

# 用于混合储能平抑光伏波动的小波包-模糊控制

吴振威<sup>1</sup>, 蒋小平<sup>1</sup>, 马会萌<sup>2</sup>, 马速良<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京市 海淀区 100083;

2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Wavelet Packet-fuzzy Control of Hybrid Energy Storage Systems for PV Power Smoothing

WU Zhenwei<sup>1</sup>, JIANG Xiaoping<sup>1</sup>, MA Huimeng<sup>2</sup>, MA Suliang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology, Haidian District, Beijing 100083, China; 2.China Electrical Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** In this paper, a hybrid energy storage system consisting of energy-type storage system and power-type storage system is used to smooth the PV power generation fluctuations. With a comprehensive analysis of the amplitude-frequency characteristics of PV power signal and the performances characteristics of different energy storage systems, the PV power signal is decomposed and the smoothing objective power and the charging and discharging power of energy storage systems are obtained by wavelet packet decomposition which can get more signals' detail information. Full consideration is given to the real-time control requirements for computing speed in practical application, and the filter delay effect is compensated through threshold judgment. SOC adaptive control of power-type storage system using fuzzy control method is applied to achieve optimal allocation and improve smoothing result. Numerical results show that the proposed control strategy can smooth the PV power generation fluctuations effectively by taking full advantages of the performance benefits of different types of energy storage systems.

**KEY WORDS:** PV power generation; smoothing power fluctuations; wavelet packet; fuzzy control method; energy-type storage system; power-type storage system; state of charge (SOC)

**摘要:** 采用能量型储能和功率型储能组成的混合储能系统平抑光伏输出功率波动。利用小波包分解可获得更多信号细节信息的优点, 综合分析光伏功率信号的幅频特性、储能的性能特点, 将光伏功率信号分解, 得到光伏平抑目标功率和不同类型储能的充放电功率。充分考虑实际工程应用中实时控制对运算速度的要求, 并通过阈值判断补偿滤波延迟效应。采用模糊控制方法对功率型储能的荷电状态(state of charge, SOC)进行自适应控制, 实现功率的优化分配, 提高平抑效果。算例结果表明, 所提控制策略能够充分利用不同类型储能的性能优势有效平抑光伏输出功率波动。

同类型储能的充放电功率。充分考虑实际工程应用中实时控制对运算速度的要求, 并通过阈值判断补偿滤波延迟效应。采用模糊控制方法对功率型储能的荷电状态(state of charge, SOC)进行自适应控制, 实现功率的优化分配, 提高平抑效果。算例结果表明, 所提控制策略能够充分利用不同类型储能的性能优势有效平抑光伏输出功率波动。

**关键词:** 光伏发电; 平抑功率波动; 小波包; 模糊控制; 能量型储能; 功率型储能; 荷电状态

## 0 引言

由于受日照强度、温度等环境因素影响, 光伏输出功率呈现明显的波动性, 给电力系统的可靠、稳定运行带来一定挑战<sup>[1-2]</sup>。为提高光伏发电的并网运行能力, 需对其输出功率的波动进行平抑。

储能技术发展迅速, 其应用可在很大程度上解决可再生能源发电的随机性和波动性问题<sup>[3]</sup>。储能按类型可分为能量型和功率型, 能量型储能包括蓄电池储能、抽水储能等, 其持续充放电时间为 min-h 级, 具有较高的能量密度, 但循环寿命较短, 不适用于频繁的充放电转换; 功率型储能包括超级电容器储能、飞轮储能、超导储能等, 持续充放电时间为 s-min 级, 具有功率密度大、响应速度快、循环寿命长等特点, 但其容量相对较小<sup>[4-5]</sup>。能量型储能和功率型储能具有很好的互补性, 因此, 本文采用两种类型储能组成的混合储能系统平抑光伏输出功率波动。

如何根据不同类型储能的性能特点利用有限的储能容量最大限度地平抑光伏输出功率波动对平抑控制策略提出了较高要求, 国内外在此领域已取得一定研究成果。文献[6]采用双重滑动平均算法对光伏输出功率波动进行了平抑, 并与滑动平均算

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2012AA050203); 国家自然科学基金项目(51277157)。

The National High Technology Research and Development of China (863 program)(2012AA050203); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51277157).

