

平抑风电波动的混合储能系统的容量配置

马速良¹, 蒋小平¹, 马会萌², 吴振威¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 风电功率波动对电网造成不容忽视影响。用滑动平均法平滑风电功率, 降低风电并网对电网的影响。滑动窗口的选取具有随机性, 直接影响平滑效果。该研究提出滑动平均和标准校正的组合方法, 分离出并网分量和储能分量。混合储能系统采用小波分解算法, 可以有效地解耦出电池及超级电容器分量。对各储能分量统计分析, 证明它们均服从 t location-scale 分布。在不同置信水平和容量下, 以波动量的均值、方差、波动范围及波动点数为指标, 分析混合储能系统的平抑效果。

关键词: 风电波动; 混合储能容量配置; 滑动平均校正法; 小波分析; 带移位因子与伸缩系数的 t 分布

Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing

MA Su-liang¹, JIANG Xiao-ping¹, MA Hui-meng², WU Zhen-wei¹

(1. School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: It can not be ignored that active power fluctuations in wind power's influence on the grid. Smoothing active power of wind power by moving-average method can diminish the fluctuation quantity of the grid-connected wind power. Sliding window that is random directly affects the smoothing result. This paper comes up with moving-average and standard calibration combinatorial method to separate grid-connected component and hybrid energy storage component from wind power. It decouples battery component and super-capacitor component by the wavelet analysis theory. It researches the probability distributions of battery component and super-capacitor component by the means of mathematic statistics and verifies that they follow t location-scale distribution. At the different confidences and capacities, this paper calculates the means, the variances, the range of fluctuation and the points of fluctuation of active power fluctuations in wind power to estimate different smoothing effects of hybrid energy storage systems.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050203) and National Natural Science Foundation of China (No. 51277157).

Key words: wind power variation; capacity configuration of hybrid energy storage systems; moving average correction method; wavelet analysis; t location-scale distribution

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0108-07

0 引言

风电有功功率输出具有较大的波动性。随着大规模风电场并网, 风电对电力系统产生的影响不容忽视^[1-3]。在风电场并网入口安装储能系统是减小风电场功率波动的有效途径^[4-6]。由于储能系统造价昂贵, 有效改善储能系统形式、合理配置储能系统容量, 利用有限容量储能系统优化风电功率输出、改

善风电联网运行性能是一项很有意义的研究课题。

文献[7]说明储能(超导)系统可以有效地平抑风电功率波动。文献[8]根据电池和超级电容的荷电状态, 采用模糊控制理论分配两种储能介质的功率流动。文献[9]对多类型的储能系统进行分析, 根据各自特点设计了基于波动特性参数的协调控制策略。文献[10]对混合储能系统结构进行比较分析, 提出一种混合储能系统结构的分层控制模型平抑风电功率波动。文献[11]比较了经验模态分解和小波变换两种分解信号的方法, 说明了小波变换更适于对非平稳、突变信号的分解。文献[12]分析了风电

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)

功率在多尺度下波动的统计规律, 验证其满足混合高斯分布。文献[13]使用概率统计的方法配置混合储能的容量, 实现对风电功率波动的调节。文献[14]使用改进的粒子群算法, 针对独立的风光发电的混合储能系统, 以负荷缺电率为指标及全生命周期费用为目标, 优化混合储能系统的容量, 降低储能成本。文献[15]提出了以风电机组及储能装置的输出功率波动标准差为指标的储能系统的功率和容量优化方案。文献[16]针对风电场可调度性研究, 使用遗传算法, 以风电场可调度为约束条件, 投资成本最小为目标优化储能容量。

该研究以混合储能系统平抑风电功率波动为目的, 使用滑动平均标准校正组合方法对风电功率信号分解, 提取平滑并网信号。小波分析方法解耦的电池、超级电容器信号。通过概率统计方法, 分析两种储能信号的分布特性, 得出不同置信水平下的功率组合方案。以均值、方差、波动范围及波动点数为指标, 分析不同置信水平和容量下的混合储能系统平抑风电功率效果。

