

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.008

基于SE-improved SGMD的混合储能容量优化配置方法研究

刘禹彤¹, 赵琳¹, 王鑫太²

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 沈阳 110015; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 采用混合储能系统平抑风电输出功率波动可有效解决风电并网问题,而不同功率分配方法对混合储能优化配置结果影响大,为此提出一种基于样本熵改进的辛几何模态分解方法(sample entropy-improved symplectic geometric mode decomposition, SE-improved SGMD)的混合储能系统功率分配策略。首先,采用SGMD对不平衡功率进行分解,获取一系列辛几何分量SGC(symplectic geometry component);然后,计算分解后各SGC的样本熵SE(sample entropy)并获取其相似度阈值,以此为依据将分解后的子分量重构高、低频分量,分别作为超级电容和全钒液流电池的参考功率;进而,通过计及储能设备SOC限幅约束和充放电效率约束对两种储能设备的额定功率和容量进行配置;最后,结合中国某风电场实测输出数据,构建基于全寿命周期成本的经济性评估模型,验证文中方法的有效性与实用性。

关键词: 混合储能; 辛几何模态分解; 样本熵; SOC限幅约束; 全寿命周期成本

Research on Optimal Configuration Method of Hybrid Energy Storage Capacity Based on SE-improved SGMD

LIU Yutong¹, ZHAO Lin¹, WANG Xintai²

(1. Institute of Economics and Technology of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110015, China; 2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012, China)

Abstract: Using hybrid energy storage system to smooth out the output power of wind power can effectively solve the problem of wind power connection to the power grid, whereas different power allocation methods have great influence on the optimal configuration of hybrid energy storage. Therefore, a power allocation strategy of hybrid energy storage system based on sample entropy-improved symplectic geometric mode decomposition (SE-improved SGMD) is proposed. Firstly, SGMD is used to decompose the unbalance power so to obtain the Symplectic Geometry Component (SGC). Then, the sample entropy (SE) of each SGC after decomposition is calculated and its similarity threshold is obtained. Based on this, the decomposed sub-components are reconstructed into high and low frequency components, which are used as the reference power of super capacitor and vanadium redox flow battery respectively. Furthermore, the rated power and capacity of the two energy storage devices are configured by taking into account the SOC limit constraints and charge-discharge efficiency constraints of the energy storage devices. Finally, combined with the measured output data of a domestic wind farm, an economic assessment model based on life cycle cost is constructed to verify the effectiveness and practicability of the method proposed in this paper.

Key words: hybrid energy storage system; symplectic geometric mode decomposition; sample entropy; SOC limiting constraint; life cycle cost

收稿日期:2024-05-05; 修回日期:2024-07-10

基金项目:国网辽宁省电力有限公司管理科技项目资助(2023YF-69)。

Project Supported by Management Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd.(2023YF-69).

0 引言

为构建新型电力系统新格局,以风能为代表的新能源发电正在快速发展。然而风电输出功率随机波动性对电力系统稳定性影响较大,通过引入储能系统可有效平抑其出力波动,实现功率平滑上网^[1]。

储能可以分为以超级电容(super capacitor, SC)为代表的功率型储能和以全钒液流电池(vanadium redox flow battery, VB)为代表的容量型储能。SC具有使用寿命长、响应灵敏性高等特点,可平抑功率波动中高频分量;VB具有能量转换效率高、使用年限长等特点,使其在平抑低频波动分量方面具有优势^[2-3]。功率型与能量型储能组成的混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)通过优势互补提高储能整体运行性能。但目前储能运行成本仍较高,如何对HESS合理优化配置以满足系统安全、经济运行具有重要意义^[4-6]。

目前,国内外专家在HESS容量优化配置领域已取得一些阶段性成果。文[7]采用改进集合经验模态分解算法对HESS参考功率进行分解;文[8]利用经验模态分解与Hilbert变换相结合,得到HESS参考功率高频、低频分量。然而,上述方法在功率分解过程中存在模态混叠问题。文[9]运用离散傅里叶变换分解新能源不平衡出力,需要人为选取基函数;文[10]采用小波分解法对HESS进行容量配置,需要合理选择小波基;文[11]提出基于变分模态分解的风功率波动分解方法,需要人为确定分解模态个数。可以看出,上述文献在确定储能额定容量时均需要人为主观性选择参数,影响后续HESS容量配置的准确性。文[12]构造飞轮储能和锂电池的HESS容量优化模型,通过遍历高、低频分界点并计算全寿命周期成本(life cycle cost, LCC),并以成本最低点作为最佳分点;文[13]提出考虑混合储能实时运行策略的储能容量优化模型。上述方法存在计算量大、计算耗时严重的问题。SGMD方法是一种能够有效处理非线性时序信号的分解法,能够有效避免上述方法中由于人为主观性导致的过渡分解或分解不完全问题,以及分解过程存在的模态混叠问题^[14]。文中将其引入电力系统混合储能功率分解方面。

文中提出一种基于样本熵改进的辛几何模态分解的HESS功率分配策略。首先,以符合并网标准的参考功率与风电输出功率之差作为HESS总参考功率;然后,利用SGMD对总参考功率进行分解,获取辛几何分量并计算各SGC的样本熵以及对应的相似度阈值,以此为依据重构高、低频分量;之

后,计及储能设备荷电状态SOC(state of charge)约束和充放电效率约束配置储能的额定功率和额定容量。最后,结合国内某100 MW风电场实测数据,验证文中所提方法的有效性。

