

超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究

桑丙玉¹, 陶以彬¹, 郑高², 胡金杭¹, 俞斌¹

(1. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350000)

摘要: 以超级电容和蓄电池为例, 分析了功率型和能量型混合储能不同拓扑结构的优缺点, 总结出混合储能拓扑结构选取的一般原则。基于二级低通滤波, 提出根据频谱图确定滤波时间常数的混合储能控制方法, 并考虑电池充放电功率限制, 对滤波输出功率进行修正。用 Matlab 对算法平滑实际光伏出力进行了仿真验证, 结果证明该算法能够满足光伏并网线路功率要求, 并使电池充放电功率不越限。

关键词: 混合储能; 拓扑结构; 低通滤波; 平滑波动; 功率限制

Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage

SANG Bing-yu¹, TAO Yi-bin¹, ZHENG Gao², HU Jin-hang¹, YU Bin¹

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

2. Fujian Electric Power Co., Ltd, Electric Power Research Institute, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Taking the super capacitor and battery for example, this paper analyzes advantages and disadvantages of different topology of the power and energy hybrid energy storage, and sums up the general rules of the selection of hybrid energy storage topology. Based on secondary low pass filter, it proposes filter time constant control method of the hybrid energy storage according to the spectrum diagram, and modifies the filtering output power considering the battery charge and discharge power limitation. The algorithm is simulated and verified using Matlab to smooth the actual photovoltaic power. The results show that this algorithm can meet the requirements of the photovoltaic (PV) grid tie line power and make the battery charge and discharge power not out-of-limit.

Key words: hybrid energy storage; topology structure; low pass filter; smooth fluctuation; power limit

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0001-06

0 引言

能源危机的日趋紧张以及低碳能源的发展需求促进了可再生能源的利用, 应用最多的是风电和光伏。这些发电系统的电能具有间歇性, 对大电网的安全稳定、可靠性及电能质量造成了影响^[1]。在这种情况下, 微网被认为是解决问题的可行措施, 储能在分布式发电与微网中实现电能的存储、削峰填谷、平抑新能源出力波动以及紧急备用等功能, 是分布式发电与微网中必不可少的环节^[2-4]。常见的储能设备可分为功率型和能量型。前者具有功率密度大, 响应速度快等优点, 但能量密度较小, 如超级电容器、超导储能、飞轮储能等; 后者具有能量密度大, 但功率响应较慢不适于频繁充放电, 如蓄电池和抽水蓄能等。由于缺点的限制, 单一的储能设

备将很难满足分布式发电与微网的要求, 因此, 必须结合两种或更多的储能组成混合储能系统, 充分发挥两种储能设备技术上的互补性。

单一储能设备的拓扑结构应用研究已经很成熟^[5-6], 两种以上不同类型混合储能应用的研究还较少。混合储能中, 不同的储能设备通过不同方式连接到公共母线上, 可以交流侧并联或直流侧并联。能量转换装置控制储能系统的功率双向流动及最佳运行, 该装置的能量损耗及成本是限制其应用的因素, 要考虑技术和经济之间的平衡^[7]。因此, 在相同的应用场合下, 可以采用不同拓扑结构的混合储能。

储能系统的控制策略在许多文献中都进行了研究^[8-12], 混合储能的优化配置、协调控制以及能量管理^[13-14]是目前应用中的热点问题, 直接影响储能系统的成本、寿命周期和效率等, 但目前还没有较成熟的方法。

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目 (BE2011011)

本文以超级电容 (SC) 和蓄电池(Battery)组成的混合储能为例, 分析比较了几种拓扑结构的优缺点, 总结出拓扑结构选取的一般原则。在二级低通滤波原理的基础上, 提出了基于电池充放电功率限制的混合储能平滑波动功率控制方法, 并进行了 Matlab 仿真验证, 结果证明该方法可以满足光伏并网功率波动要求, 并使电池充放电功率不越限。

1 混合储能拓扑结构

1.1 交流侧并联

超级电容和蓄电池通过 DC/AC 变流器在交流侧并联。该拓扑中每种储能设备需要单独的双向 DC/AC 变流器, 如图 1 所示, 对网侧的电压、频率变化响应较快, 通过 DC/AC 变流器来实现对参考功率的快速、准确追踪, 可以使各个储能系统对微网的输出功率进行集中控制和调节, 实现微网与大电网连接点的电压稳定; 超级电容的 DC/AC 变流器和蓄电池的 DC/AC 变流器可以独立配置, 满足各自的功率需求。适应于兆瓦级及以上的大容量储能系统, 可以直接并联扩容; 但对网侧变流器控制要求较高, DC/AC 的成本较高。

