

# 基于经验模态分解与小波分析相结合的风电功率平滑控制

史林军<sup>1</sup>, 周佳佳<sup>2</sup>, 温荣超<sup>3</sup>, 吴峰<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省泰州供电公司, 江苏 泰州 225300  
3. 江苏省电力公司检修分公司扬州运维分部泰州运维站, 江苏 泰州 225300)

**摘要:** 为了缓解风电功率输出的波动性对系统的影响, 常用储能装置平滑风电的输出。合理配置储能装置容量的关键是确定风电场注入电网有功功率的参考值。当前计算风电场并网功率的参考值的主要方法, 如低通滤波器平滑方法和频谱补偿法等, 都存在着一定的缺陷。提出了一种采用经验模态分解与小波分析相结合的方法, 能较好地分析原功率的特征, 能更好地还原原有功率值, 从而获得更为准确的风电并网功率的参考值。并在综合考虑电池储能的荷电状态、效率等情况下, 采用仿真法得出储能装置容量的最低配置值。算例分析中, 通过与传统的低通滤波平滑下的容量配置进行对比, 验证了所提出方法的有效性和优越性。

**关键词:** 风电系统; 容量配置; 经验模态分解; 小波分析

## Power smoothing control of wind power based on combination of empirical mode decomposition and wavelet analysis

SHI Linjun<sup>1</sup>, ZHOU Jiajia<sup>2</sup>, WEN Rongchao<sup>3</sup>, WU Feng<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Taizhou Power Supply Company, Taizhou 225300, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Taizhou 225300, China)

**Abstract:** In order to smooth the fluctuating wind output, it is often optimized by energy storage devices. At the same time, it is especially important to determine the value of active wind power that is injected to power systems so that the capability of stored energy can be allocated reasonably. At present, the main ways to calculate the reference power of grid-connected power are low-pass filter and spectrum compensation methods which always have some drawbacks. In this paper, a method that combines empirical mode decomposition with wavelet analysis is proposed to get reference power of grid-connected active power, which can restore the original power. Then synthesizing some other situations such as load conditions of the battery, efficiency and so on, the minimum storage energy is determined. Compared the minimum capacity allocation by traditional low pass filter smooth method, the effectiveness of the proposed method can be verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51422701).

**Key words:** wind power systems; capacity allocation; empirical mode decomposition; wavelet analysis

## 0 引言

风能的间歇性和不确定性会使风电场的输出功率产生很大的波动, 给电网的稳定运行产生了一定的负面效应。《风电场接入电力系统技术规定》<sup>[1]</sup>对风电场有功功率的变化作出了一些限制, 如表 1 所示。

为了缓解风电功率输出的波动性, 常用储能装置平滑风电功率的输出, 从而提高电网运行的稳定

性。然而, 由于储能装置较为昂贵, 因此合理配置储能的容量显得尤为重要。而确定风电场注入电网有功功率的参考值是计算储能参考功率的关键所在。

表 1 正常运行情况下风电场有功功率变化最大限值

Table 1 Maximum change of wind power at normal operation

风电场装机容量/MW	10 min 有功功率变化最大限值/MW	1 min 有功功率变化最大限值/MW
<30	10	3
30~50	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

目前, 已有很多学者关注平抑风功率输出的储能容量配置问题<sup>[2-7]</sup>。常用低通滤波得到风电并网参考功率的方法具有一定的延时性, 且跟踪精度不高, 不能很好地反映原始风电输出功率的特性<sup>[5]</sup>, 同时, 文献[6]中对频谱的补偿方法过于理想化, 通过采用频谱分析对风电功率谱进行傅里叶变换, 选取合适的频段进行频谱补偿, 进而得到风电输出参考功率, 但是在选取的频段内将幅值直接置为零。

因此, 本文提出一种新的风电功率参考值计算方法, 即采用经验模态分解结合小波分析方法得到风电场并网功率的参考值。该方法能够较好地分析原功率的特征, 从中提取有效的信息以便能够较好地还原原有功率。通过与低通滤波方法进行对比, 表明了本文提出的获得功率参考值方法的有效性。

## 1 经验模态分解与小波分析

### 1.1 经验模态分解

1998年美籍华人黄镌提出了经验模态分解<sup>[8-9]</sup>(Empirical Mode Decomposition, EMD)方法, 由于该方法不需要提前设置基函数而优越于小波变换等算法, 在非平稳信号的分析处理中得到了较好的应用。

