

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230333

# 基于 EWT 的分布式光储 PCC 功率波动自适应平抑方法

马万硕, 高厚磊, 张运驰, 刘震, 彭放

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 分布式光伏在交流侧公共连接点(point of common coupling, PCC)汇流的功率有较大的随机性与波动性, 影响电网的稳定运行。为此, 提出了基于经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)的分布式光储 PCC 功率自适应平抑方法。首先, 针对混合储能(hybrid energy storage system, HESS)与分布式光伏接入 PCC 的典型场景, 在分析 EWT 自适应处理波形的特点后, 结合功率波动率与储能元件的响应特性, 对 PCC 的光伏原始汇流功率进行 EWT 分解与优化修正, 实现 HESS 的功率初级分配。之后为避免 HESS 的荷电状态(state of charge, SOC)频繁越限, 提出了一种主动功率补偿的 SOC 控制策略, 通过主动改变储能的参考信号使其 SOC 在安全范围内工作。结合实际数据的仿真验证表明, 该平抑方法能够自适应地实现光伏出力的合理分解与功率分配, 在延长储能使用寿命的同时有效满足并网功率波动的要求, 为平抑光伏输出功率波动提供了新思路。

**关键词:** 分布式光伏; 混合储能系统; 经验小波变换; 平抑功率波动; 荷电状态控制

## Adaptive PCC power fluctuation smoothing method based on EWT for distributed PV-energy storage

MA Wanshuo, GAO Houlei, ZHANG Yunchi, LIU Zhen, PENG Fang

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The aggregated power of distributed PV at the point of common coupling (PCC) on the AC side has large randomness and volatility, affecting the stable operation of the grid. To help combat this, an adaptive PCC power fluctuation smoothing method based on empirical wavelet transform (EWT) is proposed. First, this paper focuses on a typical scenario of a hybrid energy storage system (HESS) and distributed PV access to the PCC. After analyzing the characteristics of the EWT adaptive processing waveform, and combining with the power fluctuation rate and energy storage element response characteristics, the EWT decomposition and optimal correction of the original PV aggregated power are applied to achieve HESS primary power distribution. Then to avoid the HESS state of charge (SOC) from frequently crossing its limit, an active power compensation control is proposed to make it work within the safe range by actively changing the energy storage reference signal. A simulation example combined with actual data shows that the smoothing method can adaptively realize reasonable decomposition and power distribution of PV output and effectively meet the requirements of grid-connected power fluctuation while extending the service life of energy storage. This provides a new idea for smoothing PV output power fluctuation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877127).

**Key words:** distributed photovoltaic; hybrid energy storage system; empirical wavelet transform; smoothing power fluctuations; state of charge (SOC) control

## 0 引言

在中国“双碳”目标的引导下, 分布式光伏作为清洁能源, 以安装方便、控制灵活的特点得到迅猛发展, 新增并网规模远超集中式光伏<sup>[1]</sup>。然而分

布式光伏的单点接入容量小, 在多点汇流通过公共连接点(point of common coupling, PCC)接入系统时, 其输出功率的随机性和波动性可能使从 PCC 注入的电能质量过低, 对电网造成冲击<sup>[2]</sup>。储能系统可以灵活调节充/放电功率, 将能量型和功率型储能元件协同控制, 组成混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)配置在分布式光伏 PCC 处, 可

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877127)

以平滑输出功率波动,提高电网运行的稳定性。

为充分发挥对光伏功率的平抑作用,并使储能的荷电状态(state of charge, SOC)保持在正常工作范围内,需要对光伏输出功率进行分解重构,并在 HESS 内部合理分配。文献[3-4]采用二阶滤波和中值平均法分析功率信号,并根据 HESS 的 SOC 实时调整分配权重以实现能量管理,但单纯的滤波算法难以兼顾光伏信号的细节和储能的响应特性,且滤波结果往往存在一定时延。文献[5-6]提出应用离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)和小波包变换将光伏或风电功率在频域上以不同分辨率均匀分解,并依据储能的响应能力重构结果,但其中小波分解基和分解层数的选择依赖人为设置,需多次试验才能达到最优组合。文献[7]采用互相关系数对小波包的分解基进行自适应选取,但这种方式需要采集完整的波形曲线,难以实现全局的分解基寻优。近年来,经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)被逐渐应用于平抑功率波动,其基于波形包络与极值的原理解决了解析基的选择问题,但分解结果存在虚假分量以及模态混叠。文献[8-9]通过求解泛函极值、加入高斯白噪声等对 EMD 进行改进,采用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和完全集合经验模态分解(complete ensemble EMD with adaptive noise, CEEMDAN)处理光伏功率,并应用模糊控制和衰减系数均衡控制来优化储能 SOC。改进的 EMD 虽克服了模态混叠,却均受限于 EMD 物理意义不明确的固有缺陷,需借助希尔伯特-黄变换(Hibert-Huang transform, HHT)进一步辨识频域特征<sup>[8]</sup>,使用灰色关联度算法重构并网功率,对分解层数进行循环寻优<sup>[9]</sup>等,增加的众多环节提高了算法复杂度,且处理不同波形时需重新设置参数。此外,上述文献涉及的 SOC 管理方法均是在 HESS 内部实现,即在功率型储能 SOC 接近限值时,将部分高频分量交予能量型储能。这与后者的工作特性相悖,将影响其使用寿命。文献[10-11]提出,在 SOC 接近限值时,可将功率型储能无法响应的小幅值高频分量视为扰动,直接交予大电网平抑,这种方式对系统运行的稳定性有要求,但给 SOC 管理策略提供了新的研究方向。

文献[12]提出的经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT),近年来在电力系统中已被应用于谐波检测、故障定位、变压器噪声分析等领域<sup>[13-14]</sup>。相比于上述处理光伏功率的方法,其分解信号的经验小波基和分解层数均不依赖人为选择,可自适应构造,分解后的波形也直接包含频域信息,算法过程简洁,理论基础完备。

因此,本文提出了一种基于经验小波变换的分布式光储 PCC 功率波动自适应平抑方法。首先,对分布式光伏与储能共 PCC 交流侧接入场景的特性展开分析;结合功率波动标准,利用 EWT 对光伏汇流功率进行自适应分解,并根据不同储能元件的响应能力重构分配给 HESS 的功率,且采用备用优化算法确保分解效果达到预期。同时为避免储能 SOC 越限并延长其使用寿命,提出一种适用于光储共交流侧连接的主动功率补偿 SOC 控制。通过算例仿真与定性定量对比,验证了本文所提方法的流程简洁性、自适应性和平滑光伏功率波动的有效性。

## 1 分布式光储并网发电系统

### 1.1 分布式光伏与储能的接入方式

分布式电源并网点(point of interconnection, POC)指电源的输出汇总点或升压站高压侧母线,而公共连接点(PCC)为电源或用户与公共电网的连接处<sup>[15]</sup>。光伏与储能的配合通常采用共直流母线的形式,接入系统的 POC 之前以稳定输出功率<sup>[16]</sup>。为适应分布式光伏单点容量小、选址分散的特性与储能的建设需求,本文采用了“分散汇流升压,集中配建储能”的共交流 PCC 连接模式,目标系统的拓扑结构如图 1 所示。

