

# 平滑风电出力的风储联合系统 能量管理协调控制研究

詹仲强<sup>1</sup>, 付菊霞<sup>2</sup>

1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:**为实现风电友好并网,采用混合储能系统平抑风电有功出力波动。首先,针对风功率的随机波动特性,采用滑动平均滤波算法与自适应小波包分解方法分别得到目标并网功率,结合风电并网波动率要求,比较不同目标功率获取方法的优劣。其次,对于并网功率缺额和盈余部分,由蓄电池-超级电容构成的混合储能系统进行补偿和消纳,并根据各储能设备不同性能,按照频率分配各储能设备的功率指令。然后,结合储能设备荷电状态和出力的限值约束,提出一种风储联合系统协调控制策略,实现储能设备间的能量互补,延长储能设备的使用寿命。最后,基于历史风电数据的仿真分析,验证所提方法的有效性。

**关键词:** 风电; 储能; 滑动平均; 自适应小波包; 协调控制

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)05-0029-08

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.05.006

## Research on Energy Management and Coordination Control for Combined System of Wind Power and Energy Storage to Smooth Wind Power Output

Zhan Zhongqiang<sup>1</sup>, Fu Juxia<sup>2</sup>

1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
2. School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xinjiang, China)

**Abstract:** In order to realize wind power integration with the grid friendly, hybrid energy storage system is adopted to mitigate wind power fluctuation. Firstly, according to the random fluctuation characteristics of wind power, the moving average filtering algorithm and adaptive wavelet packet decomposition method are used to obtain the grid-connected power, and the advantages and disadvantages of different methods are analyzed according to the fluctuation requirements of wind power integration with the grid. Secondly, for the power vacancies and surpluses of grid-connected power, the hybrid energy storage system composed of battery and supercapacitor is adopted to carry out the compensation and absorption, and the power instructions of each energy storage equipment are allocated according to the different response frequency of energy storage equipment because of the different performances. Then, combined with the state of charge (SOC) of energy storage equipment and output limit constraints, a coordinated control strategy of the combined system of wind power and energy storage is proposed to achieve energy complementarity and prolong the service life of energy storage equipment. Finally, based on simulation analysis of historical wind power data, the effectiveness of the proposed method is verified.

**Key words:** wind power; energy storage; moving average; adaptive wavelet packet; coordinated control

## 0 引言

风能有别于化石能源,具有清洁、可再生等特

科技项目:新疆维吾尔自治区高校科研重点项目(XJEDU20181005)

点,受到各国的广泛关注<sup>[1]</sup>,已成为中国电力发展的主要方向。但风能发电具有随机波动特性,严重影响大规模风电友好并网<sup>[2]</sup>,因此有必要采用储能系统维持电力系统的安全稳定运行<sup>[3]</sup>。

储能系统的主要功能是弥补能量的过剩与不

足。目前,单一储能形式已不能在风能发电应用中同时满足储存容量大、响应速度快的要求<sup>[4-5]</sup>。基于此,结合蓄电池能量密度大和超级电容功率密度高的特点,采用蓄电池-超级电容构成的混合储能系统平抑风电功率波动,使两者优势互补,达到最优平抑效果。

文献[6-7]通过低通滤波方法获得目标并网功率和储能系统功率指令,但风速随机变化,使得低通滤波时间常数难以确定,可能存在频率混叠现象,不能精确提取风功率信号特征。文献[8-9]采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法和集合经验模态分解(ensemble EMD, EEMD)方法平滑风电出力,但这两种方法存在边界效应和模态混叠问题。虽然 EEMD 方法对模态混叠现象有所改善,但却不能完全避免。文献[10-11]采用小波包方法对风功率进行分解,但分解过程中需要指定分解层数,分解结果随分解层数的不同而改变,存在主观因素影响。

文献[12]提出一种基于规则的混合储能系统功率分配策略,在不考虑功率容量限制的情况下,该策略在经济性和动态特性方面具有很好的合理性。文献[13]提出一种混合储能系统模糊滑模控制策略,采用模糊控制器消除滑模控制器的高频抖振现象,具备平抑风电出力和提高系统抗扰性能的双重作用。文献[14]设计一种分层控制策略,包括装置层和系统层。采用前馈控制器及模糊优化的思想,进行补偿风电场出口的功率波动,实现风电可靠并网。文献[15]提出了一种基于模糊经验模态分解的蓄电池储能系统控制策略。该方案储能形式单一,但在缓解风电波动以及减少集成电池储能系统的过充/放电操作方面有所改进。

