_{CH}, T_{RH}/s$	0.3, 10
$K_P p.u., K_I p.u., K_D p.u.$	3, 0.8, 2	$T_W/s$	2.5

表 2 控制策略参数

参数	数值	参数	数值
$SOC_{max}$	0.9	$SOC_{min}$	0.1
$SOC_{high}$	0.55	$SOC_{low}$	0.45
$SOC_1$	0.725	$SOC_0$	0.275
$n p.u.$	15	$P_0 p.u.$	0.01
$\Delta f_{db}/Hz$	0.0333	$a_1$	0.9

为验证所提策略的有效性,本研究基于实际测量的区域控制误差 (ACE) 信号,分析了无混合储能(方案 1)、普通分频+混合储能(方案 2)和鲸鱼算法优化变分模态分解+混合储能(方案 3)之间的对比,分析了不同分配方案对调频效果的影响,验证了所提方法的可行性与有效性。

### 4.2 原始 ACE 信号的 WOA-VMD 分解

本研究研究采用 2024 年国内某公司某典型日的 ACE 数据  $S_{ACE}$  (按原始负荷水平 1 000 MW, 50HZ 为基准进行标么化处理) 进行仿真验证, 在一个调频日内, 以分钟为单位对信号进行采样, 一共 1 440 个数据, 如图 7 所示。

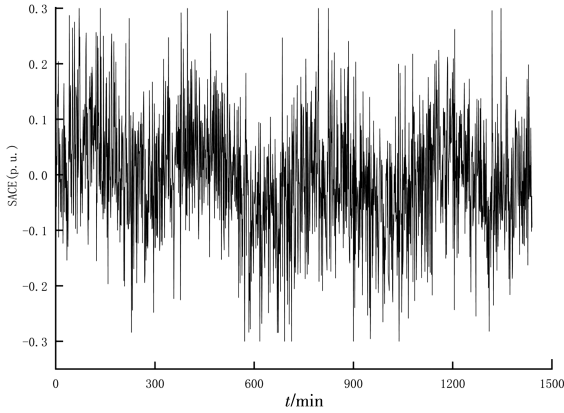


图 7 ACE 原始数据

Fig.7 Original data of ACE

采用 WOA-VMD 优化算法对初始 ACE 信号进行分解, 设置鲸鱼种群规模数量为 10, 最大迭代次数为 20, 分解层数  $K$  的取值范围为 [3, 10], 惩罚因子  $\alpha$  取值范围为 [10, 2 500]。

得到的 WOA-VMD 适应度曲线如图 8 所示, 适应度曲线图显示, 目标函数值在进化过程中呈现指数衰减趋势, 于第 15 次迭代时达到全局最小值 3.075。通过智能优化过程, 确定模态分解层数的最优参数配置为  $K$  为 9 最优惩罚因子  $\alpha$  为 63.913 2。当  $K=9, \alpha=63.913 2$  时 WOA-VMD 分解及其频谱图如图 9 所示。

