

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220120

基于 CEEMDAN-HT 的平抑光伏出力混合储能 容量优化配置

闫群民¹, 刘语忱¹, 董新洲^{1,2}, 马永翔¹

(1. 陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要: 光伏出力具有间歇性和波动性, 利用储能装置可减小光伏并网对电网的影响。以平抑光伏功率波动效果为标准, 提出了一种由超级电容和蓄电池组成的混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)的容量配置方法。采用由递推平均和中值平均加权滤波的算法平滑光伏出力, 得到光伏并网功率和 HESS 参考功率。利用完全集合经验模态分解和希尔伯特变换提取 HESS 参考功率的高频与低频分量, 对 HESS 内部功率进行一次分配。之后为了避免 HESS 荷电状态频繁越限, 同时保证 HESS 能持续工作, 提出一种 HESS 功率的均衡管理方法, 对一次分配功率的衰减进行修正, 再对修正后的 HESS 参考功率进行容量配置。最后, 基于全寿命周期成本建立经济评估模型, 对比不同的储能容量配置策略, 利用实际数据仿真验证了所提方法的有效性与经济性。

关键词: 光伏发电; 混合储能; 平抑功率波动; 完全集合经验模态分析; 容量配置

Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT

YAN Qunmin¹, LIU Yuchen¹, DONG Xinzhou^{1,2}, MA Yongxiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: PV output is intermittent and volatile, and the use of energy storage devices can reduce the impact of PV grid-connected on the grid. A capacity configuration of a hybrid energy storage system (HESS) composed of super capacitor and battery is proposed based on the effect of smoothing the PV power fluctuation. An algorithm of recursive average and median average weighted filtering is used to smooth the PV output, and the PV grid-connected power and HESS reference power are obtained. The high frequency and low frequency components of HESS reference power are extracted by complete ensemble empirical mode decomposition (CEEMDAN) and Hilbert transform (HT), and the internal power of HESS is allocated once. Then, in order to avoid frequent over-limits of HESS state of charge (SOC) and to ensure that HESS can continue to work, this paper proposes a balanced management method of HESS power. This corrects the attenuation of primary distribution power, and then configures the capacity of the corrected HESS reference power. Finally, an economic evaluation model is established based on life cycle cost (LCC), and different energy storage capacity allocation strategies are adopted. The effectiveness and economy of the proposed method are verified by actual data simulation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600).

Key words: solar power; hybrid energy storage; smoothing power fluctuation; CEEMDAN; capacity configuration

0 引言

在“碳达峰、碳中和”的目标下, 近年来电网

中新能源发电占比逐年上升。光伏作为一种绿色清洁的发电形式, 成为未来分布式发电的一大发展方向。但是光伏出力易受气候影响, 具有随机性和波动性, 大规模光伏并网会造成电网的电压和频率波动, 影响系统安全稳定运行^[1]。

储能电池能够实现电能的时空平移, 在发电侧

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600);
陕西省教育厅重点科学研究计划项目资助(20JS018)

配置储能电池能够平滑光伏功率波动,然而采用单一的电池储能进行波动平抑,一方面,会导致储能容量配置过大,投资成本增加,另一方面,储能电池频繁地充放电以及过高的放电深度(depth of discharge, DOD)会迅速地降低其循环寿命,影响储能电池正常运行^[2]。因此,近年来一部分学者将目光转移到了混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)的优化配置上。储能容量配置的合理性,一方面会影响 HESS 投资成本,另一方面会影响 HESS 的工作效果^[3-4]。

目前,已有许多科研工作者对 HESS 平抑新能源波动的控制策略和 HESS 容量配置方法进行了研究,并获得了颇多成果。文献[5-6]采用低通滤波原理对储能功率进行分配,但此分配方法精度不高,若时间常数选取不当还会产生滤波时延,导致储能容量配置不够合理。文献[7]运用离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)分解风电不平衡功率,之后对截止频率寻优得到 HESS 容量配置结果。但 DFT 需要预先设定基函数,且寻优过程会增加运算的复杂性。文献[8]提出用小波分解法进行 HESS 容量配置,但选择不同的小波基可能产生不同的处理结果。文献[9]首先用小波分解获得混合储能参考功率,再利用模糊控制器对功率进行二次修正,使得功率在 HESS 内部得到合理分配,但在实际算法实现中小波分解只能处理线性非平稳信号。文献[10]基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和神经网络(neural networks, NNs)对混合储能功率进行了分配,但 EMD 分解结果会存在模态混叠,影响储能配置。文献[11]提出使用中值平均法对风电原始功率进行平滑,之后运用 DFT 弥补了 EMD 分解精度低的缺点,最后对储能容量进行了配置,但中值平均滤波结果会有一些的时延。文献[12]基于递推平均和 EMD,提出了以净效益最大为目标的储能容量配置方法,但递推平均滤波对高频振荡信号抑制效果差,并且存在滤波时延。文献[13-14]提出使用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)对 HESS 内部功率进行分配,可以有效解决模态混叠问题,但 VMD 需要预先设定分解模态阶数,自适应性较差。完全集合经验模态分解(complete ensemble EMD with adaptive noise, CEEMDAN)在 EMD 的基础上加入了辅助的高斯白噪声,可以提高信号分解的精度,同时减小重构误差^[15]。文献[16]基于 CEEMDAN 和互信息熵法将 HESS 功率分解为高频与低频分量,并对荷电状态(state of charge, SOC)进行了限值处理,但互信息熵无法直观地表明相邻两模态分量之间是否存在

混叠现象。

总结上述方法的优劣,本文使用由蓄电池和超级电容组合的 HESS 来平抑光伏功率波动。采用由递推平均和中值平均加权滤波的算法得到光伏并网功率与 HESS 参考功率,利用 CEEMDAN 和希尔伯特变换(hilbert transform, HT)确定 HESS 参考功率高频与低频分界点,之后将高频分量重构给超级电容,低频分量重构给蓄电池。鉴于此方法会使得分配功率和容量配置过高,一方面导致 SOC 频繁越限,另一方面使得配置成本增加,因此,为了避免上述问题,本文提出一种 HESS 功率的均衡管理方法,实现功率在 HESS 内部的合理分配。最后,将 HESS 全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)作为目标函数,对比不同策略下的储能容量配置,证明本文所提方法在提高储能配置经济效益上的优越性。

1 光伏 HESS 发电模型

1.1 光储系统拓扑结构

本文对光伏并网出口母线处进行集中储能配置。图 1 为光储系统拓扑结构。其中 $P_{pv}(t)$ 为光伏原始输出功率, $P_{hess}(t)$ 为混合储能参考功率, $P_{ba}(t)$ 为蓄电池参考功率, $P_{sc}(t)$ 为超级电容参考功率, $P_{grid}(t)$ 为光伏并网参考功率。