1 基于混合储能的风电系统

在风电场并网口接入储能系统, 通过控制储能系统的输出功率 P_s 平滑风电场输出功率 P_w , 使风电系统的并网功率 P_{grid} 达到并网标准, 如公式(1)。实际工程中, 考虑到经济性和储能系统的具体性能, 储能系统一般由能量型储能和功率型储能单元组成的。例如蓄电池和超级电容器混合系统, 蓄电池能量密度大, 但功率密度小, 充放电效率低, 循环寿命短, 不适合大功率及频繁充放电; 而超级电容器功率密度大, 充放电效率高, 循环寿命长。两者在性能方面, 具有互补性, 所以使用超级电容器平抑较高功率、高频率的短时充放电波动信号 P_c , 蓄电池平抑较低功率、低频率的长时间充放电波动信号 P_b , 可以有效合理的平抑风电波动, 并延长蓄电池使用寿命, 提高经济性。

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

2 波动分量分解算法

该研究基于某 99 MW 风电场 12 月 4 日-7 日, 以 10 s 为采样间隔的数据样本, 假设采样频率满足采样定理要求, 样本容量为 34 560, 如图 1 所示, 相邻点相差 10 s。

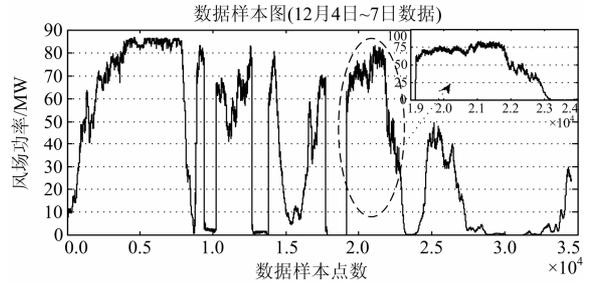


图 1 某 99 MW 风电场有功功率曲线

Fig. 1 Active power curve of a 99 MW wind farm

2.1 滑动平均法分解风电功率

风电有功功率具有较大的波动性, 必须平滑风电功率使其达到并网要求。滑动平均法是一种选择固定长度窗口, 将窗口内的所有数值做算术平均, 将平均值作为窗口中心点的数值的数学方法。根据这种方法可以得到平滑的信号, 有效的分离风电有功功率得到并网分量和波动分量(储能需要出力的分量), 如公式(2)所示。

$$\begin{cases} P_{ft} = (P_{t-(N/2-1)} + P_{t-(N/2-2)} + \dots + P_t + \dots + P_{t+N/2}) / N \\ P_{mt} = P_t - P_{ft} \\ t = N/2, N/2+1, \dots, M-N/2 \end{cases} \quad (2)$$

其中: N 为窗口长度(为表示方便 N 是偶数); P_t 为实测的第 t 时刻的风电功率; P_{ft} 为并网分量; P_{mt} 为波动分量。

窗口长度 N 是滑动平均法一个很重要的参数, 如果窗口长度太大, 导致并网分量过于平滑, 波动分量增大, 需要储能系统出力较多, 容量过大; 而窗口较小会导致并网分量不能满足风电有功功率并网标准, 对电网造成影响。反复实验可以看出, 当 $N \in [15, 30]$ 可以有较好的平滑效果, 本文选取 15。但是对于少量波动很大的点, 窗口长度 $N=15$ 不能使并网分量满足并网要求, 所以根据并网要求加入校正部分, 使波动较大部分的并网分量满足并网要求, 同时不增大其他部分的储能出力。

国家对风电有功功率并网有一系列标准, 其中装机容量 30~150 MW 的风电场, 要求 1 min 有功功率变化量在装机容量的 1/10 以内, 10 min 在装机容量的 1/3 以内。根据以上要求, 验证式(2)的持续分量是否满足并网要求。若是满足, 则直接将持续分量认为是并网分量; 若是不满足, 则通过有功功率并网标准校正持续分量, 得到符合并网要求的并网分量。最后由实际数据减去并网分量获得需要混合储能动作的储能分量。图 2 是持续分量进行 1 min

