

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

韩晓娟，陈跃燕，张浩，陈芳

(华北电力大学控制与计算机学院，北京市昌平区102206)

摘要：在充分分析风电功率幅频特性的基础上，提出基于小波包分解的混合储能技术平抑风电场输出功率波动的方法。采用小波包分解理论对风电场输出功率信号进行多尺度分解，得到反映并网功率信号的低频信号和接入储能系统的高频信号；根据不同类型储能系统的特点，将高频信号再次进行划分，分别选择与其频率范围适应的电池和超级电容器储能设备，建立了基于混合储能系统的风电场输出功率平滑控制模型；与单类型电池储能系统功率平滑效果进行了对比。仿真实例表明：该方法能够有效地抑制风电场输出功率的波动，提高储能电池的使用寿命，具有一定的工程应用价值。

0引言

由于气候与地理环境等因素的影响，风能具有出力间歇性与随机性^[1]的特点，风电场输出功率直接并入电网将对电力系统的稳定性、电网频率、电能质量、发电计划和调度等方面产生较大的影响^[2-5]，从而严重制约了风能的利用及风电的大规模发展。因此，如何有效平抑风电场输出功率波动问题具有重要的现实意义。

针对这一问题，国内外学者做出了积极的研究，主要集中在两种方式。第1种是通过调节桨距角^[6]和改变发电机转速^[7]来调整风机输出功率以实现单台风力发电机组输出功率平滑的目的，然而风电场各机组之间的输出功率有可能互补，同时也有可能相互叠加，从而导致风电场总的输出功率存在较大波动，在一定程度上降低了风能的有效利用率^[8]。另一种则是考虑风电场的整体输出功率，在风电场出口并网母线位置配备储能系统^[9-10]，利用储能系统的吞吐能力起到平抑风电功率波动的作用，即当风电出力骤升时，储能装置吸收功率，反之则输出功率。

储能系统多种多样，各自具有不同的特点，而且在功率平滑方面也得到了不同程度的应用。文献[11]提出基于低通滤波原理平抑风电功率中指定频率分量为目标，研究了储能系统用于平抑风电功率波动控制的有效性，但该方法缺少对储能系统的约束条件，尤其是低通滤波器的时间常数选择将直接影响风电功率的平滑效果及储能容量的配置。文献[12]提出了基于风电场功率短期预测技术的全钒电池储能系统运行控制策略以平抑风电场输出功率的波动，但该方法增加了电池的循环次数，不利于电池的使用寿命。文献[13]在计及电池寿命的基础上，采用基于电池荷电状态的可变滤波时间常数的储能控制方法，但该方法没有考虑当前风电功率波动的强弱作为滤波时间常数的约束条件之一，间接地影响了电池的充放电次数。文献[14-16]利用蓄电池和超级电容器混合储能系统平抑风电场输出功率的波动，按照相应准则实现电池和超级电容器之间的功率分配，在有效抑制风电场输出功率波动的同时延长电池的使用寿命。

综上所述，将不同类型储能系统进行组合以达到优势互补、缺陷互补的混合储能系统能够更加有效地平抑风电场输出功率的波动。本文在分析风电场输出功率幅频特性的基础上，提出一种基于小波包分解理论的混合储能系统平抑风电场输出功率波动的方法。首先对风电场输出功率信号进行多尺度小波包分解，得到反映并网功率信号的低频信号和接入储能系统的高频信号；然后选择蓄电池和超级电容器作为储能设备，根据其各自的不同特点^[17]，将高频信号再次进行划分，分别选择与其频率范围适应的储能方式以组成混合储能系统进行风电场输出功率的平滑。最后，通过现场采集到的风电功率数据验证了该方法的有效性，为储能电池和超级电容器两种储能介质间能量分配提供了一定的理论依据。

1 基于小波包分解理论的混合储能功率平滑方法

1.1 风电功率信号的频谱分析

采用某99MW风电场2010年全年实际输出功率数据，采样时间为1min，直接调用Matlab工具箱中的FFT函数对该数据进行快速傅里叶变换得到幅频特性曲线，如图1所示。

由图1可知，风电场输出功率的能量主要集中在低频部分($0\sim 10^{-4}$

Hz)，其高频部分能量较低。这与风速特性相吻合，高频变化的风速幅值很小，而低频变化风速幅值较大，因此将低频功率信号作为风电并网的期望功率值，高频功率信号则由储能系统进行平滑，即可在满足并网功率平滑的同时，又兼顾对储能系统性能的影响。因此，本文采用小波包分解方法将风电场输出功率信号分解成高频信号和低频信号。