法和移动中值算法进行比较证明其优越性。文献[7]提出用加权移动平均滤波算法根据储能荷电状态 (state of charge, SOC) 实时调整权重系数及滤波带宽来平抑风电功率波动, 并通过储能的 SOC 模糊控制优化了储能的工作状态。文献[8-10]均采用低通滤波算法得到风电平抑目标功率, 并根据储能的剩余电量实时调整滤波时间常数, 达到了较好的平抑效果。文献[11]提出一种双层控制模型, 并建立专家信息库, 用储能平抑多种波动状态的风电功率, 简化了控制逻辑。文献[12]用一阶巴特沃斯低通滤波器分别得到风电平抑目标功率、电池和超级电容器的补偿功率, 结合超级电容器端电压预先控制优化了储能的工作状态。文献[13]采用锂离子电容器储能通过基于虚拟同步发电机技术的充放电控制方法平抑光伏出力。文献[14-15]通过实时的电池 SOC 反馈调节控制分别实现了对风电、风光联合发电系统功率波动的平抑。文献[16]提出了基于风电场功率短期预测技术的运行控制策略以平抑风电场输出功率的波动。文献[17]利用储能将风电功率爬坡率控制与基于滑动平均算法的功率平抑控制相结合得到了较好的风电功率输出波形。文献[18]将储能的平滑和滤波功能相结合, 通过统一控制实现了风电功率的平抑, 并有效滤除了电网谐波。但是, 目前提出的功率波动平抑控制策略在计算平抑目标功率和储能功率时较少从功率信号所包含的细节信息和储能的具体性能特点出发。

在分析目前平抑可再生能源功率波动的研究基础上, 本文提出用小波包方法分解光伏输出功率信号, 结合光伏功率信号的幅频信息和不同类型储能的循环寿命等性能特点计算平抑目标功率和储能充放电功率, 分析并解决实时控制中面临的问题, 通过对功率型储能 SOC 的模糊自适应控制, 实时调整能量型储能和功率型储能的充放电功率, 优化储能的工作状态。

## 1 小波包分解在平抑光伏出力波动中的应用

### 1.1 小波包分解

小波分析是一种时频分析的方法, 具有良好的时频域定位特性, 小波多分辨分析是对信号进行分解及重构的理论基础。但是小波多分辨分析的分解尺度是二进制变化的, 即按指数间隔对信号的频带进行划分, 在信号高频部分的频率分辨率较差。小波包是小波分析的一种改进, 将小波分析中没有细分的高信号频部分进一步分解, 得到完全二叉树结

构, 提供了一种更加精细的分析方法, 有助于获取信号更细节的信息, 但同时计算量也大大增加, 小波和小波包分解的示意图如图 1 所示。图 1 中: A 表示低频; D 表示高频。在 Matlab 小波分析工具箱中可以很方便地完成对信号的小波包分解及重构。

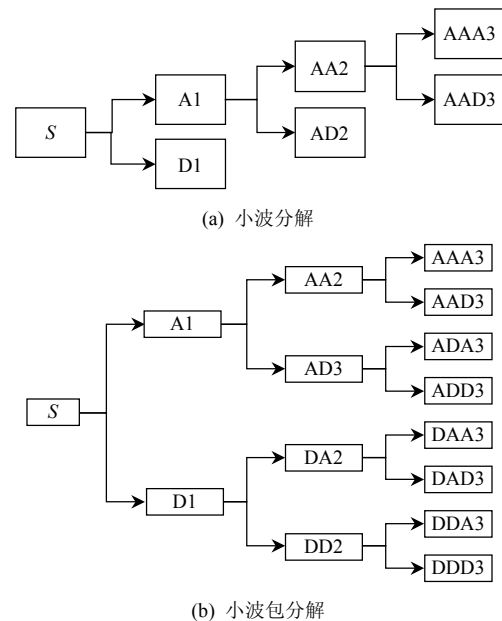


图 1 小波和小波包分解示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wavelet decomposition and wavelet packet decomposition

### 1.2 光伏输出功率信号的小波包分解

#### 1.2.1 光伏输出功率平抑目标

本文对国内某 400 kWp 光伏发电系统 2012 年全年的实际输出功率数据进行分析。数据的采样周期为 1 min, 对整体数据进行快速傅里叶变换得到数据的幅频信息, 频率范围约为  $0 \sim 8.3 \times 10^{-3}$  Hz, 截取  $0 \sim 10^{-3}$  Hz 频段的信息得到如图 2 所示的幅频特性曲线。由图 2 可知, 光伏输出功率信号的能量主要集中在  $0 \sim 10^{-4}$  Hz 频段, 频率超出这个频段的功率分量的幅值较小, 但波动频繁, 因此将该频段的功率分量作为光伏输出功率的平抑目标, 超出这个频段的功率分量由储能系统进行平抑。

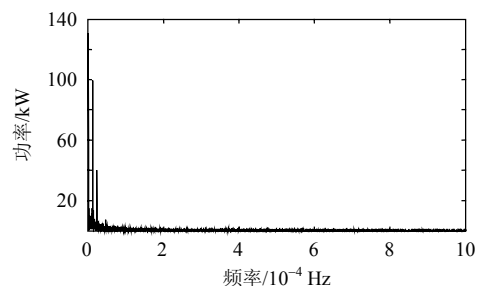


图 2 光伏输出功率幅频特性曲线

Fig. 2 Amplitude-frequency characteristics curve of the PV power generation output