并网标准校正处理的流程图，10 min 并网标准校正可以类似处理。

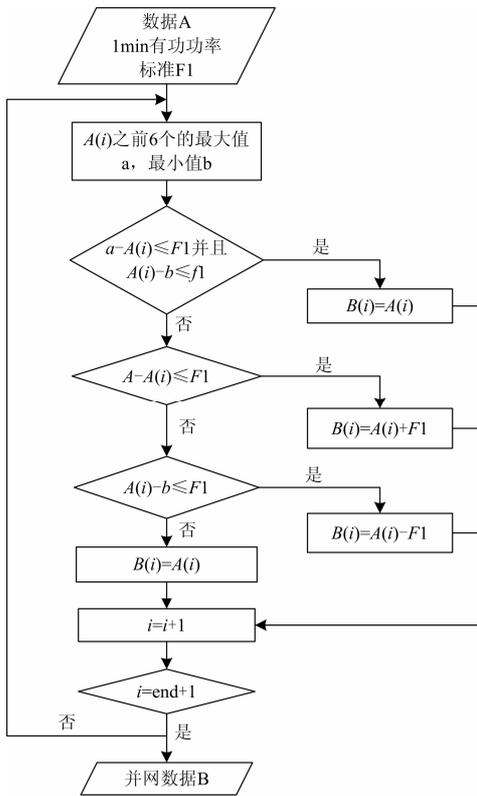


图 2 并网分量的流程图

Fig. 2 Flow chart of the grid-tied part

根据以上算法和校正流程，以该文的数据样本为例得到并网分量和储能分量如图 3 所示。从图 3 可以看出经滑动平均和并网校正后的并网分量具有较好的平滑性，且储能分量具有较大的波动性及较多的突变点。储能分量大多情况都是小幅波动，若是只使用电池储能平抑波动必然造成电池储能系统频繁充放电。由于电池储能循环寿命短，如此情况会对电池储能系统造成不良的影响。

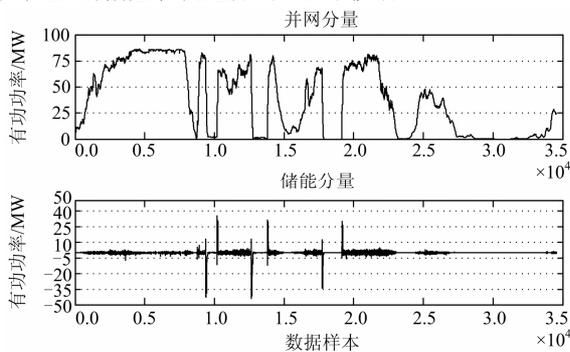


图 3 并网分量和混合储能分量

Fig. 3 Grid-tied part and hybrid energy storage's part of the sample

2.2 小波分解电池及超级电容器分量

根据图 3 得到结论，仅使用单一电池储能平抑风电功率波动量造成电池的寿命降低。故使用功率型储能（超级电容器）和电池的混合储能系统提高平抑效果和和经济性。从图 3 同时可以看出，储能分量是一个随机且具有较大突变的信号。与 Fourier 分解比较，小波变换衍生出的小波分析理论，具有良好的时频局部化特性，非常适用于对信号的时频域分析。对于突变信号的分解，显示出很好的效果。

设函数 $g(t)$ ，并假设其平方可积，即 $g(t) \in L^2(R)$ 。若其傅里叶变换 $g(\omega)$ 满足可容许性条件： $\int_{\mathbb{R}} |g(\omega)|^2 / \omega d\omega < \infty$ ，则 $g(t)$ 为一个基本小波或称母小波。一个母小波可以根据两个参数 α 和 β 分解成为一族子小波 $m_{\alpha,\beta}(t)$ 。

$$m_{\alpha,\beta}(t) = \frac{1}{\sqrt{|\alpha|}} g\left(\frac{t-\beta}{\alpha}\right), \alpha \neq 0, \beta \neq 0 \quad (3)$$

其中： α 为尺度因子； β 为移动因子。尺度因子决定小波基的频率，而移动因子决定该频率下小波基的时域性质， β 与 α 的选取有关。类似于傅里叶变换的思想，任何一个满足可容性条件的函数，均可以使用如式 (3) 的这样一组小波基表示。

针对某风电信号 $f(t)$ ，选择一种母小波，如式(3)构建一组小波基，本文选择 sym7 为母小波。那么该风电信号可以被小波基分解得到基坐标，如式 (4)。

$$w_f(\beta, \alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) m_{\alpha,\beta}(t) dt \quad (4)$$