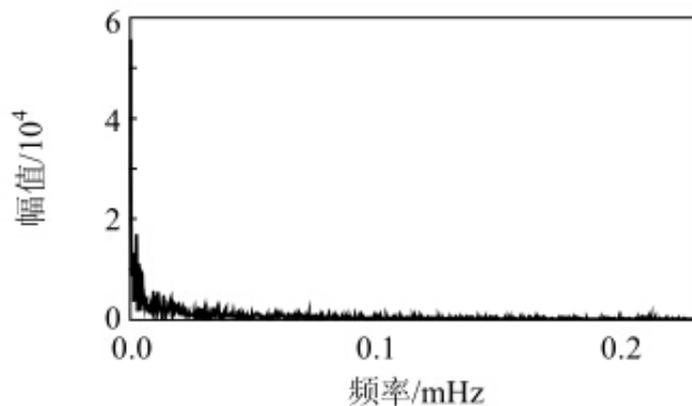


图 1 某 99 MW 风电场全年功率幅频特性曲线

Fig. 1 Curve of amplitude frequency characteristics of wind power in the whole year at a 99 MW wind farm

1.2 风电功率信号的小波包分解

小波分析非常适用于对非平稳突变信号的处理，而对于渐变信号，小波包具有更广泛的应用价值。小波包分解是在小波变换的基础上产生并发展起来的。对比来说，小波包分解是一种更精细的分解方法，它不仅对信号的低频部分进行分解，还对高频部分也进行了分解，有助于了解到信号更加细节处的特征，从而提高了时频分辨率。三层小波包分解的示意图如图2所示，图中S是原始风电功率信号。

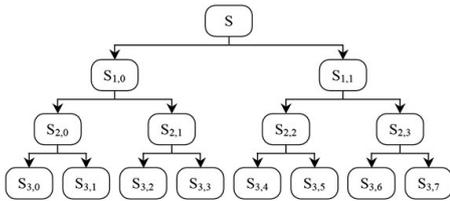


图 2 小波包分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavelet packet decomposition

由图 2 可知，小波包分解是在对小波分解所得到的低频部分进行进一步分解而得到的，其分解结果是将原信号映射到 2^j (j 为分解的层数) 个小波包子空间中，在结构上形成一个完整的二叉树^[18]。

分解算法：

$$\begin{cases} d_i^{j,2n} = \sum_k h_{k-2i} d_k^{j-1,n} \\ d_i^{j,2n+1} = \sum_k g_{k-2i} d_k^{j-1,n} \end{cases} \quad (1)$$

重构算法：

$$d_i^{j-1,n} = \sum_k (\tilde{h}_{i-2k} d_k^{j,2n} + \tilde{g}_{i-2k} d_k^{j,2n+1}) \quad (2)$$

式中： $d_i^{j,2n}$ 、 $d_i^{j,2n+1}$ 分别为小波包分解系数； h_{k-2i} 、 g_{k-2i} 分别为小波包分解的低通、高通滤波器组； \tilde{h}_{i-2k} 、 \tilde{g}_{i-2k} 分别为小波包重构的低通、高通滤波器组。

采用 DB9 小波对风电输出功率信号进行 8 层分解，得到其低频部分 $S_{8,0}$ 和高频部分 $S_{8,i}$ (其中 $i=1,2,\dots,255$) 的功率曲线，其小波包分解的风电功率曲线如图 3 所示。由于小波包分解后的信号共有 2^8 个，不便于全部表示，故选取其中部分最高频信号及次高频信号来分析其特性。

