

DOI: 10.7667/PSPC151171

# 基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法

卢芸, 徐骏

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 提出了一种基于小波包分解的风电混合储能容量配置方法。该方法对风电输出功率进行小波包分解, 将其分解为低频部分和高频部分, 采用低频部分作为并网目标功率, 根据蓄电池和超级电容器的互补特性, 分别用其平抑次高频部分和最高频部分。通过高斯逼近法拟合波动功率的概率密度函数, 进而得出混合储能系统的容量。在 Matlab/Simulink 平台上搭建混合储能系统仿真模型。通过风电并网点输出功率的平滑程度以及混合储能系统荷电状态波动范围的分析, 验证了该容量配置的有效性。

**关键词:** 风力发电; 容量配置; 小波包分解; 混合储能系统; 高斯逼近

## Wind power hybrid energy storage capacity configuration based on wavelet packet decomposition

LU Yun, XU Jun

(College of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** This paper sets up a method of hybrid energy storage capacity configuration based on wavelet packet decomposition. Wind power is firstly decomposed into low frequency section and high frequency section by wavelet packet decomposition, and using low frequency section as the target of grid-connected power while high frequency section is divided into medium-high and highest on the base of the complementary property of battery and super-capacitor. Besides, the method of Gaussian approximation is adopted to fit the probability density function so that the capacity configuration of energy storage system can be calculated finally. The hybrid energy storage system simulation model is set up based on Matlab/Simulink. So the effectiveness of the capacity configuration can be verified by the fluctuation range and the state of charge (SOC) of energy storage system.

**Key words:** wind power generation; capacity configuration; wavelet packet decomposition; hybrid storage system; Gaussian approximation

## 0 引言

随着风电大规模接入电网, 风电输出有功功率波动性将严重影响电力系统稳定性以及电能质量。储能系统能够实现电能与其他形式能量的转换, 并灵活、快速、准确地对系统的电能供需平衡进行调节, 提高风电并网的稳定性<sup>[1]</sup>。影响储能系统经济性的主要因素是储能系统的容量配置<sup>[2]</sup>, 因此储能系统容量配置的研究具有重要现实意义。

目前对混合储能系统容量配置的研究主要是以储能系统的某一经济指标作为目标函数, 以储能系统的性能指标及平滑风电波动功率的程度作为约束条件, 通过智能算法寻找最优解。文献[1]以储能容

量最小为目标函数, 以饱和系统稳定域和总体收敛速度为约束条件, 利用内点法求解储能装置的最小容量。文献[3]以储能装置成本最低为目标, 以储能系统功率出力及荷电状态为约束条件, 采用遗传算法求解。文献[4]以混合储能系统成本最低为目标函数, 以储能系统功率平衡及荷电状态为约束条件, 利用黄金分割法和抛物线逼近法求取最优解。文献[5-6]采用统计的方法初步估计了大型风电场储能系统的容量。文献[7]采用比恩法进行分类采样计算波动功率的概率密度, 并计算波动功率的数学期望, 根据蓄电池调节稳态波动功率, 超级电容调节尖峰波动功率的原则计算储能系统的容量。目前综合考虑混合储能控制策略和容量配置的研究较少。

本文以混合储能系统平抑风电输出功率为目的, 对风电输出功率进行小波包分解, 将其分解为

低频部分和高频部分，并根据蓄电池和超级电容器的互补特性，分别用其平抑次高频部分和最高频部分。通过高斯逼近法拟合波动功率的概率密度函数，进而得出混合储能系统的容量。在 Matlab/Simulink 平台上搭建混合储能系统控制仿真模型，采用小波包分解算法替代了传统的低通滤波器，通过对风电并网功率的平滑程度和储能系统荷电状态的波动范围的分析，验证了该容量配置的有效性。

