DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.251 **中图分类号**：TM732 **文献标志码**：A

用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法

程昱明[1]，孟高军[2]，贾 鹏[1]，吴 瑶[2]
(1.国网河南省电力公司经济技术研究院，郑州 450000；2.南京工程学院电力工程学院，南京 211100)

摘要：通过比较不同功率分解方法用于储能系统容量配置以及混合储能系统HESS(hybrid energy storage system)相对于单一储能系统的经济优势，针对HESS容量优化配置提出了1种基于改进滑动平均滤波和集合经验模态分解EEMD(ensemble empirical mode decomposition)的平抑风电功率波动的方法。首先利用改进滑动平均滤波获得HESS的参考功率，采用EEMD分解将其分解为多个单分量信号——固有模态函数IMF(intrinsic mode function)，并通过希尔伯特变换得到各IMF的时频谱以确定合适的分频频率，将高、低频分量重构得到HESS的参考功率。同时，充分考虑储能系统的充放电效率和荷电状态，配置额定功率和容量。最后，基于全寿命周期成本理论构建储能系统经济成本计算模型，比较不同方案的成本，得到经济最优的配置方案。

关键词：混合储能系统；风电功率波动；集合经验模态分解；滑动平均滤波；全寿命周期成本；容量配置

Optimal Hybrid Energy Storage Capacity Configuration Method for Mitigating Fluctuations of Wind Power

CHENG Yuming[1], MENG Gaojun[2], JIA Peng[1], WU Yao[2]
(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China;
2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100, China)

Abstract: Through a comparison of the economic advantages of different power decomposition methods for energy storage system capacity configuration and hybrid energy storage system (HESS) over one single energy storage system, a method based on improved moving average filtering and ensemble empirical mode decomposition (EEMD) is proposed to mitigate wind power fluctuations in view of the optimal capacity configuration of HESS. First, EEMD was used to decompose the HESS reference power which was derived by improved moving average filtering, so as to obtain several single-component signals, i.e., intrinsic mode functions (IMFs). Then, the time-frequency spectrum of each IMF was processed by Hilbert transform to identify the suitable gap frequency, and the HESS reference power was obtained by reconstructing the high- and low-frequency components. Meanwhile, the charge-discharge efficiency of the energy storage system and its state-of-charge were fully taken into account, and the rated power and capacities were configured. Finally, based on the life cycle cost theory, an economic cost calculation model for the energy storage system was established to compare the cost among different configuration schemes, thereby obtaining the optimal one with the highest economic efficiency.

Keywords: Hybrid energy storage system (HESS); wind power fluctuation; ensemble empirical mode decomposition (EEMD); moving average filtering; life cycle cost; capacity configuration

收稿日期：2022-08-11；**修回日期**：2022-09-24；**录用日期**：2022-11-11；**网络首发日期**：2023-01-09
基金项目：国家自然科学基金面上项目(51877101)；江苏省高等学校自然科学研究资助项目(20KJB470501)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51877101; Natural Science Research Project of Jiangsu Province Colleges and Universities under the grant 20KJB470501

当前，随着“双碳”战略的实施，以光伏、风电为代表的新能源产业取得了快速发展[1]。但是，电网的可靠运行、经济成本很大程度上受到具有强

烈波动特性的风电输出功率的影响，且随着风电渗透率的增加而越发突出。采用储能技术能够有效抑制风电功率波动，确保电网运行的经济性和可靠性[2]。

随着储能技术的发展，目前广泛采用混合储能系统 HESS(hybrid energy storage system)平抑风电功率波动[3]。超级电容器具有能量密度较小、功率密度较大、可进行高倍率充放电和较宽稳定工作范围等特点，作为功率型储能元件可负责平抑高频分量；蓄电池作为能量型储能元件，具有能量密度大、功率密度小的特点，可用来平抑低频分量[4-5]。HESS 充分利用 2 种储能类型优势互补的特性，可增加其运行寿命，提高整体性能。然而，在现有的技术条件下，储能装置的费用较高，过大的储能容量会增加电网的经济成本，但过小的储能容量则会导致储能系统充放电状态频繁切换，缩短储能的使用寿命[6]。因此，研究如何合理配置 HESS 的容量，对于满足系统有效平抑风电功率波动的同时降低经济成本的需求具有现实意义[7-9]。

国内外学者针对储能系统 ESS(energy storage system)容量优化配置方面进行了大量研究，并取得相关成果，常见的 ESS 容量优化配置方案主要有 2 种。一种方案是通过对风电输出功率波动特性进行分析，在满足充放电要求、提高平抑效果的约束条件下，计算得出容量最优的配置方案。文献[10-11]采用一阶低通滤波算法平滑风电输出功率，但没有涉及储能系统运行的经济成本研究且低通滤波存在延迟，降低了容量配置的准确性和实用性；文献[12]采用经验模态分解 EMD(empirical mode decomposition)并建立模糊机会约束模型求解出储能电池和超级电容器系统的容量和功率，但该方法未考虑 HESS 容量配置的经济成本问题，且 EMD 分解法尺度较大、存在模态混叠；文献[13]采用滑动平均法确定风电并网功率并提取混合储能出力，通过小波包分解对蓄电池和超级电容合理地分配低频和高频波动分量，同时构建了计及储能装置寿命损耗的容量经济优化模型，但因小波包分解精确度与原始信号量和原始信号波动程度相关，基波的选择不同使分解出来的信号分量产生变化，且重构过程会引入误差，因此功率分解过程的复杂度增加；文献[14]采用离散傅里叶变换对不平衡功率进行分解，但分解时会产生繁冗的计算过程，增大计算量。上述研究常用的低通滤波、EMD 分解及离散傅里叶变换等方法在维持电网安全性、可靠性和经济性方面仍然存在不足，需进一步改进。另一种方法是通过分析系统成本、效益构成，建立经济目标函数，计算效益最优的容量配置方案。文献[15]通过分析不同经济敏感因素对配置结果的影响，基于全寿命周期成本理论构建系统经济模型，求得功率与容量最优配置值；文献[16]以满足 HESS 技术要求及工程指标为目标，提出了 Bloch 球面量子遗传算法，以储能系统成本最低为目标建立目标函数求解配置的容量值；文献[17-18]建立基于电池寿命量化的 HESS 容量优化模型，通过计算不同分频点所对应的经济成本，求得年综合成本最低的分点作为最优分点，进而应用最优分点分配功率得到最佳容量配置方案。

