

DOI: 10.7667/PSPC161831

考虑抗扰性能的风电混合储能系统协调控制策略研究

吴冠男¹, 张明理², 徐建源¹, 史喆², 张晓天²

(1. 沈阳工业大学, 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 国网辽宁电力有限公司经济技术研究院, 规划评审中心, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 为风电场增加储能系统是平抑风电输出功率波动的有效措施之一。首先, 通过对风电场出力进行频率分析, 提出采用超级电容搭配蓄电池的混合储能方案平抑风电出力波动中的主要分量, 并给出了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。然后, 在 RTLAB 平台上搭建风电混合储能系统仿真模型。通过分析控制系统在扰动作用下的阶跃响应, 验证了模糊滑模控制器的高抗扰性能。最后, 仿真计算了采用模糊滑模控制策略前后储能设备的出力情况和荷电状态, 进一步验证了该控制策略对风电出力平抑和提高系统抗扰性能的作用。

关键词: 风电; 小波包分解; 混合储能; 模糊滑模; 功率平滑

Study on coordination control of wind power hybrid energy storage system in consideration of anti-disturbance performance

WU Guannan¹, ZHANG Mingli², XU Jianyuan¹, SHI Zhe², ZHANG Xiaotian²

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Programming and Appraisal Center, State Grid Liaoning Economic Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Using energy storage system is an effective measure to compensate wind power fluctuation. First, this paper proposes to use hybrid storage energy system to compensate main components according to frequency content analysis of wind power fluctuation. This system consists of storage battery and super-capacitor. And then, it sets up fuzzy sliding control strategy of hybrid energy storage system. The fuzzy controller can eliminate chattering of sliding controller. According to step response of control system under disturbance, it verifies the high immunity performance of fuzzy sliding controller by the wind power hybrid energy storage system simulation model on RTLAB. At last, the simulation calculation shows the output and state of charge (SOC) of energy storage system, which verifies the effectiveness of the hybrid energy storage system controller on compensating the fluctuation and improving disturbance rejection.

Key words: wind power; wavelet packet decomposition; hybrid energy storage; fuzzy sliding; power smooth

0 引言

随着风电大规模接入电网, 风电输出有功功率的波动性将严重影响电网的安全稳定、可靠性及电能质量^[1-2]。储能技术对功率的四象限调节, 可有效削弱风电波动对电网的负面影响^[3]。单一储能设备的研究已较为成熟, 利用多类型储能介质的互补特性组成混合储能系统成为近几年的研究热点^[4-5]。

文献[6]采用有源并联式混合储能系统, 以蓄电池和超级电容联合的储能方式平抑风电场并网潮流扰动, 对风电波动功率进行实时平抑。文献[7]将蓄电池和超级电容混合储能系统运用于光伏发电

系统中, 提高光伏发电效率。文献[8]采用超级电容器和磷酸铁锂电池组成混合储能系统, 再利用指数平滑法实时更新光伏电站整体出力参考值, 实现光伏电站的分级控制。文献[9]提出了一种基于荷电状态分级优化的风电平抑方法, 采用优化控制层和协调控制层实现超级电容器和蓄电池设备荷电状态的协调控制。文献[10]提出了基于蓄电池和超级电容器的混合储能系统两层结构能量管理方案, 有效实现了对中央管理即调度中心指令服从和调节本地需求的双目标优化。以上文献均针对储能系统控制策略进行研究, 储能控制系统的抗干扰性能是衡量控制系统稳定性的重要因素之一, 而相关研究较少。

由于风功率中 1 Hz 以上部分会被风机惯性吸收, 所以本文研究对象为风功率中 1 Hz 以下部分。本文以平抑风电出力波动为目标, 通过对风电输出功率进行小波包分解, 将其分为超低频(0~0.02 Hz)、次低频(0.02~0.2 Hz)和低频分量(0.2~1 Hz)三个部分, 参考《GB/T19963 风电场接入电力系统技术规定》将超低频分量作为风电并网期望值, 提出了采用蓄电池和超级电容器混合储能系统配合模糊滑模控制器对次低频和低频分量进行平抑的控制方法。通过在 RTLAB 平台上搭建的风电混合储能系统仿真模型, 分析了模糊滑模控制器的抗扰性, 并对比计算了采用本文所提控制方法前后风电场出力的稳定性和储能设备荷电状态, 验证了该控制方法对风电出力平抑和提高系统抗扰性能的作用。