1 基于SE-improved SGMD的混合储能功率分配策略

1.1 HESS总参考功率

风储发电系统拓扑图见图1^[15-16]。文中将风电场实际输出功率与经滑动平均法(method of moving average, MA)平滑后满足标准(见表1)的并网功率之差作为HESS总参考功率

$$P_{\text{HESS}}(t) = P_{\text{W}}(t) - P_{\text{bw}}(t) \quad (1)$$

式(1)中: $P_{\text{W}}(t)$ 为 t 时刻实际风电输出功率; $P_{\text{bw}}(t)$ 为 t 时刻并网功率; $P_{\text{HESS}}(t)$ 为HESS总参考功率。

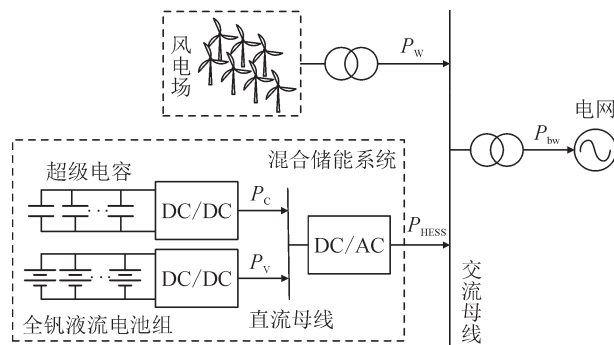


图1 风储发电系统拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of wind-storage power generation system

表1 中国风电并网功率波动限值标准

Table 1 China's wind power grid power fluctuation limit standard

装机容量/MW	1 min 最大波动/MW	10 min 最大波动/MW
<30	3	10
30~150	装机容量/10	装机容量/3
150	15	50

1.2 HESS总参考功率分配策略

由于SC与VB构成的HESS兼顾能量型和功率型两种储能的优点,即既有较高的响应灵敏性,又兼有循环寿命长的特点,能够对不同时间尺度的波动进行补偿,实现快速、稳定的电能存储。故文中提出基于SE-improved SGMD的混合储能功率分配策略。首先利用SGMD方法将得到的 $P_{\text{HESS}}(t)$ 分解为 k 个辛几何分量(SGC);然后计算各SGC的样本熵(SE)和相似度阈值 ω ;最后通过比较各SE与 ω 的大小关系进行高、低频分量重构,即 $SE < \omega$ 的 n 个SGC重构为低频波动分量, $SE > \omega$ 的 $k-n$ 个SGC重构为高频波动分量

$$\begin{cases} P_V(t) = \sum_{i=1}^n SGC_n(t) \\ P_C(t) = \sum_{k=1}^k SGC_k(t) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $P_V(t)$ 为 VB 参考功率; $P_C(t)$ 为 SC 参考功率。

基于 SE-improved SGMD 的功率分配策略图见图 2。

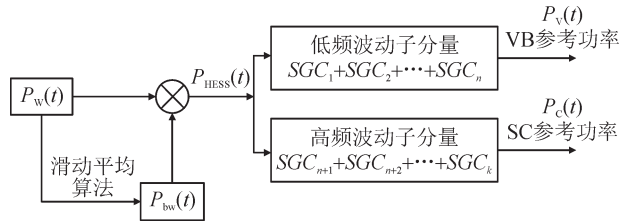


图2 基于 SE-improved SGMD 的功率分配策略图

Fig. 2 SE-improved SGMD based power allocation strategy

1.3 辛几何模态分解方法(SGMD)

2018年,国外学者 Pan 提出了辛几何模态分解方法(SGMD),本质是一种基于辛几何分析的非线性信号处理方法。SGMD 克服了传统数据分解方法的耗散机制,能更好地避免 EMD、VMD 等方法过渡分解和模态混叠情况的出现,从而很好地保持数据结构内部特征的完整性^[17]。SGMD 的核心是利用辛几何相似变换求解 Hamilton 矩阵的特征值,并利用其对应的特征向量构造辛几何分量信号。

假设任意一个初始信号的时间序列表示为: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 n 是信号长度。根据 Takens 嵌入定理,将初始时间序列 x 延展重构为多维轨迹信号矩阵 X

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\lambda} & \dots & x_{1+(d-1)\lambda} \\ x_2 & x_{2+\lambda} & \dots & x_{2+(d-1)\lambda} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_m & x_{m+\lambda} & \dots & x_{m+(d-1)\lambda} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中: d 是嵌入维数; λ 是延展因子; $m = n - (d-1)\lambda$, m 为矩阵维数。

对轨迹矩阵 X 进行自相关分析,得到协方差对称矩阵 A

$$A = X^T X \quad (4)$$

由对称矩阵 A 构造 Hamilton 矩阵 M

$$M = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & -A^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过 Householder 变换构造辛正交矩阵 Q

$$Q^T N Q = \begin{bmatrix} C & R \\ 0 & C^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中: C 是上三角矩阵, $c_{ij} = 0 (i > j + 1)$; $N = M^2$ 。