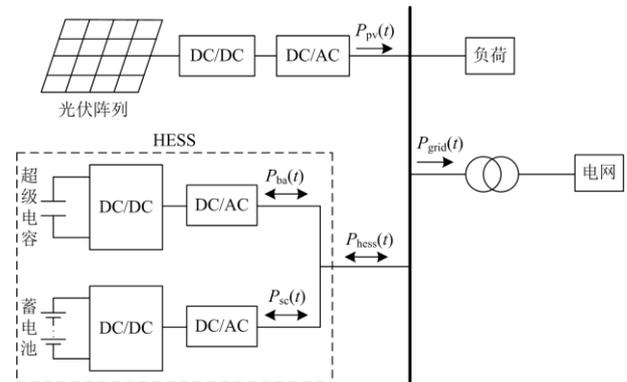


图 1 光储系统拓扑结构

Fig. 1 Structure of PV-storage system

根据图 1 中的功率关系,可得式(1)、式(2)。

$$P_{grid}(t) = P_{pv}(t) + P_{hess}(t) \quad (1)$$

$$P_{hess}(t) = P_{ba}(t) + P_{sc}(t) \quad (2)$$

由式(1)可知,光伏并网参考功率与光伏原始输出功率的差值即混合储能系统参考功率,且当 $P_{hess}(t) > 0$ 时,储能系统放电,反之储能系统充电。

1.2 光伏并网波动率

对光伏电站有功功率变化的要求,依据 Q/GDW 1617—2015《光伏电站接入电网技术规定》,光伏电

站有功功率的变化根据装机容量的不同, 限值会有区别^[17]。本文以 1 min 内有功变化不超过装机容量的 10%、10 min 内有功变化不超过装机容量的 30% 为标准, 进行光伏波动平抑。波动率的量化方法如式(3)所示。

$$\delta(t) = \frac{P_{pv}(t) - P_{pv}(t - \Delta t)}{P_{pv,er}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\delta(t)$ 为光伏波动变化率; $P_{pv,er}$ 为光伏电站额定装机容量; Δt 为光伏采样时间间隔, 本文取 1 min。

1.3 储能系统数学模型

储能系统的充放电电量体现在荷电状态上, 即储能系统剩余容量与额定容量的比值。SOC = 1, 说明储能系统电已满, 不再放电, SOC = 0, 说明储能系统电已放完^[18]。为了减少储能系统的损耗, 需要避免其过充过放, 因此本文 SOC 初始值设为 $S_{OCbeg} = 0.5$, 限值设为 $[S_{OCmin}, S_{OCmax}]$ 。SOC 的动态计算表达式为

$$S_{OC}(t) = \begin{cases} S_{OC}(t-1) - \frac{\eta_{cv}\eta_{ch} \int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt}{E_{hr}}, & P_e(t) \leq 0 \\ S_{OC}(t-1) - \frac{\eta_{cv} \int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt}{E_{hr}\eta_{dis}}, & P_e(t) > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_e(t)$ 为储能系统充放电功率; E_{hr} 为储能系统额定容量; η_{cv} 为储能变流器转换效率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为储能系统充电效率和放电效率; ΔT 为储能系统充放电时间间隔; φ 为总采样时间数。

2 光伏波动平抑与 HESS 功率分配

2.1 光伏波动平抑算法

递推平均滤波法对原始光伏输出功率进行采样, 每次得到 L 个数据并剔除之前数据组中第一个数据(先进先出), 之后对剩余数据求算数平均值, 输出新数据组, 得到平滑度较高的光伏输出功率。递推平均滤波对含有周期性干扰的信号抑制效果明显, 且平滑度较高, 但对含有脉冲干扰的信号抑制效果差, 偶然的脉冲干扰会造成采样偏差, 若总采样数据较少, 平滑结果还会产生滞后^[19]。中值平均滤波法对原始光伏输出功率进行采样, 每次得到 M 个数据并剔除其中的最大值与最小值, 之后对剩余数据求算数平均值, 输出新数据组, 得到较为平滑的光伏输出功率。中值平均滤波可消除由于偶然的脉冲干扰所造成的采样偏差, 减小信号中的噪声, 但计算速度慢, 平滑结果也具有一定的滞后性^[20]。

文献[21]提出最小二乘拟合和低通滤波相结合平抑算法, 两种方法性能互补有效地解决了最小二乘拟合平抑效果差和低通滤波的时延问题。因此, 本文利用两种滤波算法的优点, 对递推平均和中值平均滤波法进行加权处理(以下简称加权滤波), 根据光伏波动程度动态调整权重。递推平均法平抑光伏出力公式如式(5)所示。

$$P_{sli}(t) = \left[P_{pv}(t-L/2+1) + P_{pv}(t-L/2+2) + L + P_{pv}(t) + L + P_{pv}(t+L/2) \right] / L \quad (5)$$

式中: $P_{sli}(t)$ 为经过递推平均滤波后所得到的光伏并网功率; L 为递推滤波窗口(为表示方便, 本处 L 为偶数)。

中值平均法平抑光伏出力公式如式(6)所示。

$$P_{mid}(t) = \left[P_{pv}(t-M) + P_{pv}(t-M+1) + L + P_{pv}(t) - P_{pv,max} - P_{pv,min} \right] / (M-2) \quad (6)$$

式中: $P_{mid}(t)$ 为经过中值平均滤波后所得到的光伏并网功率; M 为滤波数据个数; $P_{pv,max}$ 、 $P_{pv,min}$ 分别为滤波数据 M 中的最大值和最小值。

加权后滤波算法计算公式如式(7)所示。

$$P_{grid}(t) = (1-\omega)P_{mid}(t) + \omega P_{sli}(t) \quad (7)$$

式中, ω 为权值。

通过光伏出力标准差来调整权值 ω 的大小, 光伏出力各时刻标准差如式(8)所示。

$$\sigma(t) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=0}^n (P_{pv}(t) - \overline{P_{pv}})^2} \quad (8)$$

式中: $\sigma(t)$ 为光伏出力标准差, 光伏波动愈剧烈 σ 愈大; n 为采样数据个数; $\overline{P_{pv}}$ 为光伏输出功率平均值。

权值 ω 动态计算公式为

$$\omega = \begin{cases} 0, & \sigma \leq h_1 \\ \frac{\mu}{h_2 - h_1} (\sigma - h_1), & h_1 < \sigma < h_2 \\ \mu, & \sigma \geq h_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为光伏出力标准差的上、下限; $\mu \in (0,1)$ 。当 $\sigma \leq h_1$ 时, $\omega = 0$, 即运用单一的中值平均算法即可满足光伏功率波动要求。若波动程度愈来愈剧烈, ω 随着 σ 增高而增高, 这时需要加入平滑度较好的递推平均法来抑制光伏出力波动, 当 $\sigma \geq h_2$ 时, 权值 ω 不再变化, 固定其值为 μ 。