经小波 n 层分解后得到每一层的概貌信号和细节信号，每一层的信号长度与尺度因子及所在层数有关，分解后导致信号长度变短，所以，采用重构算法对小波分解后的信号进行单支重构如式 (5) 恢复每层信号的长度，整体重构算法如式 (6)。

$$f_{\alpha}(t) = \frac{1}{\alpha^2} \int_{-\infty}^{\infty} w_f(\beta, \alpha) m_{\alpha,\beta}(t) d\beta \quad (5)$$

$$f(t) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\alpha^2} w_f(\beta, \alpha) m_{\alpha,\beta}(t) d\beta d\alpha \quad (6)$$

在 Matlab 中使用小波分析工具箱对混合储能分量信号进行分解并重构得到符合电池和超级电容器特性的功率信号。

对混合储能分量进行频谱分析，如图 4 所示。可以看出 1.0×10^{-3} Hz 以上的部分幅值很小，并根据电池和超级电容器的性能选定 1.0×10^{-3} Hz 为电池和超级电容器的分界频率。

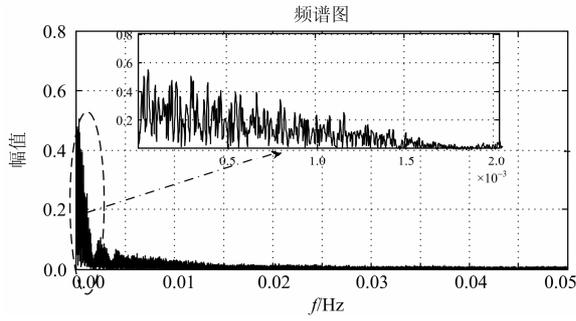


图 4 储能分量频谱图

Fig. 4 Spectrogram of the hybrid energy storage's part

根据小波分解的方法选择尺度因子 $\alpha=2$, 故 $\log_2(0.05/10^{-3})=5.64$, 选择 6 层分解混合储能信号, 将分解后概貌信号也就是小波分解的第一层分给电池, 细节信号分给超级电容器, 如图 5 所示, 采用 sym7 小波基的 6 层分解效果图。

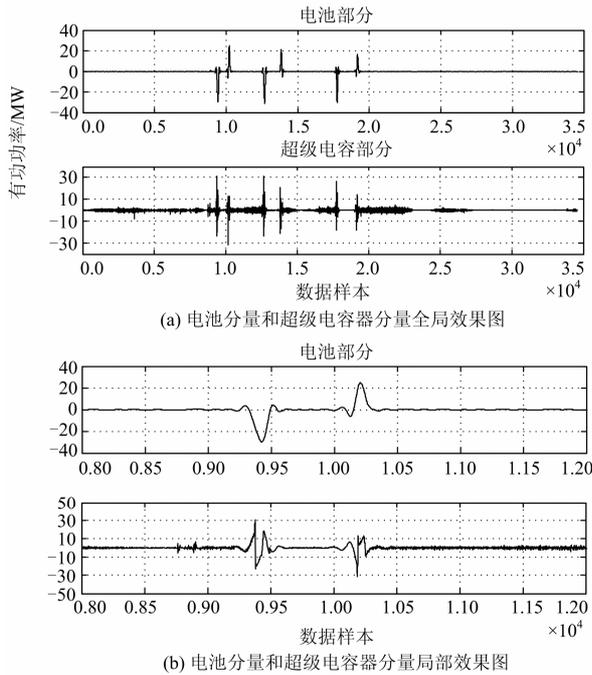


图 5 电池分量和超级电容器分量

Fig. 5 Battery and super-capacitor's component

从图 5 中可以看出电池分量以较低功率长时间持续充放电, 而超级电容器部分以较高功率短时快速充放电, 分解效果符合电池和超级电容器参数特性, 说明小波分解可以较好的分解混合储能系统的高低频部分。