EMD方法有三个必须要满足的前提: (1) 输入的信号至少需要存在一个最大值和一个最小值; (2) 时间特征尺度是由连续极值的时间间隔决定的; (3) 如果数据只存在拐点, 但是不存在极值点, 可以通过对其微分来获得极值<sup>[10]</sup>。

此外, 将构成原始信号最基本的单元叫作固态模函数(Intrinsic Mode Function, IMF)。IMF有着如下两个约束条件:

(1) 某一系列数值的极值点数量与过零点的数量之差小于或者等于1;

(2) 某一系列上的任意点, 由局部极大值点构成的包络线和局部极小值点构成的包络线的平均值为零。

经验模态分解的中心主旨是先寻找数据的局部极大值和局部极小值, 然后采用插值法分别得到这两个值各自的包络线以及均值包络线, 最后再通过筛选算法逐个挑选IMF, 其具体步骤如下所述<sup>[11]</sup>。

(1) 分别确定函数 $f(t)$ 的极大值点、极小值点, 针对这两个极值点采用三次样条插值的方法进行拟合, 分别得到原函数 $f(t)$ 的上、下两条包络线, 同时得到平均包络线。

(2) 将(1)中求得的平均包络线记作 $t_1$ , 计算得出

$$f(t) - t_1 = l_1 \quad (1)$$

由式(1)得到的 $l_1$ 若能够满足IMF必须达到的两个条件, 那么将 $l_1$ 作为由原函数 $f(t)$ 分解出来的第一个IMF值。

(3) 如果 $l_1$ 不符合IMF的两个条件, 那么用 $l_1$ 作为原始数据替代 $f(t)$ , 重复进行(1)、(2)步骤, 获得新的平均包络线 $t_{11}$ 以及 $l_{11}$ 。判断 $l_{11}$ 是否符合IMF的两个条件。如若还是不符合, 则再次重复步骤(1)、(2), 设循环 $k$ 次后得到的 $l_{1k}$ 满足IMF的两个条件, 则记 $c_1 = l_{1k}$ , 这时候的 $c_1$ 就是 $f(t)$ 分解得到的第一个IMF值。

针对筛选的次数可以用筛分门限值SD来确定。假设SD小于设置的门限值, 则筛选结束。SD的定义如式(2)所示。

$$SD = \frac{\sum_{t=0}^T |l_{1(k-1)}(t) - l_{1k}(t)|^2}{\sum_{t=0}^T l_{1(k-1)}^2(t)} \quad (2)$$

(4) 将 $c_1(t)$ 从 $f(t)$ 中分离出来, 得到的 $r_1(t)$ 为减去一个高频分量的值, 即

$$r_1(t) = f(t) - c_1(t) \quad (3)$$

将 $r_1(t)$ 当做原始数据, 重复步骤(1)、(2)、(3)可以获得第二个IMF分量 $c_2(t)$ , 重复步骤(1)、(2)、(3)步骤 $n$ 次, 就可以获得第 $n$ 个IMF分量 $c_n(t)$ 。如果按式(3)得到的 $r_n(t)$ 是一个单调函数的时候, 则循环终止。

综上所述,  $f(t)$ 可以用下式描述:

$$f(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

其中,  $r_n(t)$ 代表 $f(t)$ 分解后得到的余相。

从EMD的筛选过程来看, IMF的逐次提取总是体现先高频, 然后低频的特点, 即EMD分解是有规律的。因此, 可通过任意选取若干个IMF分量或者其组合来分析信号所体现的物理现象。由于经验模态分解采用的插值方法为三次样条插值, 其具有连续二次微分与光滑一次微分的特点使得分解出来的信号具有端点效应, 为了去除端点对图形的影响, 本文采用镜像边界延拓方法<sup>[9]</sup>, 将端点作为延拓中心来消除奇异端点。

### 1.2 小波分析

小波分析(Wavelet Analysis)<sup>[13]</sup>是以傅里叶变换为基础逐步发展起来的, 具有诸如频率分析的能力、能够表示发生的时间、多分辨率变换、良好的时域局部化分析功能和去噪性能等优点。