用 Dmeyer 小波<sup>[19]</sup>对某日光伏功率信号进行 6 层小波包分解, 并重构第 6 层 64 个频段的功率分量。每个频段带宽为

$$f_0 = \frac{1}{60s} \div 2 \div 2^6 \approx 1.30 \times 10^{-4} \text{ Hz} \quad (1)$$

第 1 个频段频率范围为  $0 \sim f_0$ , 第 2 个频段频率范围为  $f_0 \sim 2f_0$ , 依次类推。第 1 个频段频率范围与光伏输出功率信号能量集中的  $0 \sim 10^4 \text{ Hz}$  频段频率范围接近, 因此, 将第 1 个频段的功率分量作为光伏输出功率的平抑目标。设第  $k$  个采样时段实际功率值为  $P_{pv}(k)$ , 目标功率值为  $P_g(k)$ ,  $P_i(k)$  为第  $i$  个频段的功率分量, 则有:

$$P_g(k) = P_1(k) \quad (2)$$

图 3 为光伏平抑目标功率图。如图 3 所示, 相对光伏实际输出功率曲线, 目标功率曲线非常平滑, 且能表征原光伏功率信号的整体态势。

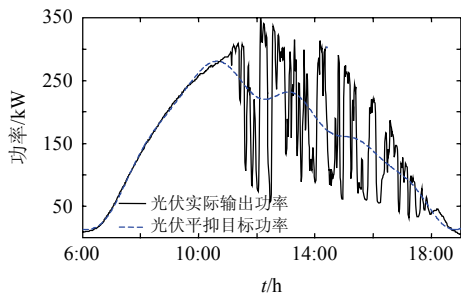


图 3 光伏平抑目标功率

Fig. 3 Smoothing objective power of the PV system

### 1.2.2 混合储能间的功率分配

随机抽取 15 个单日光伏输出功率数据, 分别进行小波包分解和重构, 对每日第 2~64 个频段重构的功率数据进行正负变换次数统计, 如图 4 所示。可以看出: 15 条曲线几乎重合, 说明每个频段的功率数据正负变换次数有很强的规律性; 变换次数的整体趋势是随频段数  $i$  的增大而增加的, 但不是单调递增, 其过程是波动的; 在频段数为  $2^n+1(n=1, 2, 3, 4, 5)$  时, 变换次数迅速增大。若某个频段的功率

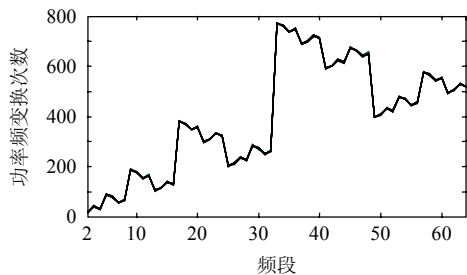


图 4 各频段功率数据正负变换次数

Fig. 4 Positive and negative transformation times in different frequency bands

分量需要储能进行平抑, 则该频段功率数据的正负变换次数可以表征储能的充放电状态改变次数。

为延长能量型储能的寿命, 应控制其充放电改变次数。考虑不同储能的性能特点, 并为实现小波包分解和小波分解的转换以减少实时控制中的计算量, 第  $2 \sim 2^n$  频段的功率分量由不适于频繁充放电转换的能量型储能平抑, 第  $(2^n+1) \sim 64$  频段的功率分量由响应速度快、循环寿命长的功率型储能平抑。可根据能量型储能的具体技术参数来调整储能系统间的功率分配, 如允许能量型储能有更多的充放电改变次数, 可由其平抑更多频段的功率分量, 若对其充放电改变次数要求更加苛刻, 则减少其平抑的频段分量。本文以控制能量型储能的充放电改变次数在 50 次以内为例进行分析说明, 则第 2~4 频段分量由能量型储能平抑, 余下频段分量由功率型储能平抑。能量型和功率型储能的充放电功率分别为

$$P_e(k) = -[P_2(k) + P_3(k) + P_4(k)] \quad (3)$$

$$P_p(k) = -[P_5(k) + P_6(k) + \dots + P_{64}(k)] \quad (4)$$

式中:  $P_e(k)$  为功率型储能  $k$  时段功率值;  $P_p(k)$  为能量型储能  $k$  时段功率值, 储能功率值为正表示储能放电, 为负表示储能充电。