## 1 基于混合储能系统的风力发电系统

风电储能系统的结构如图 1 所示。其中风电并网(PCC点)的输出功率为风机输出功率  $P_{DFIG}$  与混合储能系统输出功率之和。本文采用蓄电池、超级电容器混合储能系统平抑风电功率波动，由于蓄电池具有能量密度大、功率密度小的特点，可采用其平抑幅值大、频率低的波动功率，避免了蓄电池频繁充放电降低其使用寿命；利用超级电容器功率密度大、循环寿命长的特点，用其平抑幅值小、频率高的波动功率<sup>[8-11]</sup>。混合储能系统输出功率为蓄电池储能输出功率  $P_b$  与超级电容器储能输出功率  $P_{SC}$  之和。

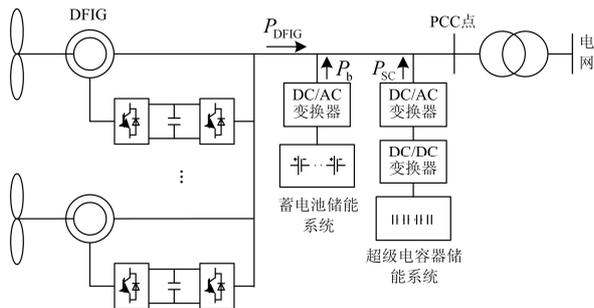


图 1 风电混和储能系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of wind power hybrid energy storage system

## 2 基于小波包分解的混合储能系统容量计算

### 2.1 小波包分解基本原理

风功率的分解本质上是一个滤波的过程，目前广泛采用一阶低通滤波器，但其时间滞后比较大，对于波动性强的风功率信号不敏感。由小波变换衍生出的小波包分解理论，具有良好的时频局部化特性，对突变信号的分解显示出更好的效果<sup>[12]</sup>。

针对某一风电信号  $P(t)$ ，对其进行  $n$  层小波包分解，分解为  $2^n$  个子信号。设小波包分解的低通、高通滤波系数分别为  $a_{k-2l}$ 、 $b_{k-2l}$ ， $n$  层小波包分解算法为

$$\begin{cases} P_{n,0}^n(t) = \sum_k a_{k-2l} P_{n-1,0}(t) \\ P_{n,1}^n(t) = \sum_k b_{k-2l} P_{n-1,0}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{n,0}^n(t)$  和  $P_{n,1}^n(t)$  分别为第  $n$  层小波包分解的低频系数与高频系数； $P_{n-1,0}(t)$  为第  $n-1$  层小波包分解的重构信号。设  $h_{l-2k}$ 、 $g_{l-2k}$  分别为小波包重构的低通、高通滤波系数， $n$  层小波包重构算法为

$$\begin{cases} P_{n,0}(t) = \sum_k [h_{l-2k} P_{n,0}^{2n}(t) + g_{l-2k} P_{n,0}^{2n+1}(t)] \\ P_{n,1}(t) = \sum_k [h_{l-2k} P_{n,1}^{2n}(t) + g_{l-2k} P_{n,1}^{2n+1}(t)] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_{n,0}(t)$  和  $P_{n,1}(t)$  分别为第  $n$  层小波包重构的低频与高频信号； $P_{n,0}^{2n}(t)$  与  $P_{n,0}^{2n+1}(t)$  为低频重构系数； $P_{n,1}^{2n}(t)$  与  $P_{n,1}^{2n+1}(t)$  为高频重构系数。

### 2.2 混合储能系统容量配置的构建

本文采用小波包分解法将风电输出功率分解为低频部分和高频部分，将低频部分作为风电并网期望值，将高频部分划分为次高频部分和最高频部分，将次高频部分作为蓄电池储能输出功率期望值，最高频部分作为超级电容器储能输出功率期望值。

小波包分解层数  $n$  是小波包分解算法的一个重要参数，如果分解层数  $n$  过多，低频部分曲线过于平滑，使得储能系统出力增大，容量过大；如果分解层数  $n$  过少，低频部分达不到风电并网标准。本文主要考虑 1 min 时间尺度风电并网标准，根据风电场接入电力系统技术规定，装机容量为 30~150 MW 的风电场，1 min 有功功率变化限值不能超过装机容量的 1/10。