小波变换实质上就是将一个小波函数 $\varphi(t)$ 先作位移 $\tau$ , 然后在不同尺度 $\alpha$ 下, 与待分析信号 $X(t)$ 作内积, 如下式所示。

$$WT_x(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \varphi^* \left( \frac{t-\tau}{\alpha} \right) dt \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  代表尺度因子, 其值为正, 用来对基本小波  $\varphi(t)$  函数作伸缩处理;  $\tau$  反映位移, 其值可正可负, 视情况而定, 将式(5)在频域里等效表示为

$$WT_x(\alpha, \tau) = \frac{\alpha}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \psi^* (\alpha \omega e^{j\omega\tau}) d\omega \quad (6)$$

小波分析能够实现去噪的主要原因是因为信号与噪声的小波系数在不同的尺度上有着不同的表现, 而且, 噪声向量与它的正交变换一样, 都是以高斯形式呈现的。研究表明当小波变换的尺度不断增加时, 高斯白噪声就会逐渐的减小, 因而能够达到很好的去噪效果<sup>[14-16]</sup>。

现有的去噪方法大致可以分为: 基于模极大值去噪法、小波阈值去噪法、平移不变量法等<sup>[14-16]</sup>。本文选取小波阈值去噪法进行去噪处理, 主要步骤如下:

- (1) 挑选合适的小波基函数, 然后根据一定的原则确定小波分解的层数, 在此基础上将原始信号进行小波分解, 获得每一层小波的分解系数;
- (2) 对(1)中得到的小波分解系数进行阈值处理, 得到新的小波系数值;
- (3) 在新的系数值的基础上, 对分解的信号进行小波重构, 得到经小波阈值去噪后的信号。

在此过程中的众多问题包括: 一是小波函数的选取, 其次是分解层数的确定以及阈值函数如何获得。

文献[17]中显示出 sym7 小波在去噪中的优越性, 同时强制阈值去噪方法的基本思想是将高频系数全部置为零, 只对低频系数进行重构, 能够较好的平滑数据。因此本文选取 sym7 小波作为小波基, 选取强制阈值去噪作为阈值函数。

而小波分解的层数一般采用经验法根据数据的特点进行选择。如果层数过少, 那么降噪处理后的信号仍然不能满足要求, 如果层数过大, 则会使得效果改善的不太明显, 而且运算量增大。本文采用均方根误差 RMSE 和消噪后的信噪比 SNR 进行综合判断, 原则上 RMSE 的值越小越好, SNR 的值越大越好。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum [x(n) - \hat{x}(n)]^2} \quad (7)$$

$$SNR = 10 \lg \left[ \frac{\sum x^2(n)}{\sum [x(n) - \hat{x}(n)]^2} \right] \quad (8)$$

其中:  $x(n)$  表示原始信号;  $\hat{x}(n)$  表示消噪信号。

## 2 基于EMD与小波去噪确定风电参考功率

由于经验模态分解不需要预先设定任何的基函数, 应用方便。而且它对原始信号的分析是基于时间特性尺度的, 很好地克服了傅里叶变换采用高次谐波频率的分量在拟合非线性与线性信号时的缺陷。然而 EMD 分解出来的 IMF 的成份中仍然包含了噪声信号以及有用的信号。如果简单的就将 EMD 分解出来的多个 IMF 信号进行简单的组合, 则有很大可能会导致有用的信号丢失。因此, 对 EMD 分解出来的 IMF 进行去噪处理显得很有必要。而小波分析在去噪领域有其独特的优势, 能够很好地对噪声信号与有用信号进行分离, 达到理想的滤波效果。

因此, 本文提出将原始信号采用经验模态分解进行分解后, 对分解得到的每个 IMF 值进行小波阈值去噪。并将去噪后的 IMF 在满足某种约束条件下进行重组, 保证在尽量不失原信号特性的前提下, 尽可能的得到理想的波形, 此时得到的就是风电功率并网的参考值。

具体流程图如图 1 所示<sup>[18]</sup>。详细步骤如下:

- (1) 原始功率信号输入, 即将风电场实际输出的风功率作为原信号输入;
- (2) 对原始信号进行经验模态分解, 在分解的过程中考虑端点效应, 消除端点的影响, 得到多个 IMF;
- (3) 对(2)中得到的 IMF 进行小波去噪处理, 得到降噪后的新的 IMF;