1 含混合储能接入的双馈型风电系统

1.1 系统结构

以双馈型风电场并网点低压侧接入混合储能系统的风电系统结构如图 1 所示。该系统由 n 台双馈型风力发电机组成, 混合储能系统拓扑结构采用分布式结构, 更有利于风电场的扩容。超级电容器储能系统与逆变器之间加装双向 DC/DC 升压变换器, 有效减少超级电容器串联个数, 节约经济成本, 双向 DC/DC 升压变换器拓扑结构如图 2 所示, 图中 V_1 和 V_2 为 IGBT, VD_1 和 VD_2 为反向二极管, C 为稳压二极管, L 为缓冲储能电感。

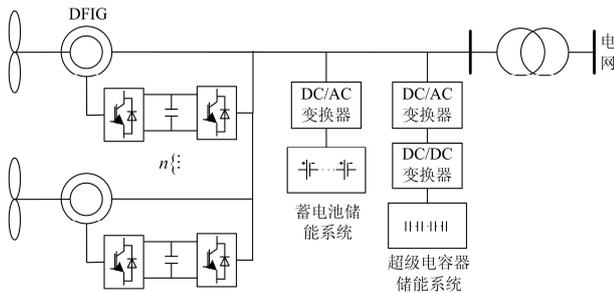


图 1 基于混合储能的双馈风力发电系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of double-fed wind power system based on hybrid energy system

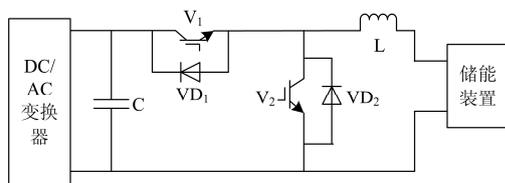


图 2 双向 DC/DC 升压变换器结构图

Fig. 2 Structure diagram of bi-directional DC/DC boost converter

1.2 风电出力波动指标

风电出力波动对电力系统运行调度的负面影响程度主要取决于其最大变化量, 风电出力波动的最大变化量为采样时间 t_0 内, 风电出力最大值与最小值的差值, 其表达式为

$$\Delta P(t) = \max_{t \rightarrow t+t_0} [P(t)] - \min_{t \rightarrow t+t_0} [P(t)] \quad (1)$$

式中: $\Delta P(t)$ 为时间 $[t, t+t_0]$ 内有功功率最大变化量; $\max_{t \rightarrow t+t_0} [P(t)]$ 为有功功率输出最大值; $\min_{t \rightarrow t+t_0} [P(t)]$ 为有功功率输出最小值。

本文主要考虑风电输出功率 1 min 时间尺度下的波动指标。

1.3 混合储能系统控制策略

混合储能系统用于吸收/补充风机实际输出功率 P_G 与并网功率目标值 P_{ref} 的差值。本文将风电输出功率经小波包分解后的超低频分量作为并网功率目标值, 蓄电池具有能量密度大、功率密度小的特点, 用其平抑次低频分量; 超级电容器具有功率密度大、循环寿命长的特点, 用其平抑低频分量^[11-12]。系统控制框图如图 3 所示。

2 混合储能系统控制器的设计

2.1 小波包分解控制器设计

风电功率的分解实际上是一个滤波的过程, 传统滤波器对于波动性强的信号变化不敏感, 造成滤波后信号失真, 而小波变换适用于对非平稳突变信号的分析^[13]。小波包分解对信号的次低频部分和低频部分都进行分解, 能对信号进行精细的时频局部化分析。第一层小波包分解算法为^[13]

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

式中: a_{k-2l} 和 b_{k-2l} 分别为小波包分解的低通、高通滤波系数; $P_{1,0}^n(t)$ 为第一层分解的次低频系数; $P_{1,1}^n(t)$ 为第一层分解的低频系数。由次低频系数和低频系数求得次低频分量和低频分量的重构, 其计算公式为^[13]

$$\begin{cases} P_{1,0}(t) = \sum_k [h_{l-2k} P_{1,0}^{2n}(t) + g_{l-2k} P_{1,0}^{2n+1}(t)] \\ P_{1,1}(t) = \sum_k [h_{l-2k} P_{1,1}^{2n}(t) + g_{l-2k} P_{1,1}^{2n+1}(t)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{1,0}(t)$ 和 $P_{1,1}(t)$ 分别为重构后的次低频分量和低频分量; h_{l-2k} 和 g_{l-2k} 分别为小波包重构的低通滤波系数和高通滤波系数。以此类推, 设进行 n 层小波包分解后的风电输出功率超低频分量为 P_{ref} , 次低频分量为 P_0^* , 低频分量为 P_{SC}^* , 其数学表达式为