基于上述分析，本文在满足风电并网标准、利用各储能设备优势互补提高利用率、降低系统的运行成本等方面做进一步研究，提出了 1 种计及风电波动平抑与经济性的 HESS 容量优化方法。应用改进滑动平均滤波对风电原始出力进行平抑，将风电原始出力与平抑后的结果做差得到 HESS 参考出力，采用基于改进滑动平均滤波和集合经验模态分解 EEMD(ensemble empirical mode decomposition)对其进行功率分解，并结合希尔伯特(Hilbert)变换得到最优的分频频率，依据蓄电池与超级电容器的储能特性进行功率的初次分配，经过所提混合储能容量配置方法得到各储能元件的内部初始功率，通过限幅控制对各储能设备的充放电功率加以约束，最后结合某风电场出力数据，基于全寿命周期成本 LCC(life cycle cost)理论构建储能系统经济成本计算模型，比较不同方案的成本，得到经济最优的配置方案。

1 电网中的风储联合发电系统

图 1 为风储联合发电系统的结构框图，由风力

发电系统、混合储能系统、能量管理系统EMS (energy management system)和电网构成。其中，混合储能系统的蓄电池与超级电容器通过EMS中的变换器实现内部功率转换和与电网之间的能量交互。图中：P_{WG}为风电机组的原始出力；P_{HESS}为HESS充放电功率；P_G为并网参考功率。当$P_{WG}>P_G$时，剩余的风电机组输出的原始功率由HESS充电吸收，此时$P_{HESS}(t)>0$；当$P_{WG}(t)\leqslant P_G(t)$时，并网功率的缺额部分由HESS放电补偿，此时$P_{HESS}(t)\leqslant 0$。为简化计算，本文暂不考虑负载的影响。

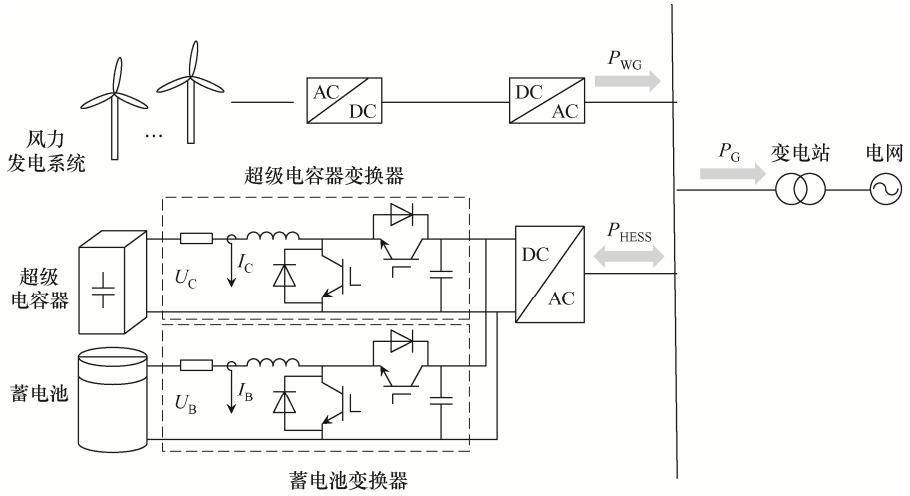


图 1　风储联合发电系统结构

Fig. 1 Structure of wind-energy storage power generation system

2　基于改进滑动平均滤波和EEMD分解的混合储能平抑方法

2.1　改进滑动平均滤波

为保障风电并网后电力系统的安全稳定运行，本文选择改进滑动平均滤波平滑风电输出功率，以满足并网要求。改进滑动平均滤波是将前一时刻的平滑数据与当前时刻的实际数据进行加权处理，经过处理后的数据作为当前时刻的平滑值[19]。改进滑动平均滤波的公式为

$$\begin{cases} P_G(t)=\alpha P_{WG}(t)+\beta P_G(t-1) \\ \beta=1-\alpha \end{cases} \quad \alpha\in[0,1] \quad (1)$$

式中：$P_G(t-1)$为平滑后的系统并网参考功率；α为平滑系数。

将利用改进滑动平均滤波获得的系统并网参考功率 $P_G(t)$与风电输出功率 $P_{WG}(t)$做差后得到HESS参考功率$P_{HESS}(t)$，即

$$P_G(t)=P_{WG}(t)+P_{HESS}(t) \quad (2)$$

$$P_{HESS}(t)=P_B(t)+P_C(t) \quad (3)$$

式中：$P_B(t)$为蓄电池初次分配的功率值；$P_C(t)$为超级电容器初次分配的功率值。当$P_{WG}(t)>P_G(t)$时，$P_{HESS}(t)<0$，HESS充电；当$P_{WG}(t)<P_G(t)$时，$P_{HESS}(t)>0$，HESS放电。