针对去噪后的 IMF 进行选取, 在满足波动率要求的前提下对模函数进行组合, 此时得到的信号就是满足某种特定要求波动率下的风电场并网功率参考值。

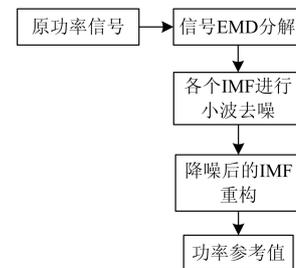


图 1 EMD 与小波去噪结合算法流程图

Fig. 1 Flow chart of combination EMD and wavelet algorithm

## 3 算例分析

如图 2 所示的风储联合系统, 风电场额定功率为 30 MW。算例中针对 2006 年 1 月份某风电场历史数据进行功率平滑, 每 1 min 记录一次风功率数据。实测风功率如图 3 所示。

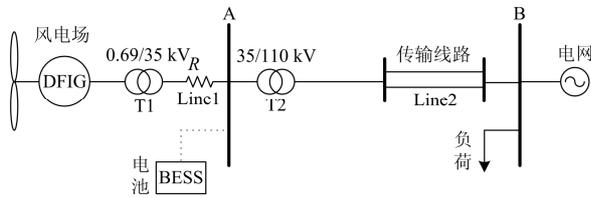


图 2 仿真系统接线图

Fig. 2 Simulation diagram of power system

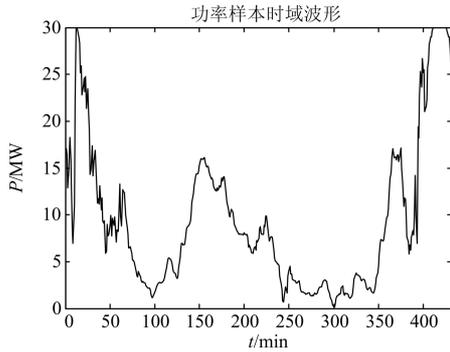


图 3 实测风功率

Fig. 3 Measured wind power

此时风电场输出 1 min 内的功率波动率最大达到 62.72%，不满足规范《风电场接入电力系统技术规定》<sup>[1]</sup>里给出的要求，因此在母线 A 处安装电池储能，如图 2 中虚线所示。

算例 1 采用本文提出的方法获得风电并网参考功率，算例 2 采用传统的低通滤波方法计算风电并网参考功率，并同时采用仿真法<sup>[5]</sup>进行容量配置，最后将结果进行对比分析。

### 3.1 算例 1(基于 EMD 与小波分析方法)

对功率波形进行傅里叶变换，得到对应的频谱图，如图 4 所示。

从频谱图中可知，原信号的频率基本集中在

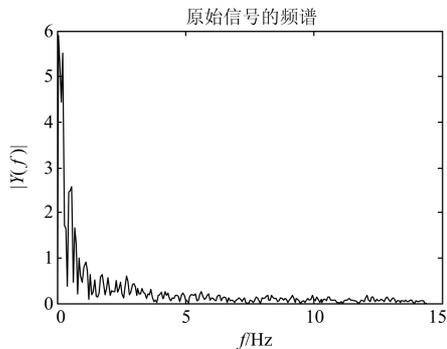


图 4 原始信号频谱图

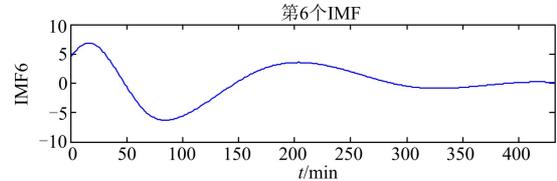
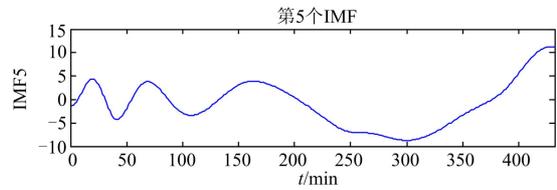
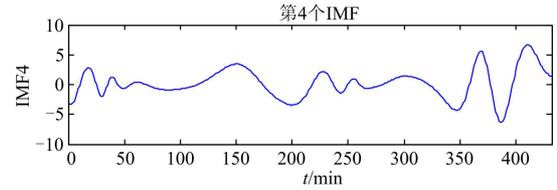
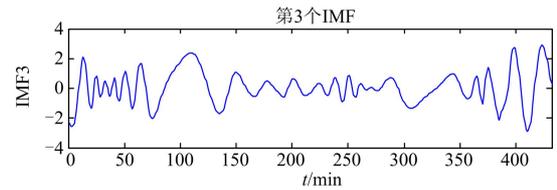
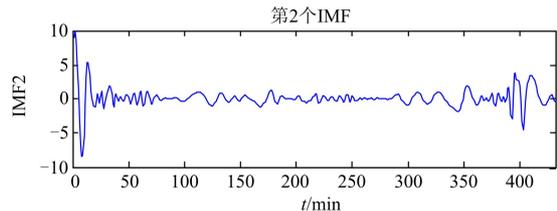
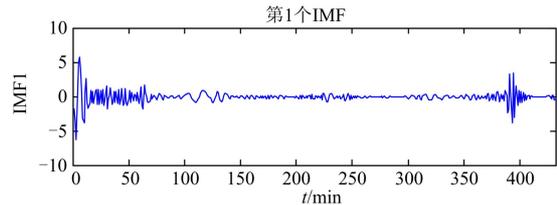
Fig. 4 Frequency spectrogram of original signal