上述文献表明,采用合理的功率分解方法和有效的控制策略可以缓解风电功率波动对电网的冲击。采用滑动平均滤波算法和自适应小波包分解方法获得目标并网功率,以正常运行下风电场接入电网的双时间尺度有功功率变化最大限值为标准,进行对比分析,说明自适应小波包分解方法的分解效果更好。再从时频角度进行分析,根据蓄电池和超级电容充放电响应频率不同进行初次功率分配;再结合储能设备荷电状态(state of charge, SOC)和充放电功率需求,设计一种风储联合系统协调控制策略,保证蓄电池和超级电容工作在规定的出力区间,

同时其 SOC 维持在合理范围。

## 1 目标并网功率获取方法

### 1.1 风储联合系统结构

在风电场并网侧加入储能系统可有效平抑风电并网功率波动,图 1 为风储联合系统结构图。

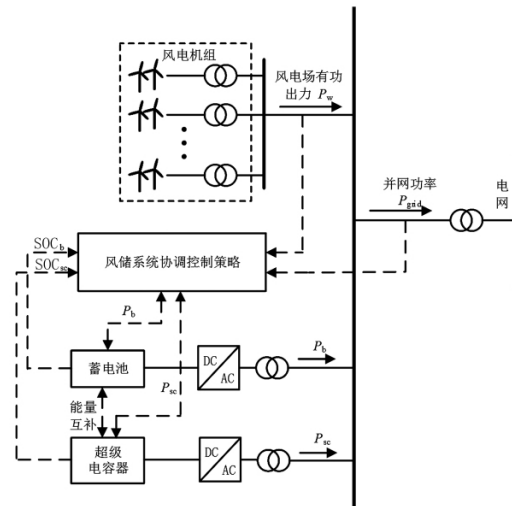


图 1 风储联合系统结构

针对风电场有功出力  $P_w$ , 首先分别采用滑动平均滤波方法和自适应小波包分解方法, 获取风电并网功率  $P_{grid}$ , 比较两种方法的优劣, 选择合适的功率分解方法。再由混合储能系统的输出功率  $P_h$  补偿或消纳风电场并网功率缺额和盈余部分。最后, 通过风储联合系统协调控制策略调节蓄电池输出功率  $P_b$  和超级电容输出功率  $P_{sc}$ , 实现两种储能设备间的能量流动, 其中,  $P_b$ 、 $P_{sc}$  大于 0 表示充电, 小于 0 表示放电。根据图 1 的功率流向可得

$$\begin{cases} P_{grid} = P_w + P_h \\ P_h = P_b + P_{sc} \end{cases} \quad (1)$$

### 1.2 基于滑动平均滤波方法的风功率分解

采用滑动平均算法, 对于  $M$  个非平稳风电功率采样数据, 通过选择合适的滑动时间窗, 对窗口内的风功率采样值做算术平均, 然后将得到的平均值作为目标并网功率值, 进而得到储能系统功率指令, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{grid}(i) = \left\{ P_w [i - (N/2 - 1)] + P_w [i - (N/2 - 2)] + \dots + P_w(i) + \dots + P_w(i + N/2) \right\} / N \\ P_h(i) = P_w(i) - P_{grid}(i) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $i = N/2, N/2 + 1, \dots, M - N/2$ ;  $P_w(i)$  为第  $i$

个采样风电功率数据;  $N$  为滑动时间窗的窗口长度偶数;  $P_{grid}(i)$  为第  $i$  个目标并网分量数据;  $P_h(i)$  为第  $i$  个混合储能系统功率指令。

滑动时间窗的窗口长度  $N$  的选取直接影响风电功率的平抑效果,窗口长度  $N$  选取越大,得到的平抑效果越明显,同时储能系统吸收与消纳的能量就越多,导致储能系统的容量过大,设备成本也就相应提高;若窗口长度  $N$  选取较小时,并网功率分量的波动幅度增大,不能满足风电并网标准,影响电力系统的安全稳定运行。通过历史风电数据进行滑动时间窗窗口长度  $N$  的选择,以风电并网标准为约束条件,对  $N$  值进行校正,进而选择合适的  $N$  值。