图 5 为能量型储能和功率型储能的充放电功率, 可以看出, 混合储能间的功率分配符合能量型储能和功率型储能各自的性能特点。

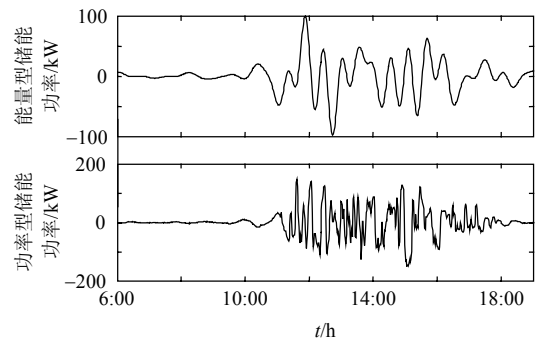


图 5 能量型储能和功率型储能的充放电功率曲线

Fig. 5 Charging and discharging power curves of energy-type and power-type energy storage systems

### 1.3 实时控制需求

实时控制中应尽量缩短计算时间, 通过小波包分解方法确定了平抑目标功率频段、能量型和功率型储能所要平抑的功率频段, 可采用小波分解按式(5)~(7)等效计算各功率值, 可大幅减少计算量。

$$P_g(k) = P_{A6}(k) \quad (5)$$

$$P_e(k) = -[P_{A4}(k) - P_{A6}(k)] \quad (6)$$

$$P_p(k) = -[P_{pv}(k) - P_{A4}(k)] \quad (7)$$

式中  $P_{A4}(k)$ 、 $P_{A6}(k)$  分别为对功率数据进行 6 层小波分解得到  $k$  时段第 4、6 层低频功率分量。

实际工程应用时, 光伏输出功率数据是通过实时采样逐点获取的, 只能对当前时段及之前的数据进行处理。例如用小波包对当前时段及之前 1 h 内的数据进行分解并重构, 可得到当前时段的平抑目标功率, 以此方法得到各时段的平抑目标功率, 如图 6(a) 所示, 在光伏出力较平滑时得到的平抑目标功率曲线相对实际功率曲线有明显的延迟效应, 储能的容量将难以满足需求, 而光伏出力平滑时不需要平抑。

可以通过设置阈值  $S$  消除该延迟效应, 即只在光伏实际输出功率与上一时段平抑目标功率相差超过  $S$  时才利用小波包分解的方法进行平抑, 否则不平抑, 以此方法得到的光伏平抑目标功率如图 6(b) 所示。平抑阈值  $S$  可根据实际需求进行合理的调整, 如当平抑要求较低或者储能功率或容量更小时可适当增大  $S$  值, 反之, 则适当减小  $S$  值。

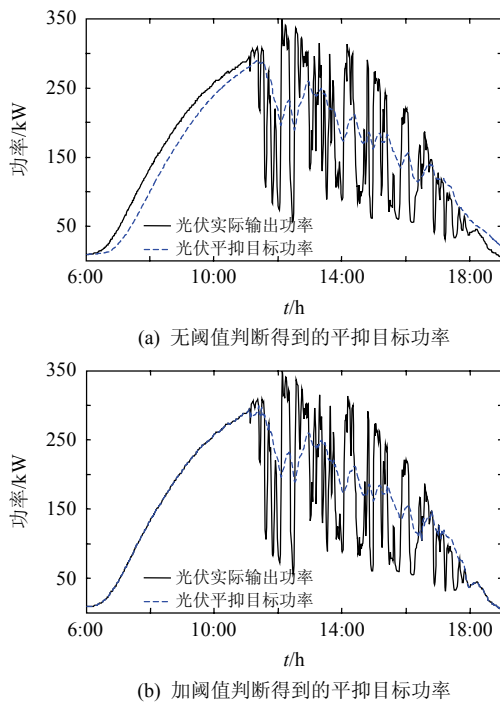


图 6 阈值判断补偿滤波延迟效应

Fig. 6 Filter delay effect is compensated through threshold judgment

## 2 模糊控制优化混合储能的功率分配

### 2.1 功率型储能的 SOC 模糊自适应控制

储能的容量是有限的, 尤其功率型储能的能量密度较小, 其容量较容易达到上下限, 直接影响光伏输出功率的平抑效果, 因此, 有必要对功率型储

能的剩余容量进行有效的控制。常用 SOC 描述储能的剩余容量, 放电时功率型储能的 SOC 为:

$$S_{SOCp}(k) = (1 - \rho_p)S_{SOCp}(k-1) - \frac{P_p(k)\Delta t}{E_p\eta_{dp}} \quad (8)$$

充电时为

$$S_{SOCp}(k) = (1 - \rho_p)S_{SOCp}(k-1) - \frac{P_p(k)\Delta t\eta_{cp}}{E_p} \quad (9)$$

式中:  $S_{SOCp}(k)$ 、 $S_{SOCp}(k-1)$  分别为  $k$ 、 $k-1$  时段结束时功率型储能的 SOC;  $\Delta t$  为时段长度;  $\rho_p$ 、 $\eta_{dp}$ 、 $\eta_{cp}$ 、 $E_p$  分别为功率型储能的自放电率、放电效率、充电效率和容量。