确定小波包分解层数后，根据高频部分频率特性确定次高频与最高频分量的分界频率为  $f_m$ ，依次将  $(n,1) \cdots (n, 2^n - 1)$  的频率特性与分界频率对比确定频率分界点  $m$ 。求得储能系统输出功率期望值如式(3)所示。

$$\begin{cases} P_{b\_ref} = \sum_{k=1}^m P_{n,k}(t) \\ P_{SC\_ref} = \sum_{k=m+1}^{2^n-1} P_{n,k}(t) \end{cases} \quad (3)$$

根据混合储能输出功率求得混合储能系统容量，容量配置流程图如图 2 所示。

文献[7]通过功率的概率密度函数求解储能输出功率幅值均值，进而求得储能系统容量，取得了良好的平抑效果。文献[13]采用 t location-scale 分布拟合储能系统输出功率概率密度函数。本文通过多次实验，最终确定高斯逼近法拟合储能系统输出功率概率密度函数。

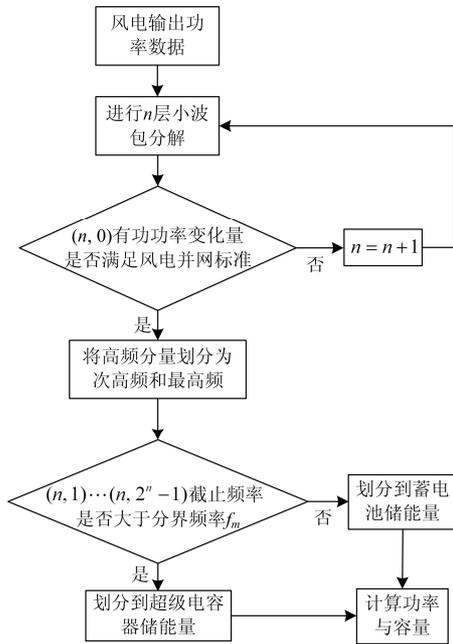


图 2 基于小波包分解的储能系统容量配置流程图

Fig. 2 Diagram of energy storage system capacity configuration based on wavelet packet decomposition

### 3 基于小波包分解的混合储能系统控制策略

风力发电系统输出功率信号经小波包分解后得到低频信号, 将其作为并网功率参考值  $P_{ref}$ 。根据蓄电池和超级电容器的互补特性分别用其平抑次高频和最高频信号, 将次高频信号作为蓄电池储能的参考功率  $P_{b\_ref}$ , 将最高频信号作为超级电容器储能的参考功率  $P_{SC\_ref}$ 。

由于蓄电池充放电时电压波动性小, 本文采用蓄电池储能经过逆变器与交流电网连接的方式, 逆变器控制策略采用功率外环电流内环的控制策略, 无功功率参考值设为 0, 控制原理如图 3 所示。

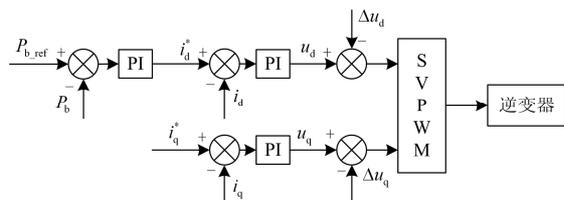


图 3 储能系统逆变器控制原理图

Fig. 3 Control diagram of inverter of energy storage system

超级电容器端电压较小, 一般为 1~3 V, 且超级电容器充放电电压波动性大, 因此本文采用超级电容器经过双向 DC/DC 变换器和逆变器与交流电网相连, 该连接方式能够稳定直流电压<sup>[14-16]</sup>。超级电容器储能系统采用与蓄电池储能系统相同的逆变

器控制策略, 仅将有功功率参考值  $P_{b\_ref}$  改为  $P_{SC\_ref}$ 。双向 DC/DC 变换器采用电压外环电流内环控制策略, 维持逆变器直流电压恒定, 控制原理如图 4 所示。

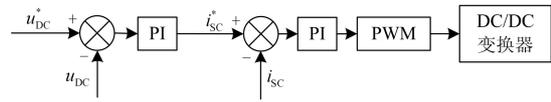


图 4 超级电容器双向 DC/DC 变换器控制原理图

Fig. 4 Control diagram of bi-directional DC-DC converter of super-capacitor

### 4 算例分析

本文风电场由 15 台单机容量为 2 MW 的双馈式风力发电机组成, 并网电压为 690 V, 系统频率为 50 Hz, 采样时间为 1 min/次, 总采样数据点为 500。风电输出功率曲线如图 5 所示。