根据 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》可知,当风电场装机容量在 30~150 MW 之间时,其 1 分钟级波动标准为风电有功功率变化量不超过总装机容量的 1/10,10 分钟级波动标准为风电有功功率变化量不超过总装机容量的 1/3。式 (3) 为  $t$  时刻,风电输出功率 1 min 及 10 min 最大功率波动量计算公式。

$$\begin{cases} \Delta P_{grid,1min}(t) = \max_{l \in [1,6]} P_{grid}[t-(l-1) \cdot \Delta t] - \min_{l \in [1,6]} P_{grid}[t-(l-1) \cdot \Delta t] \\ \Delta P_{grid,10min}(t) = \max_{l \in [1,60]} P_{grid}[t-(l-1) \cdot \Delta t] - \min_{l \in [1,60]} P_{grid}[t-(l-1) \cdot \Delta t] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $l$  表示 1 min 或 10 min 内的采样个数;  $\Delta t$  表示风电功率数据采样间隔;  $\Delta P_{grid,1min}(t)$  表示  $t$  时刻 1 分钟功率波动量;  $\Delta P_{grid,10min}(t)$  表示  $t$  时刻 10 分钟功率波动量。

图 2 为滑动时间窗  $N$  值的校正流程图。首先要确定  $N$  的初值  $N_0$ ,然后对风电功率数据做算术平均,将得到的平均值根据式 (3) 计算并网波动量,并与并网标准限值作比较,判断出是否同时满足双时间尺度并网标准;若不满足, $N$  值增加 2,继续进行判断,直至满足并网标准为止。

### 1.3 基于自适应小波包方法的风功率分解

对于非平稳、突变的风功率信号,相对于小波分解方法,小波包分解方法更具有应用价值,不仅可以实现信号低频部分的分解,也可以对信号的高频部分进行分解,最终的分解结果是将原始信号映射到  $2^n$  ( $n$  为分解层数) 个小波包子空间中,在结构上以二叉树的形式体现,是一种更加精细的信号处理方法,可以提高时频分辨率<sup>[10]</sup>。

采用 DB6 小波<sup>[16]</sup>对风电功率数据进行  $n$  层分

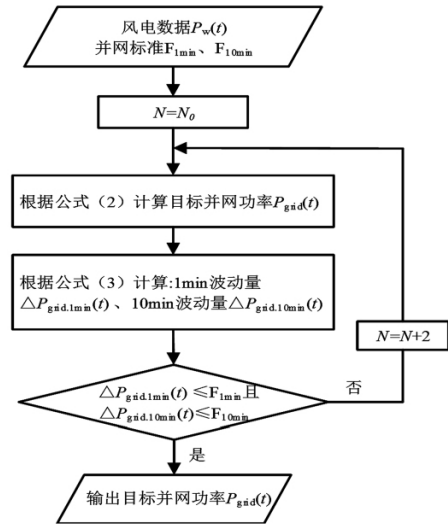


图 2 滑动时间窗  $N$  值的校正流程

解,得到其低频部分  $a_{n,0}$  和 高频部分  $a_{n,j}$  (其中  $j=1, 2, \dots, 2^n-1$ ) 的功率指令。低频部分  $a_{n,0}$  作为并网功率指令,高频部分  $a_{n,j}$  作为混合储能系统的功率指令,如式 (4) 所示。

$$\begin{cases} P_{grid} = a_{n,0} \\ P_h = \sum_{j=1}^{2^n-1} a_{n,j} \end{cases} \quad (4)$$

图 3 为满足 1 分钟级并网标准自适应小波包分解流程图。首先判断风电功率是否满足风电并网 1 分钟级波动标准,若满足标准条件,则直接进行并网;若不满足条件,进行小波包分解,给分解层数  $n$  设一个初值,将分解结果与并网标准进行比较,满足即并入电网,不满足条件时,  $n$  值增加 1,继续上述操作,直到满足并网标准为止。同理,10 分钟级并网标准与上述方法一致。

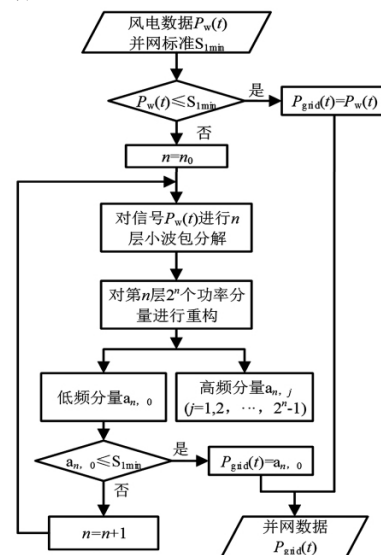


图 3 满足 1 分钟级并网标准自适应小波包分解流程

### 1.4 分解结果比较分析

基于 Matlab/Simulink 仿真平台,采用新疆某风电场日有功出力数据进行验证分析。其中,该风电场总装机容量为 49.5 MW,采样间隔  $\Delta t$  为 10 s。图 4 为原始风电场有功出力曲线。