2.2　集合经验模态分解

EMD适合对非平稳非线性信号进行分析，但EMD分解法得到的IMF分量往往存在模态混叠，造成IMF分量不精确，EEMD可更好地解决这一问题，其原理是将白噪声扰动加入待分解的原始信号中，再对添加了白噪声扰动的原始信号进行EMD分解，将多次分解所得到的IMF做集成平均处理后作为最终的IMF[20]。

对HESS参考功率进行EEMD分解步骤如下。

(1)对HESS参考功率$P_{HESS}(t)$叠加1组高斯白噪声信号$w(t)$，得到1个总体信号$P(t)$，即

$$P(t)=P_{HESS}(t)+w(t) \quad (4)$$

(2)对$P(t)$进行EMD分解，得到各IMF分量，即

$$P(t)=\sum_{i=1}^{n}c_i(t)+r_{\mathrm{n}}(t) \tag{5}$$

式中：$c_i(t)$为第 i 个 IMF；$r_{\mathrm{n}}(t)$为信号残余分量。

(3)将第 j 组高斯白噪声信号叠加给 HESS 参考功率 $P_{\mathrm{HESS}}(t)$，重复步骤(1)和步骤(2)，即

$$\begin{cases}P_j(t)=P_{\mathrm{HESS}}(t)+w_j(t)\\ P_j(t)=\sum_{i=1}^{n}c_{ji}(t)+r_{j\mathrm{n}}(t)\end{cases} \tag{6}$$

式中：$w_j(t)$为第 j 组相互独立的白噪声信号；$P_j(t)$为第 j 次加入高斯白噪声信号后的不平衡功率信号；$c_{ji}(t)$为第 j 次分解后得到的第 i 个 IMF；$r_{j\mathrm{n}}(t)$为第 j 次分解得到的剩余分量。

(4)当 EMD 分解次数达到 N 次时，得到 N 组分解结果，即

$$\begin{cases}[c_{11}(t),c_{12}(t),\cdots,c_{1i}(t),\cdots,c_{1n}(t),r_{1\mathrm{n}}(t)]\\ \vdots\\ [c_{j1}(t),c_{j2}(t),\cdots,c_{ji}(t),\cdots,c_{jn}(t),r_{j\mathrm{n}}(t)]\\ \vdots\\ [c_{N1}(t),c_{N2}(t),\cdots,c_{Ni}(t),\cdots,c_{Nn}(t),r_{N\mathrm{n}}(t)]\end{cases} \tag{7}$$

(5)由于零均值噪声的特性，将多次叠加的高斯白噪声对 IMF 的影响相互抵消，HESS 参考功率 $P_{\mathrm{HESS}}(t)$对应的 IMF 分量 $c_i(t)$及剩余分量 $r_{\mathrm{n}}(t)$可分别表示为

$$\begin{cases}c_i(t)=\dfrac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}c_{ji}(t)\\ r_{\mathrm{n}}(t)=\dfrac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}r_{j\mathrm{n}}(t)\end{cases} \tag{8}$$

(6)经过 EEMD 分解后重构的 $P_{\mathrm{HESS}}(t)$可表示为

$$P_{\mathrm{HESS}}(t)=\sum_{i=1}^{n}c_i(t)+r_{\mathrm{n}}(t) \tag{9}$$

2.3 基于 EEMD 分解的希尔伯特变换

时频谱一般可通过对分解后的模态分量进行希尔伯特变换获得。同时，由于 EEMD 分解过程的特性，决定了希尔伯特时频谱上 c_i 的瞬时频率普遍高于 c_{i+1} 的瞬时频率，因此，需确定合适的分频频率，使得两两相邻的瞬时频率-时间曲线之间混叠最少，从而提高分解精度和经济性。

HESS 参考功率信号如式(9)所示，对每个模态分量 $c_i(t)$进行希尔伯特变换后为 $H[c_i(t)]$，则

$$H[c_i(t)]=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{c_i(\tau)}{t-\tau}\mathrm{d}\tau \tag{10}$$

构造各模态分量的解析信号 $z_i(t)$，即

$$z_i(t)=c_i(t)+\mathrm{j}H[c_i(t)]=a_i(t)\mathrm{e}^{[\mathrm{j}\phi_i(t)]} \tag{11}$$

$$a_i(t)=\sqrt{c_i^{\,2}(t)+H^2[c_i(t)]} \tag{12}$$

$$\phi_i(t)=\arctan\frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)} \tag{13}$$

$$\omega_i(t)=\frac{\mathrm{d}\phi_i(t)}{\mathrm{d}t} \tag{14}$$

式中：$a_i(t)$为 $c_i(t)$的瞬间幅值；$\phi_i(t)$为 $c_i(t)$的瞬时相位；$\omega_i(t)$为各模态分量的瞬时频率。进一步求解可得到希尔伯特时频谱，即 $H(\omega,t)$，其在整个频率段随时间和频率的变化规律可表示为

$$H(\omega,t)=\mathrm{Re}\left\{\sum_{i=1}^{n}a_i(t)\mathrm{e}^{[\mathrm{j}\int\omega_i(t)\mathrm{d}t]}\right\} \tag{15}$$

2.4 混合储能系统功率重构

从希尔伯特变换计算得到的各IMF分量的时频谱可以直观地看出，一定存在 1 个分频频率 ω_k 使两两紧邻的 $c_i(k)$和 $c_i(k+1)$在能量混叠尽量少的情况下分离开来。因此，将 EEMD 分解信号进行重构，低于 ω_k 的各个 IMF 分量作为蓄电池的参考功率，高于 ω_k 的各个 IMF 分量作为超级电容器的参考功率，即

$$\begin{cases}P_{\mathrm{B}}(t)=\sum_{i=k+1}^{n}c_i(t)+r_{\mathrm{n}}(t)\\ P_{\mathrm{C}}(t)=\sum_{i=1}^{k}c_i(t)\end{cases} \tag{16}$$