0~15 Hz 之间，在低频段表现出较大的波动。一般来说，同样的频带宽度，高补偿频段所需储能系统的能量会小于低补偿频段所需的容量。因此，采用从高频段开始补偿的策略。

#### (1) 对信号进行经验模态分解

首先采用经验模态分解对原始功率进行 EMD 分解，得到不同层次的 7 个 IMF 分量，如图 5 所示。

从图 5 中可见，经验模态分解得到的信号是按照时间尺度由小到大进行的，第 1 个分解出来的 IMF 波动频率最快，时间尺度最小，信号最密集；以此类推，第 7 个分解出来的 IMF 波动频率最慢，时间尺度最大。



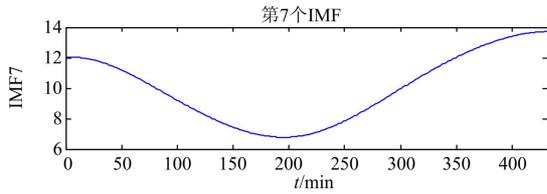


图 5 EMD 分解图

Fig. 5 Decomposition figures of EMD

(2) 小波分解层数选择

算例针对风电并网原始功率数据选取 sym7 小波, 对信号进行阈值降噪, 分别选取三层、四层、五层进行分解, 分别得到 RMSE 和 SNR 的数值, 如表 2 所示。

由表 2 可见, 采用三层小波分解时, 指标 RMSE 最小, SNR 最大, 分解效果最好, 为下面的分析奠定了基础。

表 2 分解层数主要参数对比

Table 2 Main parameters comparison of decomposition levels

	RMSE	SNR
三层	1.4469	43.093
四层	2.0296	36.3267
五层	2.9512	28.8374

(3) 将分解的 IMF 进行小波变换处理

对得到的 7 个分量分别进行小波分析, 采用 sym7 小波 3 层小波分解, 经强制阈值去噪后进行小波重构。

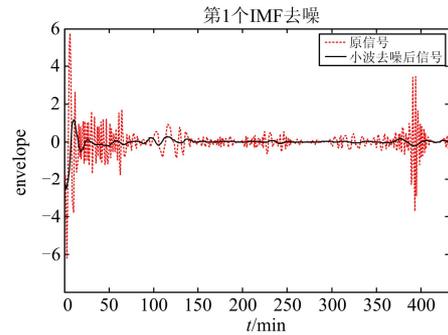
图 6 简单列出了前 3 个 IMF 分量在小波变换前后的波形, 从图 6 中可以看出, 经小波变换后的波形能够保持原信号的基本特性。

(4) 储能容量配置

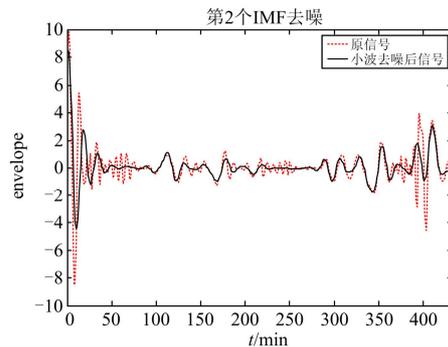
采用仿真法进行储能容量配置<sup>[6]</sup>。设电池储能的充电和放电效率相等, 设为 0.928, SOC 最大值为 1, 最小值为 0.3。根据风电场功率并网要求, 将样本 1 min 的波动率限制在 10%以内。