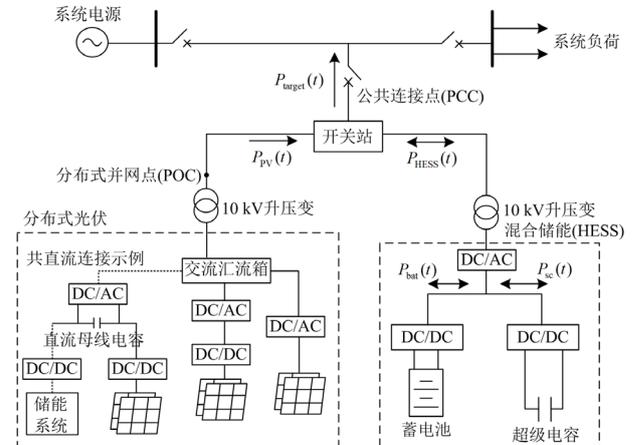


图 1 分布式光储接入 PCC 的系统拓扑结构

Fig. 1 System topology of distributed PV-storage access to PCC

图 1 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;  $P_{bat}(t)$  和  $P_{sc}(t)$  分别为蓄电池和超级电容参考功率;  $P_{target}(t)$  为光伏并网目标功率。分布式光伏依据地理条件分散配置,其电能通过交流汇流箱后升压,与混合储能电站共同连接至开关站,在开关站以一定运行策略经 PCC 注入电网。

图 1 中还给出了光储共直流母线电容的连接示例。与之相比,将储能和分布式光伏接入 PCC 交流

侧后, 光伏变流器可因地制宜, 选择单极式或通过 Boost 电路等升压的两级式结构; 大容量集中配置的储能电站功率调节能力更强, 且可以在光伏工程建成后, 根据平抑波动或调峰的需求在后期建造; 光伏之间与 HESS 均在电气上互相隔离, 控制方法的设计具有独立性, 在检修维护、后期扩建时无须大规模停电<sup>[17-18]</sup>。但同时这种连接方式无直流母线稳定输出电压, 且分布式光伏各自环境条件不一, 使汇流在 PCC 的光伏功率波动更为频繁, 平抑波动的需求全部由集中式混合储能承担, 对其平抑方法与效果带来了更高要求。从图 1 中可知, 系统各部分间的功率关系如式(1)所示。

$$P_{\text{HESS}}(t) = P_{\text{target}}(t) - P_{\text{PV}}(t) = P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{sc}}(t) \quad (1)$$

HESS 的作用为: 当  $P_{\text{PV}}(t)$  输出不稳定时, 其发出的功率  $P_{\text{bat}}(t)$  和  $P_{\text{sc}}(t)$  与其叠加, 对波动处进行补偿, 使经 PCC 输入系统的功率  $P_{\text{target}}(t)$  保持平稳, 符合并网功率需求。本文的能量型储能为铅酸蓄电池, 功率型储能为超级电容。前者具有高能量密度, 容量大, 但对功率信号的响应速度慢, 适用于幅值低、放电深度大的低频分量, 后者则相反, 具有高功率密度, 用于响应高频波动分量<sup>[17,19]</sup>。

## 1.2 PCC 处功率波动的评价指标

分布式光伏汇流后, PCC 处的功率波动率为评价其输出电能质量的重要参数, 其计算如式(2)。

$$\mu_{\text{PCC}} = \frac{P_{\text{target-max}} - P_{\text{target-min}}}{P_{\text{PCC-rated}}} \times 100\% \quad (2)$$

PCC 点功率波动率  $\mu_{\text{PCC}}$  表示为一定时间尺度内输入系统的有功功率最大值  $P_{\text{target-max}}$  减最小值  $P_{\text{target-min}}$  后, 与额定功率  $P_{\text{PCC-rated}}$  的比值。本文参考国家电网对光伏电站有功功率变化的规定<sup>[15]</sup>, 且考虑到越小的波动将越有利于接入后系统的稳定运行<sup>[8]</sup>, 以 1 min 尺度内  $\mu_{\text{PCC}}$  不超过 10%、10 min 尺度内不超过 30% 为目标, 来进行 HESS 对光伏原始功率的平抑。

## 2 基于 EWT 的平抑光伏输出波动方法

由上述分析可知, 平抑 PCC 处光伏功率的关键在于开关站处对  $P_{\text{target}}(t)$  和  $P_{\text{HESS}}(t)$  的选择方法, 使前者能尽量平滑、符合并网规定, 而后者能依据两部分储能的输出特性进行分配以延长其使用寿命。同时, 方法应尽可能地减少参数的频繁调整, 对不同情况的功率波形均能适用。本文考虑利用具有自适应性的经验小波变换处理分布式光伏的汇流输出功率。

### 2.1 EWT 的自适应分解原理

经验小波变换(EWT)根据傅里叶频谱特性自适

应地选取小波滤波器组来提取信号的调幅-调频 (AM-FM) 分量, 分解结果有明确的物理意义, 克服了模态混叠, 且在分解计算时间上小于 EMD<sup>[20]</sup>。其对光伏输出功率波形处理的具体步骤如下所述。

#### 1) 自适应划分信号频谱

在香农采样定理限制下, EWT 应用傅里叶变换 (Fourier transform, FT), 将信号频谱规范至  $[0, \pi]$  内。之后不同于 EMD 和小波包方法中分解层数的人为确定, EWT 通过 “locmax” 原则来自适应确定频谱区间分段数以及区间分界线<sup>[21]</sup>。该方法对信号频谱的极大值点进行搜索并按照幅值降序排列, 保留大于一定阈值的极大值点, 其个数即为区间分段数  $N$ 。之后取相邻两个极大值点所对应频率的中值, 记为边界点  $\omega_n (n=1, 2, \dots, N-1)$ , 且取宽度  $T_n = 2\tau_n$  作为过渡段。以此将频谱分为  $N$  个区域, 每个区域表示为  $\xi_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$ 。划分后的频谱如图 2 所示<sup>[20-21]</sup>。

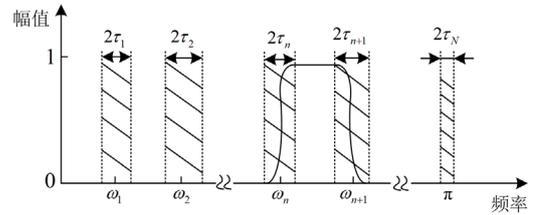


图 2 EWT 对信号傅里叶频谱的划分方式

Fig. 2 Way of EWT dividing Fourier spectrum of signal

#### 2) 自适应构造经验小波基

在每个区间  $\xi_n$  上, 定义经验小波函数  $\hat{\psi}_n(\omega)$  和经验尺度函数  $\hat{\phi}_n(\omega)$  为

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & (1+\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_{n+1} \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}} (|\omega| - (1-\gamma)\omega_{n+1}) \right) \right], & (1-\gamma)\omega_{n+1} < |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_{n+1} \\ \sin \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1-\gamma)\omega_n) \right) \right], & (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| < (1+\gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_n \\ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \beta \left( \frac{1}{2\gamma\omega_n} (|\omega| - (1-\gamma)\omega_n) \right) \right], & (1-\gamma)\omega_n < |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \quad (5)$$

$$\gamma < \min_n \left( \frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n} \right) \quad (6)$$