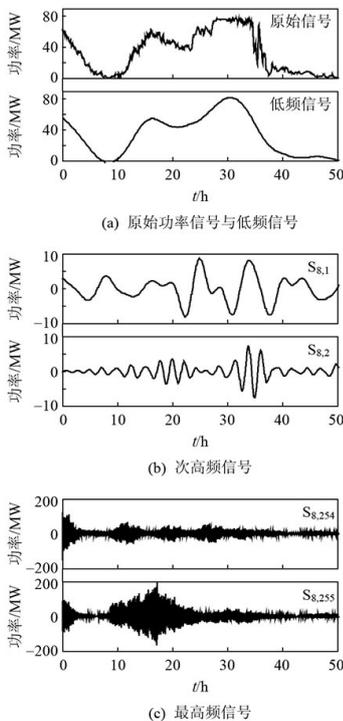


图 3 小波包分解的风电功率曲线

Fig. 3 Curves of wind power based on wavelet packet decomposition

由图3可知，低频部分为原始功率曲线的主导部分，其幅值与原始功率信号相近，可以对原始功率信号的概貌进行描述，高频部分则能量较小，且在零值附近上下波动，幅值明显小于低频部分，因此，将低频信号作为并网功率参考值，采用小波包分解滤波方式得到风电功率平滑曲线如图4所示。

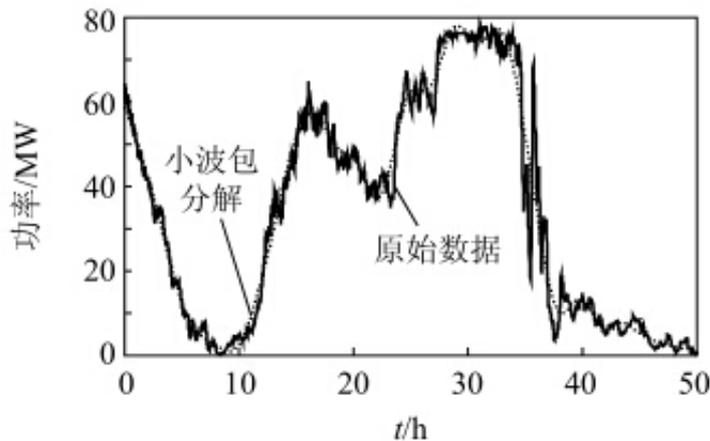


图4 小波包分解滤波后的风电场并网功率曲线

Fig. 4 Curve of wind power grid-connected smoothed by wavelet packet decomposition

由图4可知，经小波包分解滤波后得到的风电功率曲线波动大幅降低，可以快速地跟踪储能系统的输入目标值，获得更平滑的输出功率，不存在滞后现象。由于经小波包分解后接入储能系统的信号仅为高频信号，其幅值小且在零值附近上下波动。但是由图3中次高频和最高频部分可知，虽然其都是围绕零值上下波动的随机信号，但是其幅值大小具有明显差别，数量级差别达到 10^3

。根据高频信号的这一特点及蓄电池的响应速度可知：如果采用单一的蓄电池储能方式吸收其高频部分，不仅无法实现小波包分解功率平衡的需求，而且频繁的充放电动作将会对储能电池的寿命造成很大的影响。因而，对高频信号中次高频及最高频部分分别选用不同的储能方式来平抑风电场输出功率的波动。

1.3 基于混合储能技术的风电场输出功率平滑控制

风电场输出功率信号通过小波包分解得到的低频信号由于其能量高变化慢起主导作用，将之作为期望的并网功率值，而高频信号能量低变化快，则由储能系统进行吸收以达到平滑功率输出的目的。考虑到储能电池具有能量密度高和功率密度、循环使用寿命低等特点，将次高频信号由电池储能系统进行平滑；而超级电容器具有功率密度高、循环寿命高和能量密度低等特点，将未被电池储能系统平滑掉的功率信号及其它高频信号送往超级电容器进行快速滤波处理。根据这一思想，按照文献[19]选择电