风电输出功率分解重构整体过程如图 2 所示。风电原始功率经改进滑动平均滤波后得到并网参考功率，两者做差之后得到混合储能系统参考功率，随之将其进行 EEMD 分解，并经希尔伯特变换后，根据两两相邻的瞬时频率-时间曲线混叠最少的原则确定合适的分频频率，初步分配高低频波动分量。

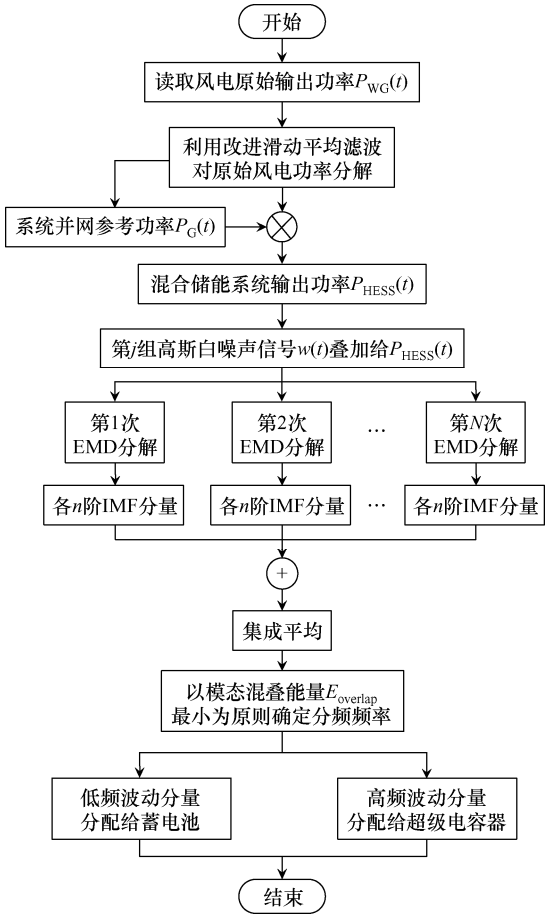


图 2　风电输出功率分解重构流程

Fig. 2 Decomposition and reconstruction process of wind power output power

3　HESS 容量优化配置和经济性评估

根据以上分析，HESS 参考功率信号经过 EEMD 分解并经希尔伯特变换后，取频率ω_k为分频频率，将高、低频重构后得到蓄电池、超级电容器的参考补偿功率。本节再依据式(16)内部初步分配的功率对蓄电池与超级电容的额定功率和额定容量进行优化配置。

3.1　混合储能系统功率配置

设储能元件的额定功率为 P_{ref}，在一定时间内若混合储能系统的出力需求为 $P_{\text{HESS}}(t)$，那么配置的 P_{ref}必须在这个时间内吸收或补偿 $P_{\text{HESS}}(t)$出现的最大出力剩余或最大出力缺额，及时进行动态消纳。在考虑变流器效率、HESS 充电效率 η_{in}和 HESS 放电效率 η_{out}的情况下配置的额定功率为

$$P_{\text{ref}}=\max\left\{\left|\max_{t\in(t_0,t_0+T)}P_{\text{HESS}}(t)\right|\eta_{\text{DC-DC}}\eta_{\text{DC-AC}}\eta_{\text{in}},\frac{\left|\min\limits_{t\in(t_0,t_0+T)}P_{\text{HESS}}(t)\right|}{\eta_{\text{DC-DC}}\eta_{\text{DC-AC}}\eta_{\text{out}}}\right\}\tag{17}$$

式中：$P_{\text{HESS}}(t)$为混合储能系统的充放电功率；$\eta_{\text{DC-DC}}$ 和 $\eta_{\text{DC-AC}}$ 为换流器的能量转换效率；η_{in}、η_{out}为混合储能系统的充、放电效率；T为时间间隔。

3.2　混合储能系统容量配置

设混合储能系统荷电状态的初始值为 $S_{\text{OC},0}$，在 i 时刻的荷电状态为

$$S_{\text{OC},i}=S_{\text{OC},0}+\frac{\int_0^{i\Delta T}P_{\text{ESS}}(t)\text{d}t}{E_{\text{ref}}}\tag{18}$$

$$S_{\text{OC,low}}\leqslant S_{\text{OC},i}\leqslant S_{\text{OC,up}}\tag{19}$$

式中：ΔT为储能系统功率指令间隔；$S_{\text{OC,up}}$、$S_{\text{OC,low}}$分别为荷电状态的上、下限；$P_{\text{ESS}}(t)$为计及换流器能量转换效率和充放电效率的功率需求时间序列；E_{ref}为额定容量。

将式(18)代入式(19)得

$$\begin{cases}E_{\text{ref}}\geqslant\dfrac{-\min(\int_0^{i\Delta T}P_{\text{ESS}}(t)\text{d}t)}{S_{\text{OC},0}-S_{\text{OC,low}}}\\[2ex]E_{\text{ref}}\geqslant\dfrac{\max(\int_0^{i\Delta T}P_{\text{ESS}}(t)\text{d}t)}{S_{\text{OC,up}}-S_{\text{OC},0}}\end{cases}\tag{20}$$

由此得到额定容量的计算公式，即

$$E_{\text{ref}}=\max\left\{\frac{\max\limits_{t\in T}\int_0^{i\Delta T}P_{\text{ESS}}(t)\text{d}t}{S_{\text{OC,up}}-S_{\text{OC},0}},\frac{-\min\limits_{t\in T}\int_0^{i\Delta T}P_{\text{ESS}}(t)\text{d}t}{S_{\text{OC},0}-S_{\text{OC,low}}}\right\}\tag{21}$$