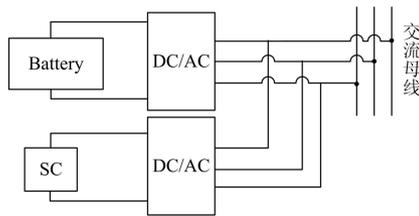


图 1 交流侧并联拓扑图
Fig. 1 AC parallel topology

1.2 直流侧并联

超级电容和蓄电池在直流侧并联可以共用 DC/AC 变流器, 实现与电网的连接, 通过对直流母线电压的控制进行功率调节, 控制上较简单。需要加大 DC/AC 变流器的功率, 以满足超级电容的功率需求。直流侧并联拓扑结构如图 2 所示。

图2(a)超级电容和蓄电池直接并联。该拓扑结构简单、成本低、系统效率高、响应速度快。但储能系统的容量不能被完全利用。电流在两种储能装置之间自动分配, 分流的大小取决于各自的内阻, 因此每种储能的功率无法控制。另外, 超级电容的电压与电池电压相同, 该电压不受控, 变化取决于电池的 SOC, 这就限制了超级电容的最优利用, 也限制了超级电容单元的选择, 为了达到相同的电压, 需要串联更多的电容单元。适应于直流母线电压变化范围不大, 电池没有严格的充放电要求的场合。

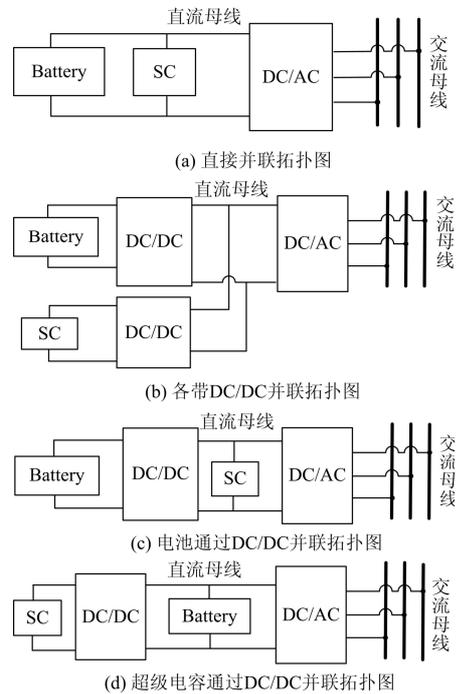


图 2 直流侧并联拓扑图

Fig. 2 DC parallel topology

图 2(b)超级电容和蓄电池通过 DC/DC 功率变换器并联。该拓扑的技术优势是显而易见的, DC/DC 有变流、调压的功能, 因此, 可以通过它来连接端电压不同的两种储能元件, 对每种储能设备直接控制, 同时维持直流母线电压恒定; 并优化蓄电池的放电电流, 延长其使用寿命; 电池和超级电容可以深度放电因此其储能量可以充分利用, 可以优化设计系统的额定容量。使用 DC/DC 还可以使能量管理系统更加灵活配置。但是和直接并联相比, 使用 DC/DC 产生功率损耗并使系统成本增加、效率降低。因此, 该拓扑结构的技术优势和系统经济成本增加之间必须折中考虑。

图 2(c)蓄电池接 DC/DC, 超级电容直接并联在直流母线上。该拓扑蓄电池功率可控, 可以优化控制电池的充放电电流, 延长其寿命周期; 超级电容直接根据直流母线电压的变化出力, 反应速度较快。缺点是超级电容需要很多单元串联以获得高的母线电压。另外, 在脉冲负荷电流区间, 超级电容的端电压会下降, 如果相连的逆变器需要一个稳定的或正常工作的最小电压以生成正确的交流侧电压, 则电压下降太多会产生问题, 所以必须把直流电压控制在合适的范围内。

图 2(d)超级电容接 DC/DC, 蓄电池直接并联在直流母线上。该拓扑超级电容储能能够充分利用,

可以优化设计其额定容量。但电池功率不可控, 无法优化其充放电电流, 直流母线电压取决于电池的 SOC 变化, 该变量不能直接控制, 必须维持在一个给定的范围内, 因此系统的运行受到限制。