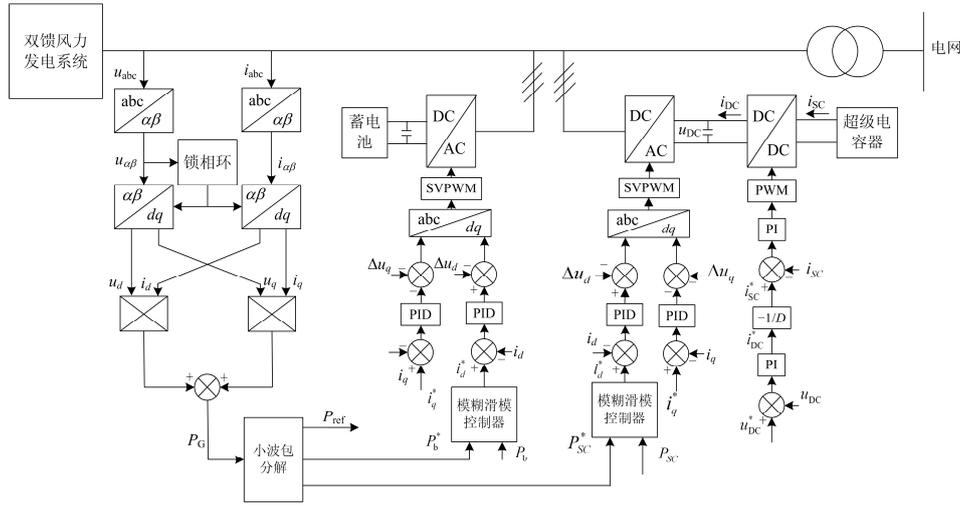


图3 混合储能系统控制框图

Fig. 3 Diagram of hybrid energy control system

$$\begin{cases} P_{ref} = P_{n,0}(t) \\ P_b^* = \sum_{k=1}^m P_{n,k}(t) \\ P_{sc}^* = \sum_{k=m+1}^{2^n-1} P_{n,k}(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$de(t) = [e(t) - e(t-1)]/T_s \quad (6)$$

式中， T_s 为储能系统采样时间。

$$s(t) = c \times e(t) + de(t) \quad (7)$$

$$ds(t) = [s(t) - s(t-1)]/T_s \quad (8)$$

式中， m 为次低频与低频分量的分界点。

2.2 模糊滑模控制器设计

模糊控制不依赖于被控对象的精确数学模型，并能克服非线性因素的影响，对被调节对象的参数具有较强的鲁棒性^[14]。但是模糊控制器参数需经过反复试凑才能确定，不能进行稳定和综合性分析。滑模变结构控制是一种解决非线性控制问题的鲁棒控制方法，主要用于处理建模的不精确性^[14]。但变结构控制系统由于开关切换和系统故障等非理想因素的影响，使滑动模态容易产生高频抖振^[15]。基于模糊控制和滑模控制优缺点以及相关性，本文将二者组合成模糊滑模控制器应用到混合储能系统中。模糊滑模控制器框图如图4所示。

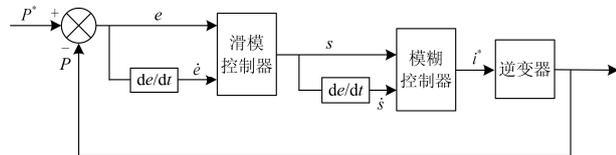


图4 模糊滑模控制器框图

Fig. 4 Diagram of fuzzy sliding controller

图中： P^* 为储能系统输出功率目标值； P 为储能系统实际输出功率。滑模控制器的输入分别为功率误差值以及误差值的变化率，其计算公式为

$$e(t) = P^*(t) - P(t) \quad (5)$$

式中， c 为正常数。

本文采用两输入模糊控制器，通过模糊控制规律直接设计电流环的目标值 i^* ，模糊控制器的输入为切换函数以及它的变化率，输出为电流变化量 Δi ，最后采用比例切换函数控制方法求解电流环目标值 i^* ，其计算公式为

$$i^* = (\alpha \times |e| + \beta \times \dot{e}) \text{sgn}(s) + \Delta i \quad (9)$$