原功率  $P_g$  的最大波动率为 62.72%, 平均波动率为 4.36%。将最后四个经小波去噪后的 IMF 分量进行组合, 将此组合后得到的功率曲线  $P_0$  作为理想的风电并网功率的参考值, 如图 7 所示。此时的风电并网功率最大波动率为 7.97%, 平均波动率为 2.01%, 满足波动率低于 10%的要求。

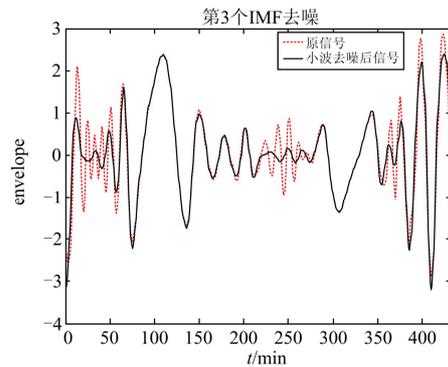
风电场并网参考功率频谱图如图 8 所示。对比图 8 与图 4 可见, 经过 EMD 分解后重组的信号, 在高频段表现出极低的波动率, 能够有效地改善原始信号的波动性能, 达到平抑波动的目的。



(a) 第 1 个 IMF 小波变换信号图



(b) 第 2 个 IMF 小波变换信号图



(c) 第 3 个 IMF 小波变换信号图

图 6 小波变换信号图

Fig. 6 Wavelet transform signals

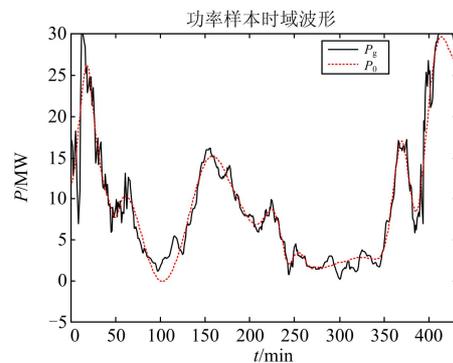


图 7 样本功率波形

Fig. 7 Waveform of sample power

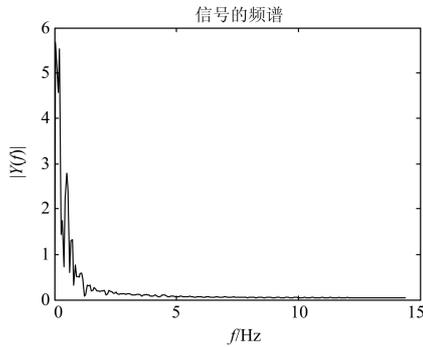


图 8 并网参考功率频谱图

Fig. 8 Frequency spectrogram of reference power

从图 7 可得到理想储能功率输出波形  $p_{b0} = P_g - P_0$ 。综合考虑储能的效率以及荷电状态等，得到实际的储能功率输出波形  $p_b$ ，如图 9 所示。

由实际的储能功率波形  $p_b$ ，可获得实际的风电并网功率参考曲线  $P_1 = P_g - P_b$ 。此时，1 min 内有功率的最大波动率为 10%，平均波动率为 2.02%，高于理论值，但是仍然满足风电功率并网规程的要求。