3 不同储能系统的容量配置

3.1 配置混合储能系统功率和理想容量

对由 sym7 小波 6 层分解后的电池分量和超级

电容器分量, 进行数理统计分析, 并拟合各自的概率密度曲线和累积概率分布曲线, 如图 6 所示。

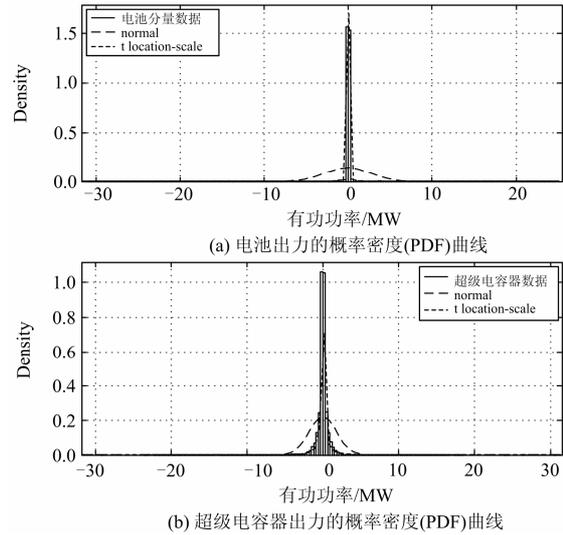


图 6 电池和超级电容器分量 PDF 曲线

Fig. 6 PDF of the battery and super-capacitor component

从图 6 可以看出, 对比正态分布和 t location-scale 分布, t location-scale 分布能更好地描述电池和超级电容器充放电功率的分布情况。以 (σ, ν, μ) 为参数的 t location-scale 分布, t_{inv} 为 t 分布的分位数函数, 置信水平为 $1-\alpha$ 下的置信区间 $[-\sigma t_{inv}(1-\alpha/2, \nu) + \mu, \sigma t_{inv}(1-\alpha/2, \nu) + \mu]$, 如表 1 所示。

表 1 不同置信水平下的电池、超级电容器功率

		MW				
		置信水平				
		85%	90%	95%	98%	99%
电池		0.07	0.165	0.67	4.24	17.14
超级电容器		0.98	1.794	5.06	19.97	56.23

表 1 可以看出电池、超级电容器功率随着置信水平的增加, 开始变化缓慢, 在置信水平高于 90% 后快速增加。说明波动量小于某个功率值的概率非常大, 而大于这个功率值的概率却很小。以这个功率点为额定功率, 可以满足大部分的平抑要求。由于电池分量大部分时间保持不动作状态, 所以应该选择较大的置信水平, 才能满足要求。

首先忽略储能容量限制, 不同的置信区间下电池、超级电容器功率平抑波动需要的储能容量算法如下:

$$SOE = SOE_0 + \int_a^b P(t)dt \quad (7)$$

$$P(t) = \begin{cases} \min(P_{\text{额}}(t), P_{\text{需求}}(t)), & P_{\text{需求}}(t) > 0 \\ \max(P_{\text{额}}(t), P_{\text{需求}}(t)), & P_{\text{需求}}(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中： SOE 表示容量状态； $P(t)$ 表示时段 $[a, b]$ 内的电池实际充放电功率； SOE_0 表示容量的起始状态。根据式 (8) 得到电池出力情况后，对电池出力情况做数值积分得到电池 SOE 状态。

假设电池初始状态在 $0.5 \cdot SOE$ ，并且电池不能过充过放。根据电池性能指标可知，电池的 SOE 范围是上限为 $0.8 \cdot SOE$ ，下限为 $0.2 \cdot SOE$ 。所以电池容量计算式为

$$Q = \max(|\max(SOE_i)|, |\min(SOE_i)|) / ((0.8 - 0.2) / 2) \quad (9)$$

超级电容器容量计算类似上式，根据其性能指标可以知道超级电容器 SOE 范围在 $0.05 \sim 0.95$ 倍容量以内。根据以上公式，计算不同置信区间下的电池、超级电容器的容量，如表 2 所示。

表 2 不同置信水平下电池、超级电容器的最大容量

Table 2 Maximum capacity of the battery and super-capacitor component at the different confidence levels

	置信水平				
	85%	90%	95%	98%	99%
电池	0.07	0.18	0.70	5.07	24.5
超级电容器	0.47	1.11	1.48	2.42	2.66

表 2 可以看出随着置信区间（功率）增大，电池、超级电容器容量也增大，在某个点之后会快速增大。主要是因为某个置信水平后的功率快速增大，电池、超级电容器分量中少量的大功率波动点也将被储能吸收，直接导致储能容量的骤增。