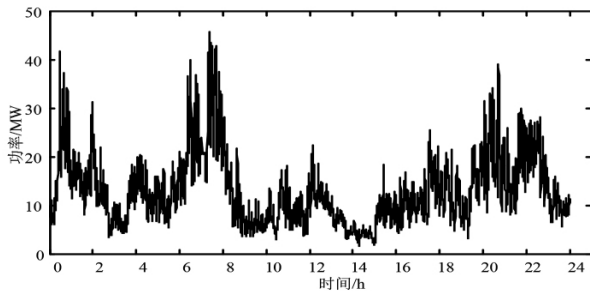


图4 原始风电场有功出力曲线

根据上述风电并网标准,装机容量为 49.5 MW 的风电场 1 min 和 10 min 的有功功率波动限值分别为

$$1 \text{ min: } 49.5/10 = 4.95 \text{ MW}$$

$$10 \text{ min: } 49.5/3 = 16.5 \text{ MW}$$

表 1 为滑动滤波算法数据统计,表 2 为小波包分解法数据统计。从表 1 中可以看出,时间窗  $N$  的选取直接影响风电的平抑效果。当  $N$  取 24 时,并网功率 1 min 最大波动量为 4.70 MW,1 分钟最大波动率为 9.49%,满足了风电并网 1 分钟级波动标准,但却远远超过了 10 分钟级波动标准。所以需对  $N$  值继续增加,当  $N$  值为 46 时,同时满足双时间尺度并网标准。

表 1 滑动滤波算法数据统计

时间窗 $N$	1 min		10 min	
	最大波动量/MW	最大波动率/%	最大波动量/MW	最大波动率/%
22	5.04	10.19	22.42	45.29
24	4.70	9.49	22.05	44.55
26	4.30	8.69	21.91	44.27
...				
44	3.17	6.41	17.15	34.64
46	2.95	5.96	16.13	32.58

表 2 小波包分解法数据统计

分解层数 $n$	1 min		10 min	
	最大波动量/MW	最大波动率/%	最大波动量/MW	最大波动率/%
4	6.59	13.31	25.15	50.81
5	3.63	7.33	16.58	33.50
6	1.29	2.60	11.19	22.60

从表 2 可以看出,当同时满足 1 min 级和 10 min

级并网标准时,优分解层数  $n$  为 6。比较表 1、表 2 可以看出,在同时满足并网标准的条件下,采用小波包分解方法得到的目标并网功率更加平滑。图 5 为采用不同平抑方法得到的目标并网功率。

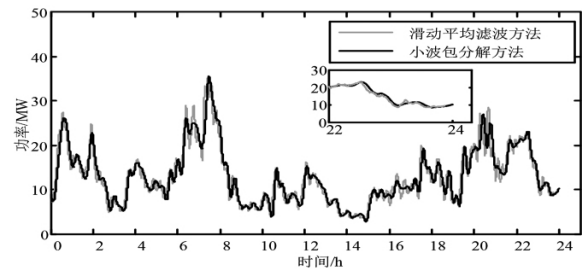


图5 目标并网功率

从图 5 可以看出,在 22 ~ 24 h 之间时,采用滑动平均滤波方法获得的目标并网功率存在时间延迟,主要原因是由于滑动时间窗的选取,当滑动时间窗  $N$  值选取越大时,延迟时间越长,反之越小。综合上述分析,采用小波包分解方法获得目标并网功率和储能系统功率指令更具可靠性。

## 2 混合储能系统协调控制策略

由文献 [17] 可知,蓄电池充放电响应时间范围为数分钟到数小时,而超级电容充放电响应时间范围在数毫秒到数分钟之间,因此,选取 1 min 作为蓄电池和超级电容的充放电响应分界时间,对应响应频率为  $1.67 \times 10^{-2}$  Hz。即由蓄电池吸收频率小于  $1.67 \times 10^{-2}$  Hz 的功率分量,超级电容吸收频率大于  $1.67 \times 10^{-2}$  Hz 的功率分量。图 6 为混合储能系统功率指令频谱图,频率小于  $5.00 \times 10^{-4}$  Hz 的能量已并入电网,大于  $1.67 \times 10^{-2}$  Hz 以上的部分幅值很小,所以选取  $1.67 \times 10^{-2}$  Hz 为蓄电池和超级电容器的分界频率是合理的。