3.3　混合储能系统限幅控制

限幅控制的结构如图 3 所示，主要包括 EEMD 分解模块、功率初级分配模块和限幅模块。第 2.2 节将高、低频分量重构进而确定蓄电池与超级电容器的初始参考功率，但却忽略了 2 种储能介质的容量，因此，需要对各储能设备的运行出力加以限值，确保其在工作过程中一直在额定阈值内运行。

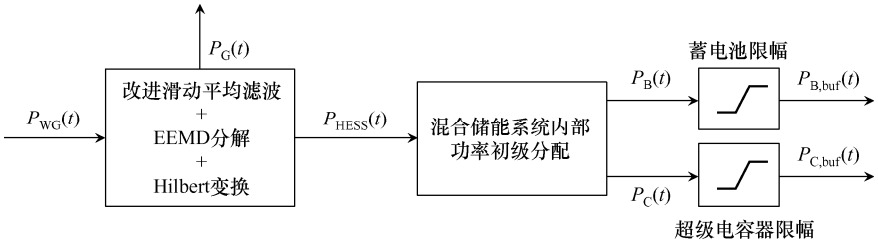


图 3 限幅控制层结构

Fig. 3 Structure of amplitude limiting control layer

限幅控制器主要是根据 HESS 及其储能元件当前的工作状态，考虑充放电功率等相关限制条件，确定最大/最小功率，对储能元件的运行功率进行限幅处理，以防止其超出储能元件出力的最大范围。

由于蓄电池、超级电容器均有最大/最小充放电功率值，为避免其出力超过限定值，需进行限幅控制，蓄电池、超级电容器需分别满足

$$\begin{cases} P_{\mathrm{B}}(t) \leqslant P_{\mathrm{B,max}} & P_{\mathrm{B}}(t) > 0 \\ P_{\mathrm{B}}(t) \geqslant P_{\mathrm{B,min}} & P_{\mathrm{B}}(t) \leqslant 0 \end{cases} \tag{22}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{C}}(t) \leqslant P_{\mathrm{C,max}} & P_{\mathrm{C}}(t) > 0 \\ P_{\mathrm{C}}(t) \geqslant P_{\mathrm{C,min}} & P_{\mathrm{C}}(t) \leqslant 0 \end{cases} \tag{23}$$

式中：$P_{\mathrm{B,max}}$、$P_{\mathrm{B,min}}$ 分别为蓄电池充放电功率上、下限；$P_{\mathrm{C,max}}$、$P_{\mathrm{C,min}}$ 分别为超级电容充放电功率上、下限。

3.4 混合储能系统经济性评估

全寿命周期成本 LCC 是指在设定的系统运行寿命周期内，所需评价系统在投资、安装、更换、维护、回收等一切工作过程中所产生的或潜在的全部直接或间接的费用总和[21-22]。综合考虑混合储能系统整个配置和运营所带来的经济效益，建立了基于 LCC 理论的 HESS 经济性评估模型。系统总成本 C_{sum} 计算公式为

$$C_{\mathrm{sum}} = C_{\mathrm{invest}} + C_{\mathrm{change}} + C_{\mathrm{maintain}} \tag{24}$$

式中：C_{invest} 为 HESS 的安装设备成本，主要包括混合储能系统及其附加设备的购置费用；C_{change} 为 HESS 的设备寿命终止产生的更换成本，主要指混合储能系统在整个使用周期内，因元件损耗、老化或运行参数达不到要求进行更换所需要的投资；C_{maintain} 为运行维护成本，主要包括系统常规保养、检修及故障后维修成本。

(1)安装设备成本

$$C_{\mathrm{invest}} = \alpha_{pb} P_{\mathrm{B}} + \beta_{eb} E_{\mathrm{B}} + \alpha_{pc} P_{\mathrm{C}} + \beta_{ec} E_{\mathrm{C}} \tag{25}$$

式中：P_{B}、E_{B} 分别为蓄电池配置的功率、容量；P_{C}、E_{C} 分别为超级电容器配置的功率、容量；α_{pb}、β_{eb} 分别为蓄电池的功率成本因数、容量成本因数；α_{pc}、β_{ec} 分别为超级电容器的功率成本因数、容量成本因数。

(2)更换成本

$$C_{\mathrm{change}} = q_1(\alpha_{pb} P_{\mathrm{B}} + \beta_{eb} E_{\mathrm{B}}) + q_2(\alpha_{pc} P_{\mathrm{C}} + \beta_{ec} E_{\mathrm{C}}) \tag{26}$$

式中，q_1、q_2 为蓄电池、超级电容器的更换次数。

(3)运行维护成本

$$C_{\mathrm{maintain}} = N_{\mathrm{d}}(k_1 E_{\mathrm{B}} + k_2 E_{\mathrm{C}}) \tag{27}$$

式中：k_1、k_2 为蓄电池、超级电容器的运行维护单价；N_{d} 为设备使用期数。

4 仿真验证及分析

以某装机容量为 30 MW 的风电场某日全天输出有功功率数据为例，在 MATLAB 中进行仿真分析(采样间隔为 7 s)。根据我国风电并网标准：装机容量在 30 MW 内的风电场，任意 1 min 间隔最大有功功率变化不超过 3 MW，任意 10 min 间隔最大有功功率变化不超过 10 MW。通过改进滑动平均滤波确定符合波动限制的窗口长度为 200。

通过改进滑动平均滤波得到的并网参考功率曲线如图 4 所示，可以看出此方法得到的并网参考功率曲线平缓且与风电输出功率曲线十分契合，风电输出功率与并网参考功率做差得到的HESS参考功率如图 5 所示。对平滑前后的风电并网数据进行