式(5)的  $\beta(x)$  为满足构造条件所需的多项式,式(6)中的  $\gamma$  系数保证相邻连续的变换不存在重叠。两个函数借鉴了小波变换中 Meyer 小波的构造方法,有着良好的频域光滑特性,可以更准确地提取和表征信号各分量的特征。可见,EWT 针对不同区间上的频段,其分解基有着不同的表达式,使其可以克服基函数的人为选取问题,自适应地构造小波滤波器。

### 3) 信号的分解与重构

与小波变换的过程类似,EWT 过程即是将原信号与经验小波函数和尺度函数进行内积运算,得到近似系数  $W_f^e(0,t)$  以及细节系数  $W_f^e(n,t)$ 。

$$W_f^e(0,t) = \langle f, \phi_1 \rangle = \int f(\tau) \bar{\phi}_1(\tau - t) d\tau = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \hat{\phi}_1(\omega)) \quad (7)$$

$$W_f^e(n,t) = \langle f, \psi_n \rangle = \int f(\tau) \bar{\psi}_n(\tau - t) d\tau = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \hat{\psi}_n(\omega)) \quad (8)$$

式中:  $\langle \rangle$  表示内积;  $\phi_1$  和  $\bar{\psi}_n$  为尺度函数和小波函数的复共轭;“ $\wedge$ ”符号表示信号的傅里叶变换;  $F^{-1}$  为信号的傅里叶反变换。

根据得到的两类系数,可以将原信号进行重构,并得到信号分解后的各频段分量:

$$f(t) = c_0(t) + \sum_{k=1}^N c_k(t) = W_f^e(0,t) * \phi_1(t) + \sum_{k=1}^N W_f^e(k,t) * \psi_k(t) \quad (9)$$

式中,“ $*$ ”表示信号卷积,最终 EWT 将信号分解为 1 个近似分量和  $N-1$  个细节分量,其分解结果  $c_k(t)$  被称为经验模态函数(empirical mode function, EMF)。与 EMD 的本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)需借助 HHT 来获取频率信息不同,EMF 在产生时就包含了自身所在的频段信息,且基于小波理论的分解方式使其避免了模态混叠<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2 混合储能的功率初步分配

EWT 的原理同时结合了 EMD 在分解基上的自适应性与小波变换的频域多分辨率特性,分解后的 EMF 分量包含了光伏功率在不同频段含有的成分。这使得可以直接依据储能在规定时间内充放电转换次数,即充放电频率对分解结果进行重构。为此需要确定频谱上各部分功率的分界线。

通常,EWT 所分解出的近似分量 EMF0 包含了原信号的大部分能量信息,占比在 90%以上,但考虑到其有时波动过小,无法表征原信号总体趋势<sup>[17]</sup>,

本文选取 EMF0 和第一个细节分量 EMF1 组成并网目标功率。一般蓄电池充放电响应时间在数分钟到数小时,而超级电容充放电响应时间在数秒钟到数分钟<sup>[7,22]</sup>,实际的响应特性与储能的具体参数密切相关。设二者的最小充放电转换周期为  $T_{\text{bat}}$  与  $T_{\text{sc}}$ ,则对应的最大响应变化频率分别为  $f_{\text{bat}}$  与  $f_{\text{sc}}$ 。因此蓄电池和超级电容对应的充电信号理想频率范围分别为  $f_{c1} \sim f_{\text{bat}}$  及  $f_{\text{bat}} \sim f_{\text{sc}}$ ,其中  $f_{c1}$  为 EMF1 对应的最大频率。超过最高频段  $f_{\text{sc}}$  的波动分量通常幅值极小,可以忽略不计。由于 EWT 频谱划分结果与极值点位置有关,对不同的波形 EMF 分量所包含的频带范围是不固定的,且储能可以响应充放电转换周期的小范围变动。因而以频带匹配的误差最小为原则,可将功率分配的初步结果表示为

$$\lambda = \min(|f_{c1} - f_{\text{bat}}| + |f_{c1} - f_{\text{sc}}|) \begin{cases} P_{\text{target}} = P_{c0} + P_{c1} \\ P_{\text{bat}} = \sum_{k=2}^i P_{ck}, P_{\text{sc}} = \sum_{k=i+1}^j P_{ck}, k=2,3,\dots,i,\dots,j,\dots,N-1 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  为频带匹配误差;  $P_{ck}$  为各 EMF 分量对应的功率。对应的示意图如图 3 所示,图中  $f_{c0} \sim f_{cN-1}$  为 EWT 分解后各频段的分界频率。

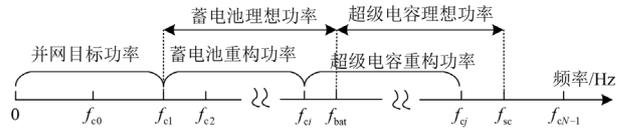


图 3 EWT 分解结果的重构原则

Fig. 3 Reconstruction principles for EWT decomposition results

### 2.3 对 EWT 自适应分解结果的后备优化算法

得益于有效的自适应小波基构造和“locmax”原则,EWT 不存在分解基和分解层数的选择难题。但算法的高度自适应性也带来了频谱划分的不可控,在极端情况下细节分量 EMF1,即图 3 中  $f_{c0} \sim f_{c1}$  会涵盖较大的频率范围,使分配给蓄电池的能量过少,或并网目标波动率不满足要求。且由于光伏输出自然功率的固有特性,将 EWT 区间划分数增大往往只能将高频进一步划分(详见 4.1 节仿真),不会对低频的细节分量进行二次分割,需要借助辅助算法来进一步优化并网目标功率。

滑动平均滤波法(moving average filter, MAF)将  $N$  个连续采样数据中的新数据放入队尾,去掉队首后计算平均值,以实现采样数据的平滑<sup>[23]</sup>。当  $N$  取值较小时,其对于中低频数据的处理效果并不理想,取值较大又导致在算法启动时从瞬时值到平均值的跳变。为适应修正光伏并网目标功率的需求,本文将

其简单改进为变步长滑动平均法(variable step moving average filter, VSMAF), 如式(11)所示。

$$P_{\text{new}}(t) = \sum_{w=0}^{N-1} \frac{P_{\text{target}}(t-w)}{N}, \quad N = l, 2l, 3l, \dots, N_{\text{max}} \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{new}}(t)$  为优化后的功率;  $l$  控制时间窗  $N$  的增加幅度, 使  $N$  随着采样时间逐步增至  $N_{\text{max}}$ 。即使  $N_{\text{max}}$  取值很大, VSMAF 仍能以较小的时间窗启动, 极大地削弱了波形跳变幅度, 使其对 EMF1 进行滤波后再与 EMF0 组成并网功率, 可以实现对 EWT 分解后并网目标功率的进一步优化。只是其滤波效果需要一定时间才能达到目标, 且在 EWT 分解的基础上又叠加了一个采样延迟, 因此仅作为后备算法, 在并网功率重构后仍需优化的少数情况下启动。