在  $S_{SOCp}$  适中时, 储能系统正常充放电, 在  $S_{SOCp}$  较小但功率型储能仍需大功率放电或  $S_{SOCp}$  较大但功率型储能仍需大功率充电时, 分配功率型储能的一部分功率由能量型储能承担, 本文选择用模糊控制方法对功率型储能的 SOC 进行自适应调控。

模糊控制器的输入为  $k-1$  时段结束时功率型储能的荷电状态  $S_{SOCp}(k-1)$  和  $k$  时段所需功率型储能荷电状态的变化量  $D_{SOCp}(k)$ , 输出为功率型储能的功率调节系数  $K_p(k)$ , 输入量和输出量的隶属函数如图 7 所示。

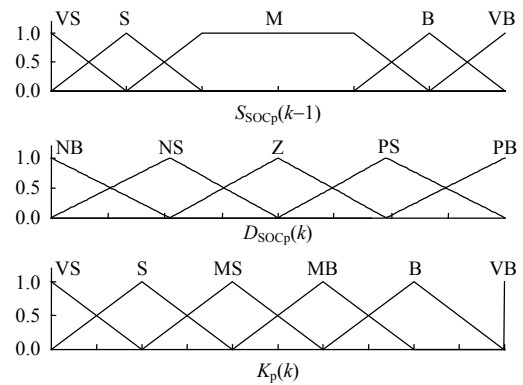


图 7 模糊控制器的输入、输出量的隶属函数

Fig. 7 Input and output membership functions of the fuzzy controller

$S_{SOCp}(k-1)$  的模糊集论域为  $\{0,1,2,3,4,5,6\}$ , 选用词集为  $\{VS,S,M,B,VB\}$ ,  $D_{SOCp}(k)$  的模糊集论域为  $\{-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4\}$ , 选用词集为  $\{NB,NS,Z,PS,PB\}$ ,  $K_p(k)$  的模糊集论域为  $\{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\}$ , 选用词集为  $\{VS,S,MS,MB,B,VB\}$ , 模糊控制规则如表 1 所示。

隶属函数和模糊规则的设计遵循以下原则: 在功率型储能容量适中时不调整储能间的功率分配, 减少对能量型储能的影响; 在功率型储能容量接近上限或下限, 而又要大功率充电或放电时, 分配一

表 1 模糊控制规则  
Tab.1 Fuzzy control rule

$S_{SOCp}(k-1)$	$D_{SOCp}(k)$				
	NB	NS	Z	PS	PB
VS	VS	S	MS	VB	VB
S	S	MB	B	VB	VB
M	VB	VB	VB	VB	VB
B	VB	VB	B	MB	S
VB	VB	VB	MS	S	VS

部分功率给能量型储能承担。选择面积等分法<sup>[20]</sup>进行解模糊，得到  $k$  时段功率型储能的功率调节系数  $K_p(k)$ 。

### 2.2 控制流程

在对光伏输出功率进行平抑时，首先判断是否需要平抑，需要平抑时利用小波分解法分别计算平抑目标功率、能量型储能功率和功率型储能功率，再根据功率型储能的 SOC 状态及其变化趋势，通过模糊自适应控制得出两种储能的充放电功率值。控制流程图如图 8 所示。图中  $P_{pmax}$ 、 $S_{SOCpmin}$ 、 $S_{SOCpmax}$  分别为功率型储能的最大持续放电功率、SOC 下限值、SOC 上限值。

### 3 算例分析

本文利用能量型储能和功率型储能组成的混合储能系统平抑光伏发电系统的输出功率波动，能量型和功率型储能分别选择蓄电池和超级电容器。小波包分解法具有获取数据细节特征的优点，可以结合能量型储能充放电转变次数的实际技术要求调整储能间的功率分配，并对功率型储能的 SOC 进行模糊控制，以达到保护储能系统的目的。

平抑阈值  $S$  定为 10kW，如果完全达到平抑目标，对储能的功率和容量要求很高，在实际中很难满足。本文蓄电池和超级电容器最大持续放电功率分别为 80、150kW，额定容量分别为 200、20kW·h，允许放电深度分别为 20%~80%、5%~95%，初始荷电状态分别为 50%、50%，自放电率分别为 0%/min、0.01%/min，放电效率分别为 95%、90%，充电效率分别为 95%、90%<sup>[9]</sup>。

利用小波分解方法进行功率分配后，若只按照储能的功率和容量限制进行单纯的限值控制得到的平抑效果和储能 SOC 变化情况分别如图 9(a)、(b) 所示。

加入模糊控制时， $S_{SOCp}(k-1)$  的基本论域为  $[0.05, 0.95]$ ， $D_{SOCp}(k)$  的基本论域为  $[-0.139, 0.113]$ ， $K_p(k)$  的基本论域为  $[0, 1]$ 。通过模糊优化控制得到的