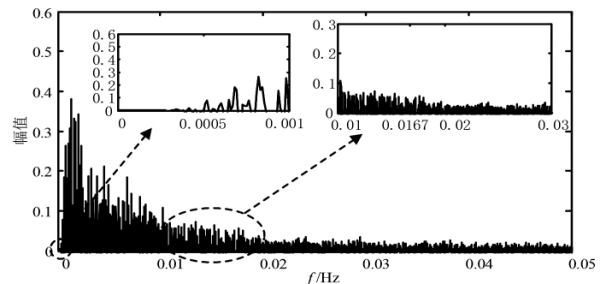


图6 混合储能系统功率指令频谱

通过对小波包分解结果进行重构,各储能设备的功率指令计算公式为

$$\begin{cases} P_{b\_ref} = a1 + a2 + \dots + a14 \\ P_{sc\_ref} = a15 + a16 + a17 + \dots + a62 + a63 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{b\_ref}$  为蓄电池的参考功率指令;  $P_{sc\_ref}$  为超级电容的参考功率指令。

由于超级电容充放电次数达几十万次,使用寿命长,在对储能系统进行协调控制时,以超级电容优先充放电为主,对蓄电池充放电功率进行限幅处理,达到延长蓄电池使用寿命的目的。

蓄电池和超级电容工作在正常 SOC 范围(蓄电池为 0.2~0.8;超级电容为 0.1~0.9),风储联合系统协调控制策略如表 3 所示。其中:  $SOC_b$ 、 $SOC_{sc}$  分别为蓄电池和超级电容的 SOC;  $P_{b\_a}$ 、 $P_{sc\_a}$  分别为协调控制后蓄电池和超级电容的充放电功率;  $P_{b\_min}$ 、 $P_{b\_max}$  分别为蓄电池最小、最大功率限值,均大于 0。

表 3 共有 60 种工作模式,模式之间相互切换,下面说明几种典型的工作模式:

模式 1: 当蓄电池功率指令为充电状态,充电功率在 0 到  $P_{b\_min}$  之间,且 SOC 小于 0.8 时,采用最小充电功率  $P_{b\_min}$  对蓄电池进行充电,此时,当超级电容荷电状态在 0.1~0.9 之间时,不管是充电状态还是放电状态,均对蓄电池缺额功率进行补偿。当蓄

电池荷电状态达到 0.8 时,切换至模式 6。

模式 12: 当蓄电池功率指令为充电状态,充电功率在  $P_{b\_min} \sim P_{b\_max}$  之间,且荷电状态小于 0.8 时,采用  $P_{b\_ref}$  对蓄电池进行充电,此时,当超级电容荷电状态大于等于 0.9 时,且处于充电状态,超级电容充电功率为 0。当蓄电池荷电状态达到 0.8 时,切换至模式 17。

模式 55: 当蓄电池功率指令为放电状态,放电功率大于  $P_{b\_max}$ ,且荷电状态小于等于 0.2 时,蓄电池放电功率为 0,此时,当超级电容荷电状态小于等于 0.1,且处于放电状态,超级电容放电功率为 0。当蓄电池荷电状态大于 0.2 时,切换至模式 60。

### 3 算例分析

仿真中,蓄电池和超级电容 SOC 初始值和期望值均设置为 50%,额定充放电功率均为 5 MW。

图 7 为采用小波包分解方法得到的各储能设备的功率指令,图 8 为采用协调控制方法得到的储能设备功率指令。从图 7 和图 8 可以看出,未对蓄电池进行功率限幅控制前,功率幅值可能出现超过蓄电池额定充放电功率的情况,会对蓄电池的使用寿

表 3 风储联合系统协调控制策略表

运行模式	$P_{b\_ref}$	$SOC_b$	$P_{sc\_ref}$		$SOC_{sc}$	$P_{b\_a}$	$P_{sc\_a}$	
			充电	放电				
1	$0 \sim P_{b\_min}$	$< 0.8$	√	√	(0.1 0.9)	$P_{b\_min}$	$P_{b\_ref} - P_{b\_min} + P_{sc\_ref}$	
2			√		$\geq 0.9$		$P_{b\_ref} - P_{b\_min}$	
3				√			$\geq 0.9$	$P_{b\_ref} - P_{b\_min} + P_{sc\_ref}$
4			√		$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$	
5				√			$\leq 0.1$	0
6			√	√	(0.1 0.9)			$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
7			√		$\geq 0.9$			0
8			√		$\geq 0.9$		0	$P_{sc\_ref}$
9				√			$\leq 0.1$	$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
10							$\leq 0.1$	$P_{b\_ref}$
11	$P_{b\_min} \sim P_{b\_max}$	$< 0.8$	√	√	(0.1 0.9)	$P_{sc\_ref}$	$P_{sc\_ref}$	
12			√		$\geq 0.9$		0	
13				√			$\geq 0.9$	$P_{sc\_ref}$
14			√		$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$	
15				√			$\leq 0.1$	0
16			√	√	(0.1 0.9)			$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
17			√		$\geq 0.9$			0
18			√		$\geq 0.9$		0	$P_{sc\_ref}$
19				√			$\leq 0.1$	$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
20							$\leq 0.1$	$P_{b\_ref}$