池响应时间为1h，其响应频率为 2.78×10^{-4} Hz，与经小波包分解后得到的 $S_{8,1}—S_{8,4}$

次高频信号响应频率几

乎一致，因此选择电池储能系统吸收该段频率

信号；剩余的高频信号 $S_{8,5}—S_{8,255}$

及未被电池吸收部分均由超级电容器吸收，实现风电功率平滑的目的，其功率平滑控制框图如图5所示。

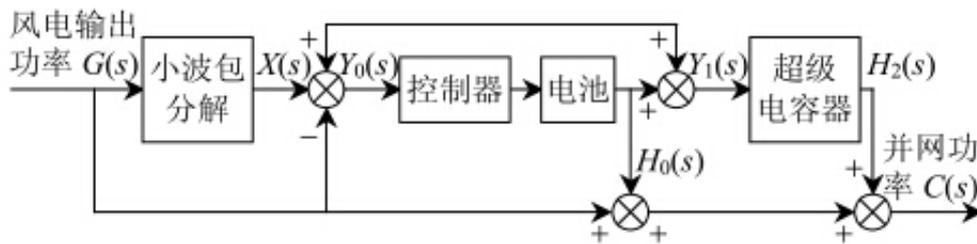


图 5 基于混合储能技术的功率平滑控制框图

Fig. 5 Power smoothing model based on hybrid energy storage technology

由图5可知，当风电场实际有功功率 $G(s)$ 大于小波包分解给出的预期功率 $X(s)$ 时，对电池储能系统和超级电容器发送充电指令；当风电场实际有功功率 $G(s)$ 小于小波包分解给出的预期功率 $X(s)$ 时，对电池储能系统和超级电容器发送放电指令。

在充放电过程中，由于电池惯性大并且响应速度慢，电池的实际输出 $H_0(s)$ 并不完全等于目标值 $Y_0(s)$ ，电池储能系统只对次高频部分进行了吸收，而剩余的最高频部分及未由电池储能系统吸收的部分则由超级电容器完成吸收。当电池输出与超级电容器输出 $H_0(s)+H_1(s)=Y_0(s)$ 时，实际的并网功率 $C(s)$ 等于预期的并网功率 $X(s)$ ，功率平滑过程结束。

2小波包分解在混合储能平抑风电功率波动中的应用

2.1两种储能方式下的功率平滑效果对比

根据1.1节中给出的风电场全年输出功率数据，分别采用单类型电池储能和电池与超级电容混合储能两种储能方式对经小波包分解后的高频信号进行吸收，其功率平滑曲线如图6所示。

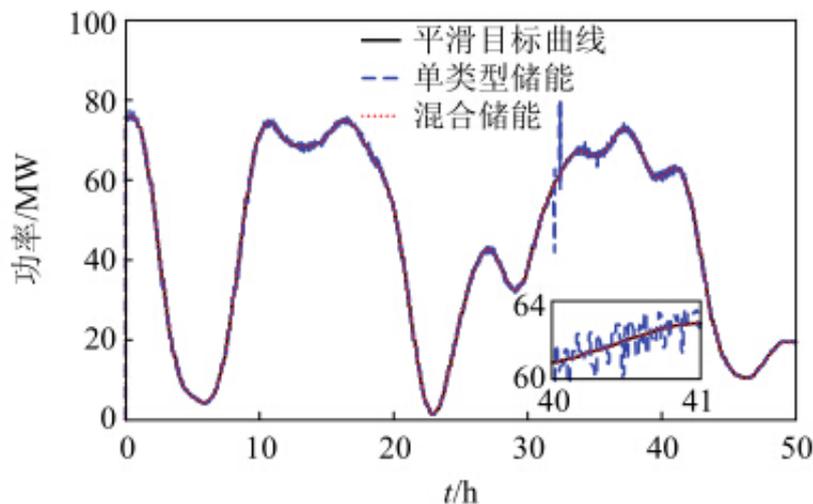


图 6 单类型电池储能与混合储能平滑曲线对比

Fig. 6 Contrast curves smoothed by single type battery storage system and hybrid energy storage system

由图6可以看出，通过混合储能方式对高频信号进行吸收可以得到更加平滑的输出曲线，且对目标功率跟踪较好，曲线几乎重合，而使用单类型电池储能得到的平滑效果则不是很理想，曲线毛刺较多，效果较差(如图6中放大部分)。为了进一步比较单类型电池储能及混合储能的平滑效果，图7给出了在两种储能方式下输出功率与目标功率的误差

曲线。

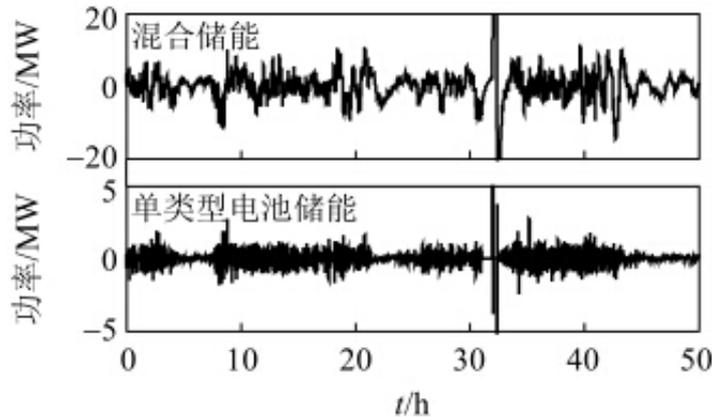


图 7 储能系统输出功率与并网目标功率误差曲线
Fig. 7 Error curve of the energy storage power-output and grid-connected power