式中， α 和 β 为大于零的常数。

本文定义的模糊集为

$$s = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

$$\dot{s} = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

$$\Delta i = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

定义的论域为 $[-3, 3]$ ，模糊变量采用三角形隶属函数和高斯型隶属函数。隶属函数如图5和图6所示。

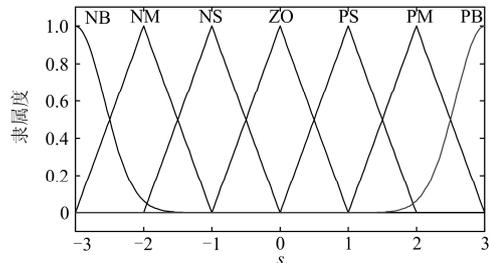


图5 切换函数的隶属度函数

Fig. 5 Degree of membership function of switching function

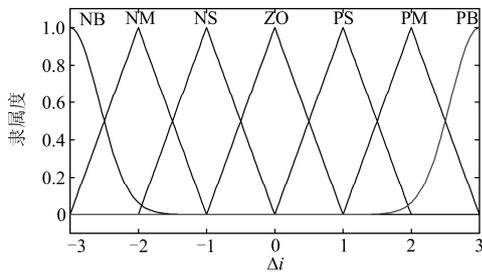


图 6 Δi 的隶属度函数

Fig. 6 Degree of membership function of Δi

模糊控制器的控制策略如下:

- (1) 当 s 和 \dot{s} 都为正大时, 没有达到滑模系统的稳定点, 需要控制输入一个极大值 Δi , 使 $s\dot{s}$ 快速减小;
- (2) 当 s 和 \dot{s} 异号时, 满足 $s\dot{s} < 0$ 的充要条件, 不需要调节控制量, 使控制量 Δi 输出为零;
- (3) 当 s 和 \dot{s} 都为负大时, $s\dot{s}$ 为正大, 需要调节控制量为极小, 使得 $s\dot{s}$ 快速减小。

输出函数的控制规则如表 1 所示。

表 1 输出量 Δi 控制规则表

Table 1 Control rule of output Δi

$\dot{s} \backslash s$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

3 算例分析

3.1 模糊滑模控制器验证

通过对比模糊滑模控制器与常规 PID 调节器单位阶跃响应, 并在 0.5 s 时施加一个扰动信号, 其响应曲线如图 7 所示, 可知模糊滑模控制系统具有较小的超调量, 系统受到扰动后恢复稳定的速度较快, 抗干扰性能优于常规 PID 控制系统。

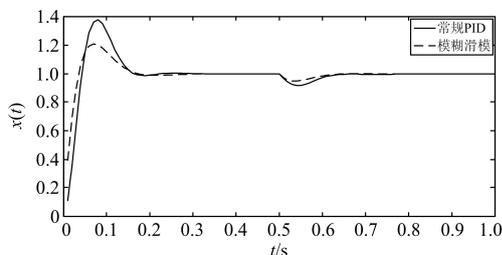


图 7 模糊滑模与 PID 系统阶跃响应对比曲线

Fig. 7 Contrast of step response of fuzzy sliding and PID system

3.2 风电混合储能系统验证

为了简化风力发电系统的复杂度, 本文采用 15 台容量为 2 MW 的双馈式风力发电机等效风力发电系统, 仿真系统采样时间 T_s 为 10^{-5} s。变流器直流侧额定电压为 1200 V, 变流器直流侧电容为 0.01 F, 风机并网电压为 690 V, 系统频率为 50 Hz。储能设备参数如表 2 所示。

表 2 储能设备参数

Table 2 Performance of energy storage device

设备名称	参考型号	结构	容量
蓄电池	M12-3.3 型	1600 节串联	6.83 MWh
超级电容器	UCPY3000F 型	140 个串联	2.8 MWh

功率开关器件 IGBT 频率为 2700 Hz, 超级电容器储能系统双向 DC/DC 变换器的升压电感为 5 mH, 升压电容为 0.1 F。风电运行时间为 500 min, 混合储能平抑风电输出功率波动考虑 1 min 评价指标。风电输出功率曲线如图 8 所示。