(续表)

运行模式	$P_{b\_ref}$	SOC <sub>b</sub>	$P_{sc\_ref}$		SOC <sub>sc</sub>	$P_{b\_a}$	$P_{sc\_a}$
			充电	放电			
21	$> P_{b\_max}$	$< 0.8$	√	√	(0.1 0.9)	$P_{b\_max}$	$P_{b\_ref} - P_{b\_max} + P_{sc\_ref}$
22			√		$\geq 0.9$		0
23			√	√	$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
24			√		$\leq 0.1$		$P_{b\_ref} - P_{b\_max} + P_{sc\_ref}$
25			√	√	(0.1 0.9)		$P_{b\_ref} - P_{b\_max}$
26			√		$\geq 0.9$		$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
27			√		$\geq 0.9$		0
28			√	√	$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
29			√		$\leq 0.1$		$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
30			√	√	(0.1 0.9)		$P_{b\_ref}$
31	$-P_{b\_min} \sim 0$	$\leq 0.2$	√	√	(0.1 0.9)	0	$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
32			√		$\geq 0.9$		$P_{b\_ref}$
33			√	√	$\leq 0.1$		$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
34			√		$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
35			√	√	(0.1 0.9)		0
36			√		$\geq 0.9$		$-P_{b\_ref} - P_{b\_min} + P_{sc\_ref}$
37			√		$\geq 0.9$		$-P_{b\_ref} - P_{b\_min}$
38			√	√	$\leq 0.1$		$-P_{b\_ref} - P_{b\_min} + P_{sc\_ref}$
39			√		$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
40			√	√	(0.1 0.9)		0
41	$-P_{b\_min} \sim -P_{b\_max}$	$\leq 0.2$	√	√	(0.1 0.9)	0	$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
42			√		$\geq 0.9$		$P_{b\_ref}$
43			√	√	$\leq 0.1$		$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
44			√		$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
45			√	√	(0.1 0.9)		0
46			√		$\geq 0.9$		$P_{sc\_ref}$
47			√		$\geq 0.9$		0
48			√	√	$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
49			√		$\leq 0.1$		0
50			√	√	(0.1 0.9)		$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
51	$< -P_{b\_max} \sim 0$	$> 0.2$	√	√	(0.1 0.9)	$P_{b\_ref}$	$P_{b\_ref}$
52			√		$\geq 0.9$		$P_{b\_ref} + P_{sc\_ref}$
53			√	√	$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
54			√		$\leq 0.1$		0
55			√	√	(0.1 0.9)		$P_{b\_ref} + P_{b\_max} + P_{sc\_ref}$
56			√		$\geq 0.9$		$-P_{b\_ref} + P_{b\_max}$
57			√	√	$\geq 0.9$		$P_{b\_ref} + P_{b\_max} + P_{sc\_ref}$
58			√		$\leq 0.1$		$P_{sc\_ref}$
59			√	√	(0.1 0.9)		0
60			√		$\leq 0.1$		0

命产生影响。经过对蓄电池进行限功率操作和实现储能设备间的功率流动之后,可以看出蓄电池承担大部分储能工作,具备能量型器件的特征。

图9为采用小波包分解方法得到的蓄电池和超级电容SOC曲线,图10为采用所提控制方法后得到的蓄电池和超级电容SOC。比较图9、图10

可以看出,在同样的储能设备容量配置下,采用小波包分解方法按频率划分得到储能设备的充放电功率指令,其蓄电池SOC曲线出现超过上限0.8的时刻,而超级电容的SOC出现接近于1的时刻。在采用所提控制策略后,可有效改善两种储能设备的荷电状态,避免其出现过充过放现象,进而延