2.2 基于 CEEMDAN 的 HESS 功率分解

EMD 是一种基于原始数据的自适应信号分解

方法,在分解起始时不需要预先设置任何基函数。该方法可以将连续的非平稳或非线性信号分解为一系列固有模态函数(intrinsic mode function, IMF),但分解结果存在模态混叠现象,且信号重构会有一定的误差^[22]。CEEMDAN 是 Antico 等人在 2014 年提出的一种改进 EMD 算法。该方法并非直接在原始信号中加入白噪声,而是在 EMD 分解后加入带有辅助白噪声的 IMF 分量。通过 CEEMDAN 分解得到一阶 IMF 分量后,再进行总体平均计算,得到最终的一阶 IMF 分量,然后对残差部分重复上述操作。通过这种方法,可以有效解决白噪声从高频向低频的转移与传递问题^[23]。

此处 $P_{\text{hess}}(t)$ 为待分解的 HESS 参考功率。 $P_{\text{hess}}(t)$ 分解步骤如下。

步骤 1: 将高斯白噪声加入待分解信号 $P_{\text{hess}}(t)$ 中,得到新信号 $P_{\text{hess}}(t) + (-1)^q \varepsilon b_i(t)$, 其中 $q=1, 2$, 对新信号进行 EMD 分解,得到第 1 阶固有模态函数 I_{MF1} , 分解式如式(10)所示。

$$E_1(P_{\text{hess}}(t) + (-1)^q \varepsilon b_i(t)) = I_{\text{MF1},i}(t) + r_i \quad (10)$$

式中: $E_1(\cdot)$ 为通过 EMD 分解后得到的第 1 阶固有模态函数; $b_i(t)$ 为满足标准高斯分布的白噪声信号; $i=1, 2, L, W$ 为加入白噪声的次数; ε 为信噪比; r_i 为每次分解得到的余量。

步骤 2: 对由 EMD 分解得到的 N 阶固有模态函数进行累加并求平均值,得到 CEEMDAN 分解出的第 1 阶固有模态函数,即

$$\overline{I_{\text{MF1}}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{\text{MF1},i}(t) \quad (11)$$

步骤 3: 将原始信号与 CEEMDAN 分解出的第 1 阶固有模态函数作差,得到第 1 阶余量。

$$r_1(t) = P_{\text{hess}}(t) - \overline{I_{\text{MF1}}}(t) \quad (12)$$

步骤 4: 在 $r_1(t)$ 中添加正负成对的高斯白噪声,得到新信号,对新信号进行 EMD 分解,得到新的 N 阶固有模态函数 $I_{1,i}(t)$, 即

$$E(r_1(t) + (-1)^q \varepsilon b_i(t)) = I_{1,i}(t) \quad (13)$$

步骤 5: 对由 EMD 分解得到的新的 N 阶固有模态函数进行累加并求平均值,得到 CEEMDAN 分解出的第 2 阶固有模态函数,即

$$\overline{I_{\text{MF2}}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{1,i}(t) \quad (14)$$

步骤 6: 第 1 阶余量与 CEEMDAN 分解出的第 2 阶固有模态函数作差,得到第 2 阶余量。

$$r_2(t) = r_1(t) - \overline{I_{\text{MF2}}}(t) \quad (15)$$

步骤 7: 重复步骤 5 和步骤 6,直至获得的余量信号为单调函数,无法继续分解提取 IMF,则算法终止。此时获得的固有模态函数共有 K 个,那么原始信号 $P_{\text{hess}}(t)$ 分解结果为

$$P_{\text{hess}}(t) = \sum_{k=1}^K \overline{I_{\text{MFk}}}(t) + r(t) \quad (16)$$

2.3 基于 HT 的 HESS 功率分配

文献[10]已给出不同分频频率对 HESS 配置的影响。本文着重介绍瞬时频率的提取方法。

希尔伯特变换(HT)是将一个连续的具有实际意义的信号 $s(t)$ 与冲激信号 $h(t) = 1/(\pi t)$ 作卷积之后,得到原信号 $s(t)$ 的瞬时频率和瞬时相位特征的信号变换方法,其分析信号的自适应性在故障诊断中得到了广泛的应用^[24]。HT 提取 CEEMDAN 分解得到每个 IMF 的瞬时频率过程如式(17)一式(20)。

$$\begin{aligned} \overline{I'_{\text{MF}i}}(t) &= H\{\overline{I_{\text{MF}i}}\} = h(t) * \overline{I_{\text{MF}i}}(t) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \overline{I_{\text{MF}i}}(\tau) h(t-\tau) d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\overline{I_{\text{MF}i}}(\tau)}{t-\tau} d\tau \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\overline{I_{\text{MF}i}}$ 为第 i 个固有模态函数; $\overline{I'_{\text{MF}i}}$ 为经过冲激信号 $h(t) = 1/(\pi t)$ 后的输出响应。

定义解析信号表达式为

$$z_i(t) = \overline{I_{\text{MF}i}} + j\overline{I'_{\text{MF}i}}(t) = A_i(t) e^{j\psi_i(t)} \quad (18)$$

式中, $A_i(t)$ 、 $\psi_i(t)$ 分别为瞬时幅值和瞬时相位。

其中,瞬时相位的计算方法如下:

$$\psi_i(t) = \arctan \frac{\overline{I'_{\text{MF}i}}(t)}{\overline{I_{\text{MF}i}}(t)} \quad (19)$$

最终得到各个模态函数的瞬时频率为

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi_i(t)}{dt} \quad (20)$$

综上,CEEMDAN-HT 提取 IMF 瞬时频率特征的过程如图 2 所示。

得到频率范围由高到低的瞬时频率-时间曲线 $c_{1,L}, c_k$, 从这些曲线中挑出无模态混叠或混叠程度最小的 c_m 和 c_{m+1} , 之后将 c_m 与瞬时频率高于 c_m 的模态分量进行累加,即重构,由超级电容吸收, c_{m+1} 与瞬时频率低于 c_{m+1} 的模态分量进行累加,由蓄电池吸收。那么 HESS 功率分配结果为

$$\begin{cases} P_{\text{sc}}(t) = \sum_{i=1}^m \overline{I_{\text{MF}i}} \\ P_{\text{ba}}(t) = \sum_{i=m+1}^k \overline{I_{\text{MF}i}} + r(t) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_{\text{sc}}(t)$ 为重构后的超级电容参考功率; $P_{\text{ba}}(t)$

