DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.182 **中图分类号**：TM614 **文献标志码**：A

基于改进小波包方法的风电功率波动平抑

桑盛鹏(中国电源学会会员)，石开明，李 凯，曹仕通，苟于亮
(内蒙古工业大学电力学院，呼和浩特 010080)

摘要：针对传统小波包分解在风电功率波动平抑过程中存在过度平抑的问题，在时频分析的基础上，引入高频分量的平抑系数，提出1种改进的小波包分解方法。首先，找出功率波动越限的时间集合，利用传统小波包分解得到各个频段的分量；其次，通过目标函数和约束条件确定最佳平抑系数，从最高频分量开始依次对越限时间集合内的功率分量进行平抑，直到满足2种时间窗口下的波动限制；最后，对平抑效果进行评价。经算例仿真分析，在不同场景中改进的小波包方法在满足波动限制的前提下，均可以降低储能的充放电累积量，并使储能的出力水平维持在较好的状态。

关键词：风电功率；小波包分解；波动平抑；平抑系数；储能

Wind Power Fluctuation Smoothing Based on Improved Wavelet Packet Method

SANG Shengpeng, *Member, CPSS*, SHI Kaiming, LI Kai, CAO Shitong, GOU Yuliang
(College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

Abstract: Aimed at the problem of over-smoothing in the process of wind power fluctuation smoothing by means of traditional wavelet packet decomposition, an improved wavelet packet decomposition method is proposed based on the time-frequency analysis by introducing the smoothing coefficients of high-frequency components. First, the set of time when the power fluctuation crosses the limit is found, and the components ineach frequency band are obtained using the traditional wavelet packet decomposition. Then, the optimal smoothing coefficients are determined based on an objective function and constraints, and the power components in the set of limit-crossing time are suppressed in turn, starting from the highest-frequency components until the fluctuation limits under the two time windows are satisfied. Finally, the smoothing effect is evaluated. Through the simulation analysis of an example, it is verified that under the premise of satisfying the fluctuation limits, the improved wavelet packet method can reduce the charge and discharge accumulation of energy storage and maintain the power output level of energy storage in a better state under different scenarios.

Keywords: Wind power; wavelet packet decomposition; fluctuation smoothing; smoothing coefficient; energy storage

在“双碳”目标背景下，风力发电技术得到了大力发展，成为具有开发规模和商业前景的1种清洁能源发电方式[1-2]，但风电的随机性与波动性为电力系统带来了严重的稳定性问题[3-4]。储能系统可以通过充放电动作来有效降低风电功率的波动性对并网带来的不利影响[5]，是应对风力发电不确定性的有效手段[6-7]，但应避免过度充放电。文献[8-9]采用不同低通滤波算法实现对储能功率的分配，但该类型算法存在滞后性；文献[10]利用经验模态分解对历史风电功率数据进行分析，并应用于滤波器设计中，但该方法存在模态混叠的问题。小波分解具有处理非平稳序列的能力[11]，可以有效地分析风电功率等信号的特征[12-13]。文献[14]利用小波滤波算法处理风电功率，从而获得满足波动要求的功率

收稿日期：2023-05-23；**修回日期**：2023-07-08；**录用日期**：2023-09-02；**网络首发日期**：2023-11-27

输出。小波包分解是在小波变换的基础上产生并发展起来的，它可以对信号的低频部分和高频部分进行分解，有助于更细节地了解信号的特征，从而提高时频分辨率[15]。文献[16-17]通过小波包分解获得满足波动要求的目标并网功率；文献[18-19]将小波包分解应用于功率分频中，采用混合储能对风电并网功率进行波动平抑；文献[20]基于时频分析，对传统的小波包分解方法进行改进，不再将分解后的高频分量全部滤除，只对高频分量的波动越限时刻进行局部平抑，但高频分量的平抑程度均通过人为设置决定。

本文参考时频分析的小波包分解，对高频分量的平抑程度进行优化，求取最优平抑系数，避免风电功率被过度平抑，尽可能降低对储能的充放电需求。算例仿真分析表明，所提方法在满足波动限制的前提下，可以降低储能的充放电功率累积值，并使储能的荷电状态维持在较为良好的水平。