令上三角矩阵 C 的特征值为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_d$, 则对称矩阵 A 的特征值为

$$\sigma_i = \sqrt{\lambda_i} \quad i = 1, 2, \dots, d \quad (7)$$

故矩阵 A 的特征值所对应的特征向量为 $Q_i (i = 1, 2, \dots, d)$, 根据 Householder 变换理论,对矩阵 A 进行重构,得到轨迹矩阵 Z :

$$Z_i = Q_i Q_i^T X_i \quad (8)$$

$$Z = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_d \quad (9)$$

式(8)、(9)中, Z_i 为 $m \times d$ 维初始子分量矩阵。其中,定义 Z_i 中元素为 z_{ij} , 若 $m < d$, 则 $z_{ij}^* = z_{ij}$; 否则 $z_{ij}^* = z_{ji}$ 。

对任意初始子分量矩阵 $Z_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行平均对角化,使其转化为一组长度为 n 的时间序列。因此, d 组长度为 n 的时间序列之和即为初始时间序列 x 。平均对角化公式为

$$y_k = \begin{cases} \frac{1}{i} \sum_{p=1}^i z_{p,i-p+1}^* & 1 \leq i \leq d^* \\ \frac{1}{d^*} \sum_{p=1}^{d^*} z_{p,i-p+1}^* & d^* \leq i \leq m^* \\ \frac{1}{n-i+1} \sum_{p=i-m^*+1}^{n-m^*+1} z_{p,i-p+1}^* & m^* < i \leq n \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $d^* = \min(m, d)$; $m^* = \max(m, d)$; $n = m + (d-1)\lambda$ 。

由式(10)将 Z_i 转换成长度为 n 的时间序列 $Y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。从初始信号 x 为 d 组独立成分叠加,即 d 个辛几何模态分量(SGC),表示为

$$x = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_d \quad (11)$$

1.4 改进辛几何模态分解方法(SE-improved SGMD)

样本熵是由 Richman 和 Moorman 提出的,作为时间序列复杂性计算的度量^[18]。低 SE 值意味着时域信号的不规则性较低,反之则表明信号不规则性较高。根据 1.3 节分解过程可以看出,利用 SGMD 方法能够将波动信号分解为若干个辛几何模态分量(SGC)。本节进一步采用各 SGC 分量的 SE 值和对应的相似度阈值对其进行重组,重构高、低频分量以实现功率型和容量型储能平抑功率的合理分配,即提出一种基于样本熵改进的辛几何模态分(SE-improved SGMD)的功率分配方法。

对于任意时间序列 $S = \{S_1, \dots, S_i, \dots, S_N\}$, 构造一个 m 维的嵌入向量 S_m

$$S_i^m = \{S_i, S_{i+1}, \dots, S_{i+m-1}\} \quad 1 \leq i \leq N - m \quad (12)$$

则向量 S_{mi} 的样本熵可由式(13)计算得到

$$SE(m, r) = \lim_{r \rightarrow \infty} [-\ln \frac{O^{m+1}(r)}{O^m(r)}] \quad (13)$$

式(13)中, r 为相似限值。

当 v 取有限值时, SE 可以根据式(14)计算

$$SE(m, r, v) = -\ln \frac{O^{m+1}(r)}{O^m(r)} \quad (14)$$

式(14)中, $O^m(r)$, $O^{m+1}(r)$ 分别为 SGC 在 r 下匹配 m 个点和 $m+1$ 个点的概率。

根据 1.3 节可将一个信号通过 SGMD 分解为多个 SGC 分量, 计算各分量的 SE 值与对应的相似度阈值进行比较, 以此实现高、低频波动分量的重构。相似度阈值计算表达式为

$$\omega = \frac{m}{\sqrt{r}} \sum_{n=1}^N S_i \quad (15)$$

2 混合储能系统优化配置与经济性评估

2.1 HESS 系统功率配置

由式(2)可知, 在某时间段内 VB 和 SC 的参考功率分别为 $P_v(t)$ 和 $P_c(t)$, 将这两个参考功率统一设为储能设备出力需求 $P_{cl}(t)$ 。因为配置的储能额定功率 P_{edf} 必须在该时间段内吸收或补偿 $P_{cl}(t)$ 出现的最大充放电功率。则储能设备的 P_{edf} 为

$$P_{edf} = \max \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \max_{t \in (t_0, t_0 + T)} P_{cl}(t) \right\} \eta_{DC-DC} \eta_{DC-AC} \eta_{in}, \\ \left\{ \min_{t \in (t_0, t_0 + T)} P_{cl}(t) \right\} \eta_{DC-DC} \eta_{DC-AC} \eta_{out} \end{array} \right\} \quad (16)$$

式(16)中: η_{DC-DC} 和 η_{DC-AC} 为交直流转换器的转换效率; η_{in} 和 η_{out} 为 HESS 的充放电效率; T 为时间步长。

2.2 HESS 系统容量配置

两种储能设备的额定功率确定后, 设 VB 的 SOC 初始值为 SOC_0 , 在 j 时刻 SOC 计算公式为^[19]

$$\begin{cases} SOC_j = SOC_0 + \frac{\int_0^{j\Delta T} P_{edf}(t) dt}{E_{ed}} \\ SOC_{low} \leq SOC_j \leq SOC_{up} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: ΔT 为 VB 功率采样间隔; SOC_{up} 、 SOC_{low} 为 VB 储能设备 SOC 的上、下限值。

对式(17)进行运算, 可得:

$$E_{ed} \geq \frac{-\min \left[\int_0^{j\Delta T} P_{edf}(t) dt \right]}{SOC_0 - SOC_{low}} \quad (18)$$

$$E_{ed} \geq \frac{\max \left[\int_0^{j\Delta T} P_{edf}(t) dt \right]}{SOC_{up} - SOC_0} \quad (19)$$