为重构后的蓄电池参考功率; $r(t)$ 为余量。

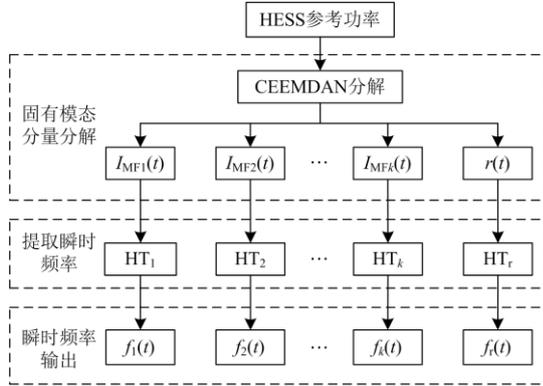


图 2 CEEMDAN-HT 提取 IMF 瞬时频率流程

Fig. 2 Process of CEEMDAN-HT extracting IMF instantaneous frequency

结合 2.1 节至 2.3 节所述, HESS 功率分配策略如图 3 所示。

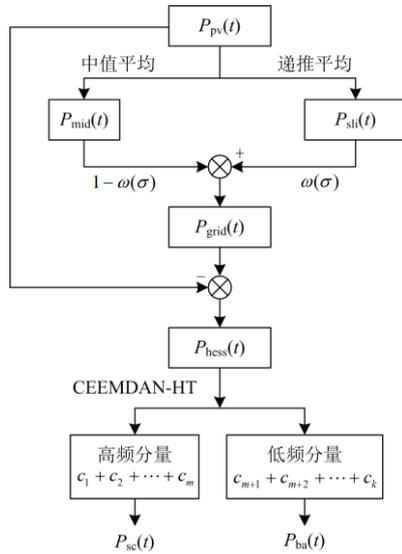


图 3 HESS 功率分配策略

Fig. 3 Strategy of power distribution for HESS

2.4 HESS 功率均衡管理

在实际工况中, 储能装置若不加以限制地进行充、放电, SOC 频繁越限以及深度放电将导致其循环寿命快速下降, 这将缩短储能装置的更换周期, 那么其投资成本会相应的增加, 且当储能装置一天的充放电结束后, 电量会处于低限值, 影响第二天的正常工作。为了防止由 CEEMDAN 分解并通过 HT 重构得到的蓄电池和超级电容参考功率过高, 导致 SOC 超出正常范围, 需要对一次分配的参考功率进行修正处理。本文引入以自然常数 e 为底的衰减因子, 并以储能参考功率和实时荷电状态作为衰

减系数对一次分配功率动态修正。修正策略如图 4 所示。

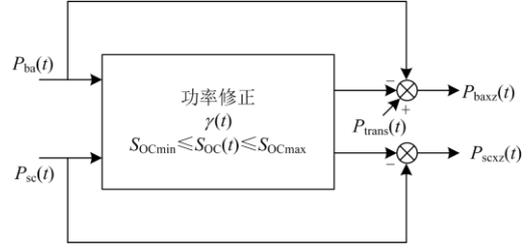


图 4 HESS 功率修正策略

Fig. 4 Strategy of power modification for HESS

修正过程如下:

1) 当 $P_{ba}(t) > 0$ 、 $P_{sc}(t) > 0$ 时, 即储能系统工作在放电状态, 由实时充放电功率和实时荷电状态反馈调整一次分配功率, 功率幅值越高, 则衰减程度越大, 同时为了减小衰减后的能量损失, 预防储能系统在一天的工作后处于低电量状态, 本文采用了储能装置间的能量均衡管理办法, 蓄电池作为能量型储能装置, 其可大规模存储电量, 因此将超级电容衰减电量转移至蓄电池中。修正公式如式(22)所示。

$$\begin{cases} P_{scxz}(t) = P_{sc}(t)[1 - \gamma_{sc}(t)] \\ \gamma_{sc}(t) = e^{-P_{sc}(t)[1 + S_{OCsc}(t)]} \\ P_{trans}(t) = P_{sc}(t)\gamma_{sc}(t) \\ P_{baxz}(t) = P_{ba}(t)[1 - \gamma_{ba}(t)] + P_{trans}(t) \\ \gamma_{ba}(t) = e^{-P_{ba}(t)[1 + S_{OCba}(t)]} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\gamma_{sc}(t)$ 、 $\gamma_{ba}(t)$ 分别为超级电容和蓄电池参考功率的衰减因子; $S_{OCsc}(t)$ 、 $S_{OCba}(t)$ 分别为超级电容和蓄电池的实时荷电状态; $P_{trans}(t)$ 为转移电量; $P_{trans}(t)$ 、 $P_{baxz}(t)$ 分别为修正后的超级电容和蓄电池参考功率。

2) 当 $P_{ba}(t) < 0$ 、 $P_{sc}(t) < 0$ 时, 即储能系统工作在充电状态, 由实时充放电功率和实时荷电状态反馈调整一次分配功率, 因充电时功率为负, 则修正公式应注意运算符号的变化, 充电时修正公式如式(23)所示。

$$\begin{cases} P_{scxz}(t) = P_{sc}(t)[1 + \gamma_{sc}(t)] \\ \gamma_{sc}(t) = e^{P_{sc}(t)[1 + S_{OCsc}(t)]} \\ P_{baxz}(t) = P_{ba}(t)[1 + \gamma_{ba}(t)] - P_{trans}(t) \\ \gamma_{ba}(t) = e^{P_{ba}(t)[1 + S_{OCba}(t)]} \end{cases} \quad (23)$$

经过修正后的参考功率 $P_{scxz}(t)$ 、 $P_{baxz}(t)$ 即可进行储能容量的配置。

3 HESS 额定功率与额定容量配置

3.1 HESS 额定功率配置

为满足采样时间段内光伏功率波动的平抑需求, 储能系统的额定功率应选择第2节分配的最大值, 兼顾储能变流器转换效率和储能系统充放电效率, 额定功率 P_{essr} 配置方式如式(24)所示。

$$P_{\text{essr}} = \max_{t \in (t_0, t_0+T)} \left\{ \eta_{\text{cv}} \eta_{\text{ch}} \left| \min[P_{\text{ch}}(t)] \right|, \frac{\eta_{\text{cv}} \max[P_{\text{dis}}(t)]}{\eta_{\text{dis}}} \right\} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{ch}}(t)$ 为储能系统充电功率; $P_{\text{dis}}(t)$ 为储能系统放电功率; t_0 为采样初始时刻。