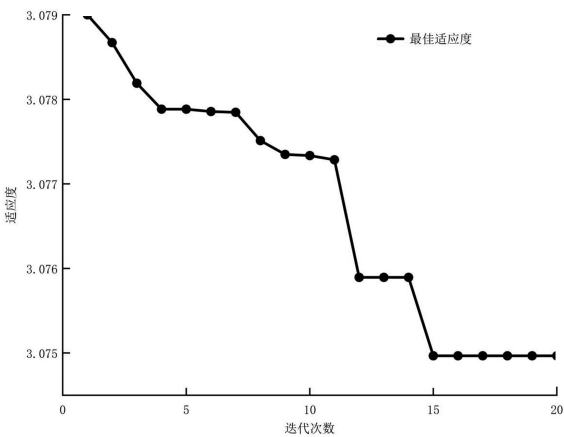


图 8 WOA-VMD 适应度曲线

Fig.8 WOA-VMD fitness curve

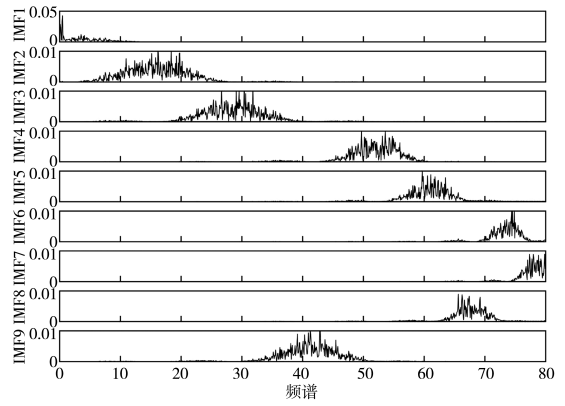
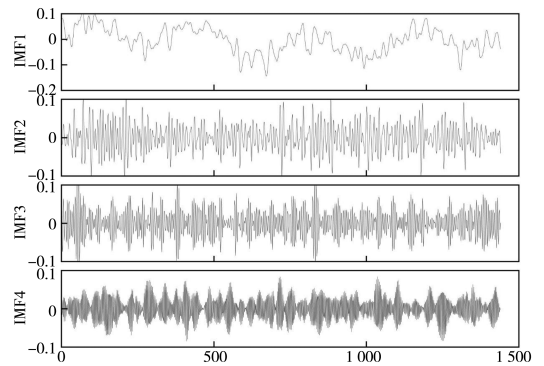


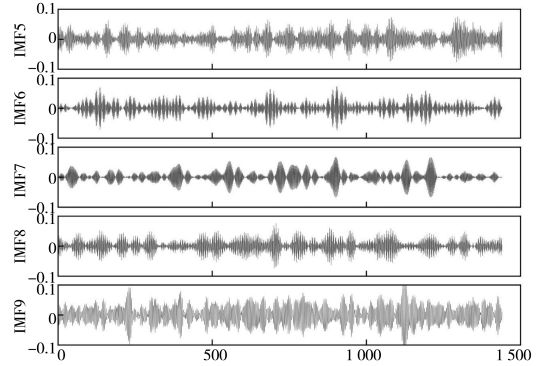
图 9 WOA-VMD 分解各分量频谱

Fig.9 WOA-VMD decomposition of each component spectrum

采用 WOA-VMD 算法对原始区域控制偏差 (ACE) 信号进行处理, 获得 9 个具有差异化频率特征的本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 分量。如图 10 所示, 各 IMF 分量依频率由低到高呈梯度分布。研究进一步通过分解层级差异性分析, 对包含频率调节特征的关键分量执行多尺度重构处理, 将高频分量 IMF5-IMF9 分给储能电池部分, 低频分量 IMF1-IMF4 分给抽水蓄能部分。



(a) IMF1-IMF4分量波形



(b) IMF5-IMF9分量波形

图 10 WOA-VMD 分解各分量波形

Fig.10 WOA-VMD decomposition of waveform components

### 4.3 仿真对比分析

仿真选取 3 种不同方案作对比:无混合储能(方案 1,只有常规机组)、普通分频+混合储能(方案 2)和鲸鱼算法优化变分模态分解+混合储能(方案 3)。所有对比方案均在统一搭建的两区域互联系统模型中运行,仿真环境与参数配置完全一致,并选取相同性能评价指标(最大频率偏差与频率偏差均方根),确保对比分析的公平性。将分解重构后的低频分量分给抽水蓄能部分,高频分量分给储能电池部分,得到仿真结果如图 11 所示。

从调频效果分析,由图 11(a)可以看出在接收相同调频信号的情况下,方案 3 的最大频率偏差为 0.0110 73,频率偏差均方根为 0.004 236,都远远小于方案 1 的最大频率偏差的 0.014 962,频率偏差均方根的 0.005 873 和方案 2 的最大频率偏差的 0.011 958,频率偏差均方根的 0.004 549。方案 3 的最大频率偏差相较于方案 1 和方案 2 分别提高了 35.12%和 7.99%,频率偏差均方根相较于方案 1 和方案 2 分别提高了 38.64%和 7.39%。