本文采用 db9 小波将风电输出功率信号作 4 层分解, 设低频信号的频率界限为 0.2 Hz, 将低频重构信号(4, 0)作为风电并网期望值, 如图 6 所示。

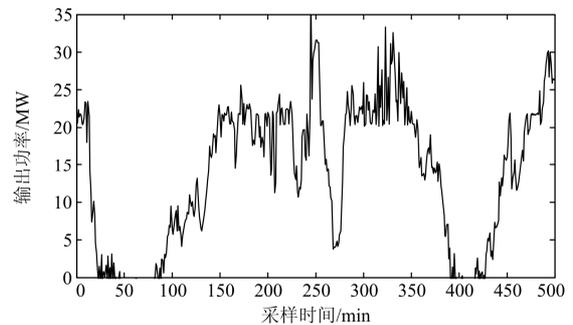


图 5 风电输出功率曲线

Fig. 5 Curve of wind output power

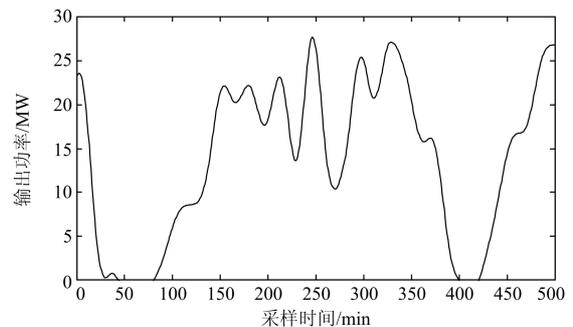


图 6 低频重构信号曲线

Fig. 6 Curve of low frequency reconstructed signal

由图可知, 低频信号变化的趋势与原始信号相近, 但其波动幅度很小, 曲线较为平滑。将高频重构信号分解为次高频信号和最高频信号, 本文将重

构信号的(4, 1)~(4, 3)作为次高频信号, 将(4, 4)~(4, 15)作为最高频信号, 次高频信号和最高频信号的对比图如图7所示。由图7可知, 次高频信号波动频率较小, 幅值较大, 最高频信号波动频率较高, 幅值较小, 充分利用了蓄电池、超级电容器互补特性。

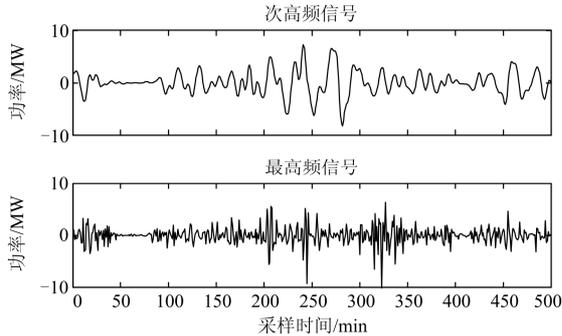


图7 风电输出功率小波包分解图

Fig. 7 Diagram of wind output power by wavelet packet

本文采用 Matlab 工具箱中的高斯逼近法拟合蓄电池和超级电容器输出功率的概率密度函数, 蓄电池采用5阶高斯逼近, 拟合度为0.993, 其概率密度曲线与函数对比如图8所示, 其中实线代表概率密度曲线, 虚线代表拟合后的概率密度函数曲线。超级电容器采用5阶高斯逼近, 拟合度为0.998, 其概率密度曲线与函数对比如图9所示, 其中实线代表概率密度曲线, 虚线代表拟合后概率密度函数曲线。蓄电池和超级电容器的概率密度函数分布系数如表1、表2所示。

由图8和图9可知蓄电池输出功率为[0, 9.347], 超级电容器输出功率范围为[0, 8.521], 根据输出功率的概率密度函数可求得蓄电池和超级电容器输出功率幅值均值分别为1.6 MW和0.78 MW, 最终求得蓄电池和超级电容器储能系统容量分别为6.66 MWh和3.2 MWh。