3.2 HESS 额定容量配置

储能系统在正常运行中, 放电量最大时 SOC 应不低于下限, 充电量最大时 SOC 应不高于上限, SOC 计算方法见式(4), 则储能运行条件有

$$S_{\text{OCmin}} \leq S_{\text{OC}}(t) \leq S_{\text{OCmax}} \quad (25)$$

式中, S_{OCmax} 、 S_{OCmin} 分别为荷电状态上下限, 根据储能介质的不同, 限值会有区别。

将式(25)代入式(4)中可得

$$\begin{cases} S_{\text{OCbeg}} - S_{\text{OCmin}} \geq \frac{\eta_{\text{cv}} \max\left(\int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt\right)}{E_{\text{hr}} \eta_{\text{dis}}} \\ S_{\text{OCmax}} - S_{\text{OCbeg}} \leq \frac{\eta_{\text{cv}} \eta_{\text{ch}} \left| \min\left(\int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt\right) \right|}{E_{\text{hr}}} \end{cases} \quad (26)$$

在满足任意时刻平抑需求的同时, 为了达到经济性要求, E_{hr} 应取满足式(26)的最小值, 可得

$$\begin{cases} E_{\text{hr,dis}} = \frac{\eta_{\text{cv}} \max\left(\int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt\right)}{\eta_{\text{dis}} (S_{\text{OCbeg}} - S_{\text{OCmin}})} \\ E_{\text{hr,ch}} = \frac{\eta_{\text{cv}} \eta_{\text{ch}} \left| \min\left(\int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt\right) \right|}{S_{\text{OCmax}} - S_{\text{OCbeg}}} \end{cases} \quad (27)$$

式中, $E_{\text{hr,dis}}$ 、 $E_{\text{hr,ch}}$ 分别为储能系统最小放电容量和最小充电容量。

在 SOC 约束下, 取式(27)的差值, 则储能容量配置结果为

$$E_{\text{essr}} = \frac{\max\left(\int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt\right) - \min\left(\int_0^{\varphi\Delta T} P_e(t) dt\right)}{S_{\text{OCmax}} - S_{\text{OCmin}}} \quad (28)$$

4 HESS 寿命评估与经济性分析

4.1 储能系统寿命评估模型

由于超级电容在充放电过程中无化学反应, 充放电过程可逆, 故其循环寿命长, 深度放电可达近

百万次。因此, 本文将超级电容器寿命设为常数。而温度、放电倍率和放电深度等内外因素对蓄电池循环寿命影响较大, 尤其是 DOD, 蓄电池每次放电都会对其寿命造成不可逆转的损耗。DOD 计算方法如式(29)。此处主要考虑 DOD 对蓄电池寿命的影响。

$$D_{\text{cir}}(t) = 1 - S_{\text{OC}}(t) \quad (29)$$

式中, $D_{\text{cir}}(t)$ 为蓄电池实际放电深度。

蓄电池循环次数会随着 DOD 的增大而减小, 利用实验数据所得结论建立蓄电池寿命模型为^[25]

$$R_{\text{cir}} = R_{\text{rat}} \left(\frac{D_{\text{rat}}}{D_{\text{cir}}} \right)^{\alpha_1} \cdot e^{-\alpha_2 \left(1 - \frac{D_{\text{cir}}}{D_{\text{rat}}} \right)} \quad (30)$$

式中: D_{rat} 为额定放电深度; R_{rat} 、 R_{cir} 分别为对应额定放电深度和实际放电深度下的循环次数; α_1 、 α_2 为拟合系数。

根据等效循环寿命法^[26], 将实际循环次数折算至额定循环次数有

$$R_{\text{dod}} = \frac{R_{\text{rat}}}{R_{\text{cir}}} = \left(\frac{D_{\text{rat}}}{D_{\text{cir}}} \right)^{\alpha_1} \cdot e^{-\alpha_2 \left(1 - \frac{D_{\text{cir}}}{D_{\text{rat}}} \right)} \quad (31)$$

式中, R_{dod} 为折算后的等效循环次数。

则蓄电池运行寿命的估算结果为

$$Y_{\text{ba}} = \frac{R_{\text{rat}}}{\sum_{t=1}^n R_{\text{dod},t}} \quad (32)$$

4.2 储能系统全寿命周期成本分析

本文采用全寿命周期成本对储能配置结果做经济性评估, 将储能设备购置成本与储能系统在工作年限内产生的所有费用之和作为最终投资成本^[27]。投资成本主要由以下四部分组成。

1) 储能设备购置成本

$$F_{\text{fac}} = (\lambda_{\text{pfac}} P_{\text{essr}} + \lambda_{\text{efac}} E_{\text{essr}}) \zeta_{\text{pvf}}(\rho, Y) \quad (33)$$

$$\zeta_{\text{pvf}}(\rho, Y) = \frac{\rho(1+\rho)^Y}{(1+\rho)^Y - 1} \quad (34)$$

式中: F_{fac} 为储能设备购置成本; λ_{pfac} 为功率单价; λ_{efac} 为容量单价; $\zeta_{\text{pvf}}(\rho, Y)$ 为等年值折算系数, 其是贴现率 ρ 、储能设备寿命 Y 的函数。

2) 储能设备更换成本

$$F_{\text{rep}} = \sum_{u=1}^x (\lambda_{\text{prep}} P_{\text{essr}} + \lambda_{\text{erep}} E_{\text{essr}}) \frac{1}{(1+\rho)^{x+1} - 1} \quad (35)$$

式中: F_{rep} 为储能设备更换成本; λ_{prep} 、 λ_{erep} 分别为单位功率更换成本和单位容量更换成本; x 为运行周期内更换的次数。

3) 运行维护成本

$$F_{ma} = (\lambda_{pma} P_{essr} + \lambda_{ema} E_{essr}) \zeta_{pvf}(\rho, Y) \quad (36)$$

式中: F_{ma} 为储能设备运行维护成本; λ_{pma} 、 λ_{ema} 分别为单位功率运维成本和单位容量运维成本。

4) 回收残值成本

$$F_{res} = \beta_{res} (F_{fac} + F_{rep}) \frac{1}{(1 + \rho)^Y - 1} \quad (37)$$

式中: F_{res} 为回收残值成本; β_{res} 为回收残值率。

结合式(33)一式(37), 可得全寿命周期成本为

$$F_{LCC} = F_{fac} + F_{rep} + F_{ma} - F_{res} \quad (38)$$

5 算例分析

本文以我国西北某地区 60 MW 光伏电站某日实际采样数据(采样间隔为 1 min)为研究对象, 分别采用递推平均法和加权滤波法平滑光伏出力, 滤波窗口均设为 15, 将 1 min 内功率波动限制到装机容量 10% 以下, 10 min 内功率波动限制到装机容量 30% 以下。采用递推平均法平抑光伏波动的效果如图 5 所示。