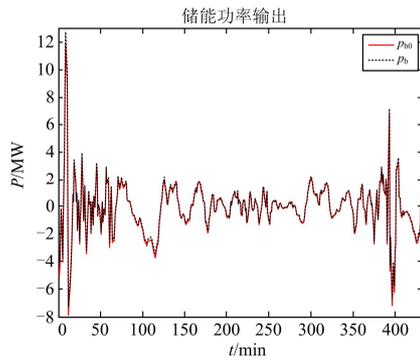


图 9 储能功率输出

Fig. 9 Storage power output

在实际风电并网功率参考值下，波动率对比图如图 10 所示，能量波动图以及电池荷电状态如图 11 所示。

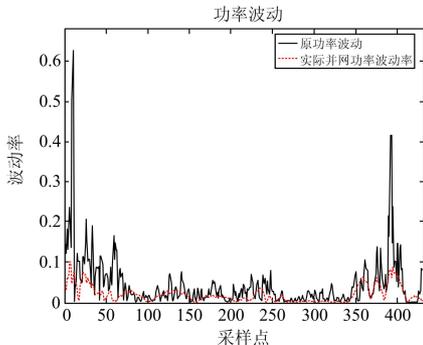


图 10 波动率对比图

Fig. 10 Comparison of volatility

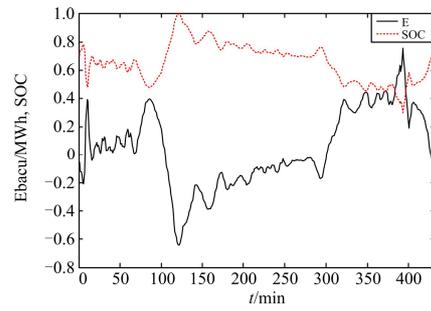


图 11 能量波动和荷电状态图

Fig. 11 Energy fluctuation and state of charge

此时，储能满足功率波动率的额定容量为 1.995 6 MWh，额定功率为 12.722 8 MW。从图 11 中可见，初始 SOC=0.7074，电池储能系统的荷电状态在一个周期运行结束后又重新回到了初始值，且储能的能量波动与电池的荷电状态存在较好的互补性。

### 3.2 算例 2(基于低通滤波平滑的方法)

采用低通滤波原理进行平滑控制可以有效地平滑风电场的输出功率，得到风电场并网功率的期望值，这种方法目前在实际应用最为广泛。在不同的时间常数  $T$  下，功率平滑的效果却不尽相同，算例选取的截止频率分别为  $f_c=1/30$  (Hz)， $1/60$  (Hz)， $1/180$  (Hz)， $1/434$  (Hz) 时，得到不同情况下的平滑波形，如图 12 所示。采用同样的仿真法进行容量配置，储能配置如表 3 所示。

由图 12 可见，随着时间常数的增大，功率平滑的效果更好，1 min 的波动率越来越小，但是与原功率曲线的差距越来越大，具有一定的延时性。同时，随着时间常数的增大，储能所需要的功率和容量也在不断的增大。按照风电并网规则的要求，1 min 的风电波动率限制在 10% 以内。因此，本算例中  $f_c=1/434$  (Hz) 及以下的截止频率能够满足要求，并与经验模态分解与小波分析相结合的方法进行对比。

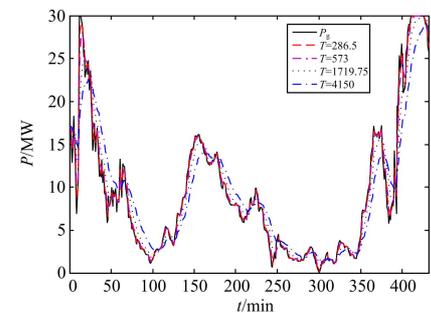


图 12 不同时间常数 T 下的波形对比

Fig. 12 Comparison of waveform at different T

表 3 平抑风电功率波动所需储能容量及平抑指标

$f_c / \text{Hz}$	$\frac{1}{30}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{180}$	$\frac{1}{434}$
$T / \text{s}$	286.5	573	1719.75	4150
$F(\%)$	50.24	39.23	19.54	10
$P / \text{MW}$	4.6606	7.6432	11.5144	13.4118
$E / \text{MWh}$	0.5139	1.0143	2.8087	6.2682

### 3.3 对比分析

算例 1 和算例 2 分别给出了两种不同的方法得出风电功率并网的期望功率, 并采用同样的方法进行储能容量的配置, 为了便于比较, 在同一个图中表示, 如图 13 和表 4 所示。

由图 13 可见, 由于一阶低通滤波具有延时性, 不能很好地体现原曲线的特性, 而本文提出的经验模态分解与小波分析相结合的方法与之相比较, 对原始信号进行层层分解、提取有用的信号, 能够更好地展示波形原有的特性。同时, 由表 4 可知, 在满足风电并网波动率的前提下, 该文提出的平滑方法需要更小的储能容量, 平滑的效果也相对更好, 验证了本文所提出方法的有效性和优越性。