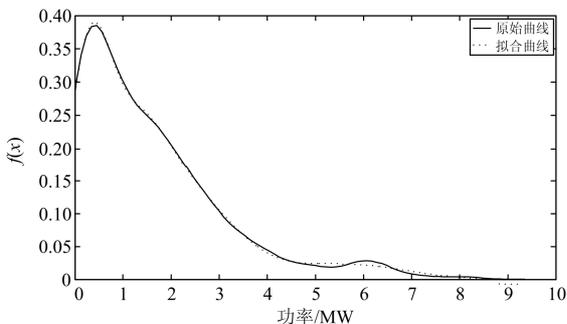


图8 蓄电池概率密度曲线与概率密度函数对比图

Fig. 8 Contrast of probability density curve and probability density function of battery

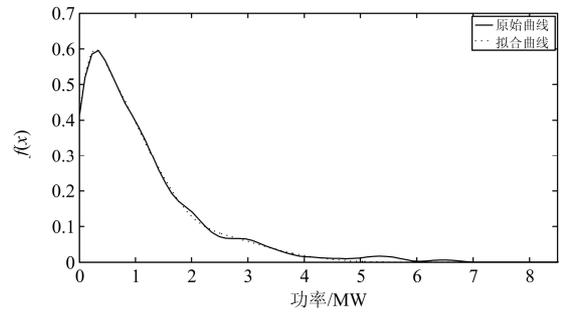


图9 超级电容器概率密度曲线与概率密度函数对比图

Fig. 9 Contrast of probability density curve and probability density function of super-capacitor

表1 蓄电池概率密度函数系数

Table 1 Probability density function coefficient of battery

	$a_k$	$b_k$	$c_k$
$k=1$	0.173 2	1.159	0.98
$k=2$	0	0.938 3	0.000 213 7
$k=3$	0.282 1	0.278	0.613 2
$k=4$	0.126	2.283	1.451
$k=5$	0.023 21	5.623	1.731

表2 超级电容器概率密度函数系数

Table 2 Probability density function coefficient of super-capacitor

	$a_k$	$b_k$	$c_k$
$k=1$	-0.004 284	0.316 9	0.186 2
$k=2$	0.241 9	0.532 4	0.506 4
$k=3$	0.333 2	0.155 8	0.355 8
$k=4$	0.233 5	1.021	0.762 7
$k=5$	0.083 49	2.006	1.634

在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建风电混合储能系统模型, 系统结构图如图1所示。蓄电池储能采用 M12-3.3 型铅酸蓄电池, 并采用1575节串联的连接方式, 其额定容量约为6.72 MWh; 超级电容器储能采用UCPY3000F型超级电容, 并采用150个串联的连接方式, 其额定容量为3 MWh。混合储能系统并联在双馈式风力发电机的并网侧。经GB/T19963-2011风电场接入电力系统技术规定, 装机容量30~150 MW 以下的风电场1 min的有功功率变化最大限值不能超过装机容量的1/10, 因此本文设置功率变化限值为3 MW。图10为风电输出功率经小波包分解的低频部分功率最大变化量与功率变化限值的对比图。由图10可知, 低频部分的最大功率变化范围为0~1.288 MW, 低于功率变化限值, 满足风电并网标准, 证明了采用小波包分解低频部分作为风电并网期望值的可行性。图11为混合储能经小波包分解与经低通滤波分解PCC点输出功率的对比图。由图11可知, 小波包分解风电混合储能输出功率波动范围为0~27 MW, 曲线对小波包分解低频信号的跟踪性能好, 曲线平滑。而低通滤波分

解风电混合储能输出功率波动范围为 0~24 MW, 其输出功率曲线有明显的滞后性, 启动时输出功率波动大会造成储能系统荷电状态变化大, 影响储能系统使用寿命, 且输出功率曲线平滑性较差。综上所述, 小波包分解性能优于低通滤波。图 12 为蓄电池、超级电容器所吸收和补偿的有功功率, 可以看到超级电容补偿了风电波动功率中高频部分, 而蓄电池则补偿了次高频部分。因此由超级电容器作为辅助设备的储能系统, 使蓄电池的充放电周期变大, 其充放电次数也将明显减少, 从而延长了蓄电池的寿命。