1　风电功率波动与标准

风能具有强烈的随机性与波动性，会对电力系统的安全稳定运行造成诸多不利影响；针对风电功率波动的并网要求，国家标准GB/T19963—2011采用时间窗内最大功率波动限值 MPFR(maximum power fluctuation restraint)，其含义表征为某时间窗内，风电功率最大值与最小值之差，即

$$\upsilon_{\mathrm{L}} = P_{\max}(t) - P_{\min}(t) \qquad t \in T_L \tag{1}$$

式中：υ_{L} 为功率波动限值；T_L 为长度为 L 的时间窗口；$P_{\max}(t)$、$P_{\min}(t)$ 分别为窗口内的风电功率最大值和最小值。

为了尽可能降低风电并网波动，风场任一 1 min 及 10 min 时间间隔内的并网功率变化值不应超过其装机容量的某个比例 $\alpha_{1,\mathrm{lim}}$ 及 $\alpha_{10,\mathrm{lim}}$，可表示为

$$\begin{aligned} \left|P_{1\min,\mathrm{Wind}}(t) - P_{1\min,\mathrm{Wind}}(t-1)\right| &\leqslant \alpha_{1,\mathrm{lim}} C_{\mathrm{p}} \\ \left|P_{10\min,\mathrm{Wind}}(t) - P_{10\min,\mathrm{Wind}}(t-1)\right| &\leqslant \alpha_{10,\mathrm{lim}} C_{\mathrm{p}} \end{aligned} \tag{2}$$

式中：C_{p} 为风场装机容量；$P_{1\min,\mathrm{Wind}}$、$P_{10\min,\mathrm{Wind}}$ 分别为风场任一 1 min、10 min 时间间隔内的并网功率最小值；$\alpha_{1,\mathrm{lim}}$ =5%、$\alpha_{10,\mathrm{lim}}$ =10%。

由实际风场得到的风场数据采样间隔设为 ΔT，所需要平抑波动的周期为 $N \cdot \Delta T$，其中 N 为正整数。探究功率波动性时，按照长度为 L(L<N，且 L 为 ΔT 的正整数倍)的时间窗口依次在时间轴上以 ΔT 为步长从左向右移动，得到 n_L 个滑动时间窗，其表达式为

$$n_L = N \cdot \Delta T / L \tag{3}$$

按照式(1)和式(3)可以得到 n_L 个 MPFR 序列，记作 $\{\nu_{L,k}\}$，$k = 1, 2, \cdots, n_L$。只有当 MPFR 中的所有元素均小于等于式(2)所设置的不同时间窗口的功率波动限值时，该风场的输出功率波动性才满足要求。

2　引入平抑系数的改进小波包分解方法

2.1　传统小波包分解的局限性

文献[20]基于时频分析，提出了传统小波包分解存在过度平滑风电功率信号的问题，该分解方法会将原始信号的高频分量全部滤除，直到滤波后的功率信号满足 MPFR 限值，如图 1 所示。

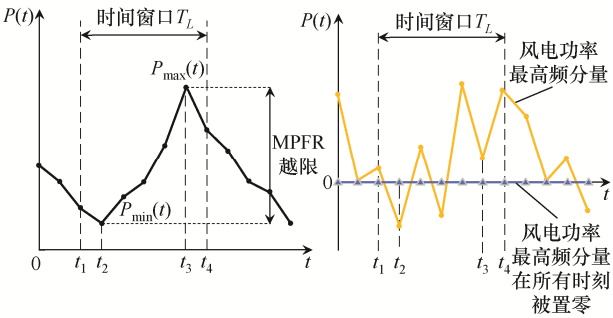


图 1　小波包分解将高频分量滤除

Fig. 1 High-frequency component filtered out by wavelet packet decomposition

时间窗口内的功率最大值与最小值的差值超出 MPFR 限制，则最高频分量会在所有时刻被滤除。但是超出限制的 2 个功率点所对应的时刻为 t_2 和 t_3，传统的小波包分解却将整个时间窗口(t_1~t_4)

及时间窗口外的所有高频风电功率信号分量全部滤除。由此可见，传统小波包分解虽然保证了平抑后的风电功率满足波动要求，却忽略了波动越限在时域上的局部性特征[20]，使风电功率被过度平抑，导致储能设备的频繁充放电动作及充放电功率增大。