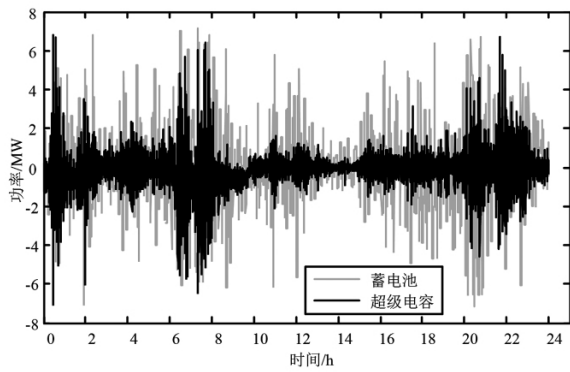


图7 采用小波包分解方法得到储能设备功率指令

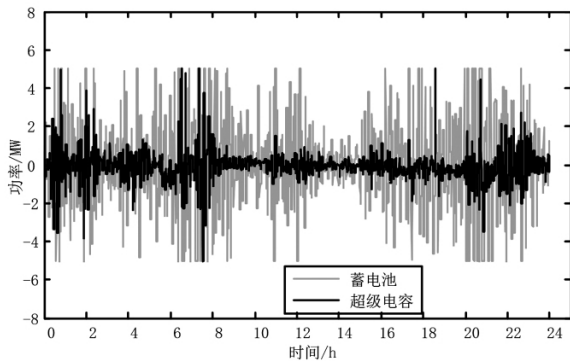


图8 采用协调控制方法得到储能设备功率指令

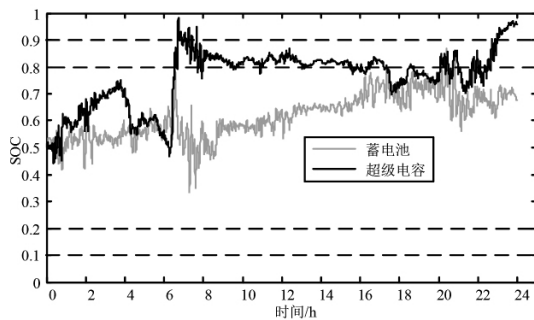


图9 小波包分解方法

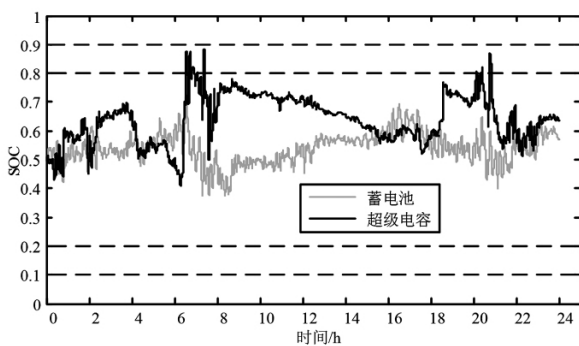


图10 协调控制方法

长其使用寿命。

## 4 结 语

通过搭建风储联合系统数学模型,采用蓄电池

— 超级电容组成的混合储能系统平抑风电功率波动,可得出以下结论:

1) 通过比较滑动平均滤波方法和自适应小波包分解方法对风电功率信号的平抑效果,得到自适应小波包分解方法更具有优势,目标并网功率更加平滑,也可避免滑动平均滤波方法出现的延迟现象。通过仿真结果表明,自适应小波包分解方法可以避免通过主观设定分解层数所带来的局限性,不仅对风电平滑效果好,同时也兼具了储能设备的容量配置最优。

2) 设计一种风储联合系统协调控制策略,对经过频域分析得到的蓄电池和超级电容的功率指令进行储能设备间能量的再分配。这样,可以同时综合储能设备的频率和出力两方面的需求,使能量流动于不同储能设备之间,发挥各自储能设备的不同优势。

## 参考文献

- [1] OmPrakash Mahela, Abdul Gafoor Shaik. Comprehensive Overview of Grid Interfaced Wind Energy Generation Systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 260 - 281.
- [2] 徐国栋,程浩忠,马紫峰,等.用于平滑风电出力的储能系统运行与配置综述[J].电网技术,2017,41(11): 3470 - 3479.
- [3] F. J. Vivas, A. De las Heras, F. Segura, et al. A Review of Energy Management Strategies for Renewable Hybrid Energy Systems with Hydrogen Backup [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018, 82: 126 - 155.
- [4] Chauhan A, Saini RP. A Review on Integrated Renewable Energy System Based Power Generation for Stand - alone Applications: Configurations, Storage Options, Sizing Methodologies and Control [J]. Renew Sustain Energy Reviews 2014, 38: 99 - 120.
- [5] 王绍丞. 储能技术在光伏电站并网中的应用分析 [J]. 电工技术, 2018(17): 19 - 21.
- [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.
- [7] 谢俊文,陆继明,毛承雄,等.基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J].电力系统自动化,2013,37(1): 96 - 102.
- [8] 杨锡运,曹超,李相俊,等.基于模糊经验模态分解的电池储能系统平滑风电出力控制策略[J].电力建设,

2016 37(8):134-140.