分析，结果见表 1，可以看出，风电输出功率经过改进滑动平均滤波后各项参数指标均明显下降。平滑后 1 min 内最大波动量由 3.77 MW 下降为 2.49 MW，10 min 内最大波动量由 5.45 MW 下降为 4.20 MW，以上 2 组数据表明平滑后符合国家并网标准要求。

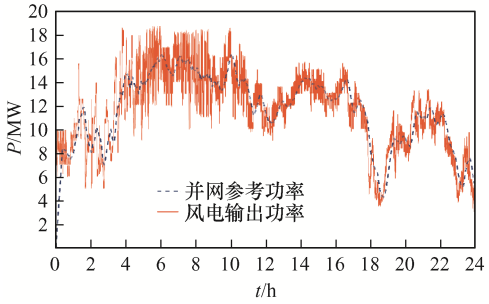


图 4　HESS 平抑风电功率波动效果

Fig. 4 Smoothing effect of HESS on wind power fluctuations

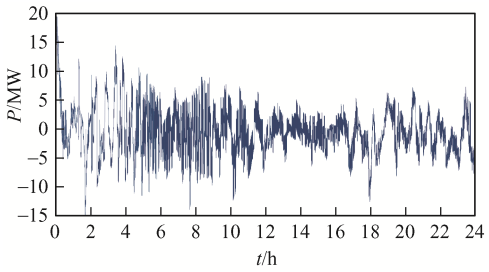


图 5　HESS 参考输出功率

Fig. 5 HESS reference output power

表 1　风电数据统计

Tab. 1 Statistics of wind power data

参数	平滑前	平滑后
1 min 最大波动量/MW	3.77	2.49
1 min 最大波动率/%	17.14	11.32
10 min 最大波动量/MW	5.45	4.20
10 min 最大波动率/%	24.77	19.09
功率标准差/MW	2.31	2.24
平稳性指标	179.74	19.17

采用 EEMD 对图 5 中 HESS 参考功率 $P_{\mathrm{HESS}}(t)$ 进行分解，按照频率范围由高到低被分解为 13 个 IMF 和 1 个余量，图 6 给出了部分 IMF 和余量。图 7 为部分 IMF 的瞬时频率时间曲线，分析可知，$c_6(t)$与 $c_7(t)$能量混叠最少，取 k=6 作为频率划分分界点重构 $P_{\mathrm{HESS}}(t)$，因此功率型储能输出功率参考值 $P_{\mathrm{C}}(t)=c_1(t)+c_2(t)+c_3(t)+c_4(t)+c_5(t)+c_6(t)$，能量型储能输出功率参考值 $P_{\mathrm{B}}(t)=c_7(t)+c_8(t)+c_9(t)+c_{10}(t)+c_{11}(t)+c_{12}(t)+c_{13}(t)+r_{\mathrm{n}}(t)$。

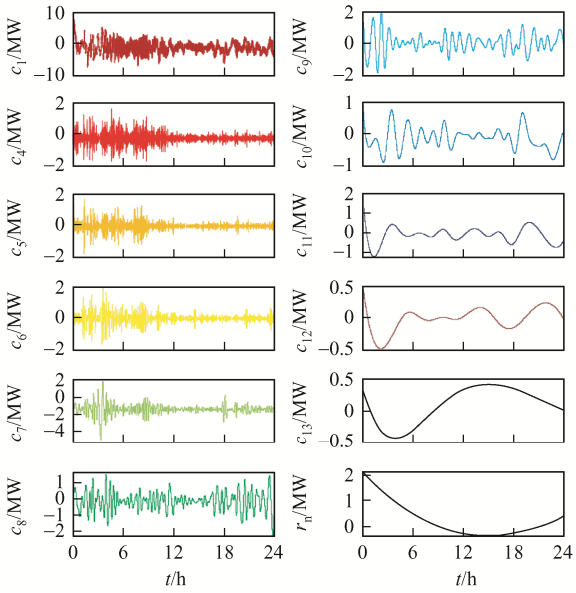


图 6　部分 IMF 和余量

Fig. 6 Some IMFs and remainder

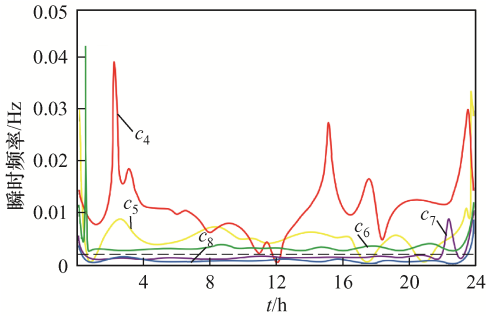


图 7　部分 IMF 的瞬时频率−时间曲线

Fig. 7 Curves of instantaneous frequency-time for some IMFs

为验证本文所提方法的经济优势，采取 3 种配置方案进行对比。方案 1 为蓄电池单一储能，方案 2 为基于 EMD 分解法的蓄电池和超级电容器的 HESS，方案 3 为本文方法，各储能参数见表 2。同时，根据 3.1 节及 3.2 节所述配置方法对 3 种方案进行配置，利用 HESS 经济成本计算模型可计算得出各配置方案的经济成本，具体配置结果见表 3(假设储能的全寿命周期为 10 年)。

通过对表 3 的分析可知，与方案 2 和方案 3 相比，本文方法的额定功率和额定容量配置低于 EMD 分解得到的结果，这是因为 EEMD 分解将多次 EMD 分解得到的 IMF 做集成平均处理后作

表 2 储能技术参数指标

Tab. 2 Technical parameters of energy storage

参数	蓄电池	超级电容
$\eta_{DC\text{-}DC}$	0.95	0.95
$\eta_{DC\text{-}AC}$	0.95	0.95
充放电效率	0.80	0.95
SOC 阈值	0.15~0.85	0.10~0.90
功率成本系数/(元/kW)	2 300	1 860
容量成本系数/(元/kW·h)	930	12 400
维护单价/(元/kW·h)	0.02	0.01