由此可知 VB 额定容量 E_{ed} 的计算公式, 即为式(18)、(19)的最大值

$$E_{ed} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{\max_{t \in T} \int_0^{j\Delta T} P_{ess}(t) dt}{SOC_{up} - SOC_0}, \\ \frac{-\min_{t \in T} \int_0^{j\Delta T} P_{ess}(t) dt}{SOC_0 - SOC_{low}} \end{array} \right\} \quad (20)$$

SC 储能设备的 SOC 与额定容量计算过程与 VB 储能设备的计算过程(式(17)–(20))相同, 不再赘述。

基于文中方法的 HESS 优化配置流程图见图 3。

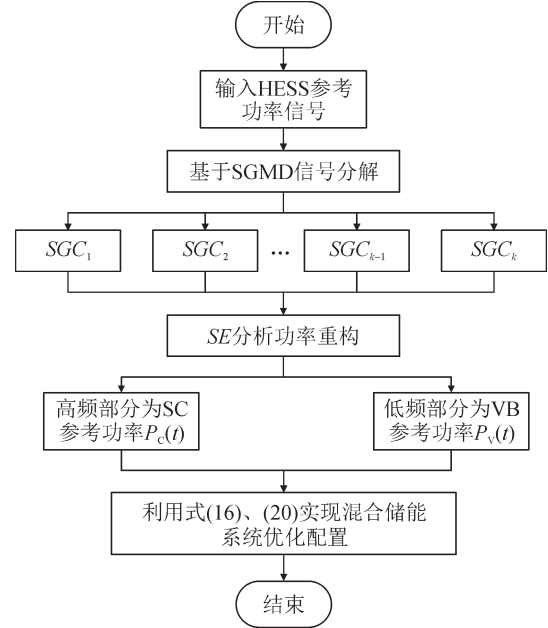


图 3 基于文中方法的 HESS 优化配置流程图

Fig. 3 The flow chart of HESS configuration

2.3 HESS 限幅约束

考虑到 VB 与 SC 两种储能介质的容量限制, 需对其充放电功率和 SOC 进行约束, 以确保储能设备在满足经济性的同时维持安全稳定运行。

2.3.1 充放电功率限幅约束

由于 VB 和 SC 均有最大或者最小的充放电功率限值, 为避免其功率超过额定值, 需要进行限幅约束, VB、SC 需分别满足式(21)、(22):

$$\begin{cases} P_v(t) \leq P_{v_max} & P_v(t) > 0 \\ P_v(t) \geq P_{v_min} & P_v(t) \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} P_c(t) \leq P_{c_max} & P_c(t) > 0 \\ P_c(t) \geq P_{c_min} & P_c(t) \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

式(21)、(22)中: P_{v_max} 、 P_{v_min} 为 VB 充放电功率上下限; P_{c_max} 、 P_{c_min} 为 SC 充放电功率上下限。

2.3.2 SOC 限幅约束

为了防止储能 SOC 越限, 故加入 SOC 限幅约束, 如式(23)所示

$$\begin{cases} SOC_0 + \frac{\max \left[\int_0^{j\Delta T} P_{edf}(t) dt \right]}{E_{ed}} \leq SOC_{up} \\ SOC_0 + \frac{\min \left[\int_0^{j\Delta T} P_{edf}(t) dt \right]}{E_{ed}} \geq SOC_{low} \end{cases} \quad (23)$$

2.4 LCC 经济性评估

全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)是指在规

定的系统使用寿命内,所需评价系统在投资、安装、更换、维护等一切运行过程中所产生的直接或间接的费用之和^[20-21]。为验证文中所提方法的有效性和实用性,构建基于LCC的经济性评估模型,以此作为实用性评估指标。

系统全寿命周期成本 C_{sum} 包括:安装成本 C_{inv} 、更新替换成本 C_{irep} 、运行维护成本 C_{om} ,如式(24)–(27)所示:

$$C_{\text{inv}} = \alpha_{\text{pv}} P_{\text{V}} + \beta_{\text{ev}} E_{\text{V}} + \alpha_{\text{pc}} P_{\text{C}} + \beta_{\text{ec}} E_{\text{C}} \quad (24)$$

$$C_{\text{irep}} = q_1(\alpha_{\text{pv}} P_{\text{V}} + \beta_{\text{ev}} E_{\text{V}}) + q_2(\alpha_{\text{pc}} P_{\text{C}} + \beta_{\text{ec}} E_{\text{C}}) \quad (25)$$

$$C_{\text{om}} = N(k_1 E_{\text{V}} + k_2 E_{\text{C}}) \quad (26)$$

$$C_{\text{sum}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{irep}} + C_{\text{om}} \quad (27)$$

式(24)–(27)中: P_{V} 、 E_{V} 为VB配置的额定功率及容量; P_{C} 、 E_{C} 为SC配置的额定功率及容量; α_{pv} 、 β_{ev} 分别为VB的功率成本因数、容量成本因数; α_{pc} 、 β_{ec} 分别为SC的功率成本因数、容量成本因数; q_1 、 q_2 为VB、SC的更换次数; k_1 、 k_2 为VB、SC的运行维护单价; N 为设备使用年限。