2.2 平抑系数的改进

本文基于时频分析的改进小波包方法，对高频分量 $P_{J,2^J}(t)$ 的平抑效果进行优化，引入平抑系数 c 和 d。平抑后的高频分量可表示为

$$P'_{J,i}(t)=\begin{cases}\left[P_{J,i}(t_{\mathrm{B1,1min}})+P_{J,i}(t_{\mathrm{B2,1min}})\right]/c & t\in T_{\mathrm{B,1min}}\\ \left[P_{J,i}(t_{\mathrm{B1,10min}})+P_{J,i}(t_{\mathrm{B2,10min}})\right]/d & t\in T_{\mathrm{B,10min}}\\ P_{J,i}(t) & t\notin(T_{\mathrm{B,1min}}\cup T_{\mathrm{B,10min}})\\ c>1\\ d>1\end{cases} \tag{4}$$

式中：$T_{\mathrm{B,1min}}$ 及 $T_{\mathrm{B,10min}}$ 分别为时间窗口为 1 min 及 10 min 时的波动越限时刻；$t_{\mathrm{B1,1min}}$ 及 $t_{\mathrm{B2,1min}}$ 分别为时间对 $T_{\mathrm{B,1min}}$ 的前一个时刻及后一个时刻；$t_{\mathrm{B1,10min}}$ 及 $t_{\mathrm{B2,10min}}$ 分别为时间对 $T_{\mathrm{B,10min}}$ 的前一个时刻及后一时刻；c 及 d 分别为 1 min 及 10 min 时间窗口所对应的平抑系数；$P_{J,i}(t)$ 为分解层数 J 中第 i 个分量，$i=1,2,\cdots,2^J$。

风电功率信号经过高频分量平抑后，可表示为

$$P'(t)=P_{J,1}(t)+P_{J,2}(t)+\cdots+P_{J,i-1}(t)+P'_{J,i}(t) \tag{5}$$

2.2.1 目标函数

平抑系数 c 和 d 的取值不宜进行直接规定，c 和 d 过大会使风电功率信号被过度平抑，导致储能需求增大，经济性降低；c 和 d 过小会导致平抑后的风电功率信号无法满足 2 种时间窗口的 MPFR 限制。

为了获取适宜的平抑系数 c 和 d，采用麻雀搜索算法SSA(sparrow search algorithm)对风电功率的平抑程度进行优化，优化模型以原始信号与平抑后的风电功率信号的差值最小为目标函数，即

$$f_{\min}=P(t)-P'(t) \tag{6}$$

2.2.2 约束条件

为了降低对储能的需求，风电功率信号不应进行过度平抑，但同时也要满足 1 min 和 10 min 这 2 种时间窗口的波动限制。

1 min 时间窗口波动约束条件为

$$\begin{cases}P'(t)=P_{J,1}(t)+P_{J,2}(t)+\cdots+P_{J,i-1}(t)+P'_{J,i}(t)\\ \quad t\in T_{\mathrm{B,1min}}\\ \left|P(t)-P'(t-1)\right|\leqslant\alpha_{1,\lim}C_{\mathrm{p}}\end{cases} \tag{7}$$

10 min 时间窗口波动约束条件为

$$\begin{cases}P'(t)=P_{J,1}(t)+P_{J,2}(t)+\cdots+P_{J,i-1}(t)+P'_{J,i}(t)\\ \quad t\in T_{\mathrm{B,10min}}\\ \left|P(t)-P'(t-1)\right|\leqslant\alpha_{10,\lim}C_{\mathrm{p}}\end{cases} \tag{8}$$

2.3 改进小波包分解的算法流程

改进的小波包平抑方法具体步骤如下。

步骤 1 对原始风电功率数据 $P(t)$ 进行 J 层小波包分解，得到 2^J 个频率依次增大的不同频段的分量 $P_{J,1}(t)$，$P_{J,2}(t)$，$\cdots$，$P_{J,2^J}(t)$；

步骤 2 按式(1)和式(3)计算 $P(t)$ 的 1 min 和 10 min 波动序列 $\{v_{1\mathrm{min},k}\}$ (k=1, 2, $\cdots$, n_1) 和 $\{v_{10\mathrm{min},k}\}$ (k=1, 2, $\cdots$, n_{10})，序列 MPFR 越限的时间对记作 $T_{\mathrm{B,1min},k}$ (k=1, 2, $\cdots$, n_1) 和 $T_{\mathrm{B,10min},k}$ (k=1, 2, $\cdots$, n_{10})。1 min 时间间隔的所有 MPFR 越限时间对 $T_{\mathrm{B,1min},k}$ 用集合 $T_{\mathrm{B,1min}}$ 表示，10 min 时间间隔的所有 MPFR 越限时间对 $T_{\mathrm{B,10min},k}$ 用集合 $T_{\mathrm{B,10min}}$ 表示；