显然说明引入 WOA-VMD+混合储能可以有效减少系统频率波动,并且相较于无储能参与情况效果提升非常大,相较于普通分频+混合储能的情况效果也有不小的提升。

从图 11(b)~图 10(c)可以看出,通过整合混合储能系统实现功率优化分配,系统运行特性呈现显著改善。其中,抽水蓄能承担大部分功率,促使常规机组出力大幅降低,并且在引入 WOA-VMD 控制策略后,通过多时间尺度动态协调机制,火电机组出力需求在原有基础上再度降低,从图 11(d)可以看出,方案 2 中储能电池 SOC 时常处于不良状态,严重影响储能电池调频效果及其寿命,对应的储能电池 SOC 均方根为 0.155 750(基准值取 0.5)。相对比之下,方案 3 根据所设计的策略对储能电池 SOC 进行辅助恢复能有效改善其出力,有效较小储能电池的损耗,保证良好的调频效果,让储能电池 SOC 维持较好的状态,其对应的储能电池 SOC 的均方根为 0.083 565,提高了 46.31%,提升非常明显,能够有效降低常规机组出力,提高了系统运行经济性。

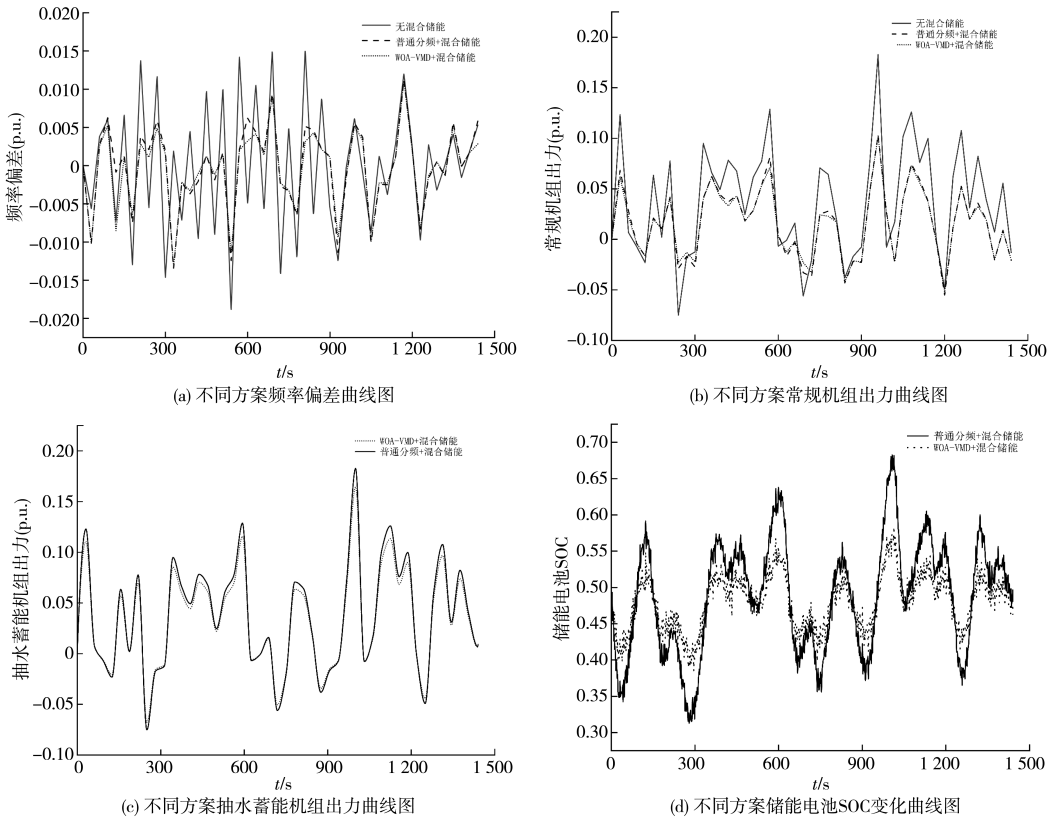


图 11 不同方案仿真结果对比

Fig.11 Comparison of simulation results of different schemes

综上所述,在基于实测的区域控制误差(ACE)调频信号的仿真情况下,方案3能够有效抑制电网的频率偏差,充分发挥混合储能的优越性,其中引入的WOA-VMD算法在减少常规机组出力,合理分配调频信号方面也有着较好的效果,设计的抽水蓄能辅助储能电池自恢复策略也能解决SOC偏低或偏高时调频能力不足的问题,将SOC维持在较好的水平。