3 算例分析

文中选取中国某装机容量为100 MW的风电场一周的实测功率数据对所提方法的有效性进行验证(采样间隔为15 min)。根据表1中国风电并网功率波动限值标准:装机容量为100 MW的风电场,任意1 min最大波动变化不超过10 MW,任意10 min间隔最大有功功率变化不超过33.33 MW。通过滑动平均法(MA)对一周的实测功率进行平滑滤波,得到平滑前后的功率曲线见图4。分析图4可知,平滑后的并网功率较平滑前风电场实测输出功率的波动大幅下降。

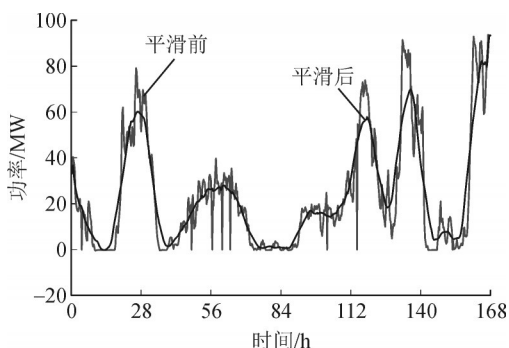


图4 平滑前后风电功率波动

Fig. 4 Wind power fluctuation before and after MA smoothing

平滑前后风电数据统计情况见表2。表2中平滑度 f 计算见式(28)^[22]

$$f = \sum_{i=q}^p \omega_i y_x \quad x = q+1, q+2, \dots, N-p \quad (28)$$

表2 平滑前后风电数据统计情况

Table 2 Statistics of wind power data before and after MA smoothing

参数	平滑前	平滑后
1 min 最大波动值/MW	13.67	4.64
1 min 最大波动率/%	13.668	4.629
10 min 最大波动值/MW	57.02	23.30
10 min 最大波动率/%	57.017	22.298
功率标准差/MW	31.29	20.76
平滑度 f	182.65	25.42

式(28)中: y 为风电数据; N 为数据长度; x 为窗口

口内的数据子序列长度; ω_i 为权系数,且 $\sum_{i=q}^p \omega_i = 1$;

p 、 q 为小于 x_a 的任一正整数,且 $p+q+1=x_a$ 。

由表2可知,平滑后1 min最大波动率为4.629%,10 min最大波动率为22.298%。MA法本质上是一种低通滤波方法,其通过滤掉时间序列中的高频扰动,有效保留有用的低频趋势分量。且分析图4和表2可知,风电功率波动数据经MA平滑滤波后,其平滑后的两个不同时间尺度的最大波动值均满足我国风电并网标准,风电数据平滑后的最大波动率和平滑度均有显著下降,且平滑后的功率曲线较为平缓。实测风电输出功率与经MA平滑后的并网参考功率之差得到的HESS总参考功率见图5。

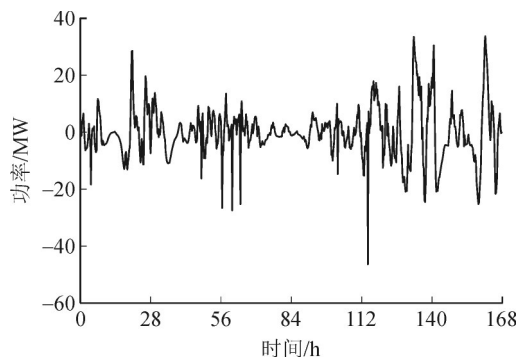


图5 HESS总参考功率

Fig. 5 Total reference power of HESS

采用SE-improved SGMD方法对图5中的HESS总参考功率进行分解,分解得到的各SGC子模态三维分布见图6。由图6可知,利用文中方法一共分解得到14个SGC子模态分量。进一步,利用1.2节所提样本熵相似度对分解得到的14个SGC分量进行重构得到高、低频波动分量。根据1.2节分析可知,SE的计算结果以及重构所需的相似度阈值 ω 与参数 m 和 r 的取值息息相关。参考文[23],当 $m=1$ 或 2 , $r=0.1 \sim 0.25std$ (其中 std 表示待计算时间序列的标准差) 时样本熵统计特征比较合理。故本节计算中取 $m=2$, $r=0.18std$ 。通过式(15)计算得到相似度阈值 ω

为0.594。

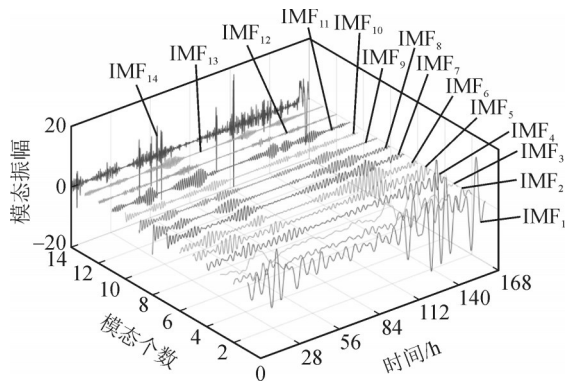


图6 三维SGC子模态分布图

Fig. 6 Three-dimensional SGC sub-modal distribution

计算利用文中方法分解得到的各SGC分量的样本熵见表3。根据表3中SE计算结果可以看出, $SE < \omega(0.594)$ 所占SGC子分量个数为6,故第1~6个分量重构后得到低频波动分量,第7~14个分量重构后得到高频波动分量,见图7。根据1.2节功率分配策略可以确定,SC具有灵敏性高特点,可用于平抑功率波动中的高频分量,而VB以其容量大、寿命长优势可承担平抑波动功率中的低频分量任务,因此将图7中的低频波动分量作为混合储能系统中VB的初始参考功率 $P_v(t)$,而高频波动分量对应着SC的初始参考功率 $P_c(t)$ 。