表 4 平滑对比图

	容量配置/ MWh	功率配置/ MW	最高波动率 (%)
EMD 与小波结合	1.9956	12.7228	10
低通滤波	6.2682	13.4118	10

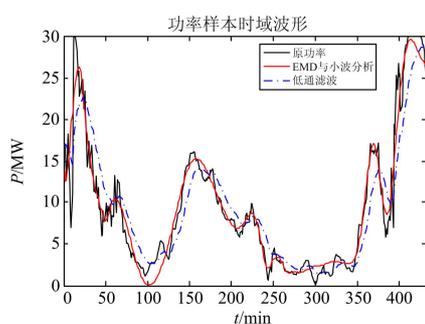


图 13 功率波形对比

Fig. 13 Comparison of power waveform

## 4 结论

本文提出一种新的风电并网参考功率的计算方法, 即基于经验模态分解与小波分析相结合的方法。该方法将原始风功率信号经 EMD 方法分解得到若干 IMF, 再将 IMF 经过小波去噪后再进行重组得到参考功率。该方法能够较好地分析原功率的特征,

从中提取有效的信息以便能够更好地还原原有功率。并综合考虑电池储能的荷电状态以及参考输出功率, 应用仿真法确定了满足要求的最小储能容量。并通过与传统的低通滤波方法的储能系统容量配置对比, 体现了文中提出的方法的有效性和优越性。

### 参考文献

- [1] GB/T 19963-2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. GB/T 19963-2011 technical rule for connecting wind farm to power system[S].
- [2] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.  
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [3] 冯江霞, 梁军, 冯益坤. 基于风电功率 min 级分量波动特性的风电场储能容量优化计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 1-6.  
FENG Jiangxia, LIANG Jun, FENG Yikun. Optimization calculation of wind farm storage capacity based on minute-scale wind power characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 1-6.
- [4] 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, 2015, 43(7): 149-154.  
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, 2015, 43(7): 149-154.
- [5] 李军徽. 抑制风电对电网影响的储能系统优化配置及控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
LI Junwei. Research on the optimal plan and control of energy storage system to reduce the effect of wind power on the grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [6] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.  
WANG Chenshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [7] 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, 2012, 32(16): 1-8.

- 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.
- [8] HUANG N E, LONG S R, SHEN Z. Frequency downshift in nonlinear water wave evolution[J]. Adv Appl Mech, 1996, 32: 59-117.
- [9] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationarity time series analysis[J]. Proc R Soc London, Ser A, 1989, 454: 903-995.
- [10] HUANG N E, WU M C, LONG S R, et al. A confidence limit for the empirical mode decomposition and the Hilbert spectral analysis[J]. Proc R Soc London, Ser A, 2003, 459: 2317-2345.
- [11] 陈志刚. 经验模态分解与 Savitzky-Golay 方法的自适应遥感影像融合[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- CHEN Zhigang. Self-adaptive remote sensing image fusion based on empirical mode decomposition and Savitzky-Golay method[D]. Shanghai: East China Normal University, 2010.
- [12] 胡爱军, 马万里, 唐贵基. 基于集成经验模态分解和峭度准则的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(11): 106-111.
- HU Aijun, MA Wanli, TANG Guiji. Rolling bearing fault feature extraction method based on ensemble empirical mode decomposition and kurtosis criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11): 106-111.
- [13] 蔡艳平, 李艾华, 张玮, 等. HHT 端点效应的最大 Lyapunov 指数边界延拓方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1330-1336.
- CAI Yanping, LI Aihua, ZHANG Wei, et al. HHT end effect processing method based on maximum Lyapunov index boundary extension model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(6): 1330-1336.
- [14] 袁兰敬. 小波变换在信号去噪中的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- YUANG Lanjing. Application of wavelet transformation in signal denoising[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [15] CHING P C, SO H C, WU S Q. On wavelet denoising and its applications to time delay estimation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(10): 2879-2882.
- [16] ZHANG X P, DESAI M D. Adaptive denoising based on SURE risk[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1998, 5(10): 265-267.
- [17] 吕瑞兰, 吴铁军, 于玲. 采用不同小波母函数的阈值去噪方法性能分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(7): 826-829.
- LÜ Ruilan, WU Tiejun, YU Ling. Performance analysis of threshold denoising via different kinds of mother wavelets[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(7): 826-829.
- [18] 李文娟. 基于经验模态分解与小波阈值降噪结合的柴油机故障诊断[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- LI Wenjuan. Fault diagnosis of diesel engine based on empirical mode decomposition and wavelet threshold denoising[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.

---

收稿日期: 2015-12-19; 修回日期: 2016-03-01

作者简介:

史林军(1976-), 男, 博士, 副教授, 从事新能源, 储能系统在电力系统中应用以及电力系统分析与控制方面的研究。E-mail: eec@hhu.edu.cn

(编辑 姜新丽)