## 5 结论

本研究聚焦抽水蓄能联合储能电池混合储能系统的协同控制问题,提出了基于多模式动态协调的二次调频优化架构。该方案突破传统单一储能调频模式局限,在电网二次调频过程中实现两种储能介质的技术特性互补和运行效能优化。对于混合储能调频指令分配问题,引入WOA-VMD算法,实现对混合储能内部调频指令分配。同时设计电池SOC自恢复策略,能有效实现混合储能

的优势使其高效利用,有一定的工程价值,实验结果表明:

1)所提出的鲸鱼算法优化变分模态分解(WOA-VMD)可以有效寻找VMD分解层数 $K$ 和惩罚因子 $\alpha$ 的最优参数组合,实现对混合储能内部调频指令分配,且效果良好,能够有效解决模态混叠问题。

2)WOA-VMD+混合储能的方案在调频阶段有较好的效果,能够充分发挥不同储能各自的优点,相互配合,有效减小常规火电机组的出力,合理分配调频信号,提高系统的运行经济性。

3)本研究设计的抽水蓄能剩余容量辅助储能电池SOC自恢复策略能够有效避免电池过充或过放影响电池寿命,让SOC维持在良好状态。能够有效实现储能电池和抽水蓄能之间的互补,提高抽水蓄能的利用率,减小储能电池的损耗,对混合储能调频能力的提高起着重要的作用。

## 参考文献:

- [1] 韩健民,薛飞宇,梁双印,等.模糊控制优化下的混合储能系统辅助燃煤机组调频仿真[J].储能科学与技术,2022,11(7):2188-2196.
- [2] JIN C L,LU N,LU S,et al. A coordinating algorithm for dispatching regulation services between slow and fast power regulating resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(2):1043-1050.
- [3] 张凯,王金袖,杨雪峰,等.基于二次EMD分解的风电场混合储能系统配置优化[J].综合智慧能源,2025,47(10):45-51.
- [4] 周丹,袁至,李骥,等.考虑平抑未来时刻风电波动的混合储能系统超前模糊控制策略[J].发电技术,2024(3):412-422.
- [5] 胡锐,乔加飞,李永华,等.基于WOA-VMD-SSA-LSTM的中长期风电预测[J].太阳能学报,2024,45(9):549-556.
- [6] 张仕鹏,李培强,张亦君,等.基于变滤波时间常数和模糊控制的复合储能二次调频策略[J].上海交通大学学报,2025,59(9):1370-1382.
- [7] 肖家杰,李培强,毛志宇.基于模糊分配因子的电池储能参与二次调频策略[J].电网技术,2023,47(9):3568-3575.
- [8] 张皓南,何川,刘天琪,等.考虑水光多时间尺度不确定性与互补分组分群接入的清洁能源电力系统扩展规划方法[J].电网技术,2025,49(9):3710-3720.
- [9] 王果,李宝鹏,闵永智,等.基于声阵列与SHO-VMD-FastICA的750kV电抗器声纹分离方法研究及应用[J].高电压技术,2025,51(9):4588-4598.
- [10] 刘刚,高成龙,胡万君,等.基于鲸鱼优化算法超参数优化的径向基函数响应面模型的油浸式变压器绕组挡板结构优化[J].电工技术学报,2024,39(17):5331-5343.
- [11] 胡杰,程雅钰,余海,等.基于WOA-VMD和香农熵的锂电池早期故障诊断研究[J].汽车工程,2024,46(7):1189-1196.
- [12] 苏嘉豪,蔺红,樊艳芳.基于变下垂系数的风电全直流输电系统一次调频协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(8):55-64.
- [13] 李若,李欣然,谭庄熙,等.考虑储能电池参与二次调频的综合控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(8):74-82.

(责任编辑:方素华)