步骤 3 用 i 表示当前需要进行功率平抑的频率段，并初始化为 2^J；

步骤 4 频率为 i 的分量 $P_{J,i}(t)$ 在 $T_{\mathrm{B,1min}}$ 时刻和 $T_{\mathrm{B,10min}}$ 时刻进行平抑；

步骤 5 考虑式(7)和式(8)的约束条件，对式(6)中的目标函数进行优化，得到最优平抑系数 c 和 d；

步骤 6 将步骤5中的最优平抑系数代入式(4)，结合式(5)计算平抑后的风电功率 $P'(t)$；

步骤 7 计算并分析平抑后的风电功率 $P'(t)$ 的 MPFR 序列，若 MPFR 序列满足式(2)，则输出 $P'(t)$ 作为目标并网功率；若不满足，则频率 i 减 1，返回步骤 4。

基于改进小波包的分解流程如图 2 所示。

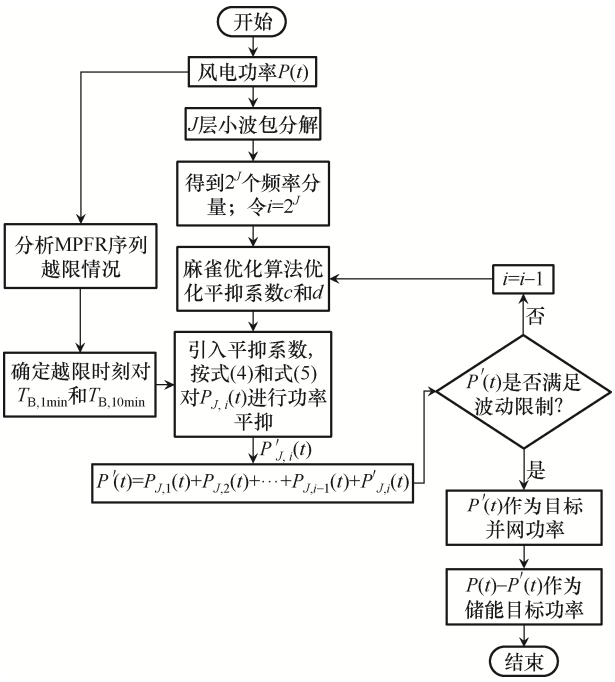


图 2　基于平抑系数的改进小波包分解方法流程

Fig. 2 Flow chart of improved wavelet packet decomposition method based on smoothing coefficients

3　风电功率波动平抑效果的评价指标

在平抑风电功率波动的场景下，技术评价指标是用来衡量平抑效果的有效手段，本文采用能量型蓄电池储能和功率型超级电容器储能组成的混合储能系统对目标并网功率进行波动平抑，定义平抑风电并网功率的评价指标分别为储能出力累积量和储能出力水平值。

储能出力累积量用来衡量储能出力情况，可表示为

$$C_{\text{on}}=\sum_{t=0}^{T-1}\left|P(t)-P'(t)\right|\Delta t \tag{9}$$

在满足风电功率波动标准的前提下，其值越小代表原始风电功率信号与经平抑后的风电功率信号之间的差值越小，对储能的需求越小。

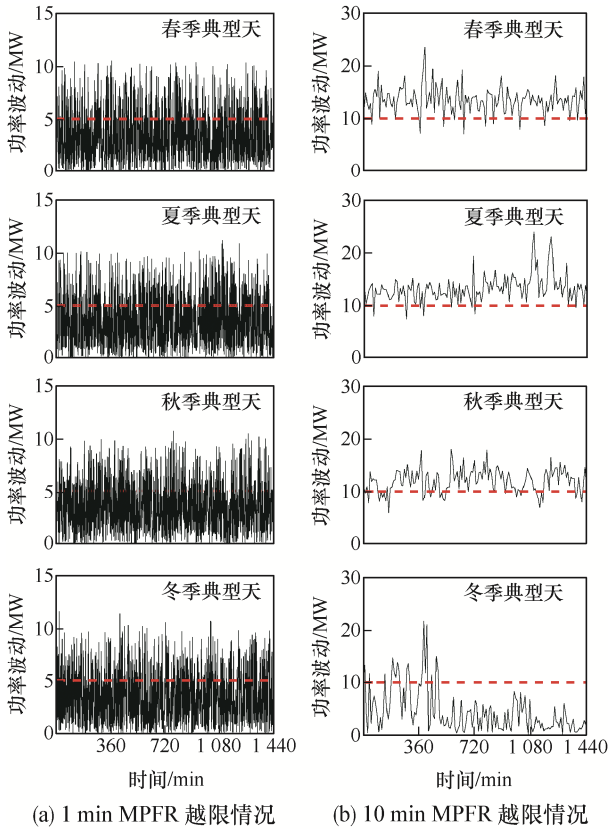
储能出力水平值用来衡量储能出力能力，可表示为

$$C_{\text{ap}}=\sqrt{\frac{1}{T-1}\sum_{t=0}^{T-1}[\text{SOC}(t)-0.5]^2} \tag{10}$$