表3 各SGC分量的样本熵统计情况

Table 3 The sample entropy statistics of each SGC

SGC子分量个数	SE	SGC子分量个数	SE
1	0.322	8	0.642
2	0.367	9	0.659
3	0.435	10	0.681
4	0.489	11	0.706
5	0.547	12	0.724
6	0.587	13	0.789
7	0.621	14	0.865

为证明文中所提功率分配策略的优越性,分别计算文中所提方法与其它两种方法对应的功率分配的经济性。方案1,基于EMD的HESS功率分配策略;方案2,基于VMD分解法的HESS功率分配策略;方案3为基于文中方法的HESS功率分配策略。各储能出厂指标见表4^[24]。同时,根据前文第2节所述配置方法对上述3种方案进行储能配置,利用基于LCC理论的HESS经济性评估模型计算得到各方案的经济成本,具体配置结果见表5(假设设备使用年限 $N=20$ a)。

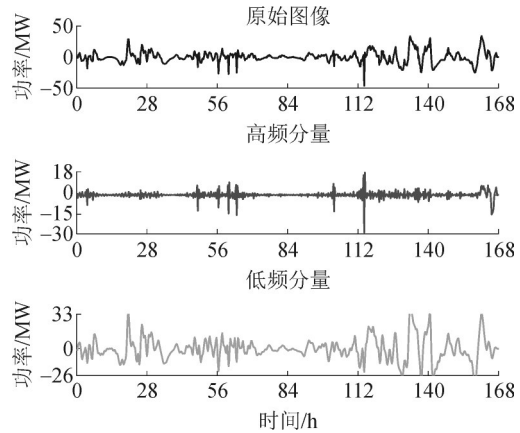


图7 重构后的高、低频波动子分量

Fig. 7 The reconstructed high and low frequency fluctuation sub-components

表4 储能技术参数指标

Table 4 Energy storage technical parameters index

参数	VB	SC
η_{DC-DC}	0.95	0.95
η_{DC-AC}	0.95	0.95
充放电效率	0.80	0.95
SOC限值	0.20~0.80	0.10~0.95
功率成本系数/(元·KW ⁻¹)	2 300	1 860
容量成本系数/(元·KWh ⁻¹)	9 300	12 400
维护单价/(元·KWh ⁻¹)	0.02	0.01

表5 不同方案下HESS配置结果及经济成本

Table 5 HESS configuration results and economic costs under different schemes

参数	方案1	方案2	方案3
VB额定功率/MW	40.7	35.3	32.6
VB额定容量/MWh	19.28	17.84	16.89
SC额定功率/MW	44.39	41.48	39.24
SC额定容量/MWh	5.76	4.89	4.25
经济成本/元	2.39×10^8	1.86×10^8	1.27×10^8

特别说明,表5中的方案2是基于VMD分解的HESS功率分配策略,文中通过分析 $P_{HESS}(t)$ 的窗口傅里叶变换频谱图中峰值个数,从而确定出功率信号中含有的主导振荡模式,以此可以确定VMD模态分解数 $K=9$ 。进一步,将此情况下的9种功率分配方案的经济性成本进行遍历,得到经济性最优情况下的分界点 $K=4$,则选取该分界点下的经济成本在表5中展示。

通过分析表5可知,方案3与方案1、2相比,文中方法所得到的储能设备额定功率和额定容量配置结果均要低于采用EMD和VMD分解方法得到的结果,其原因在于文中方法采用样本熵合理划分高、低频分量,避免了EMD分解结果中存在的模态

混叠问题,以及VMD分解中由于人为选择模态分解数误差带来的额外经济成本,从而合理配置 HESS 的额定功率和额定容量。

为进一步验证文中方法中限幅约束对VB和SC的SOC调节作用的实用性,分别绘制HESS充、放电功率曲线和两种储能设备的SOC变化曲线,分别见图8、9。

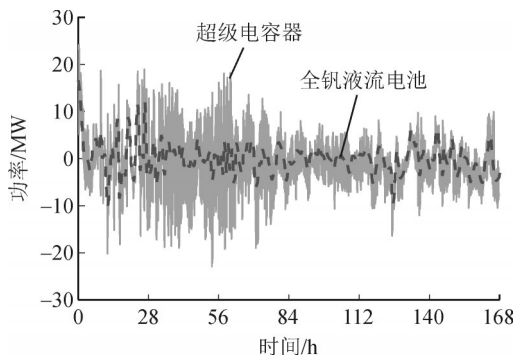


图8 HESS充放电功率曲线

Fig. 8 HESS charge and discharge power curve

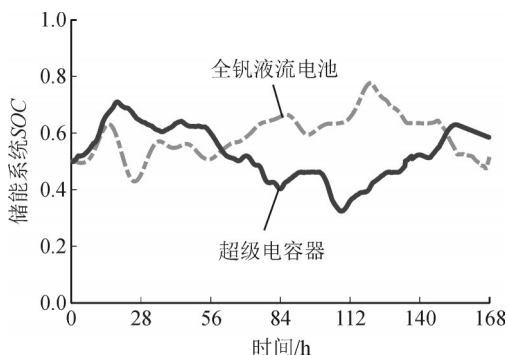


图9 两种储能设备SOC变化曲线

Fig. 9 The SOC change curves of two energy storage devices

由图8可知,VB输出功率曲线比SC输出功率曲线较为平缓,这是因为文中采用基于SE-improved SGMD模型的功率分配策略下,功率低频波动由VB进行补偿平抑而高频波动分量均由SC进行补偿,相较于低频波动来说,功率高频波动快且变化密集,因此SC会有频繁的充放电过程,故SC的充放电次数和充放电深度都较VB更剧烈。