[9] 付菊霞,陈洁,滕扬新,等.基于集合经验模态分解的风电混合储能系统能量管理协调控制策略[J/OL]. 电工技术学报:1-8 [2019-03-29]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181729>.

[10] 韩晓娟,陈跃燕,张浩,等.基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报 2013 33(19):8-13.

[11] 卢芸,徐骏.基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制 2016 44(11):149-154.

[12] Yujie Wang, Zhendong Sun, Zonghai Chen. Development of Energy Management System Based on a Rule-based Power Distribution Strategy for Hybrid Power Sources [J/OL]. Energy (2019). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.155>.

[13] 吴冠男,张明理,徐建源,等.考虑抗扰性能的风电混合储能系统协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制 2017 45(22):164-169.

[14] 雷勇,林晓冬.超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术, 2019 45(3):983-992.

[15] Xiyun Yang, Hong Yue, Jie Ren. Fuzzy Empirical Mode Decomposition for Smoothing Wind Power with Battery Energy Storage System [J]. IFAC Papers OnLine 2017, 50(1):8769-8774.

[16] 何正友,钱清泉.电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化 2003 27(10):45-48.

[17] Chen H, Cong T N, Yang W et al. Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review [J]. Progress in Natural Science 2009, 19(3):291-312.

作者简介:

詹仲强(1987) 硕士研究生,主要从事新能源并网技术研究;

付菊霞(1993) 在读硕士研究生,研究方向为清洁能源发电、储能技术。

(收稿日期:2019-04-08)

(上接第28页)

[18] 黄俊辉,汪惟源,王海潜,等.基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制 2016 44(10):37-43.

[19] 刘科研,盛万兴,李运华.基于改进遗传模拟退火算法的无功优化[J]. 电网技术 2007 31(3):13-18.

[20] 蔡昌春,丁晓群,王斌.混沌模拟退火算法在无功优化中的应用[J]. 高电压技术 2008 34(3):578-582.

[21] 郭清元,吴杰康,莫超,等.基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J]. 中国电机工程学报 2017 38(5):1385-1396.

[22] 陈曦.基于灵敏度方法的电网安全校正策略研究[D]. 北京:华北电力大学 2010.

[23] 段献忠,袁骏,何仰赞,等.电力系统电压稳定灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化,1997 21(4):9-12.

[24] 袁骏,段献忠,何仰赞,等.电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术,1997 21(9):7-10.

[25] 陈曦,任建文,杨玉坤,等.基于灵敏度方法的电压越限分析[J]. 陕西电力 2010 21(9):77-80.

[26] 蒋贤强,徐青山.考虑需求响应的交直流配网调度研究[J]. 电力需求侧管理 2019 21(2):19-23.

[27] 白晓燕,苏毅,成煜.基于仿射特性的约束灵敏度分析及应用综述[J]. 电网与清洁能源 2014 30(8):20-26.

[28] 王晓丰.基于模糊机会约束模型的负荷恢复过程中风场有功出力调度[J]. 自动化应用 2019(2):94-98.

[29] 张云菊,何晔,李秀萍,等.基于数据挖掘的电压无功灵敏度分析及应用[J]. 自动化与仪器仪表,2018(5):211-214.

[30] 赵兴迪.基于量测数据的配电网线损计算方法[J]. 电工技术 2018(12):7-9.

[31] 李国武,李艳琼,刘娇扬,等.考虑集群划分的分布式储能容量规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018 30(12):1-10.

[32] 李晏君,张章煌,陈玮,等.兼顾抗毁度的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制 2019 47(4):1-8.

[33] 孟波,孟现岭,靳玉凯,等.灵敏度分析法在静态电压稳定中的应用[J]. 技术与市场 2014 47(4):1-8.

作者简介:

张庆晖(1969) 高级工程师,研究方向为电力系统规划等;  
吴长元(1991) 硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制等;

吴杰康(1965) 教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行与控制、智能电网等;

吴帆(1990) 助理工程师,研究方向为电力系统运行与控制等;

唐惠玲(1975) 副教授,研究方向为电力系统运行与控制等;

陈灵敏(1981) 讲师,研究方向为电力系统运行与控制等。

(收稿日期:2019-06-05)