式中，SOC(t)为 t 时刻的荷电状态 SOC(state of charge)。C_{ap} 的值越小，表示储能在全天内的充放电水平越强。

4　算例研究与分析

原始数据来自内蒙古某 100 MW 风电场数据采集。采用 1、4、7、11 月份的典型天数据进行波动性与平抑效果的分析，采样周期均为 1 min。四季典型天的风电功率特性如图 3 所示，2 种时间窗口内的波动性均存在大量超出限制的时刻。



(a) 1 min MPFR 越限情况　　(b) 10 min MPFR 越限情况

图 3　四季典型天的风电功率信号波动性分析

Fig. 3 Analysis of volatility of wind power signals on typical days in four seasons

平抑系数 c 和 d 的取值不宜过小，否则会使原始信号的平抑程度过低，无法满足波动限制；过大则会使功率信号发生过度平抑，导致储能的出力需求增大。c 和 d 的取值应使平抑后的风电功率信号满足 2 种时间窗口的波动限制前提下，尽可能小。平抑系数的示意图如图 4 所示。

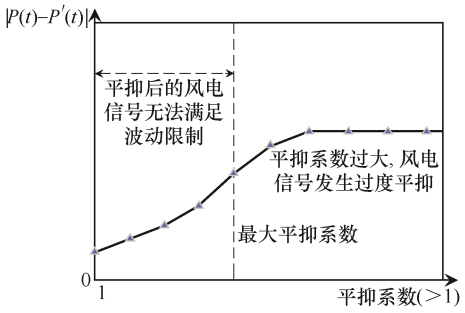


图 4 最佳平抑系数示意

Fig. 4 Schematicof optimum smoothing coefficient

为了验证 SSA 算法的有效性，分别采用遗传算法 GA(genetic algorithm)、萤火虫算法 FA(firefly algorithm)和粒子群优化 PSO(particle swarm optimazation)算法进行仿真对比，将式(6)作为适应度值的计算公式，各优化算法的迭代过程如图 5 所示。可以看出，SSA 算法的迭代速度较为理想，适应度值比其他算法小，不会发生 PSO 算法陷入局部最优的情况，寻优效果良好，故采用 SSA 算法对平抑系数最优值进行求解。