因此, 混合储能拓扑结构的选择取决于不同因素, 在每个应用下都必须进行全面的分析以便能够确定最佳的选择。

2 混合储能功率控制策略

2.1 平滑波动的功率控制方法

混合储能和分布式电源构成的微网系统如图 3 所示。以储能放电功率为正, 充电功率为负, 图中变量关系如式 (1)。

$$P_E = P_{\text{line}} - (P_W + P_V) \quad (1)$$

其中: P_E 为储能输出功率; P_W 为风电输出功率; P_V 为光伏输出功率; P_{line} 为并网联络线功率, 向电网放电时为正, 从电网取电时为负。

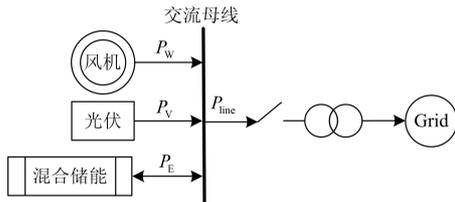


图 3 风光储微网系统图

Fig. 3 Microgrid with wind, PV and ES

图 3 的微网并网运行时, 为减少风电、光伏等间歇式分布式电源对配网电能质量的影响, 要对并网联络线输出功率进行平滑。首先对分布式电源输出功率进行傅里叶变换, 得到功率波动频谱图。分布式电源出力波动的频谱分布如图 4 所示^[4]。超级电容功率密度大能量密度小, 循环寿命长, 用来补偿波动频率大但幅值小的分量, 电池功率密度小能量密度大, 用来补偿波动频率小但幅值较大的分量。

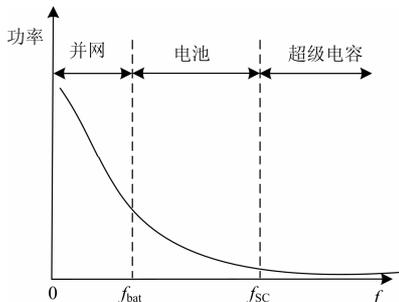


图 4 分布式电源出力波动频谱图

Fig. 4 Distributed power output fluctuation spectrum

基于功率波动的频谱图, 采用低通滤波的方法来确定超级电容和蓄电池的功率^[14]。利用图 5 所示的二级低通滤波。其中, P_T 为分布式电源总的出力, 时间常数 $T_{sc} < T_{bat}$, 分别对应图 4 中的截止频率 $f_{sc} > f_{bat}$ 。

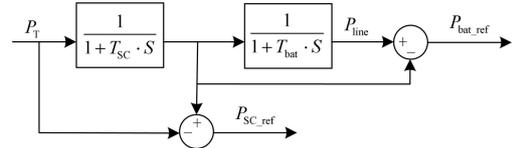


图 5 二级低通滤波控制

Fig. 5 Two stage low pass filter control

根据分布式电源出力的频谱分析图, 结合分布式电源并网功率波动要求和混合储能配置的容量, 可确定电池和超级电容分别需要平抑的波动频率段, 从而确定低通滤波对应的时间常数, 得到各自的输出功率参考值。由图 5 可得超级电容和电池的参考功率分别为

$$P_{SC_ref} = -\frac{T_{SC}S}{1+T_{SC}S} P_T \quad (2)$$

$$P_{bat_ref} = -\frac{1}{(1+T_{SC}S)(1+T_{bat}S)} P_T \quad (3)$$

将低通滤波得到的参考功率作为储能系统恒功率控制的参考值, 即可达到平滑波动的控制效果。

2.2 考虑电池功率限制的改进方法

由式 (2)、式 (3) 可知, 滤波时间常数确定后, 储能的参考功率只和分布式电源的出力有关。若分布式电源出力出现较大波动, 储能补偿的参考功率也会出现波动。电池的充放电电流要求比较严格, 为保障电池的经济优化运行, 通常要考虑电池的充放电状态和充放电功率限制。文献[11-12]分别提出了蓄电池平滑光伏并网功率波动的控制方法, 对于只采用电池储能的系统, 能够平滑光伏出力并有效管理电池充放电。实际应用中通常在电池 SOC 达到严重限值时, 禁止其充放电; 在 SOC 未达到严重限值时, 根据电池的额定功率和容量将其充放电功率限制在一定范围内。