### 3 混合储能的功率再分配

#### 3.1 基于主动功率补偿的 SOC 优化控制

从 HESS 的工作特性来看, 蓄电池适用于缓慢大容量吞吐功率, 影响其使用寿命的主要因素为充放电转换次数, 而超级电容的容量较小, 影响其寿命的主要因素为过充/放电的次数<sup>[22-23]</sup>。在光伏出力经自适应分解和初级功率分配得到参考信号控制储能时, 还应考虑储能的荷电状态(SOC)的问题, 尤其是超级电容的过充/放电问题。当 SOC 接近上下限时, 储能的响应能力将减弱, 直接影响输出功率的平抑效果。超级电容 SOC 与其充放电之间的关系可表示为<sup>[24]</sup>

$$S_{\text{OC-sc}}(t) = \frac{E_{\text{sc}}^{\text{ini}} - \int_0^t \left( \eta_{\text{sc-ch}} P_{\text{sc-ch}}(t) + \frac{P_{\text{sc-dis}}(t)}{\eta_{\text{sc-dis}}} \right) dt}{E_{\text{sc}}^{\text{rated}}} \quad (12)$$

式中:  $S_{\text{OC-sc}}(t)$  为超级电容 SOC 曲线;  $E_{\text{sc}}^{\text{ini}}$  和  $E_{\text{sc}}^{\text{rated}}$  分别为超级电容初始和额定容量;  $\eta_{\text{sc-ch}}$  和  $\eta_{\text{sc-dis}}$ 、 $P_{\text{sc-ch}}(t)$  和  $P_{\text{sc-dis}}(t)$  分别为其充/放电效率与功率。

为使超级电容的 SOC 不越限, 若采用单纯的限值控制直接闭锁储能, 会使平抑效果不符合预期<sup>[6]</sup>; 若用模糊控制或衰减系数控制将超级电容高频参考信号的幅值进行削减, 交予蓄电池进行输出<sup>[5,8,23]</sup>, 虽能在短期内完成平抑, 却与蓄电池响应低频分量的特性相悖, 可能使其频繁充放电, 减少使用寿命。有学者提出, 在并网功率波动有足够裕量时, 可以通过略微降低并网功率的质量来延长储能的经济寿命<sup>[10-11]</sup>。本文对此观点进行了延续和改进, 提出一种主动功率补偿的储能 SOC 优化控制, 规则如下所述。

1) 定义储能 SOC 检测时间窗  $T$  和功率补偿函

数  $\phi$ ,  $\phi$  的波形应尽量平滑。本文选取正弦半周波进行说明, 其波形及其在  $T$  内的表达式如图 4 所示, 其中  $k$  控制函数幅值, 当其取值不同时,  $\phi$  的前 1 min 内波动率  $\Delta\phi_{\text{min}}$  也将不同。

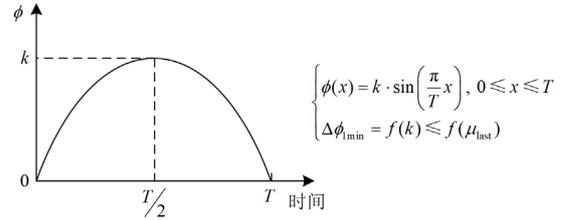


图 4 功率补偿函数及其表达式

Fig. 4 Power compensation function and its expressions

2) 以 SOC 在 50% 作为最佳工作状态, 30% 和 70% 为两侧告警状态。在储能工作时实时检测 SOC 的变化值, 每次经过 50% 时, 将此刻作为初始 0 位置, 当达到告警阈值时, 以此时刻作为  $T_1$  位置, 并在与  $T_1$  同宽的  $T_2$  内给储能参考信号叠加  $\phi$ , 以减弱 SOC 越限趋势, 如图 5 和式(13)所示。

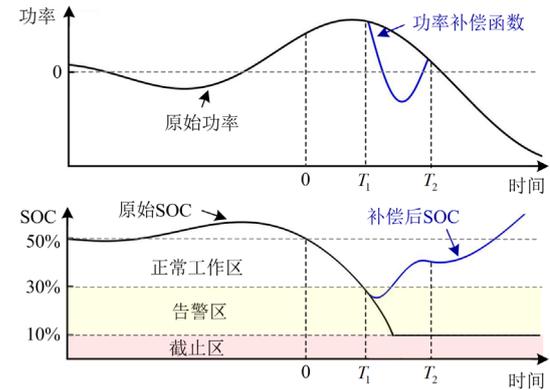


图 5 应用功率补偿函数阻止 SOC 越限

Fig. 5 Applying power compensation function to stop SOC from crossing limit

$$\int_0^{T_2} \phi(t) dt = \Delta S_{\text{OC-sc}} = \int_0^{T_1} \left( \eta_{\text{sc-ch}} P_{\text{sc-ch}}(t) + \frac{P_{\text{sc-dis}}(t)}{\eta_{\text{sc-dis}}} \right) dt / E_{\text{sc}}^{\text{rated}} \quad (13)$$

沿用式(12)的 SOC 表达式和变量, 式(13)表示补偿函数  $\phi$  在  $T_2$  内的积分, 对  $T_1$  内 SOC 的变化量  $\Delta S_{\text{OC-sc}}$  进行补偿。告警区间划分相对较大, 为补偿函数留出了充分的响应时间和 SOC 裕量。

3) 重复进行检测和补偿。在 SOC 波动较慢时,  $T_1$  时间窗取得较大, 相应的  $\phi$  也变化缓慢, 几乎不会影响波形平滑度; 而 SOC 快速变化时, 较小的  $T_1$  对 SOC 的补偿也将更为快速。在补偿完毕后, 效果相当于每个  $T_2$  开始时 SOC 从 50% 开始变化。

以上调整主动改变了 HESS 的参考功率，反映到外部将表现为并网目标功率叠加上每个时间窗内的  $\phi$ ，因此称为主动功率补偿的优化控制。同时为防止  $T_1$  较小时  $\phi$  的加入使并网波动率过大，需要对  $\phi$  的变化幅度进行限制。正弦函数在 0 位置附近变化率最大，便于在生成补偿函数时确定其变化幅度。在权衡补偿的有效性和并网电能质量后，以  $\phi$  在前 1 min 内的波动率  $\Delta\phi_{\min}$  不超过波动率裕量的 70% 为目标，可得图 4 中  $k$  的约束条件为

$$\begin{cases} k \sin\left(\frac{60\pi}{T}\right) \leq 0.7(10\% - \mu_{\text{last}}) \times P_{\text{PCC-rated}}, T/2 \geq 60 \text{ s} \\ k \leq 0.7(10\% - \mu_{\text{last}}) \times P_{\text{PCC-rated}}, T/2 < 60 \text{ s} \end{cases} \quad (14)$$

式中， $\mu_{\text{last}}$  与  $(10\% - \mu_{\text{last}})$  为生成补偿函数时刻的并网波动率及其裕量。当  $T/2$  小于 1 min 时， $\phi$  的变化量已变为  $k$ ，因此有上述两种情况下的表达式。

总体而言，该方法牺牲了一定范围内并网功率的平滑性，以保证 HESS 总体的平抑性能和使用寿命。这是足够合理的，因为当储能尤其是超级电容达到截止区无法工作时，其造成的输出波动率将远大于平滑性的损失。此外，若光伏与 HESS 共直流母线接入，对储能参考功率的改变可能会影响光伏的运行状态<sup>[16]</sup>，因而该优化控制更适合于本文光储在电气上隔离的共 PCC 交流侧的接入方式。