由图7可知，在给定相同的目标功率值情况下，经单类型电池储能系统吸收后，其输出功率与目标功率的差值在 ± 5 MW之间波动；而经混合储能系统吸收后，其输出功率与目标功率的差值则在 ± 10 kW之间波动，远远小于单类型电池储能系统。

根据文献[20]给出的储能容量计算公式得到在两种储能方式下50h内所需配置的最大储能容量为21.21MW·h，考虑到电池的使用寿命及20%的裕度，拟配置25MW·h。由上文可知，输入到电池的信号为次高频部分，剩余高频部分输入到超级电容器中，对滤波能量进行频谱分析，得到次高频部分与高频部分的能量比为623:2，依据该能量比配置电池储能系统容量为24.92MW·h，超级电容器容量为0.08MW·h，其储能容量变化曲线如图8所示。

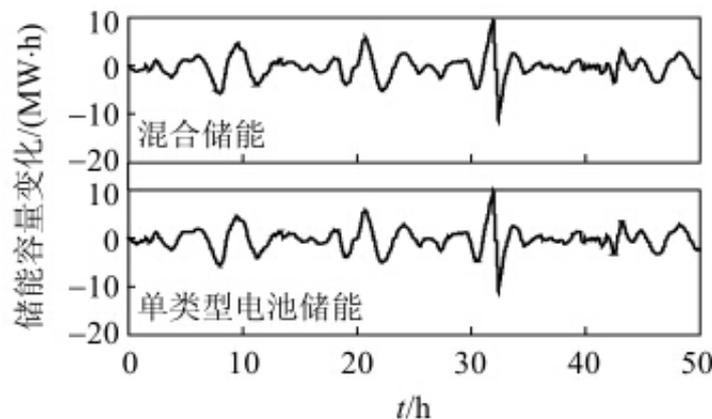


图 8 储能容量变化曲线
Fig. 8 Changing curve of the storage capacity

由图8可知，在对高频信号进行吸收的过程中，单类型电池储能及混合储能的储能容量变化几乎一致，因此在配置相同储能容量的前提下使用混合储能可以实现更加理想的平滑效果。

2.2混合储能系统的荷电状态

储能装置荷电状态(stateofcharge, SOC)指储能装置中剩余电荷量占总容量的比值,是制定储能装置控制策略的重要依据,也是衡量电池是否工作在正常范围内的重要参考值。以储能电池为例, SOC的计算公式^[21]如下:

$$M_{SOC} = \frac{E_b^0 + \int_0^t (\eta_c P_c - \frac{1}{\eta_d P_d}) dt}{E_b^{\max}} \quad (3)$$

式中: E_b^0 为电池初始容量; η_c 、 η_d 为充、放电效率; P_c 、 P_d 为充放电功率; E_b^{\max} 为电池额定容量。

超级电容器与储能电池类似,只是参数的选择有所不同。依据上文给出的数据分别为电池及超级电容器配备相应容量,选取 SOC 初始值为 0.5,仿真得到储能电池和超级电容器的 SOC 曲线如图 9 所示。