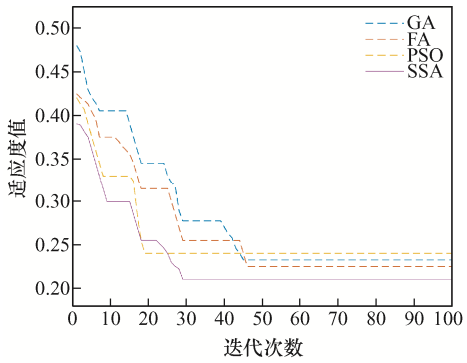


图 5 不同优化算法迭代过程

Fig. 5 Iterative process of different optimization algorithms

经过 SSA 算法优化，平抑系数的最优取值见表 1。

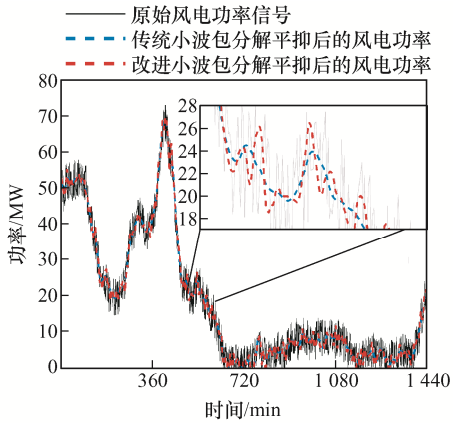
表 1 平抑系数的确定

Tab. 1 Determination of smoothing coefficients

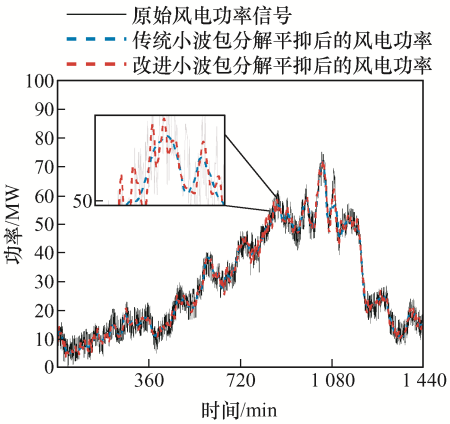
典型日	*c*	*d*
春	3.1	3.4
夏	2.9	3.3
秋	2.4	2.9
冬	2.7	3.1

经过传统小波包方法和改进小波包方法平抑后的四季典型天的风电功率如图 6 所示。可以看出，传统小波包分解对原始信号进行了过度平抑，经滤波后的曲线平滑性较好，但与原始信号的幅值差距较大；改进的小波包平抑方法因未将各高频分量全部滤除掉，滤波后的曲线相比于传统小波包平抑方法更接近原始风电功率曲线。

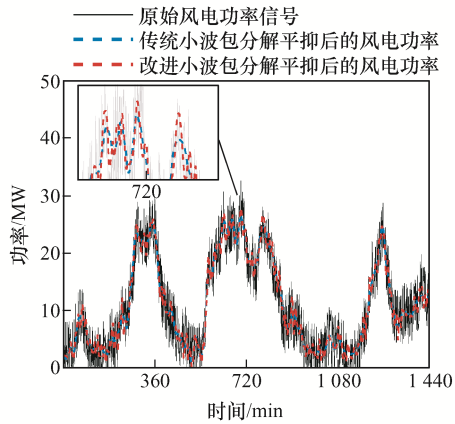
原始信号经传统小波包和改进后的小波包方法平抑之后的低频分量波动情况如图 7 和表 2 所



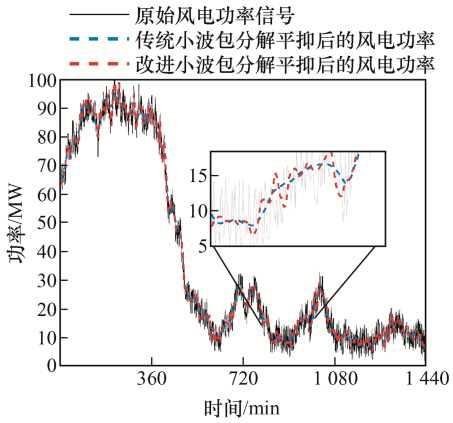
(a) 春季典型天的风电功率平抑效果对比



(b) 夏季典型天的风电功率平抑效果对比



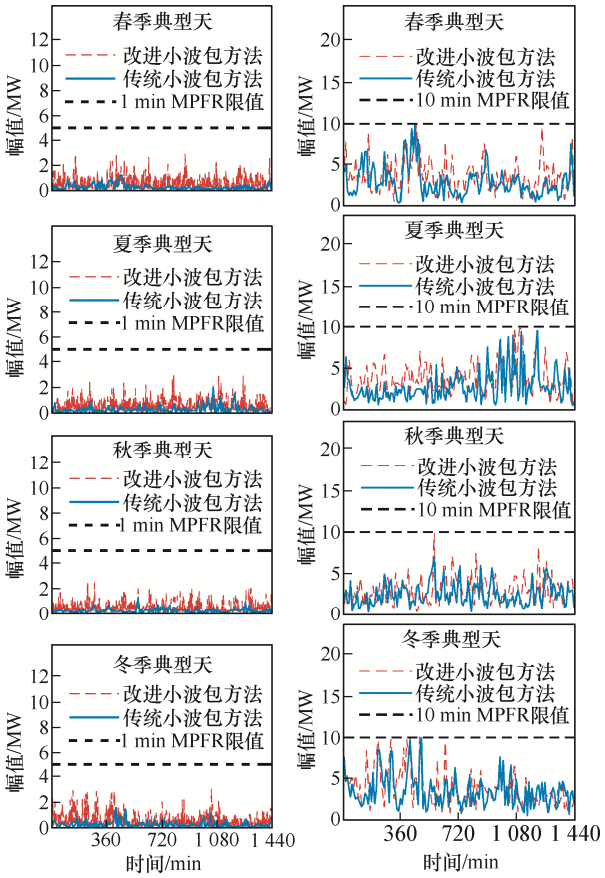
(c) 秋季典型天的风电功率平抑效果对比



(d) 冬季典型天的风电功率平抑效果对比

图 6　2 种方法平抑后的风电功率

Fig. 6 Wind power smoothed using two methods



(a) 1 min MPFR平抑情况　　(b) 10 min MPFR 平抑情况

图 7　2 种方法平抑后的四季典型天的风电功率低频分量波动性特征

Fig. 7 Low-frequenay componext of wind power volatility characteristics on typical days in four seasons, which are smoothed using two methods