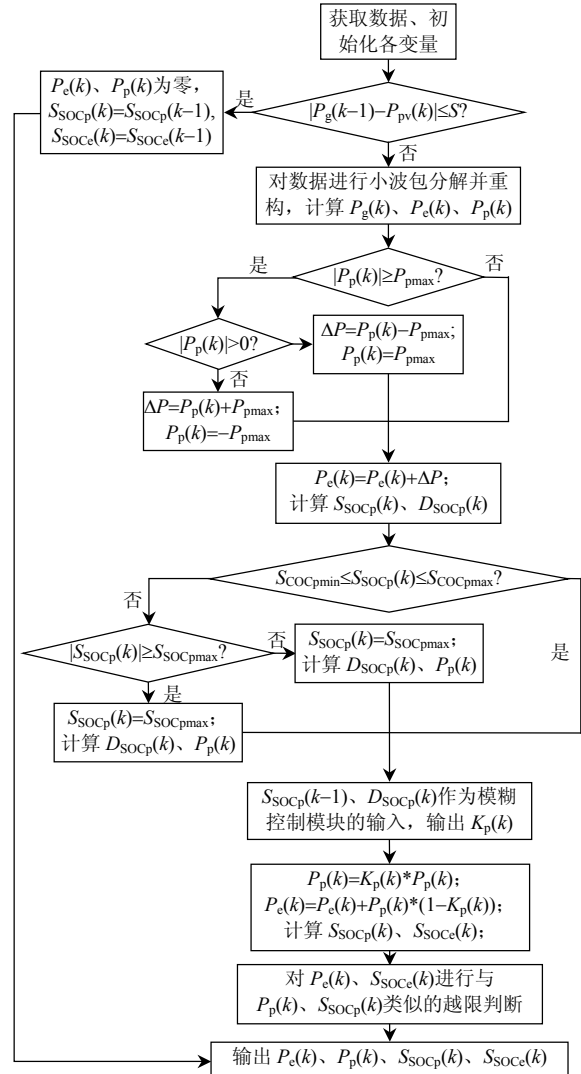
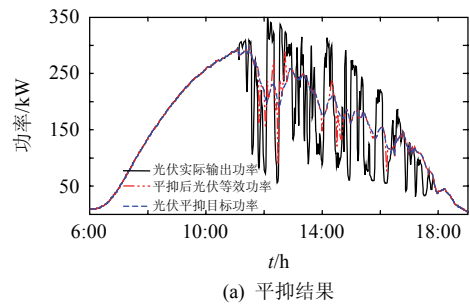
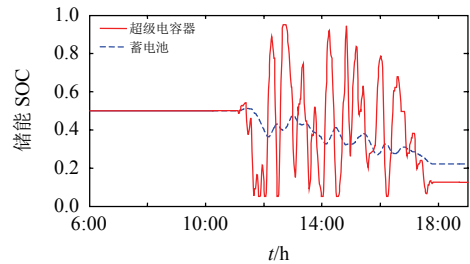


图 8 实时平抑控制流程图

Fig. 8 Flow diagram of real-time smoothing control



(a) 平抑结果



(b) 储能 SOC 变化曲线

图 9 单纯限值控制的平抑结果及储能 SOC 变化曲线

Fig. 9 Smoothing result and the SOC curves of the energy storage systems by simple limit control



平抑效果和储能 SOC 变化情况分别如图 10(a)、(b) 所示,可以看出,对功率型储能的 SOC 进行模糊控制后平抑效果明显改善,避免了功率型储能的容量越限,且对能量型储能的充放电次数及 SOC 变化状态没有产生明显影响。

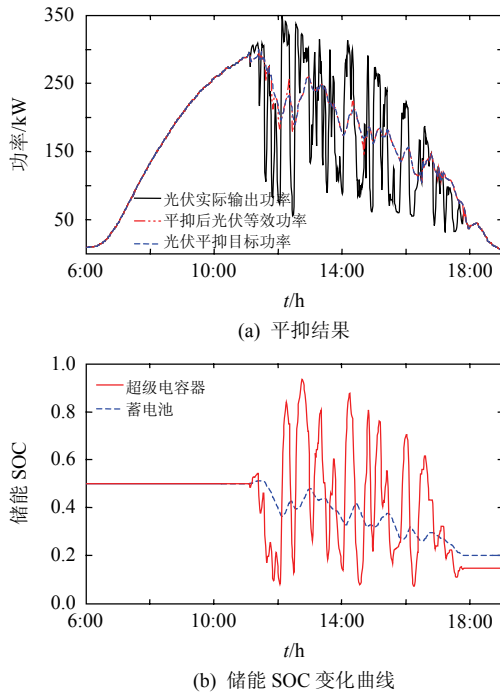


图 10 功率型储能 SOC 模糊控制的平抑结果及储能 SOC 变化曲线

Fig. 10 Smoothing result and the SOC curves of the energy storage systems by SOC control of the power-type energy storage system