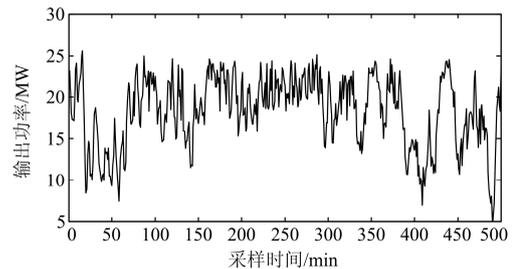


图 8 风电输出功率曲线

Fig. 8 Curve of wind output power

本文采用 db9 型小波包对风电场出力进行 5 层分解, 分解结果如图 9 所示。由于风电 1 Hz 以上的频率波动会被风机的惯性吸收, 因此本文只考虑 1 Hz 以下的频率波动。通过频谱分析, 选取 (5, 0) 为超低频分量, 超低频分量的频率范围为 0~0.02 Hz; (5, 1)~(5, 3) 为次高频分量, 次低频分量的频率范围为 0.02~0.2 Hz; (5, 4)~(5, 31) 为低频分量, 低频分量的频率范围为 0.2~1 Hz。由图 9 可知, 超低频分量曲线较为平滑, 因此将其作为风电并网功率目标值, 根据蓄电池和超级电容器的互补特性, 将次低频分量和低频分量分别作为蓄电池和超级电容器的充放电目标功率 P_b^* 和 P_{sc}^* 。次低频分量的幅值范围为 -9~9 MW, 低频分量的幅值范围为 -5.9~5.9 MW。

风电输出功率经混合储能系统补偿后的并网点功率与不加混合储能时并网点功率的对比如图 10 所示。依据 GB/T 19963—2011 标准, 本文设置风电出力波动限值为 3 MW。对比混合储能系统接入前后风电并网点输出功率对比混合储能系统接入前后

风电并网点输出功率如图 11 所示,可知经混合储能系统补偿后风电并网点功率最大变化量为 0~1.3 MW, 在满足风电并网标准的基础上有效平滑了风电并网功率,提高了风能利用效率。图 12 为蓄电池、超级电容器充放电过程所吸收和补偿的风电出力, 由图可见, 超级电容和蓄电池分别实现了前文所述小波包分解得到的风电出力波动低频和次低频部分的平抑功能。而且鉴于超级电容的快速充放电特性, 很好地避免了蓄电池的频繁充放电, 同时蓄电池的大容量有效降低了设备总体构建成本, 既满足了响应速度需求, 又达到了寿命和成本的经济性。