### 3.2 平抑方法总体流程

综合以上环节，可得安装于 PCC 处开关站的混合储能平抑分布式光伏输出功率方法流程，如图 6 所示。

在获取光伏功率后，EWT 的自适应分解及良好的理论特性使该方法省去了选择分解基和分解层数，以及辨识分解后波形频域信息等众多环节。重构前两层分量得到的并网功率通常能满足要求，且在储能容量配置合理的情况下，其 SOC 不会轻易越限，因而在图 6 用实线表示正常工作下的流程，虚线表示需要修正的环节。整体的控制流程简洁直观，无须频繁调整平抑参数，以较少的处理环节实现光伏功率波动的自适应平抑。

## 4 仿真分析

本文以山东莱芜某分布式光储示范工程的典型日功率实际采样数据为例，结合 Matlab/Simulink 仿真，说明前述所提方法的特点与优势。该项目已建成额定功率为 700 kW 的分布式光伏，并拟采用如图 1 所示的拓扑结构同步配建最大持续放电功率为 120 kW 的蓄电池和 180 kW 的超级电容，共 300 kW

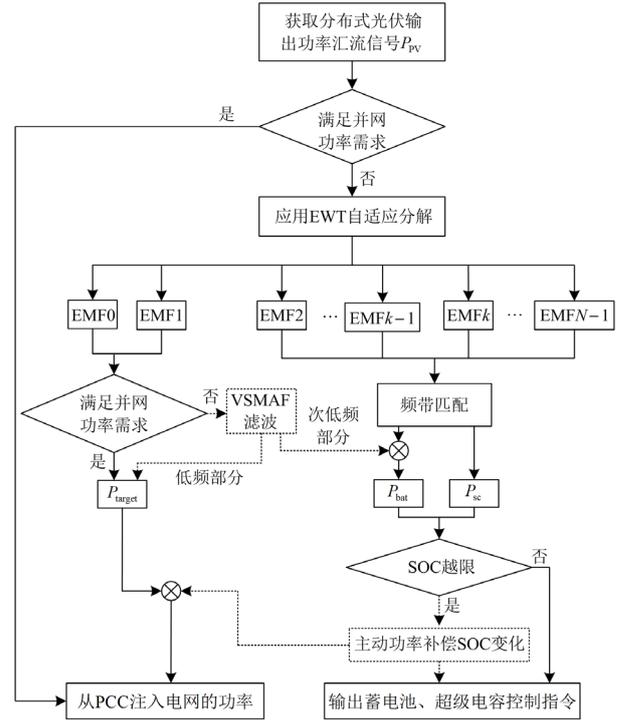


图 6 平抑方法整体流程

Fig. 6 Overall process of smoothing power

的混合储能。PCC 处功率数据采样间隔最小为 15 s，一天可得到 5760 个采样点，原始数据如图 7 所示。

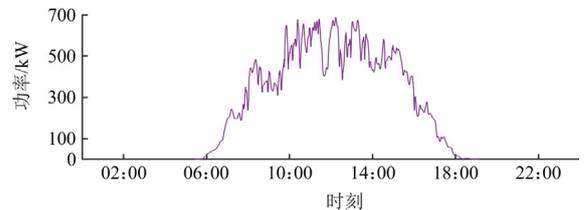


图 7 PCC 处汇流功率原始数据

Fig. 7 Raw data of PCC aggregated power

剔除数据中光伏非工作时间的部分，初步计算其功率波动率，在一天内其 1 min 尺度波动最大为 16.8%，10 min 尺度波动最大为 52.3%，并不满足并网要求，需要借助混合储能系统进行波动平抑。为在分钟至小时级、秒至分钟级尺度上具有代表性，本文的蓄电池和超级电容的最小充放电转换周期分别设置为 30 min 和 30 s，对应的理想充放电频率为  $5.56 \times 10^{-4}$  Hz 和  $3.32 \times 10^{-2}$  Hz。

### 4.1 EWT 分解基和分解层数的自适应性

从方法的时序出发，本节首先对 EWT 处理光伏功率波形的自适应特性展开讨论。因 EWT 的经验小波基根据信号特征自适应构造，仅需要考虑分解层数的预设。光伏输出功率信号的波形是自然条件下的频谱，理论上存在无数个极值点，在“locmax”

规则下, EWT 的分解层数往往是预设的最大层数, 但这并不影响 EWT 处理光伏波形时存在的自适应性, 如图 8 所示。

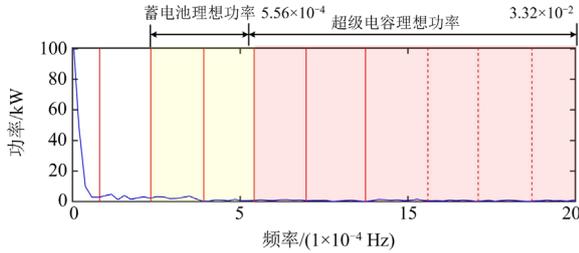


图 8 EWT 对原始功率傅里叶频谱的分割

Fig. 8 EWT segmentation of the original power Fourier spectrum

图 8 中红色实线部分为 EWT 分解 6 层的频谱划分, 当划分 10 层时, 增加了红色虚线所示的划分带(其中过渡段的中点为每层分界线), 并在图上方指出了蓄电池和超级电容的响应频率范围。可见, 本算例中无论是选择 6 层还是增大到 10 层的 EWT 分解, 重构后蓄电池和超级电容所包含的频率分量将完全一样。这是因 EWT 根据频谱极值划分每层频带, 而光伏输出功率谱的可辨识极值通常在中低频部分, 增大分解层数不会影响已识别出的频带, 而只对高频进行进一步划分, 多划分的 4 层高频分量均包含在了超级电容承担的频带中。

在 EWT 的最大分解层数设置为一定阈值后(经多个样本数据分析, 对光伏功率一般设为 6 层以上), 重构给蓄电池和超级电容的频率分量将趋于稳定, 不会因层数的增减对结果产生较大影响。因此, 对于混合光储的功率分配问题, EWT 的分解层数选择十分宽松, 有相当大的自适应性。其分解 10 层的 EMF 分量如图 9 所示。

#### 4.2 基于 EWT 方法的平抑效果

对于光伏信号的处理, 仅具有自适应性并不够, 还应关注其平抑目标效果。本文对光伏原始功率应用常见的变换手段进行分解与重构, 将结果进行对比筛选。首先, EMD 的 7 层分解结果如图 10 所示。

对比 EWT 结果, 可以发现: 1) 由于 EMD 分解固有的理论依据不完备问题, 得到的残差和内涵模态分量中存在无法解释意义的分量, 且不包含直观的波形频率信息, 需 HHT 来进一步处理, 增大了算法复杂度和计算时间。2) IMF1—IMF3 分量中均有高频和低频分量混杂的部分, 即存在模态混叠问题。高低频分量之间无明显界限, 很难选择重构的组合。因此舍去对 EMD 的进一步分析。