示。可以看出，传统小波包方法处理后的低频信号波动性均满足式(2)的限值要求，但在 MPFR 限制之内，传统小波包方法的平抑结果过于平滑，造成了过度平抑；改进的小波包方法平抑后的信号在满足波动限制的前提下，波动性均高于传统方法。

表 2　2 种方法滤波后的风场典型日的风电功率特征对比

Tab. 2 Comparison of wind power characteristics of wind farm on typical days, which are filtered out using two methods

指标	春	夏	秋	冬
传统小波包最大 1 min MPFR/MW	1.211	1.889	1.267	1.575
改进小波包最大 1 min MPFR/MW	2.915	2.939	2.443	3.129
传统小波包最大 10 min MPFR/MW	9.303	9.481	6.915	9.464
改进小波包最大 10 min MPFR/MW	9.986	9.843	9.981	9.831
传统小波包滤波后与原始功率相对差值/MW	3.831	4.032	3.627	4.256
改进小波包滤波后与原始功率相对差值/MW	2.813	2.914	2.741	2.941

表 2 对比了 2 种方法平抑后的风电功率 MPFR 序列，改进的小波包平抑方法无论在 1 min 时间间隔还是 10 min 时间间隔内的最大 MPFR 值均高于传统的小波包平抑方法；且四季典型天滤波后的功率与原始功率的相对差值都小于传统小波包方法，有效降低了对储能出力的需求。

表 3 对比了典型天原始功率信号经过 2 种方法

表 3　2 种方法平抑后的评价指标

Tab. 3 Evaluation indicators smoothed using two methods

指标	春	夏	秋	冬
传统小波包 $C_{on,LB}$/MW·h	14.34	13.76	12.75	13.45
改进小波包 $C_{on,LB}$/MW·h	12.51	11.86	11.32	12.34
传统小波包 $C_{on,SC}$/MW·h	11.28	10.24	10.22	11.05
改进小波包 $C_{on,SC}$/MW·h	9.18	8.46	8.13	8.95
传统小波包 $C_{ap,LB}$	0.28	0.24	0.22	0.25
改进小波包 $C_{ap,LB}$	0.20	0.16	0.13	0.15
传统小波包 $C_{ap,SC}$	0.32	0.29	0.27	0.31
改进小波包 $C_{ap,SC}$	0.24	0.21	0.18	0.24

平抑后的评价指标，其中 $C_{\text{on,LB}}$、$C_{\text{on,SC}}$、$C_{\text{ap,LB}}$、$C_{\text{ap,SC}}$ 分别为蓄电池储能出力累积量、超级电容器储能出力累积量、蓄电池储能出力水平、超级电容器储能出力水平，改进的小波包方法可以有效降低储能出力的累积值，且储能经过充放电动作后，其 SOC 水平更接近于 0.5，充放电能力更强，更有利于储能使用寿命的延长。

5 结论

(1)传统的小波包方法存在过度平抑原始功率信号的问题。本文在时频分析的小波包分解方法基础上，引入平抑系数，对高频分量的平抑程度进行优化，并在满足波动限制的前提下，以原始信号和平抑后得到的功率信号之间的差值最小为目标，进行了波动平抑。

(2)制定了更为严格的功率波动限制，在 1 min 和 10 min 这 2 种时间窗口内对原始信号的高频分量依次进行平抑，使平抑后的风电功率波动满足波动限制。

(3)通过平抑效果的评价指标分析，验证了改进后的小波包分解可以在满足波动限制的前提下，降低对储能装置出力的需求，储能的荷电水平更接近于 0.5，可以保持较高的充放电能力。