图 11、12 分别对比了有、无 SOC 模糊控制时,

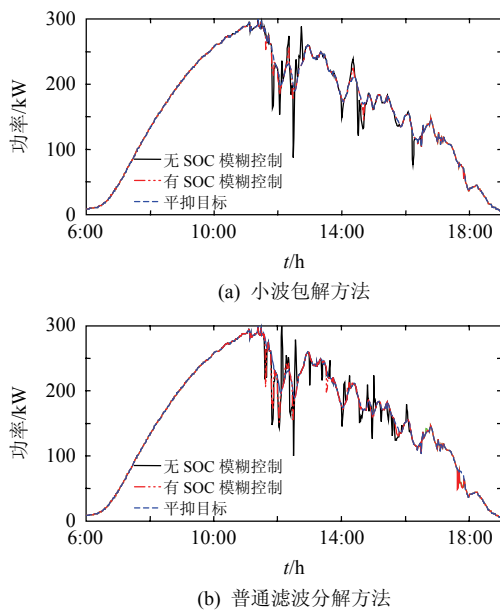


图 11 不同控制方法平抑效果对比

Fig. 11 Comparison of the smoothing results between different control methods

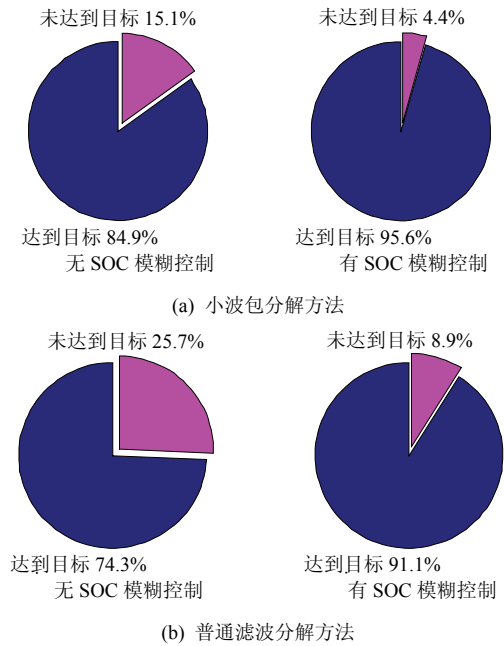
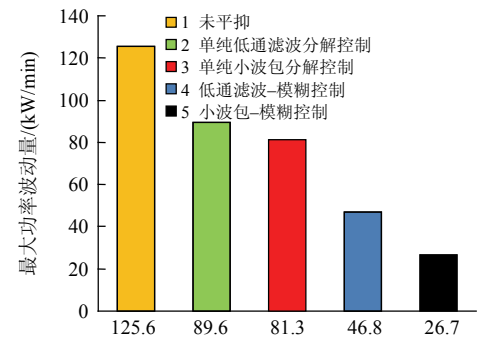


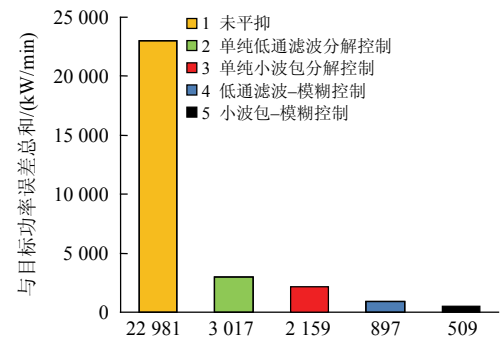
图 12 平抑结果对比

Fig. 12 Comparison of the smoothing results

经小波包分解方法和普通低通滤波分解方法平抑后光伏等效输出功率和各自达到平抑目标的百分比。为保持平抑目标相同,均采用小波包分解法得到的平抑目标,低通滤波方法用于分解波动分量给电池和超级电容器。图 13 定量统计了不同控制方



(a) 最大波动量对比



(b) 与目标功率误差总和对比

图 13 平抑前后光伏功率波动情况统计

Fig. 13 PV power fluctuations statistics before and after smoothing

法下经储能平抑后光伏等效输出功率的波动情况，并与光伏实际输出功率的波动情况进行对比。

由图 11~13 可知：光伏实际输出功率波动性明显；无 SOC 模糊控制时，经小波包分解法和低通滤波分解法平抑后，波动性有一定改善，但仍有较大波动情况出现，未达到平抑目标的比例较大，主要是因为功率型储能容量达到上、下限，无法起到平抑大功率波动的作用；对功率型储能的 SOC 进行模糊控制后，两种分解方法下的平抑效果都明显变好，达到平抑目标的比例大幅提高；无论有无 SOC 模糊控制，小波包分解方法的平抑效果都优于普通低通滤波分解方法。