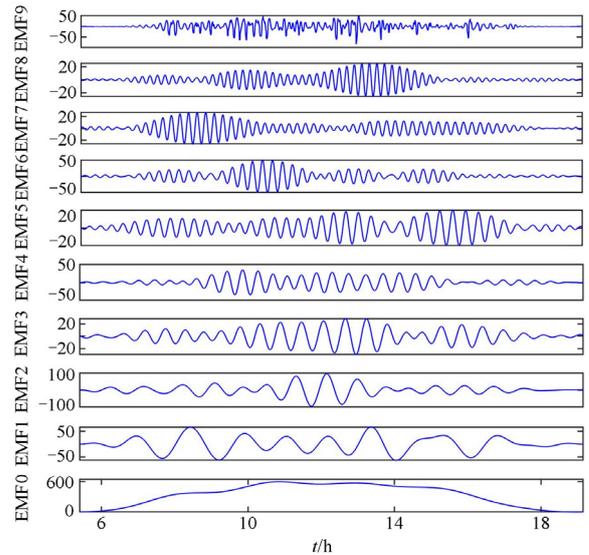


图 9 EWT 的 10 层分解 EMF 分量

Fig. 9 The 10-layer decomposition EMF component of EWT

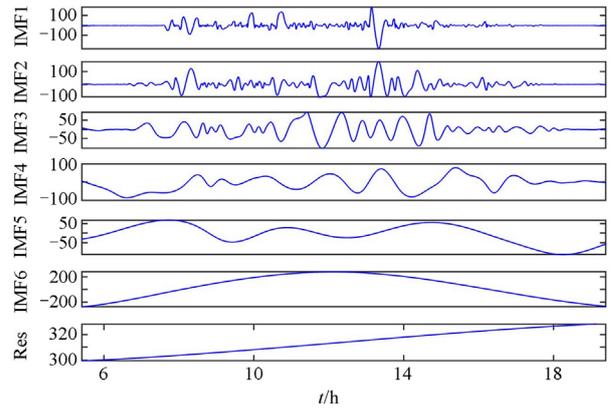


图 10 EMD 的 7 层分解 IMF 与余量

Fig. 10 The 7-layer decomposition IMF with residual of EMD

根据前述的频率范围及重构规则, 对 EWT 的 10 层分解结果进行重构, 得到并网目标功率及蓄电池和超级电容的目标功率, 并参照文献[5-7, 9]中的相关流程, 将其与 db2 基-8 层小波包分解、7 层变分模态分解(VMD)后的重构结果进行对比, 三种方法重构后频率范围和包含的层数如表 1 所示。

表 1 三种分解法重构后各部分频率

Table 1 Each frequency after reconstructed by three methods			
方法	并网目标频率	蓄电池频率	超级电容频率
EWT	0~2.51×10 <sup>-4</sup>	2.51×10 <sup>-4</sup> ~5.65×10 <sup>-4</sup>	5.65×10 <sup>-4</sup> ~4.00×10 <sup>-2</sup>
	2 层	2 层	6 层
小波包	0~2.32×10 <sup>-4</sup>	2.32×10 <sup>-4</sup> ~5.69×10 <sup>-4</sup>	5.69×10 <sup>-4</sup> ~3.33×10 <sup>-2</sup>
	2 层	1 层	4 层
VMD	0~8.60×10 <sup>-5</sup>	8.60×10 <sup>-5</sup> ~6.22×10 <sup>-4</sup>	6.22×10 <sup>-4</sup> ~7.91×10 <sup>-3</sup>
	1 层	1 层	5 层

在表 1 中, 小波包分解和 VMD 的并网目标功率划分原则与 EWT 相同, 均在考虑蓄电池和电容的响应频率后, 选取了解析后最能表征光伏原始功率波动趋势的分量, 三者对应的并网波形与波动率如图 11 所示。

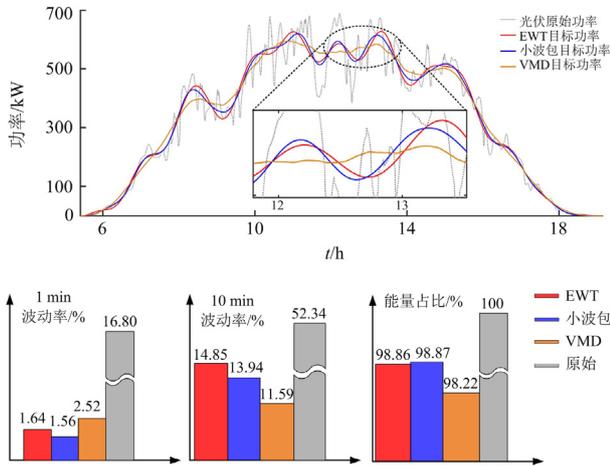


图 11 三种方法重构后的并网目标波形及波动率

Fig. 11 Grid-connected target power waveform and fluctuation rate of three methods after reconstruction

结果表明, EWT 和小波包分解的效果良好, 二者重构后的并网参考功率能量占比相近, 包含了原信号的大部分趋势信息, 能满足并网要求。而 VMD 虽然有着较小的 10 min 波动率, 但第一层分量难以表征原始功率趋势, 且波形中有着无法解释的不平滑波动, 使 1 min 波动率较大; 而第二层分量频率涵盖过长, 无法与第一层组合作为并网功率。在增大 VMD 分解层数时, 只能识别出高频的无效分量, 无法对低频进一步细分。对各分量重构后的蓄电池和超级电容功率如图 12 所示。

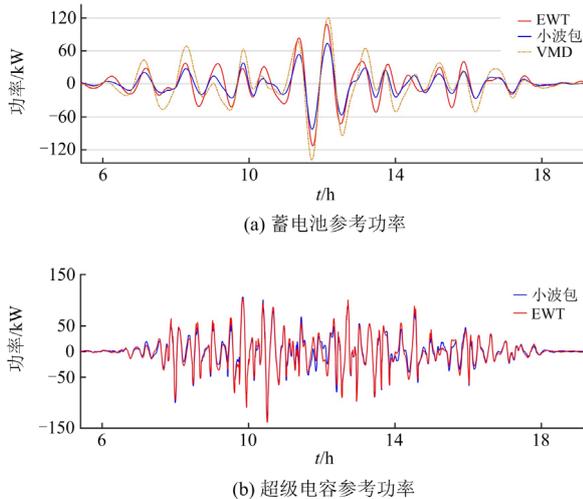


图 12 重构后的混合储能参考功率

Fig. 12 HESS reference power after reconstruction

在图 12(a)中, 三者一天内蓄电池功率的充放电转换均在 30 次左右, 基本不会影响蓄电池使用寿命。但 VMD 波形同样由于频段范围涵盖过长, 其充电幅值已超出了蓄电池的额定功率 120 kW, 失去了可行性。EWT 和小波包波形的能量占比分别为 0.63%和 0.56%, EWT 的分解结果在幅值未超限的情况下, 充放电程度更深, 对蓄电池特性的利用更为充分。在图 12(b)中, 由于超级电容响应高频带分量, 而 EWT 和小波包分解后波形频带范围近似, 充放电幅值也各有交叉, 可认为二者的超级电容功率响应效果相近。总体而言, 对于该典型日的分布式光伏功率数据, 采用 EWT 方法和小波包分解的效果类似, 优于 EMD、VMD 分解。对于波形分解重构三类方法的进一步总结见 4.4 节。

### 4.3 主动功率补偿法的影响

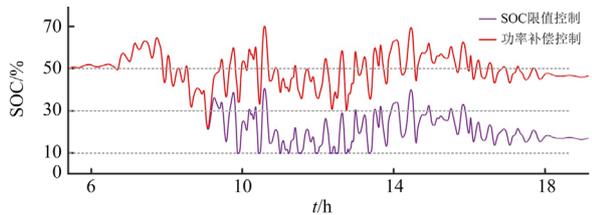
在使用 EWT 分解得到蓄电池和超级电容的参考功率后, 实际输出功率还与储能的 SOC 状态相关。本文采用的蓄电池和超级电容额定容量分别为 200 kWh 和 30 kWh, 允许放电深度分别为 20%~80%、10%~90%, 最大充放电效率均为蓄电池 90%、超级电容 95%。