(4)本文所提的改进小波包方法采用历史风电功率数据进行离线仿真分析，对实时平抑方法的研究尚未展开，在今后的研究中将对相关内容进行拓展。

参考文献：

[1] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 电力市场环境下考虑风电调度和调频极限的储能优化控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1791-1804.
Li Junhui, Hou Tao, Mu Gang, et al. Optimal control strategy for energy storage considering wind farm scheduling plan and modulation frequency limitation under electricity market environment [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1791-1804. (in Chinese)

[2] 郭文花, 沈顺群, 刘凯. 用于 DR-HVDC 系统连接的海上风电场电网形成控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 179-188.
Guo Wenhua, Shen Shunqun, Liu Kai. Offshore wind farm grid-formation control method for connection of DR-HVDC system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 179-188. (in Chinese)

[3] Cheng Lilin, Zang Haixiang, Ding Tao, et al. Ensemble recurrent neural network based probabilistic wind speed forecasting approach [J]. Energies, 2018, 11(8): 1958.

[4] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9. (in Chinese)

[5] Lin Li, Jia Yuanqi, Ma Minghui, et al. Long-term stable operation control method of dual-battery energy storage system for smoothing wind power fluctuations [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106878.

[6] Amirante R, Cassone E, Distaso E, et al. Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132: 372-387.

[7] Wang Chengshan, Yang Xianshen, Wu Zhen, et al. A highly integrated and reconfigurable microgrid testbed with hybrid distributed energy sources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 451-459.

[8] 孙玉树, 唐西胜, 孙晓哲, 等. 基于 MPC-HHT 的多类型储能协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2580-2588, 2826.
Sun Yushu, Tang Xisheng, Sun Xiaozhe, et al. Research on multi-type energy storage coordination control strategy based on MPC-HHT [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(9): 2580-2588, 2826. (in Chinese)

[9] Bai Linquan, Li Fangxing, Hu Qinran, et al. Application of battery-supercapacitor energy storage system for smoothing wind power output: An optimal coordinated control strategy [C]// 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, MA, USA, 2016: 1-5.

[10] 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.

[11] Liu Youbo, Zhu Yuwei, Xu Weiting, et al. Dynamic wavelet decomposition based multi-objective operation model for HESS enabling wind power output smoothing [J]. Energy Procedia, 2017, 142: 1462-1467.

[12] Guo Tingting, Liu Youbo, Zhao Junbo, et al. A dynamic wavelet-based robust wind power smoothing approach using hybrid energy storage system [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105579.

[13] 孙克仲, 鲁迎春, 杨笑笑, 等. 改进小波阈值函数在高功率电源信号去噪中的应用[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 332-340.
Sun Kezhong, Lu Yingchun, Yang Xiaoxiao, et al. Application of modified wavelet threshold function in high-power power supply signal denoising [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 332-340. (in Chinese)

[14] 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.

[15] 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)

[16] 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. (in Chinese)

[17] 吕超贤, 李欣然, 户龙辉, 等. 基于小波分频与双层模糊控制的多类型储能系统平滑策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2): 21-29.
Lü Chaoxian, Li Xinran, Hu Longhui, et al. A smoothing strategy for hybrid energy storage system based on wavelet frequency allocation and two-level fuzzy control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 21-29. (in Chinese)

[18] 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 Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 357-363. (in Chinese)

[19] 毛志宇, 李培强, 郭思源. 基于自适应时间尺度小波包和模糊控制的复合储能控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 158-165.
Mao Zhiyu, Li Peiqiang, Guo Siyuan. Control strategy of composite energy storage based on wavelet packet with adaptive time scale and fuzzy control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 158-165. (in Chinese)

[20] 齐先军, 郑夕炜, 王晓蓉, 等. 基于时频分析的改进小波包风电功率波动平抑方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 302-309.
Qi Xianjun, Zheng Xiwei, Wang Xiaorong, et al. Improved wavelet packet method of smoothing wind power fluctuations based on time-frequency analysis [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(7): 302-309. (in Chinese)



桑盛鹏

作者简介：

桑盛鹏(1998—)，男，中国电源学会会员，硕士研究生。研究方向：电力系统规划运行与新能源发电。E-mail：3331397452@qq.com。

石开明(1970—)，男，通信作者，本科，副教授。研究方向：电气设备状态监测与故障诊断，电力系统规划运行与新能源发电研究。E-mail：Skming2006@126.com。

李凯(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统规划运行与新能源发电研究。E-mail：1254212795@qq.com。

曹仕通(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统规划运行与新能源发电研究。E-mail：cao36992022@163.com。

苟于亮(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电力系统规划运行与新能源发电研究。E-mail：1528166310@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)