因此, 在满足并网功率波动要求的情况下, 对二级低通滤波后的参考功率进行修正, 根据电池充放电要求设置功率限值, 超出电池充放电功率限值的由超级电容来补偿。修正框图如图 6 所示。

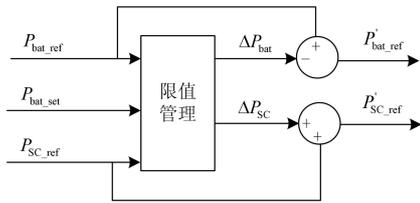


图 6 电池功率限值修正方法

Fig. 6 Battery power limit correction method

其中： P_{bat_set} 为电池的限值功率； P_{SC_ref} 、 P_{bat_ref} 分别为修正前的超级电容和电池参考功率； P'_{SC_ref} 、 P'_{bat_ref} 分别为修正后的超级电容和电池参考功率； ΔP_{SC} 、 ΔP_{bat} 分别为修正功率，且 $\Delta P_{SC} = -\Delta P_{bat}$ 。限值管理的具体方法如下：

1) 正常工作区：若 $|P_{bat_ref}| \leq P_{bat_set}$

则 $\Delta P_{bat} = 0$ ，相应的 $\Delta P_{SC} = 0$ ；

2) 放电功率超限：若 $P_{bat_ref} > P_{bat_set}$

则 $\Delta P_{bat} = P_{bat_ref} - P_{bat_set}$ ，相应地 $\Delta P_{SC} = -\Delta P_{bat}$ ；

3) 充电功率超限：若 $P_{bat_ref} < -P_{bat_set}$

$\Delta P_{bat} = P_{bat_ref} + P_{bat_set}$ ，相应地 $\Delta P_{SC} = -\Delta P_{bat}$ 。

利用上述限值修正方法，能在满足并网联络线功率控制要求的情况下，使电池充放电功率不超限，并充分利用超级电容大功率充放电特点，吸收尖峰波动功率。

3 控制策略的 Matlab 仿真验证

3.1 仿真模型

以 132 kW 屋顶光伏电站为功率平滑对象，其典型的日发电曲线如图 7 所示，最大输出功率 84 kW，最小输出功率 1 kW，平均功率 33.7 kW。利用 Matlab 将原始数据输入进行仿真，滤波及修正模型如图 8 所示。

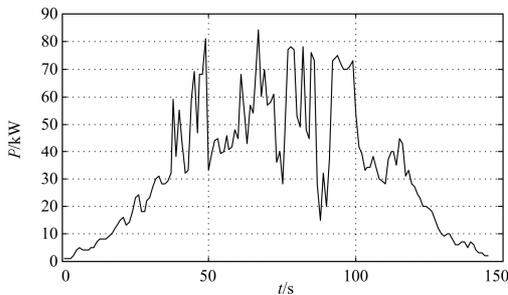


图 7 光伏发电系统输出功率波形

Fig. 7 Output power waveform of PV power generation system

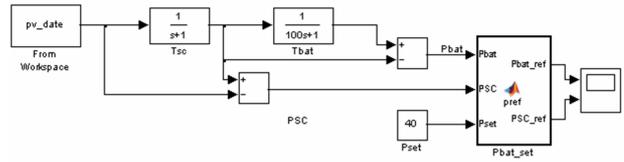


图 8 功率分配及修正仿真模型

Fig. 8 Power allocation and correct simulation model

3.2 仿真结果与分析

(1) 光伏功率频谱分析

首先对光伏输出功率进行傅里叶变换，得到功率频谱图，如图 9 所示。由图可知，高频波动分量主要集中在 0.01~0.5 Hz 之间，对应时间常数为 100~2 s，在此之间选择电池和超级电容的滤波时间常数，即可对光伏输出功率进行平滑。