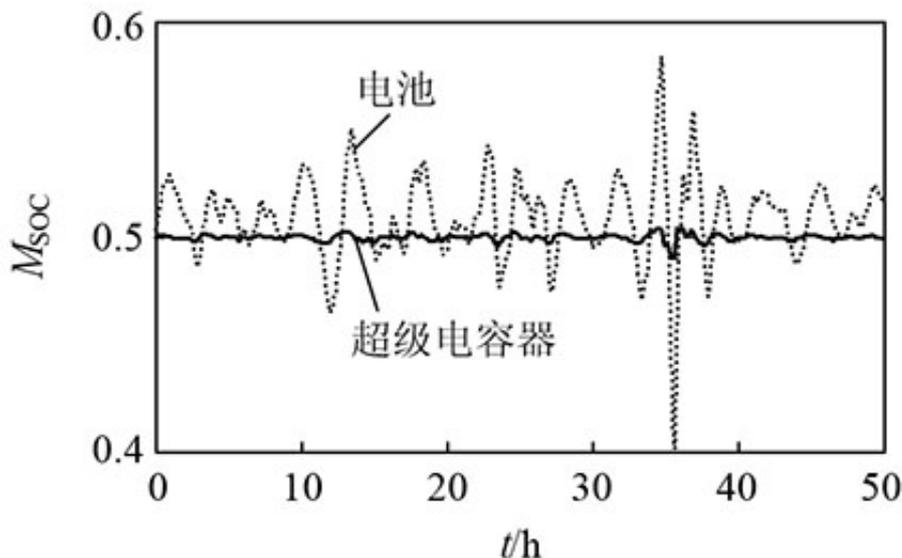


图 9 混合储能系统的 SOC

Fig. 9 SOC of hybrid energy storage system

由图9可知,按照上述容量配置,风电输出功率经小波包分解后,由超级电容器吸收功率波动的高频成分,由电池吸收功率波动的低频成分,通过观察SOC可知,电池以及超级电容器均运行于安全范围内,避免了过充过放。同时,通过超级电容器的SOC可以看出,由于其所吸收成分是在零均值附近上下随机波动的经小波包分解后的最高频成分,其幅值能量小且变化迅速,所以SOC也呈现在零均值附近波动变化的特性。另外,由于超级电容器本身具有快充快放特性,所以快速的充放电变化对其寿命没有影响,而且只需要配置容量较小的超级电容器即可在很大程度上改善储能系统的输出,提高储能电池的使用寿命。

3结论

本文从频域角度分析了风电场输出功率波动特性,提出了基于小波包分解的混合储能平抑风电功率波动方法,针对经小波包分解后高频信号所具有的特征,结合储能电池与超级电容器的各自特点,实现了两种储能方式间的能量分配,更好地平抑风电功率波动对电网造成的影响。与单一类型的电池储能系统进行了比较,本文所提出的方法响应速度快,经过滤波后的输出功率更加平滑、波动率更小,具有一定的优越性。最后对某风电场实测数据进行仿真,验证了该方法的有效性,具有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1]陈波,吴政球.基于约束因子限幅控制的双馈感应发电机有功功率平滑控制[J].中国电机工程学报,2011,31(27):130-137.
- [2]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.
- [3]Naser I S, Garba A, Anaya-Lara O, et al. Impact of wind generation on voltage stability in low-voltage distribution networks[C]//Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference. Glasgow, UK: IEEE, 2009: 1-5.
- [4]Zhou Dongxu, Li Xiaoming. Research on the voltage stability control for wind turbine group based on dynamic reactive power compensation[C]//Processing of Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China: IEEE Power Energy Soc, 2010: 1-5.
- [5]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.
- [6]廖勇,何金波,姚骏,等.基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J].中国电机工程学报,2009,29(18):71-77.
- [7]Senjyu T, Sakamoto R, Urasaki N, et al. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 467-475.
- [8]张坤,毛承雄,谢俊文,等.风电场混合储能系统容量配置的优化设计[J].中国电机工程学报,2012,32(25):79-87.
- [9]管俊,高赐威.储能技术在抑制风电场功率波动方面的研究综述[J].电网与清洁能源,2011,27(4):48-53.
- [10]贾宏新,张宇,王育飞,等.储能技术在风力发电系统中的应用[J].可再生能源,2009,27(6):10-15.
- [11]宇航.利用储能系统平抑风电功率波动的仿真研究[D].吉林:东北电力大学,2010.
- [12]Ran L, Bumby J R, Tavner P J. Use of turbine inertia for power smoothing of wind turbines with a DFIG[C]//Processing of the 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Lake Placid, NY, USA: IEEE, 2004: 106-111.
- [13]张野,郭力,贾宏杰,等.基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J].电力系统自动化,2012,36(6):34-38,62.

[14]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.

[15]Abbey C, Joos G. Super capacitor energy storage for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007(43): 769-76.

[16]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.

[17]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.

[18]高志, 余啸海. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 71-72.

[19]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.

[20]杨水丽, 惠东, 李建林, 等. 适用于风电场的最佳电池容量选取的方法[J]. 电力建设, 2010, 31(9): 1-4.

[21]艾青. 基于混合储能技术的风电场功率控制研究[J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2012, 30(1): 87-90.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/93057.html>