3.2 配置混合储能系统容量

实际中，储能单元的容量没有办法满足假设条件。在选定置信区间，确定电池、超级电容器的功率后，根据实际情况，找出适合的容量，完成容量配置。基于波动范围、波动量绝对值的均值、方差及波动点数比平滑效果进行评价。波动范围反映储能分量对电网的影响，波动量绝对值的均值和方差分别反映波动量的总体情况和程度，波动点数比反映对电网冲击时间占整体时间的比重。具体公式如下。

波动范围为

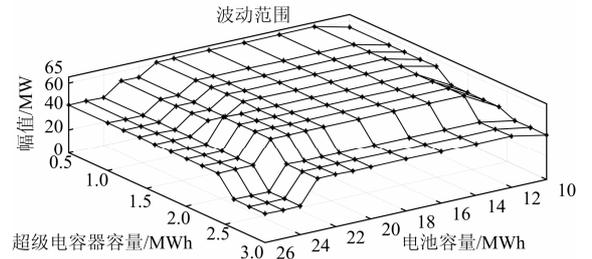
$$P_{\text{scope}} = (\max(P_{\text{ess}}(t)) - \min(P_{\text{ess}}(t))) \quad (10)$$

波动量绝对值的均值和方差为

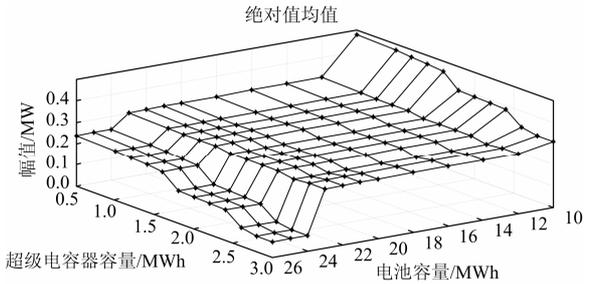
$$\begin{cases} \text{Aver} = \sum_{t=1}^N |P_{\text{ess}}(t)| / N \\ \text{Var} = \sum_{t=1}^N (|P_{\text{ess}}(t)| - \text{Aver})^2 / N \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{波动点数比: } \lambda = \sum_{t=1}^N \text{sgn}(|P_{\text{ess}}(t)|) \quad (12)$$

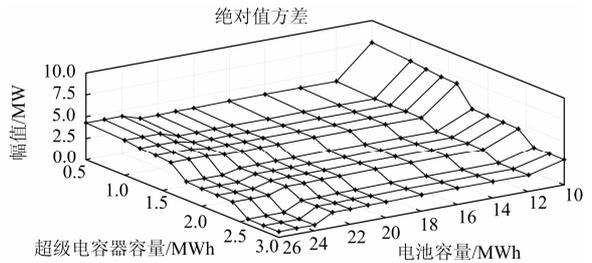
其中： $P_{\text{ess}}(t)$ 表示波动量在 t 时刻的值； P_{scope} 表示波动范围； Aver 、 Var 表示波动量绝对值的均值和方差； N 表示样本容量； λ 表示波动点数。比较不同功率和容量的储能系统的平抑波动量的效果，如图 7、图 8 所示。



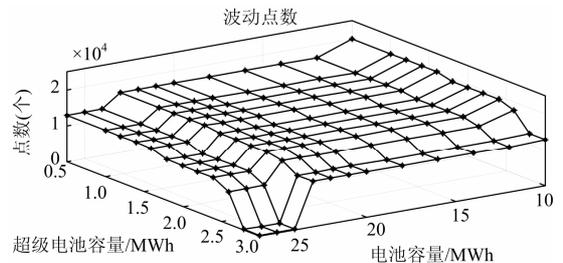
(a) 不同容量下的波动范围



(b) 不同容量下的波动量绝对值均值



(c) 不同容量下的波动量绝对值方差



(d) 不同容量下的波动点数

图 7 电池、超级电容器均置信水平为 99%、98%，不同容量下平抑波动情况

Fig. 7 Effect of stabilizing fluctuations at different capacities in the 99% confidence level battery and the 98% confidence level super-capacitor system