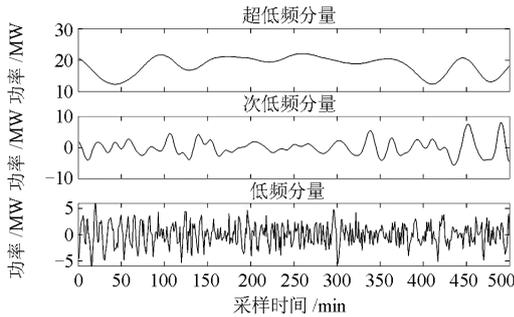


图 9 风电出力小波包分解曲线

Fig. 9 Diagram of wind output power by wavelet packet

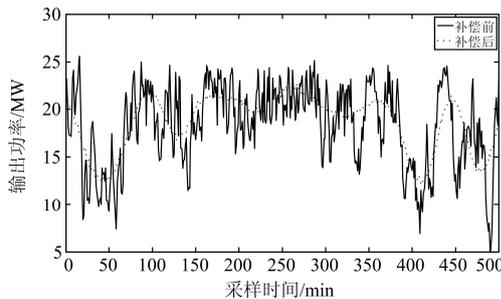


图 10 补偿前后风电并网点输出功率对比图

Fig. 10 Comparison chart of wind grid-connected power whether compensated or not

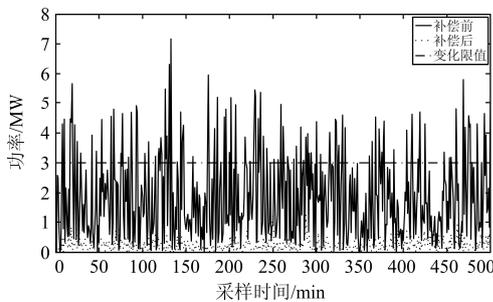


图 11 补偿前后风电并网波动量曲线

Fig. 11 Diagram of wind grid-connected fluctuation whether compensated or not

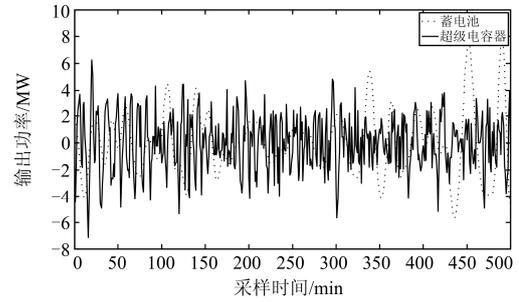


图 12 蓄电池和超级电容器输出功率对比图

Fig. 12 Contrast of battery and super-capacitor power

荷电状态是判断储能装置是否处于过充或过放两种非正常工作状态的重要依据。通过对储能设备的荷电状态监测, 可以清楚地获得设备实时剩余容量情况。为了确保各个储能单元的串联结构下系统安全稳定运行, 需要加强储能单元的均压保护和荷电状态保护。本文重点关注储能设备荷电状态的安全范围, 设置混合储能系统荷电状态初值为 0.5, 在风电出力响应下, 蓄电池与超级电容器荷电状态曲线如图 13 所示, 虚线对应蓄电池, 实线对应超级电容器。

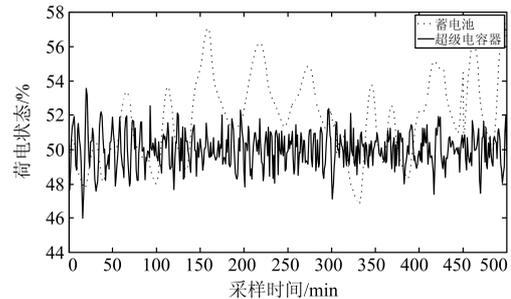


图 13 混合储能系统荷电状态曲线

Fig. 13 Curve of SOC of hybrid energy storage system

由图 13 可知, 蓄电池和超级电容器的荷电状态在响应风电出力下的变化范围分别为 46.5%~57% 和 46%~53.8%, 即同时处于安全范围内, 不存在过充过放现象。与图 12 对比可知, 储能设备荷电状态和功率输出一致, 混合储能系统充分发挥了超级电容器小容量和快充快放的特点, 弥补了单一蓄电池储能充放慢和频繁充放电降低使用寿命的不足, 既提高了储能系统的响应速度, 又提高了系统的抗扰性。

4 结论

本文在分析了风电出力特点的基础上, 选择了蓄电池与超级电容器组合而成的混合储能系统用于平抑双馈风力发电系统输出功率波动, 并针对该系统提出了模糊滑模控制策略。通过分析控制系统的

单位阶跃响应, 验证了控制策略的抗扰性, 通过分析经混合储能系统补偿后的并网点功率以及混合储能系统的荷电状态, 证明了控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 苏咏梅, 王振宇, 易善明. 不同风力发电机组同时并网稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 101-107.
SU Yongmei, WANG Zhenyu, YI Shanming. Stability analysis for wind power integration with different WTGS[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 101-107.
- [2] 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.
- [3] 熊雄, 王江波, 杨仁刚, 等. 微电网中混和储能模糊自适应控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 677-681.
XIONG Xiong, WANG Jiangbo, YANG Rengang, et al. A fuzzy adaptive control strategy for composite energy storage system to cope with output power fluctuation of intermittent energy source in micro-grid[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 677-681.
- [4] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 43(21): 93-98.
ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 43(21): 93-98.
- [5] 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.
- [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 fluctuate wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [7] 王振浩, 刘宇男, 张明江, 等. 基于双向 DC/AC 变换器的混合储能系统动态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 26-32.
WANG Zhenhao, LIU Yunan, ZHANG Mingjiang, et al. Dynamic control strategy for hybrid energy storage system based on bi-directional DC/AC converters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 26-32.
- [8] 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.
- [9] 邹见效, 戴碧蓉, 彭超, 等. 基于荷电状态分级优化的混合储能风电功率平抑方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 1-6.
ZOU Jianxiao, DAI Birong, PENG Chao, et al. Wind power smoothing method using hybrid energy storage system based on SOC hierarchical optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 1-6.
- [10] 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, 25(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, 25(20): 24-28.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 孔屹刚, 王志新. 大型风电机组模糊滑模鲁棒控制器设计与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(14): 136-141.
KONG Yigang, WANG Zhixin. Design and simulation of fuzzy sliding-mode robust controller for large wind generating unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(14): 136-141.
- [15] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

收稿日期: 2016-11-04; 修回日期: 2017-01-06

作者简介:

吴冠男(1986—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为新能源并网技术、交直流系统稳定分析。E-mail: 947988422@qq.com

(编辑 魏小丽)