若单纯考虑储能的安全运行, 在允许充放电深度的限值控制下, 当 SOC 达到截止区时, 必须立即停止加剧其变化的储能充放电动作, 且在接近截止区时储能的响应效果也会变差, 导致平抑效果不理想, 并网功率出现波动。一般蓄电池为了适应额外削峰填谷的需求, 额定容量配置较大, SOC 很少出现越限情况, 而超级电容的容量则较小, 容易达到限值, 如图 13(a)中紫色部分所示。

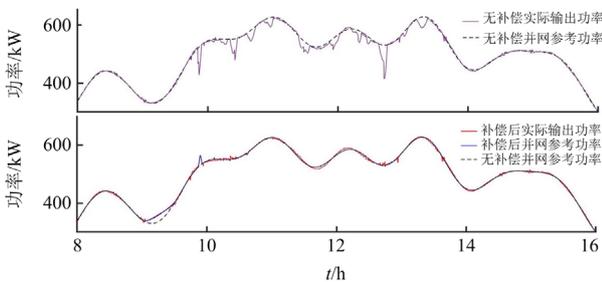
将图 13(a)结合图 12 蓄电池和超级电容的功率波形可见, 超级电容的波动频率远大于蓄电池, 若在 SOC 接近 10%的 10~14 h, 将电容高频功率的一部分不经处理分配给蓄电池, 会导致其难以跟随高频变化指令。最严重的情况为在蓄电池的充放电交界处叠加高频信号, 将进一步导致短期内蓄电池的充放电次数增加, 严重影响其使用寿命。

图 13(b)给出了主动功率补偿控制前后的并网功率(为使波形特征更为直观, 仅截取 8~16 h 部分)。根据前述原则, 在 09:06、09:55 启动充电补偿, 10:32 进行放电补偿。其中在 09:55 因 SOC 从 50%到告警区时间过短, 功率补偿函数的幅值  $k$  经算法限制为 30。受限于环境变化和储能的实际响应能力, 控制输出波形与参考功率会在小范围内略有偏差, 视二者相差在  $\pm 5$  kW 内为达到输出目标, 可得功率补偿控制使该日达到目标比率从 84.1%改善为 97.2%, 1 min 波动率从 11.3%稳定在 5%以下, 且

SOC 修正为正常工作范围。并网功率虽然也出现了一定的不平滑,但其波形中大的骤变从 15 次改善为 3 次,在不影响蓄电池正常工作的情况下保证了平抑效果。在仿真中当超级电容的容量设置过小时, SOC 的频繁双向越限可能打乱相邻补偿流程的时序,达不到预期效果。但在现场应用中容量的配置一般不会出现此极端条件<sup>[8]</sup>。



(a) SOC变化



(b) 并网功率平抑结果

图 13 超级电容 SOC 及并网功率对比

Fig. 13 Comparison of supercapacitor SOC and grid-connected power

在 4.2 节中,由前两层 EMF 组成的并网目标已经满足了波动率要求。但频谱划分方式的固定总会带来结果的不确定,为说明 VSMAF 对 EWT 自适应分解结果的可调节性,结合功率补偿控制,本文在环境条件开始有大波动的 08:00 时刻启动 VSMAF,将并网功率进一步优化,如图 14 所示。

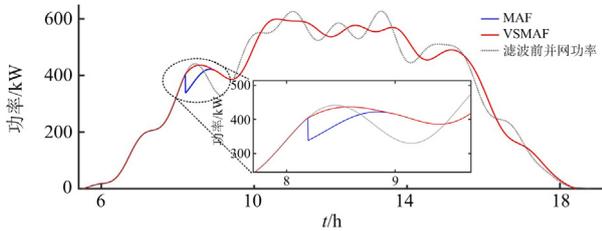


图 14 采用变步长滑动滤波算法优化并网功率

Fig. 14 Optimization of grid-connected power using VSMAF

可见,对于已是低频的并网功率波形,MAF 的时间窗在取到 1.5 h 后才能有效平抑,以致于在算法启动时刻其并网功率指令从瞬时值立刻跳变为该时间窗内的平均值。而 VSMAF 初始时间窗很小,

在不断采样过程中逐步增大,使得启动过程的波形也能保持平滑,最终使并网功率的 10 min 波动率从 14.85%优化为 8.30%。同时,VSMAF 的滤波效果并不是立刻达到预期,且与原波形有相位延迟,偏差的功率会使蓄电池一段时间后 SOC 偏移量增加。此时同样可以启动功率补偿控制进行蓄电池 SOC 的偏差管理,如图 15 所示。

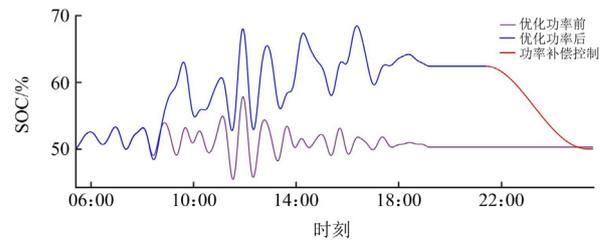


图 15 主动功率补偿算法对蓄电池 SOC 进行控制

Fig. 15 Battery SOC controlled by active power compensation algorithm

在优化前,并网功率对原始功率的变化趋势已较为贴近,使蓄电池的能量吞吐较小,在一天内 SOC 变化不大。而在优化后蓄电池容量被显著利用, SOC 虽未进入告警区,但在电池工作一天后与 50%状态的偏移明显。这时可在夜间电网负荷压力小时启动功率补偿算法,向蓄电池缓慢充电,使次日 SOC 能从 50%启动,保证平抑效果。这种补偿方式在本文分布式光伏与储能在电气上相互隔离的连接下,等同于由电网向蓄电池直接供电,不会在夜间光伏元件不工作时对其产生影响。

#### 4.4 方法有效性的总体定性定量对比

经上述仿真验证,本文将基 EWT 与小波包、改进 EMD 的光伏功率波动平抑方法整体进行了再次梳理。同时为保证结果的普遍性,本文另外随机筛选了三个典型日的光伏原始数据,计算上文涉及指标的均值以评价效果,如表 2 所示。

从定性分析可见,EWT 有着小波变换完备的频域分析基础和高于 EMD 的自适应性及算法简洁性。数据的平均指标定量表明,EWT 的平抑效果与常用的小波包变换互有优劣(标红为最优组合),在加入功率补偿控制后,平抑效果均得到明显优化,能更好地跟随目标功率。然而每次小波包的分解基和层数均需要人为调整以达到最优,使用 EWT 在没有针对具体波形进行环节和参数修改的情况下,依然有着与主流分解方法相近的效果。总体上看,本文提出的 EWT 结合功率补偿控制的平抑方法具有可行性与有效性。