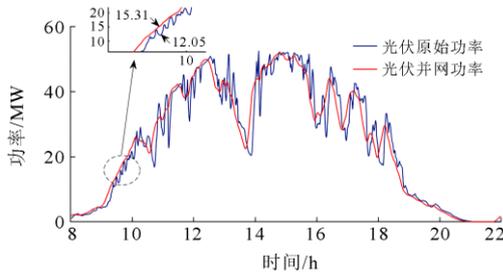


图 5 递推平均法平抑光伏波动效果

Fig. 5 Effect of PV power by moving average

由图 5 可知, 经递推平均后光伏并网功率相对于原始功率有明显的延时, 平抑结果见表 1。从表 1 可知, 光伏出力在 1 min 内最大波动率下降至 3.58%, 在 10 min 内最大波动率下降至 25.08%, 均满足我国并网要求。

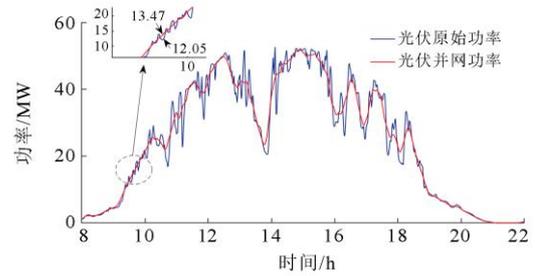
表 1 光伏数据计算结果 1

Table 1 Calculation result of PV power data 1

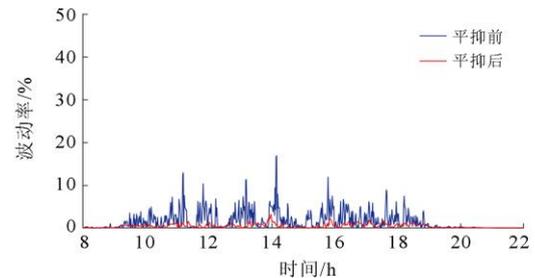
参数	1 min		10 min		平滑度 指标/%
	最大波 动量/MW	最大波 动率/%	最大波 动量/MW	最大波 动率/%	
原始	10.19	16.98	27.55	45.92	31.82
并网	2.15	3.58	15.05	25.08	4.29

采用加权滤波法平抑光伏波动的效果与波动率变化如图 6 (本文仅展示 1 min 内功率波动率) 所示。加权滤波后, 光伏并网功率与原始功率拟合度较高,

基本无时间延时。由图 5 可知, 在 09:34 光伏原始出力为 12.05 MW, 经递推平均后的光伏并网功率为 15.31 MW, 混合储能系统将释放 3.26 MW 电量以平滑出力波动; 由图 6(a)可知, 经加权滤波后的光伏并网功率为 13.47 MW, 混合储能系统将释放 1.42 MW 电量以平滑出力波动, 相比之下, 此方法将使储能系统免于 1.84 MW 的不必要出力, 因此储能配置容量降低, 避免了多余的投资。经加权滤波前后的光伏平抑结果见表 2。从表 2 可知, 在 1 min 内最大波动率下降至 3.29%, 在 10 min 内最大波动率下降至 20.72%, 平滑度从递推平均法滤波后的 4.29%, 下降至 2.15%, 因此, 可得本文方法对长时间尺度的波动平抑效果更佳。



(a) 经加权滤波前后的光伏功率



(b) 经加权滤波前后的光伏波动率

图 6 加权滤波法平抑光伏波动效果与波动率变化

Fig. 6 Effect of PV power by weighted filtering and volatility

表 2 光伏数据计算结果 2

Table 2 Calculation result of PV power data 2

参数	1 min		10 min		平滑度 指标/%
	最大波 动量/MW	最大波 动率/%	最大波 动量/MW	最大波 动率/%	
原始	10.19	16.98	27.55	45.92	31.82
并网	1.97	3.29	12.43	20.72	2.15

得到光伏并网参考功率后, 将并网参考功率与光伏原始输出功率作差, 把差值作为混合储能系统参考功率, 各时刻混合储能系统的工作状态如图 7 所示。

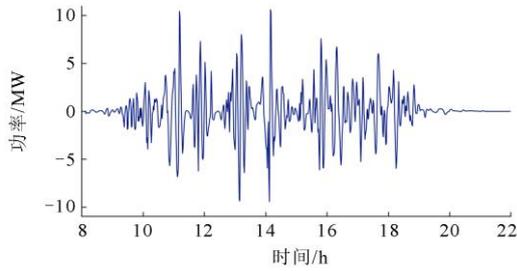


图7 混合储能系统工作状态
Fig.7 Working condition of HESS

为体现 CEEMDAN 在 HESS 配置中相对于 EMD 的优势，首先采用 EMD 对混合储能系统参考功率进行分解，将分解得到的各个模态分量通过 HT 后，可得到各个模态函数的瞬时频率-时间曲线(此处仅列出 c_4-c_7 以及余量的曲线)。从图 8 可以看出，相邻两模态分量之间均存在模态混叠现象，无法找出合适的分频频率将高频与低频部分分离，因此，蓄电池依然会承担一部分功率的高频波动量，影响其循环寿命。

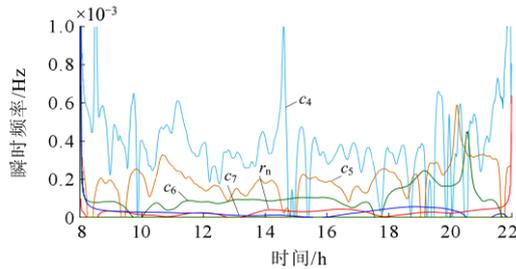


图8 EMD 部分 IMF 的瞬时频率-时间曲线
Fig. 8 Curve of instantaneous frequency-time of some EMD's IMF

采用 CEEMDAN 对混合储能系统参考功率进行分解，如图 9 所示，得到频率范围由高到低的 9 个固有模态函数和 1 个余量。将这 10 个模态函数分别通过 HT 后，可得到各个模态函数的瞬时频率-时间曲线(此处仅列出 c_6-c_9 以及余量的曲线)。从图 10 中可以看出， c_8 与 c_9 两条曲线几乎全时段无混叠，因此，将 c_8 以及频率范围高于 c_8 的模态函数重构为超级电容参考功率，将 c_9 以及余量重构为蓄电池参考功率。

为比较不同储能配置方法的优劣性，本文选取了 5 种配置方案，储能系统仿真参数见表 3。方案 1 为单一蓄电池储能，滤波算法采用本文提出的加权滤波法；方案 2—5 为混合储能，其中方案 2 的滤波算法采用本文提出的加权滤波法，储能参考功率采用 EMD 进行分解；方案 3 的滤波算法采用递推平