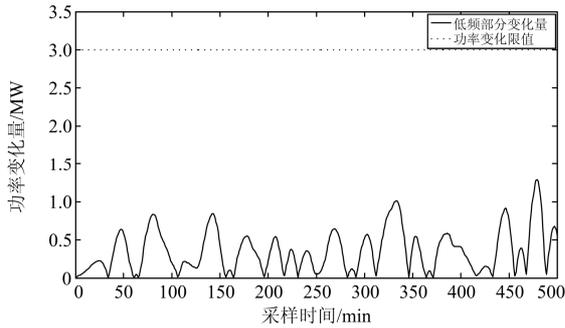


图 10 功率最大变化量对比图

Fig. 10 Contrast diagram of maximum variable power

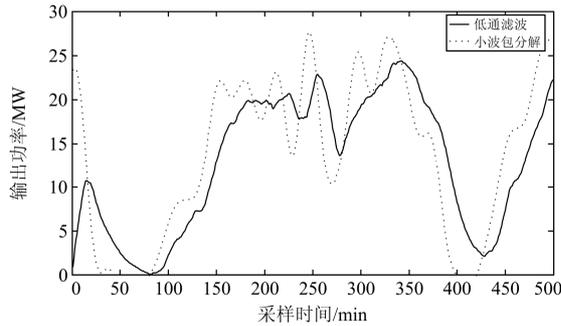


图 11 小波包分解混合储能与低通滤波混合储能风电输出功率对比图

Fig. 11 Contrast of wavelet packet hybrid energy storage system and low-pass filter hybrid energy storage system wind output power

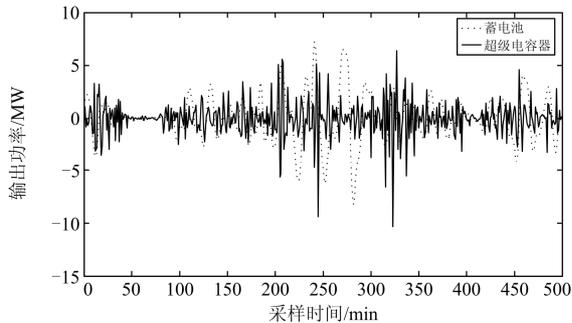


图 12 蓄电池和超级电容器输出功率对比图

Fig. 12 Contrast of battery and super-capacitor power

混合储能系统荷电状态(SOC)是衡量储能装置是否工作于正常状态的重要依据之一, 也是衡量储能容量大小的重要参考因素。由于本文混合储能系统采用串联的连接方式, 在忽略串联均压的情况下, 所有储能电池的荷电状态都必须处于安全范围内。将蓄电池储能系统 SOC 初值设为 50%, 超级电容器 SOC 初值设为 65%, 图 13 为蓄电池与超级电容器 SOC 变化曲线。其中虚线为蓄电池 SOC, 实线为超级电容器 SOC。

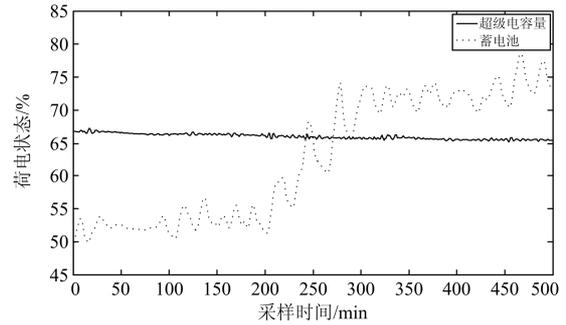


图 13 混合储能系统荷电状态曲线

Fig. 13 Curve of SOC of hybrid energy storage system

由图 13 可知, 蓄电池 SOC 波动范围为 50%~78%, 超级电容器 SOC 波动范围为 65%~67%, 由此可知采用上述容量配置, 蓄电池与超级电容器的 SOC 均处于安全范围内, 避免了过充过放。且蓄电池的 SOC 变化幅度大, 变化频率小, 提高了其使用寿命, 而超级电容器的 SOC 的变化幅度小, 变化频率大, 充分发挥了其快速充放电的特性, 提高了混合储能系统的稳定性, 进一步证明了该容量配置的有效性。