分析图9可知,由于文中进行HESS优化配置过程中充分考虑了充放电功率约束及SOC限幅约束,VB和SC的SOC曲线一直处于上下限之间,无越限情况。此外,SC对VB所不能平抑的功率高频波动分量进行补偿,避免了VB设备工作在过充过放区域。由此可以说明,HESS能够极大降低单一类型储能运行过程中由于频繁切换充放电导致的损耗,也避免了单一类型储能一直越限运行的情况,有利于延长各储能设备的使用年限,降低系统维护

更新成本。

4 结论

针对平抑风电输出功率波动问题,文中提出一种基于样本熵改进的辛几何模态分解方法(SE-improved SGMD)的混合储能功率分配策略。利用SGMD方法对并网参考功率信号进行分解,结合样本熵相似度界定超级电容和全钒液流电池的参考功率,并基于建立的容量配置模型得到两者储能的额定配置容量和额定功率。主要结论如下:

1)文中所提的SE-improved SGMD模型算法,有效避免了EMD和MEEMD算法中存在的模态混叠情况,也避免了VMD算法中人为设置模态分解数对结果的主观性影响,具有明显的信号分解优势。

2)在确定储能额定功率和额定容量过程中,充分考虑了HESS的充放电效率和SOC的限幅约束,有效避免了储能设备过充过放情况。

3)算例分析表明,文中基于SE-improved SGMD的功率分配策略,在补偿平抑风电场输出功率达到并网标准的同时,极大降低HESS的经济成本,说明了方法的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] NATHWANI J, KAMMEN D M. Affordable energy for humanity: A global movement to support universal clean energy access[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(9): 1780-1789.
- [2] JIANG Quanyuan, HONG Haisheng. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363-1372.
- [3] 陈科彬, 邱晓燕, 赵劲帅, 等. 用于补偿风电预测误差的混合储能容量配置及成本分析[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 189-196.
CHEN Kebin, QIU Xiaoyan, ZHAO Jinshuai, et al. Sizing and cost analysis of hybrid energy storage system for compensating wind power forecast errors[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 189-196.
- [4] 贾承宇, 王驰中, 陈衡, 等. 基于多类型储能的新型综合能源技术路线研究[J]. 能源科技, 2023, 21(1): 62-66.
JIA Chengyu, WANG Chizhong, CHEN Heng, et al. Research on technical routes for new integrated energy based on multi-type energy storage[J]. Energy Science and Technology, 2023, 21(1): 62-66.
- [5] 李怡, 李永丽, 李松, 等. 基于VSG的光伏及混合储能系统功率分配与虚拟惯性控制[J]. 电力自动化设备,

- 2023, 43(7): 27-34.
- LI Yi, LI Yongli, LI Song, et al. Power distribution and virtual inertia control of photovoltaic and hybrid energy storage system based on VSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 27-34.
- [6] 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): 116518.
- [7] 郑浩, 谢丽蓉, 叶林, 等. 考虑光伏双评价指标的混合储能平滑出力波动策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1805-1817.
- ZHENG Hao, XIE Lirong, YE Lin, et al. Hybrid energy storage smoothing output fluctuation strategy considering photovoltaic dual evaluation indicators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1805-1817.
- [8] 任凯, 蒋玮, 杨波, 等. 用于平抑间歇性负荷的混合储能系统优化分频定容技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 81-87.
- REN Kai, JIANG Wei, YANG Bo, et al. Optimal frequency division and capacity determination technology of hybrid energy storage system for suppressing intermittent load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 81-87.
- [9] 陈厚合, 杜欢欢, 张儒峰, 等. 考虑风电不确定性的混合储能容量优化配置及运行策略研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 174-182.
- CHEN Houhe, DU Huanhuan, ZHANG Rufeng, et al. Optimal capacity configuration and operation strategy of hybrid energy storage considering uncertainty of wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 174-182.
- [10] 贾伟青, 任永峰, 薛宇, 等. 基于小波包-模糊控制的混合储能平抑大型风电场功率波动[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 357-363.
- JIA Weiqing, REN Yongfeng, XUE Yu, et al. Wavelet packet - fuzzy control of hybrid energy storage for power fluctuation smoothing of large wind farm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(9): 357-363.
- [11] 唐雨晨, 林毅, 王仁顺, 等. 基于变分模态分解的高比例新能源电网调频储能需求计算方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 146-155.
- TANG Yuchen, LIN Yi, WANG Renshun, et al. Demand calculation method of energy storage in high - proportion new energy power system frequency regulation based on variational modal decomposition[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 146-155.
- [12] 李聪, 秦立军. 基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 426-434.
- LI Cong, QIN Lijun. Sizing optimization for hybrid energy storage system independently participating in regulation market using improved particle swarm optimization[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(1): 426-434.
- [13] 李蕊睿, 李奇, 蒲雨辰, 等. 计及功率交互约束的含电-氢混合储能的多微电网系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 53-64.
- LI Ruirui, LI Qi, PU Yuchen, et al. Optimal configuration of an electric-hydrogen hybrid energy storage multi-microgrid system considering power interaction constraints[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 53-64.
- [14] 胡明, 郭健鹏, 李富强, 等. 基于自适应CEEMD方法的电能质量扰动检测与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(21): 103-110.
- HU Ming, GUO Jianpeng, LI Fuqiang, et al. Power quality disturbance detection and analysis based on adaptively complementary ensemble empirical mode decomposition method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 103-110.
- [15] LI Qingsheng, LI Zhen, ZHANG Zhaofeng, et al. Energy storage capacity optimization strategy for combined wind storage system[J]. Energy Reports, 2022(8): 247-252.
- [16] ABDULGALIL M A, KHALID M, ALISMAIL F. Optimizing a distributed wind-storage system under critical uncertainties using benders decomposition[J]. IEEE Access, 2019(7): 77951-77963.
- [17] PAN Haiyang, YANG Yu, LI Xin, et al. Symplectic geometry mode decomposition and its application to rotating machinery compound fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019(114): 189-211.
- [18] RICHMAN J S, MOORMAN J R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy[J]. American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology, 2000, 278(6): H2039-H2049.
- [19] 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/OL]. 电工技术学报: 1-14[2024-05-05]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230915>.
- ZHAO Jingying, QIAO Hengpu, YAO Shuailiang, et al. Capacity configuration strategy of hybrid energy storage considering wind power fluctuation smoothing by self-recovery of energy storage SOC[J/OL]. Journal of Electrical Technology: 1 - 14[2024-05-05]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230915>.
- [20] 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