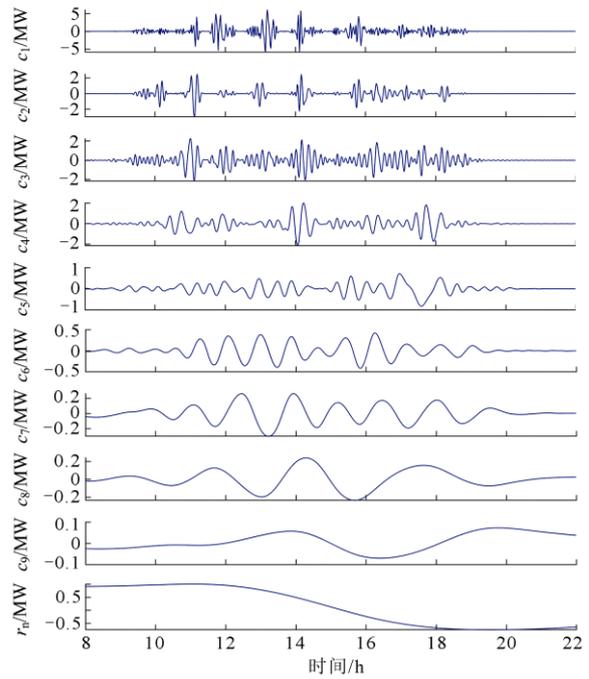


图9 CEEMDAN 分解得到的 IMF 和余量

Fig. 9 Curve of IMF and remnant decomposed by CEEMDAN

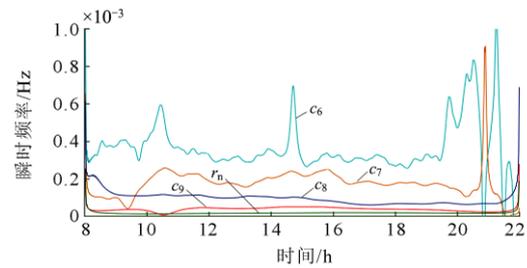


图10 CEEMDAN 部分 IMF 的瞬时频率-时间曲线
Fig. 10 Curve of instantaneous frequency-time of some CEEMDAN's IMF

表3 储能系统技术参数

Table 3 Technical parameters of energy storage system

参数	蓄电池	超级电容
SOC 阈值	0.2~0.8	0.1~0.9
使用寿命/年	—	15
单位功率成本/(元 kW ⁻¹)	1500	11 500
单位功率维护成本/(元 kW ⁻¹)	62	80.6
单位容量成本/(元 kWh ⁻¹)	6500	450
单位容量维护成本/(元 kWh ⁻¹)	0.014	0.013
回收残值率 $\beta_{res}/\%$	3	4
贴现率 $\rho/\%$	10	10

均法，储能参考功率采用 CEEMDAN 进行分解；方案 4 的滤波算法采用本文提出的加权滤波法，储能

参考功率采用 CEEMDAN 进行分解; 方案 5 在方案 4 的基础上加入了本文提出的 HESS 能量均衡管理措施, 即对 CEEMDAN 分解后的一次分配功率进行修正再进行储能容量配置。5 种方案配置结果如表 4。此处列出了方案 1、方案 4 和方案 5 的 HESS 实时 SOC 对比图, HESS 实时 SOC 如图 11 所示。

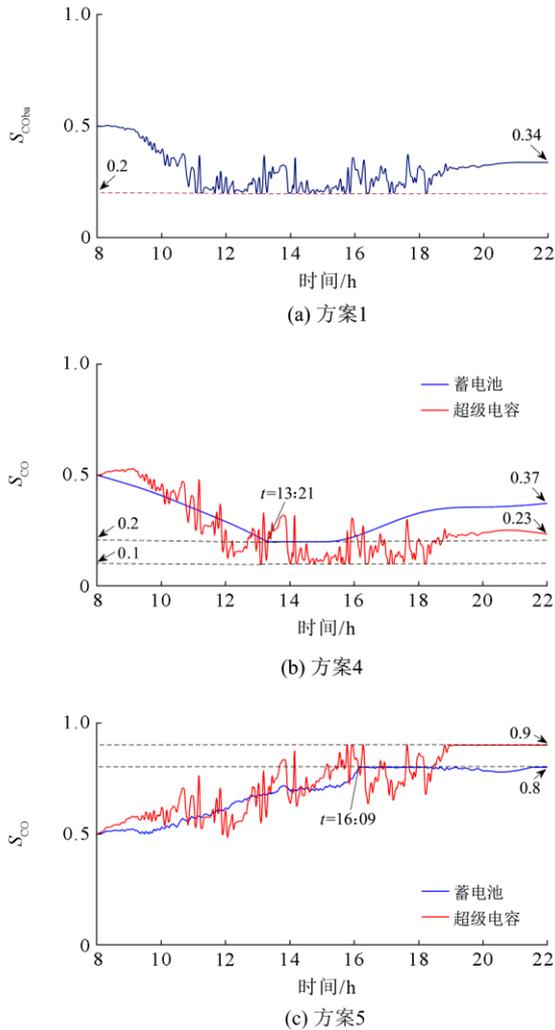


图 11 不同配置策略下的混合储能 SOC

Fig. 11 SOC of HESS in different configuration methods

根据表 4 所得数据, 首先将方案 2 与方案 4 作比较, 可知经过 CEEMDAN 重构后的蓄电池和超级电容参考功率无模态混叠现象, 避免了经过 EMD 重构后的蓄电池承担一部分功率的高频波动分量, 从而导致循环寿命下降、投资成本升高。其次将方案 3 与方案 4 作比较, 可知加权滤波算法有效地去除了滤波时延, 避免了 HESS 不必要的充放电, 因而储能的配置容量降低, 投资成本下降。

表 4 储能容量配置结果

Table 4 Capacity configuration result of HESS

参数	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
蓄电池额定容量/MWh	1.925	1.670	1.680	1.669	1.684
蓄电池额定功率/MW	9.536	0.218	0.587	0.127	0.606
蓄电池使用寿命 Y_{ba} /年	1.62	2.15	2.10	3.29	3.60
超级电容额定容量/MWh	—	1.443	1.478	1.445	1.299
超级电容额定功率/MW	—	9.559	18.581	9.432	9.375
投资成本/亿元	19.175	6.437	7.075	4.369	4.173