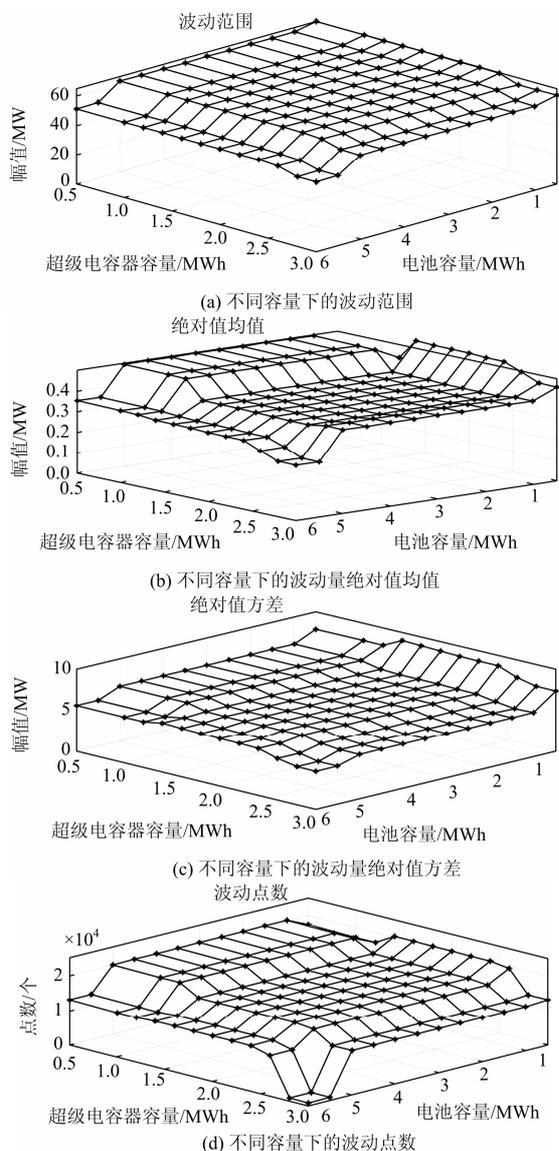


图8 表示电池、超级电容器均置信水平为 98%、99%，不同容量下平抑波动情况

Fig. 8 Effect of stabilizing fluctuations at different capacities in the 98% confidence level battery and the 99% confidence level super-capacitor system

通过图 7 可以看出, 电池、超级电容器在一定置信水平下: 1) 随着超级电容器和电池容量增加波动范围、绝对值均值、方差及波动点数均有降低, 但均是变化缓慢至某一对容量值后快速降低, 而后保持不变; 2) 超级电容器和电池容量共同决定指标大小, 各自的影响强弱没有明显的分别; 3) 超级电容器和电池的容量并非越大越好, 到达某个配比后, 由超级电容器和电池的功率影响指标大小, 容量的影响基本为零。

由于篇幅所限不能列出所有置信水平下不同容

量的指标情况, 但通过图 7、图 8 及表 1、表 2 可以看出, 1) 置信水平和容量共同影响平抑波动的效果, 为达到某种平抑效果可以通过组合不同的功率和容量实现; 2) 最大波动范围受电池部分置信水平和容量影响较大, 波动点数受超级电容器置信水平和容量的影响较大, 绝对值均值、方差受电池和超级电容器功率容量的共同影响; 3) 在电池置信水平较低的情况下, 电池容量的不同对最大波动范围、整体的绝对值均值及方差影响不大, 主要是置信水平下对功率的影响, 而在较高的置信水平下, 上述指标主要受电池容量限制; 4) 某种指标下, 不同的组合的功率、容量差别较大, 需要从经济性角度评价储能系统容量配置的效果。

4 结论

针对该研究选取的典型百 MW 级风电场历时 4 天, 采样时间 10 s 的数据, 进行数理统计分析, 可以得出:

1) 风电功率波动主要分布在 $0 \sim 1.0 \times 10^{-3}$ Hz 频段, 以 1.0×10^{-3} Hz 为电池和超级电容器出力的分界频率较合适。

2) 小波分解可以简单有效的分解混合储能系统分量, 得到其高、低频分量。以 1.0×10^{-3} Hz 为分界频率, 宜采用六层小波变换对之进行分离, 得出功率型储能系统与能量型储能系统的动作指令。