## 4 结论

1) 综合分析光伏功率信号的幅频特性和不同类型储能的性能特点，用小波包分解方法获取储能的充放电功率可以对能量型储能的充放电次数加以限制，延长其使用寿命。

2) 通过设置阈值和小波包分解到小波分解的转换分别解决了实时控制中的滤波延迟和小波包分解计算量大的问题。

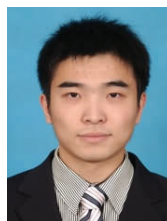
3) 通过功率型储能 SOC 的模糊控制优化不同储能间的功率分配，改善了光伏出力波动的平抑效果。

4) 算例分析表明，本文所提控制方法的平抑效果优于普通低通滤波方法，且对储能系统进行了有效保护，有重要的实际意义和工程应用价值。

## 参考文献

- [1] Datta M, Senjyu T, Yona A, et al. A coordinated control method for leveling PV output power fluctuations of PV-diesel hybrid systems connected to isolated power utility[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(1): 153-162.
- [2] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 33(2): 26-32. Chen Wei, Ai Xin, Wu Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 33(2): 26-32(in Chinese).
- [3] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8. Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8(in Chinese).
- [4] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9. Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9(in Chinese).
- [5] 张颖媛. 微网系统的运行优化与能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011. Zhang Yingyuan. Study of operation optimization and energy management for microgrids[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011(in Chinese).
- [6] Cheng F, Willard S, Hawkins J, et al. Applying battery energy storage to enhance the benefits of photovoltaics [C]//Energytech, Cleveland. America: IEEE, 2012: 1-5.
- [7] 丁明, 吴建锋, 朱承治, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 22-29. Ding Ming, Wu Jianfeng, Zhu Chengzhi, et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J] Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 22-29(in Chinese).
- [8] Sheikh M R I, Eva F, Motin M A, et al. Wind generator output power smoothing and terminal voltage regulation by using STATCOM/SMES[C]//2012 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET). Dhaka, Bengal: IEEE, 2012: 1-5.
- [9] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6. Ding Ming, Lin Gende, Chen Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6(in Chinese).
- [10] Jiang Q, Wang H. Two-time-scale coordination control for a battery energy storage system to mitigate wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 52-61.
- [11] 于芑, 周炜, 孙辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 127-133. Yu Peng, Zhou Wei, Sun Hui, et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(17): 127-133(in Chinese).
- [12] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于平滑控制的混合能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-41. Zhang Ye, Guo Li, Jia Hongjie, et al. An energy management method of hybrid energy storage system

- based on smoothing control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 36-41(in Chinese).
- [13] Koyanagi K, Hida Y, Ito Y, et al. A smart photovoltaic generation system integrated with lithium-ion capacitor storage[C]//Proceedings of 2011 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC). Soest, Germany: IEEE, 2011: 1-6.
- [14] Li X, Hui D, Lai X. Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464-473.
- [15] Yoshimoto K, Nanahara T, Koshimizu G. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system[C]//Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, America: IEEE, 2006: 1244-1251.
- [16] 李蓓, 郭剑波. 平抑风电功率的电池储能系统控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 39-43.  
Li Bei, Guo Jianbo. Control strategy for battery energy storage system to level wind power output[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 39-43(in Chinese).
- [17] Nasiri A, Esmaili A, Abdel-Baqi O, et al. A hybrid system of Li-Ion capacitors and flow battery for dynamic wind energy support[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 99: 1-9.
- [18] Ding M, Chen Z, Wang B, et al. Unified control of smoothing out wind power fluctuations and active power filtering by an energy storage system[C]//Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Tianjin, China: IEEE, 2012: 1-5.
- [19] Gong B, Bao Z P, Guo C C, et al. Select on wavelet in the SK static mixer with the velocity pulse signal analysis [C]//International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Beijing, China: IEEE, 2009: 31-34.
- [20] Mogharreban N, Dilalla L F. Comparison of defuzzification techniques for analysis of non-interval data[C]//Annual meeting of the North American on Fuzzy Information Processing Society. Montreal, Canada: IEEE, 2006: 257-260.



吴振威

收稿日期: 2013-07-17。

作者简介:

吴振威(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电及其控制技术, wei66882006@126.com;

蒋小平(1966), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为自动控制理论及应用;

马会萌(1985), 女, 本科, 工程师, 研究方向为电能存储与转换技术;

马速良(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电及其控制技术。

(责任编辑 吕鲜艳)