从图 11(a)可以看出, 方案 1 的单一蓄电池储能的充放电较为频繁, 这将导致其循环寿命快速下降, 因此更换周期缩短, 投资成本增加; 从图 11(b)可以看出, 方案 4 的蓄电池承担了功率的低频波动分量, 因而其 SOC 变化平缓, 超级电容承担了功率的高频波动分量, 因而其 SOC 变化频繁, 混合储能的运用减小了蓄电池的工作负担, 减少了蓄电池容量配置, 提高了其循环寿命, 因此投资成本会相应下降; 从图 11(c)可以看出, 采取了能量均衡管理措施的方案 5, 蓄电池与超级电容在 22:00 时 SOC 将会达到满额状态, 准备第 2 天的光伏波动平抑工作。再与方案 4 作比较, 可知方案 4 中的蓄电池在 08:00—13:21 持续放电, 直到限值, 如此深度的放电在一定程度上会使蓄电池产生损耗, 而方案 5 中的蓄电池在 08:00—16:09 整体为充电趋势, 虽然充放电较为频繁, 但是放电深度小, 因此, 本文提出的能量均衡管理方案会使蓄电池工作寿命比方案 4 的蓄电池工作寿命略有提升, 投资成本相应下降。

6 结论

在光伏并网出口处配置储能设备可平抑光伏出力波动, 本文以实际光伏出力数据为支撑, 建立了光储系统模型, 首先采用加权滤波法平滑光伏原始出力, 此方法得到的并网参考功率不仅平滑度较高, 而且能很好地对原始出力进行跟踪, 基本没有时间延时。然后通过 CEEMDAN 将混合储能参考功率进行分解, 经 HT 后得到各个模态的瞬时频率-时间曲线, 这些曲线可直观地表明各模态之间的相关性, 发现 CEEMDAN 可将信号的高频与低频部分有效分离, 因此储能容量的配置更加合理, 之后, 利用提出的能量均衡管理策略进一步优化了混合储能容量配置, 既可改善 HESS 工作状态, 同时也保证了

HESS 在一天的平抑光伏出力结束后, 电量有余。本文所提方法对光伏电站混合储能系统配置具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 马原, 张雪敏, 甄钊, 等. 基于修正晴空模型的超短期光伏功率预测方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 44-51.
MA Yuan, ZHANG Xuemin, ZHEN Zhao, et al. Ultra-short-term photovoltaic power prediction method based on modified clear-sky model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 44-51.
- [2] 马伟, 王玮, 吴学智, 等. 平抑光伏并网功率波动的混合储能系统优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 58-66.
MA Wei, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Optimal dispatching strategy of hybrid energy storage system for smoothing power fluctuation caused by grid-connected photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 58-66.
- [3] 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, LÜ 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.
- [4] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-188.
ZHANG Yuhan, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-188.
- [5] 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.
- [6] 桑丙玉, 王德顺, 杨波, 等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3700-3706.
SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Optimal allocation of energy storage system for smoothing the output fluctuations of new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3700-3706.
- [7] 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, 188.
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, 188.
- [8] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储能系统的容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 108-114.
MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 108-114.
- [9] 吴杰, 丁明. 采用自适应小波包分解的混合储能平抑风电波动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 7-12.
WU Jie, DING Ming. Wind power fluctuation smoothing strategy of hybrid energy storage system using self-adaptive wavelet packet decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 7-12.
- [10] 孙承晨, 袁越, CHOI S S, 等. 基于经验模态分解和神经网络的微网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 19-26.
SUN Chengchen, YUAN Yue, CHOI S S, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in microgrid using empirical mode decomposition and neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 19-26.
- [11] 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.
- [12] 张晴, 李欣然, 杨明, 等. 净效益最大的平抑风电功率波动的混合储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 40-48.
ZHANG Qing, LI Xinran, YANG Ming, et al. Capacity determination of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations with maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 40-48.
- [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] 张梦田, 田书, 曾志辉. 基于变分模态分解的混合储

- 容量优化配置[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(1): 170-177.
- ZHANG Mengtian, TIAN Shu, ZENG Zhihui. Optimal allocation of hybrid energy storage capacity based on variational mode decomposition[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 170-177.
- [15] 韩宏志, 唐振浩. 基于 CEEMDAN 与回声状态网络的风速预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 90-96.
- HAN Hongzhi, TANG Zhenhao. Wind speed prediction method based on CEEMDAN and echo state network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 90-96.
- [16] 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.
- [17] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定: Q/GDW 1617—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- State Grid Corporation of China. Technical rule for connecting photovoltaic power station to power grid: Q/GDW 1617—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [18] 杨子龙, 宋振浩, 潘静, 等. 分布式光伏/储能系统多运行模式协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2213-2220, 4.
- YANG Zilong, SONG Zhenhao, PAN Jing, et al. Multi-mode coordinated control strategy of distributed PV and energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2213-2220, 4.
- [19] 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.
- [20] 胡备, 郑立评, 于杨. 基于激光测距技术的火炮击针突出量测量方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(3): 78-82.
- HU Bei, ZHENG Liping, YU Yang. Measurement method of artillery pin protrusion based on laser ranging technology[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2020, 41(3): 78-82.
- [21] 张增辉, 邓宇豪, 李春卫, 等. 光储系统功率波动平抑策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 111-116.
- ZHANG Zenghui, DENG Yuhao, LI Chunwei, et al. Study on fluctuation smoothing strategy of photovoltaic/storage system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 111-116.
- [22] 张大海, 杨宇辰, 刘艳梅, 等. 基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 1-11.
- ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIU Yanmei, et al. Hybrid HVDC line pilot protection method based on EMD and Spearman correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 1-11.
- [23] ANTICO A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Analysis of hydroclimatic variability and trends using a novel empirical mode decomposition: application to the Paran ́a River Basin[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(3): 1218-1233.
- [24] 葛维春, 殷祥翔, 葛延锋, 等. 基于 MEMD 和 HHT 的电力系统低频振荡模式识别方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 124-135.
- GE Weichun, YIN Xiangxiang, GE Yanfeng, et al. Estimating low frequency oscillation mode in power systems using multivariate empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 124-135.
- [25] 易林, 娄素华, 吴耀武, 等. 基于变寿命模型的改善风电可调度性的电池储能容量优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 53-59.
- YI Lin, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Optimal battery capacity based on lifetime predication for improving the schedulability of the wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 53-59.
- [26] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97, 16.
- HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97, 16.
- [27] ZAKERI B, SYRI S. Electrical energy storage systems: a comparative life cycle cost analysis[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 42(2): 569-596.

收稿日期: 2022-01-26; 修回日期: 2022-03-08

作者简介:

闫群民(1980—), 男, 通信作者, 教授, 博士研究生, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与电能质量控制; E-mail: yanqunm@163.com

刘语忱(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与电力储能技术; E-mail: liuarentchen@163.com

董新洲(1963—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与继电保护。E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn

(编辑 许威)