表 2 方法的总体定性与定量分析

Table 2 General qualitative and quantitative analysis of methods

方法流程对比		小波包变换	EMD 及其改进	EWT	
↓ 平抑方法 时间顺序	分解基选择	人为选择	自适应构造	自适应构造	
	分解层数选择	人为选择	人为选择/ 辅助算法	自适应构造	
	重构功率	依据储能 充放电频率	HHT 等频率 提取算法	依据储能 充放电频率	
	波动率控制	增大分解层数	辅助算法	辅助算法(VSMAF)	
储能 SOC 控制					
方法整体组合对比		小波包+ 限值控制	小波包+功率 补偿控制	EWT+ 限值控制	EWT+功率 补偿控制
典型 日数 数据的 平均 指标	达到目标 功率时长 占比/%	81.3	<u>96.4</u>	79.6	96.2
	并网输出 骤变次数	15	<u>4</u>	17	<u>4</u>
	1 min 最大 波动率/%	11.2	<u>4.9</u>	14.9	5.8
	超级电容在 告警区运行 时长/h	6.7	1.8	7.9	<u>1.5</u>

## 5 结论

分布式光伏与储能共 PCC 交流侧的连接方式使光储的配置更为灵活、运行维护方便，但也对平抑光伏波动的方法与效果带来了更高要求。本文基于经验小波变换对光伏功率自适应处理的特性，综合提出了分布式光储 PCC 功率波动平抑方法。理论分析与仿真验证结果表明：

1) 在分解光伏功率信号时，该平抑方法能利用 EWT 自适应构造经验小波基，且基于频谱特征的划分方式几乎没有分解层数的设置难题。

2) 在重构并网目标和初级分配储能功率时，EWT 的分解结果包含了频域信息，能直接基于不同储能元件的响应特性实现合理分配。通过辅助算法可以提升 EWT 分解的可控性，进一步优化并网目标功率。整体环节简洁，无须频繁参数调整。

3) 在储能的 SOC 管理方面，本文提出用于光储共交流侧连接方式的功率再分配方法，通过主动补偿 SOC 偏差，在保证混合储能平抑效果的同时延长其使用寿命，提高运行的经济性。

此外，本文 EWT 结果虽借助了辅助算法优化，但也可通过改进原理以提高频谱辨识可控度。同时主动功率补偿的算法流程也有待优化。未来将对这些问题、以及方法对数据的实时采样平抑、与光储容量经济配置等密切相关的方向展开进一步研究。

## 参考文献

- [1] 李征, 王文宾, 韩胜峰, 等. 考虑无功支撑的分布式光伏接入配电网电压适应性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 32-41.  
LI Zheng, WANG Wenbin, HAN Shengfeng, et al. Voltage adaptability of distributed photovoltaic access to a distribution network considering reactive power support[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 32-41.
- [2] 杨珮鑫, 张沛超. 分布式电源并网保护研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1888-1895.  
YANG Peixin, ZHANG Peichao. A survey on interconnection protection of distributed resource[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1888-1895.
- [3] 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): 177-187.  
ZHANG Yuhuan, 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): 177-187.
- [4] 李学斌, 刘建伟. 采用二阶滤波的混合储能系统实时功率分配方法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1650-1657.  
LI Xuebin, LIU Jianwei. Real-time power distribution method adopting second-order filtering for hybrid energy storage system[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1650-1657.
- [5] 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 Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(3): 593-599.
- [6] 吴振威, 蒋小平, 马会萌, 等. 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 317-324.  
WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage systems for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 317-324.
- [7] 程龙, 张方华. 用于混合储能系统平抑功率波动的小波变换方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 100-104, 128.  
CHENG Long, ZHANG Fanghua. Wavelet transform method for hybrid energy storage system smoothing power fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 100-104, 128.
- [8] 闫群民, 刘语忱, 董新洲, 等. 基于 CEEMDAN-HT 的平抑光伏出力混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 43-53.  
YAN Qunmin, LIU Yuchen, DONG Xinzhou, et al. Hybrid energy storage capacity optimization configuration for smoothing PV output based on CEEMDAN-HT[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 43-53.
- [9] 颜晨煜, 樊艳芳, 姚波. 采用自适应变分模态分解的

- 混合储能平滑光伏出力波动控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1898-1906.
- YAN Chenyu, FAN Yanfang, YAO Bo. Strategy for smoothing photovoltaic power fluctuation of hybrid energy storage system using self-adaptive variational mode decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1898-1906.
- [10] 刘海涛, 马丙泰, 郝思鹏, 等. 考虑功率限值管理的光储系统建模及控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(11): 100-108.
- LIU Haitao, MA Bingtai, HAO Sipeng, et al. Modeling and control strategies for PV energy storage systems considering power limit management[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(11): 100-108.
- [11] DENG J D, SHI J, LIU Y, et al. Application of a hybrid energy storage system in the fast charging station of electric vehicles[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 10(4): 1092-1097.
- [12] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [13] 吴建章, 梅飞, 陈畅, 等. 基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 136-143.
- WU Jianzhang, MEI Fei, CHEN Chang, et al. Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 136-143.
- [14] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105-112.
- TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 105-112.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 分布式电源并网技术要求: GB/T 33593—2017[S]. 北京: 中国标准化出版社, 2012.
- [16] 王宇. 超级电容与蓄电池混合储能系统的能量管理与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG Yu. Study on energy management and control of supercapacitor and battery hybrid energy storage system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [17] 李培强, 段克会, 董彦婷, 等. 含分布式混合储能系统的光伏直流微网能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 42-48.
- LI Peiqiang, DUAN Kehui, DONG Yanting, et al. Energy management strategy for photovoltaic DC microgrid with distributed hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 42-48.
- [18] CHEN Jinli, XIAO Gang, FERRARI M L, et al. Dynamic simulation of a solar-hybrid microturbine system with experimental validation of main parts[J]. Renewable Energy, 2020, 154: 187-200.
- [19] ACHLERKAR P D, SAMANTARA Y, S R, MANIKANDAN M S. Variational mode decomposition and decision tree based detection and classification of power quality disturbances in grid-connected distributed generation system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 4(9): 3122-3132.
- [20] 洪翠, 连淑婷, 郭谋发, 等. 经验小波变换在直流配电系统故障检测中的应用[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(12): 65-74.
- HONG Cui, LIAN Shuting, GUO Moufa, et al. Application of empirical wavelet transform in fault detection of DC distribution system[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(12): 65-74.
- [21] 李国权, 李必禄, 林金朝, 等. 基于改进 EWT 的心电信号基线校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 156-166.
- LI Guoquan, LI Bilu, LIN Jinzhao, et al. Baseline correction algorithm for ECG signals based on improved EWT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 156-166.
- [22] 王育飞, 王成龙, 李盟盟, 等. 基于自适应小波包分解的混合储能平抑高渗透率光伏社区电网电压波动方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 78-85.
- WANG Yufei, WANG Chenglong, LI Mengmeng, et al. Stabilize voltage fluctuation of community grid caused by high permeability photovoltaics based on self-adaption wavelet packet decomposition[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(9): 78-85.
- [23] 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.
- [24] 刘英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 107-108.
- LIU Yingpei, TIAN Shijie, LIANG Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-108.

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-06-20

作者简介:

马万硕(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式光储接入系统建模与保护; E-mail: wanshuo@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: houlei@sdu.edu.cn

张运驰(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分布式故障自愈技术。E-mail: laonazy@c@mail.sdu.edu.cn

(编辑 魏小丽)