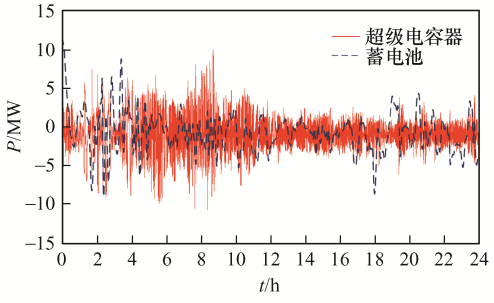
表 3 HESS 配置结果

Tab. 3 Capacity configuration results of HESS

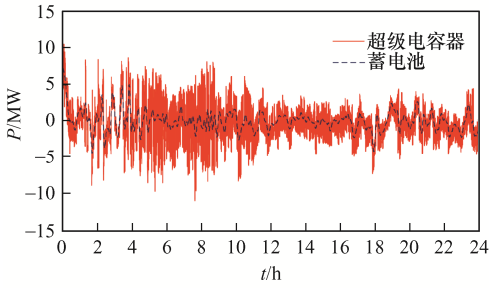
参数	方案 1	方案 2	方案 3
蓄电池额定功率/MW	15.479 9	5.393 6	5.046 0
蓄电池额定容量/MW·h	20.032 7	7.090 5	6.047 8
超级电容器额定功率/MW	—	13.411 7	10.470 8
超级电容器额定容量/MW·h	—	10.113 4	8.453 7
系统综合成本/元	$4.414\ 3\times10^7$	$3.961\ 0\times10^7$	$3.597\ 1\times10^7$

为最终的 IMF，有效避免了传统模态分解中存在的混叠效应及两两相邻曲线模态无法正确分离的现象，更好地分解了风电输出功率中的波动分量，从而降低储能系统配置的功率和容量。同时，对比方案 1 和方案 3 可知，采用 HESS 方案经济性优于单一储能方案，这是因为 HESS 可以显著增加蓄电池的循环寿命，因此方案3 可作为平抑风电波动应用下容量配置的推荐方案。

为进一步比较 EMD 分解法和 EEMD 分解法对于 HESS 容量配置结果的影响，分别绘制图 8(a)经 EMD 分解得到的 HESS 充放电功率曲线和图 8(b)经 EEMD 分解得到的 HESS 充放电功率曲线。通过对比分析可知，采用 EMD 分解时，蓄电池的充放电较为频繁，且充放电功率大于采用本文方法时蓄电池的充放电功率。可见，采用本文所提方法，蓄电池的充放电次数及充放电深度均有明显的降低，可使混合储能系统功率分配更合理，有利于延长蓄电池的使用寿命，降低系统投资成本。



(a)EMD分解

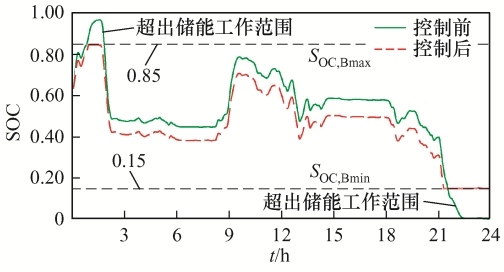


(b)EEMD分解

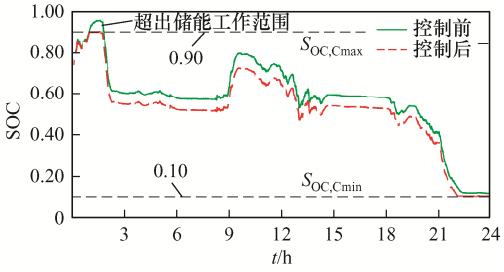
图 8 HESS 充放电功率曲线

Fig. 8 Curves of HESS charge and discharge power

同时，为了验证限幅控制对储能设备的荷电状态调节作用的有效性，分别给出 2 种储能设备控制前与控制后的SOC 变化曲线对比，如图9 所示。



(a)控制前后蓄电池SOC对比



(b)控制前后超级电容器SOC对比

图 9 限幅控制前后混合储能 SOC 对比

Fig. 9 Comparison of hybrid energy storage SOC before and after amplitude limiting control

可以看出，当未进行限幅控制时，不能保证蓄电池 SOC 一直在 0.15~0.85 之间变化，超级电容器同样，两者均有越限的现象，甚至蓄电池的 SOC 有接近极限值 1 的情况发生，这严重影响了储能元件的使用寿命。当进行限幅控制后，蓄电池、超级电容器的 SOC 曲线一直在其上下限之内，没有出现越限的现象，避免了设备工作在过充、过放区域，延长其运行寿命。

5　结语

为抑制风电功率波动，降低储能系统经济成本，本文针对 HESS 容量优化配置提出了 1 种基于改进滑动平均滤波和集合经验模态分解的平抑风电功率波动的方法，并考虑混合储能系统的充放电效率和 SOC，通过所采用的限幅控制进一步调节后，可有效避免出现过充过放的情况。最后，基于 LCC 理论构建储能系统经济成本计算模型，比较不同方案的成本，得到经济最优的配置方案。仿真分析表明，本文所提 HESS 容量配置方法不仅能够给出平抑风电波动使其达到并网标准要求的 HESS 容量配置方案，而且可以避免分解过程中的模态混叠效应，在有效抑制风电输出功率波动的同时，减少 HESS 所配置的额定功率和额定容量，降低 HESS 经济成本。

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] 袁小明, 程时杰, 文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 14-18.
Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Wen Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18. (in Chinese)

[3] 何平，雷勇，杜佳耘，等. 基于 EWT-FC 方法的氢-超级电容混合储能功率分配[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 191-199.
He Ping, Lei Yong, Du Jiayun, et al. Hydrogen-supercapacitor hybrid energy storage power distribution based on EWT-FC method [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 191-199. (in Chinese)

[4] Yuan Yue, Sun Chengchen, Li Mengting, et al. Determination of optimal supercapacitor-lead-acid battery energy storage capacity for smoothing wind power using empirical mode decomposition and neural network [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 127: 323-331.