## 5 结论

本文采用小波包分解将风电输出功率分解为低频部分和高频部分, 将低频部分作为并网期望值, 高频部分由混合储能系统平抑。将高频部分通过低通滤波器分解为次高频部分和最高频部分, 根据蓄电池、超级电容器的互补特性分别用其平抑次高频和最高频波动。通过高斯逼近法拟合波动功率的概率密度函数, 计算混合储能系统容量。搭建了风电混合储能系统仿真模型, 通过分析并网功率以及混合储能系统的荷电状态, 证明了容量配置算法的有效性。

## 参考文献

[1] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于饱和控制理论的储能装置容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 32-39.

- Determination methodology for energy storage capacity based on saturation control theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 32-39.
- [2] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场复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.  
ZHANG Kun, MAO Chengxiong, XIE Junwen, et al. Optimal design of hybrid storage system capacity for wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 79-87.
- [3] 谢石骁, 杨莉, 李丽娜. 基于机会约束规划的混合储能优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 79-84.  
XIE Shixiao, YANG Li, LI Lina. A chance constrained programming based optimal configuration method of hybrid energy storage system[J]. Power system Technology, 2012, 36(5): 79-84.
- [4] 李成, 杨秀, 张美霞, 等. 基于成本分析的超级电容器和蓄电池混合储能优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 20-24.  
LI Cheng, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Optimal configuration scheme for hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries based on cost analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 20-24.
- [5] 梁亮, 李建林, 惠东. 大型风电场用储能装置容量的优化配置[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 930-936.  
LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong. Optimization configuration for capacity of energy storage system in large-scale wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 930-936.
- [6] 韩涛, 卢继平, 乔梁, 等. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 170-173.  
HAN Tao, LU Jiping, QIAO Liang, et al. Optimized scheme of energy-storage capacity for grid-connected large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 170-173.
- [7] 卢芸, 赵永来. 基于风电场混合储能系统容量配置的研究[C] // 第十届沈阳科学学术年会论文集, 沈阳, 2013.  
LU Yun, ZHAO Yonglai. Research on capacity configuration of hybrid energy storage system in wind farm[C] // The Tenth Shenyang Science Annual Conference Proceedings, Shenyang, 2013.
- [8] NISHAD M, KASHEM M, SARATH P. Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 944-953.
- [9] 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 fluctuate wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [10] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高, 等. 超级电容-蓄电池混和储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.  
SANG Bingyu, TAO Yibin, ZHENG Gao, et al. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [11] WEE K W, CHOI S S, VILATHGAMUWA D M. Design of a least-cost battery-supercapacitor energy storage system for realizing dispatchable wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(3): 786-796.
- [12] ZHANG S, CHEN J, SHE L H. Use of optimal wavelet packet decomposition for the long-term prediction of variable-bit-rate video traffic[J]. IET Journals & Magazines, 2010, 4(11): 1277-1287.
- [13] 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, 2014, 42(8): 108-114.  
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, 2014, 42(8): 108-114.
- [14] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.  
ZHANG Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Design of a hybrid energy storage system on leveling off fluctuating power outputs of intermittent sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 24-28.
- [15] 鲍雪娜, 张建成, 徐明, 等. 基于混和储能的并网光伏电站有功分级控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 115-121.  
BAO Xuena, ZHANG Jiancheng, XU Ming, et al. Active power hierarchical control strategy of interconnected Photovoltaic station based on hybrid energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 115-121.
- [16] 卢芸, 赵永来. 基于模糊神经网络风电混合储能系统优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 113-118.  
LU Yun, ZHAO Yonglai. Optimal control in a wind power hybrid energy storage system based on fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 113-118.

收稿日期: 2015-07-08; 修回日期: 2015-08-28

作者简介:

卢芸(1963-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行、优化与控制;

徐骏(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、优化与控制。E-mail: 332006485@qq.com

(编辑 葛艳娜)