- sensing technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(2): 30-41.
- [112] 无损检测 基于光纤传感技术的应力监测方法: GB/T 33213—2016[S]. 2016.
- Non-destructive testing-practice for strain monitoring based on fiber sensing technology: GB/T 33213—2016[S]. 2016.
- [113] 电力设备状态监测. 高压电缆防外破新装备[EB/OL]. [2024-05-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/tKC8tQraL2U5PHJ79er9hw>.
- Power Equipment Condition Monitoring. New equipment for preventing high voltage cable from external damage[EB/OL]. [2024-05-12]. <https://mp.weixin.qq.com/s/tKC8tQraL2U5PHJ79er9hw>.
- [114] 曹俊平, 刘浩军, 杨勇, 等. 高压电缆附件铅封涡流探伤方法试验验证及应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3720-3726.
- CAO Junping, LIU Haojun, YANG Yong, et al. Verification and application of lead sealing eddy current testing method of high voltage cable accessories[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3720-3726.
- [115] LI Zhonglei, DU Boxue, LI Wang. Evaluation of high-voltage AC cable grounding systems based on the real-time monitoring and theoretical calculation of grounding currents[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 38-43.
- [116] 丁薇霞. 应用光纤传感技术的高压电缆护层绝缘监测系统[J]. 电线电缆, 2014(5): 22-24.
- DING Weixia. The insulation monitoring system of the HV cable sheath with fiber grating sensing technology[J]. Electric Wire & Cable, 2014(5): 22-24.
- [117] 郭卫, 周松霖, 王立, 等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.
- GUO Wei, ZHOU Songlin, WANG Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [118] 杨静, 朱晓岭, 董翔, 等. 基于护层电流的高压电缆故障在线监测和诊断[J]. 高电压技术, 2016, 42(11): 3616-3625.
- YANG Jing, ZHU Xiaoling, DONG Xiang, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults based on sheath currents[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3616-3625.
- [119] DONG Xiang, YANG Yang, ZHOU Chengke, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults by sheath system currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2281-2290.

吴春芳(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事配网运行和安全管理(Email: 184550569@qq.com)。

陈云(1993—), 女, 博士研究生, 研究方向为关键电力设备状态检测和故障诊断等(通信作者)(E-mail: epchenyun@mail.scut.edu.cn)。

郝艳捧(1974—), 女, 博士(后), 教授, 博士生导师, 研究方向为输电设备状态感知技术、介质阻挡放电和局放等气体放电理论、输变电设备外绝缘安全等(E-mail: yphao@scut.edu.cn)。

(上接第 85 页)

- System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [21] 孙东磊, 赵龙, 孙凯祺, 等. 新能源接入下配电系统混合储能选址定容优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 423-432.
- SUN Donglei, ZHAO Long, SUN Kaiqi, et al. Research on optimization strategy of HESS site and capacity selection in distribution system with renewable energy access[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(1): 423-432.
- [22] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(1): 21-23.
- PEI Yixuan, GUO Min. The fundamental principle and application of sliding average method[J]. Gun Launch & Control Journal, 2001(1): 21-23.
- [23] PINCUS S M. Assessing serial irregularity and its implications for health[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2001(954): 245-267.
- [24] 王苏蓬, 张新慧, 吴文浩, 等. 用于风电平抑的混合储能选型和容量优化配置方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(9): 16-23.
- WANG Supeng, ZHANG Xinhui, WU Wenhao, et al. Hybrid energy storage selection and capacity optimization configuration method for wind power smoothing[J]. Smart Power, 2021, 49(9): 16-23.
- 刘禹彤(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为主要研究电力系统、能源战略、新能源发展及储能等方面。
- 赵琳(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为能源电力规划、综合能源系统分析、电价与电力市场研究。
- 王鑫太(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多类型混合储能在电力系统中的应用(通信作者)(E-mail: 18584358018@163.com)。