[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: 116518.

[6] 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. (in Chinese)

[7] 李宏仲, 张仪, 孙伟卿. 小波包分解下考虑广义储能的风电功率波动平抑策略[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4495-4504.
Li Hongzhong, Zhang Yi, Sun Weiqing. Wind power fluctuation smoothing strategy with generalized energy storage under wavelet packet decomposition [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4495-4504. (in Chinese)

[8] Liao Kai, Xu Yan, Yin Minghui, et al. A virtual filter approach for wind energy conversion systems for mitigating power system frequency fluctuations [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1268-1277.

[9] Nikoobakht A, Aghaei J, Shafie-khah M, et al. Allocation of fast-acting energy storage systems in transmission grids with high renewable generation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1728-1738.

[10] 李军徽, 高天宇, 赵冰, 等. 抑制风电功率波动的电池

储能系统自适应控制策略设计[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(3): 278-283.
Li Junhui, Gao Tianyu, Zhao Bing, et al. Inhibition of wind power fluctuations of battery energy storage system adaptive control strategy design [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(3): 278-283. (in Chinese)

[11] 曹超, 马玉鑫, 常悦, 等. 基于经验模态分解和模糊机会约束的混合储能容量配置方法[J]. 分布式能源, 2016, 1(3): 43-48.
Cao Chao, Ma Yuxin, Chang Yue, et al. Capacity allocation method of hybrid energy storage system based on empirical mode decomposition and fuzzy chance constrained programming [J]. Distributed Energy, 2016, 1(3): 43-48. (in Chinese)

[12] 陈科彬, 邱晓燕, 史光耀, 等. 基于滑动平均与小波包分解的混合储能容量优化[J]. 电测与仪表, 2018, 55(7): 62-65.
Chen Kebin, Qiu Xiaoyan, Shi Guangyao, et al. Optimization of hybrid energy storage capacity based on moving average and wavelet packet decomposition [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(7): 62-65. (in Chinese)

[13] Makarov Y V, Du Pengwei, Kintner-Meyer M C W, et al. Sizing energy storage to accommodate high penetration of variable energy resources [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 34-40.

[14] 贾燕冰, 郑晋, 陈浩, 等. 基于集合经验模态分解的火-储联合调度调频储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2930-2937.
Jia Yanbing, Zheng Jin, Chen Hao, et al. Capacity allocation optimization of energy storage in thermal-storage frequency regulation dispatch system based on EEMD [J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2930-2937. (in Chinese)

[15] 刘永前, 梁超, 阎洁, 等. 风-光电站中储能系统混合最优配置及其经济性研究[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 143-150.
Liu Yongqian, Liang Chao, Yan Jie, et al. Optimal configuration and economic study of hybrid energy storage system in wind and solar power plants [J]. Electric Power, 2020, 53(12): 143-150. (in Chinese)

[16] 马速良, 马会萌, 蒋小平, 等. 基于 Bloch 球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 592-599.
Ma Suliang, Ma Huimeng, Jiang Xiaoping, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system based on Bloch spherical quantum genetic algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 592-599. (in Chinese)

[17] 丁明, 吴杰, 张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 593-599.
Ding Ming, Wu Jie, Zhang Jingjing. Capacity optimization method of hybrid energy storage system for wind power smoothing [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(3): 593-599. (in Chinese)

[18] 丁明, 吴建锋, 朱承治, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 22-29.
Ding Ming, Wu Jianfeng, Zhu Chengzhi, et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 22-29. (in Chinese)

[19] 吴建锋, 朱承治. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1):22-29.
Wu Jianfeng, Zhu Chengzhi. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 22-29. (in Chinese)

[20] 付菊霞, 陈洁, 滕扬新, 等. 基于集合经验模态分解的风电混合储能系统能量管理协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2038-2046.
Fu Juxia, Chen Jie, Teng Yangxin, et al. Energy management coordination control strategy for wind power hybrid energy storage system based on EEMD [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2038-2046. (in Chinese)

[21] 严干贵, 朱星旭, 李军徽, 等. 内蕴运行寿命测算的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 110-114.
Yan Gangui, Zhu Xingxu, Li Junhui, et al. Control

strategy design for hybrid energy storage system with intrinsic operation life measurement and calculation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 110-114. (in Chinese)

[22] 李建林, 修晓青, 吕项羽, 等.储能系统容量优化配置及全寿命周期经济性评估研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(4):1-13.

Li Jianlin, Xiu Xiaoqing, Lu Xiangyu, et al. Review on capacity optimization configuration and life cycle economic evaluation method for energy storage system [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 1-13. (in Chinese)



程昱明

作者简介：

程昱明(1987—)，男，博士，高级工程师。研究方向：新能源与电网规划研究。E-mail：308215343@qq.com。

孟高军(1987—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：电力电子与先进储能技术。E-mail：gjun_m@126. com。

贾鹏(1982—)，男，博士，副教授。研究方向：先进储能技术。E-mail：510761967@qq.com。

吴瑶(1996—)，女，硕士，工程师。研究方向：新能源与储能技术。E-mail：wuyao@126.com。

(责任编辑：郭凯凯)