3) 电池、超级电容器的充放电功率分布均满足 t location-scale 分布。根据样本数据的拟合曲线, 很好的配置混合储能系统的额定功率。

4) 在同样的指标下, 可以配置不同的电池和超级电容器功率与容量方案。从图 7、图 8 可以看出选择电池为 17.14 MW/24.51 MWh (功率/容量), 超级电容器为 19.97 MW/2.42 MWh 的组合方案, 平抑波动效果较好。

参考文献

[1] 孙涛, 王伟胜, 戴慧珠, 等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62-67.
SUN Tao, WANG Wei-sheng, DAI Hui-zhu, et al. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 62-67.

[2] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
CHI Yong-ning. Studies on the stability issues about large scale wind farm grid integration[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006.

[3] 傅旭, 李海伟, 李冰寒. 大规模风电场并网对电网的影响及对策综述[J]. 陕西电力, 2010(1): 53-57.

FU Xu, LI Hai-wei, LI Bing-han. Review on influences of large-scale wind farms power systems and countermeasure[J]. Shaanxi Electric Power, 2010(1): 53-57.

[4] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 1-4.

ZHANG Bu-han, ZENG Jie, MAO Cheng-xiong, et al. Application of series-parallel energy storage system with super-capacitor in wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 1-4.

[5] 姚勇, 朱桂萍, 刘秀成. 电池储能系统在改善微电网电能质量中的应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 85-89.

YAO Yong, ZHU Gui-ping, LIU Xiu-cheng. Improvement of power quality of micro-grids by battery energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 85-89.

[6] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.

YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.

[7] ASAO T, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Evaluation method of power rating and energy capacity of superconducting magnetic energy storage system for output smoothing control of wind farm[C] // Electrical Machines, 2008, ICEM 2008, 18th International Conference on, IEEE, 2008: 1-6.

[8] 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 Gen-de, CHEN Zi-nian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.

[9] 张国驹, 陈瑶, 唐西胜, 等. 基于波动特性参数的多类型储能协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 271-276.

ZHANG Guo-ju, CHEN Yao, TANG Xi-sheng, et al. Research on coordinated control strategy of multi-type energy storage based on fluctuation characteristic parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 271-276.

[10] 于芑, 周玮, 孙辉, 等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[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]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 127-133.

[11] 李璇, 周青峰, 戴吾蛟, 等. 经验模式分解与小波分解在形变分析应用中的对比分析[J]. 工程勘探, 2009, 37(7): 67-71.

LI Xuan, ZHOU Qing-feng, DAI Wu-jiao, et al. Comparison of empirical mode decomposition and wavelet decomposition in deformation analysis[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(7): 67-71.

[12] 李剑楠, 乔颖, 鲁宗相, 等. 大规模风电多尺度出力波动性的统计建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 40(19): 7-13.

LI Jian-nan, QIAO Ying, LU Zong-xiang, et al. Research on statistical modeling of large-scale wind farms output fluctuations in different special and temporal scales[J]. Power System Protection and Control, 2010, 40(19): 7-13.

[13] GAO Wen-zhong, WANG Xiao-yu, MULJADI E. Probability-based method for power capacity specification of wind energy storage systems[C] // Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on, IEEE, 2011: 2050-2055.

[14] 杨琚, 张建成, 周阳, 等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.

YANG Ju, ZHANG Jian-cheng, ZHOU Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 38-44.

[15] 文艺, 张步涵, 毛承雄, 等. 风电场中储能系统的功率和容量优化配置[J]. 湖北工业大学学报, 2012, 27(1): 18-21.

WEN Yi, ZHANG Bu-han, MAO Cheng-xiong, et al. The power and capacity's optimized allocation of energy storage device in wind farm[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2012, 27(1): 18-21.

[16] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-127.

SHI Lin, LUO Yi, TU Guang-yu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-127.

收稿日期: 2013-07-30; 修回日期: 2013-10-10

作者简介:

马速良(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源发电及其控制技术、数据挖掘、智能算法研究; E-mail: 352104881@qq.com

蒋小平(1966-), 男, 副教授, 主要从事自动控制理论及应用;

马会萌(1985-), 女, 工程师, 从事能量存储于转换技术研究。