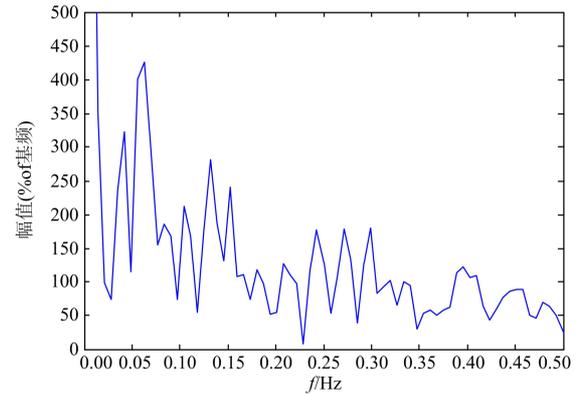


图 9 光伏发电系统输出功率频谱图

Fig. 9 Output power spectrum of PV power generation system

(2) 储能补偿功率

对超级电容和电池分别补偿不同频段波动分量进行仿真，经平滑后的联络线功率以及超级电容和电池的参考功率如图 10 所示。由图 10(a)和图 10(b)可知， T_{bat} 不变， T_{SC} 变小时，超级电容补偿的波动频段变窄，功率峰值变小，主要在 0 值上下正负切换，适合超级电容反应快、循环寿命长的特性；由图 10(b)和图 10(c)可知， T_{SC} 不变， T_{bat} 变小时，电池补偿的频段变窄，联络线功率峰值变大，且电池充放电功率切换过于频繁，不利于保护电池寿命。因此，适合取图 10(b)中的参数，即使联络线功率较平滑，超级电容补偿容量不需太大，电池充放电切换频率又较低。

(3) 考虑电池功率限制的改进方法

由图 10 可知，在光伏功率波动较大的地方，电池参考功率有较大的尖峰波动，对电池是不利的。利用图 10(b)的参数，假设电池的充放电功率限值为 40 kW，经限值后的各功率波形如图 11 所示。由图

可知, 电池的参考功率变得更加平滑, 被平滑处对应的超级电容参考功率变大, 由超级电容补偿尖峰波动功率。

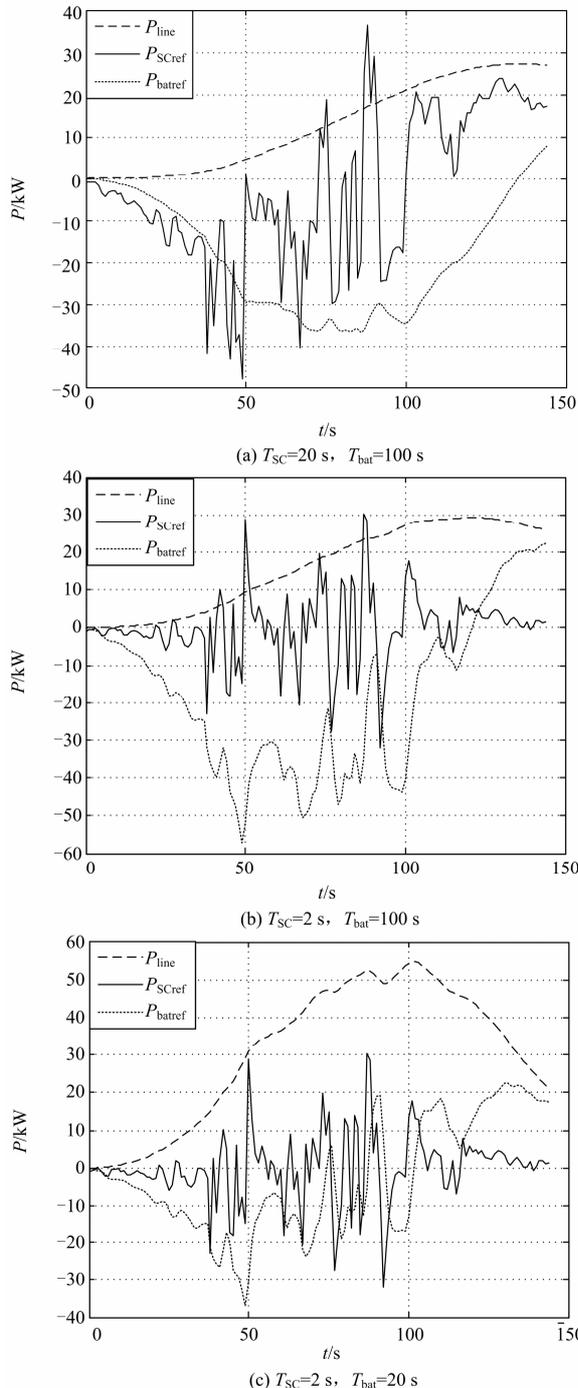


图 10 不同滤波时间常数的电池、超级电容和联络线功率
Fig. 10 Battery, SC and tie line power waveforms with different filter time constant

4 结语

本文分析了功率型和能量型混合储能不同拓

扑结构的优缺点, 总结出混合储能拓扑结构选择的

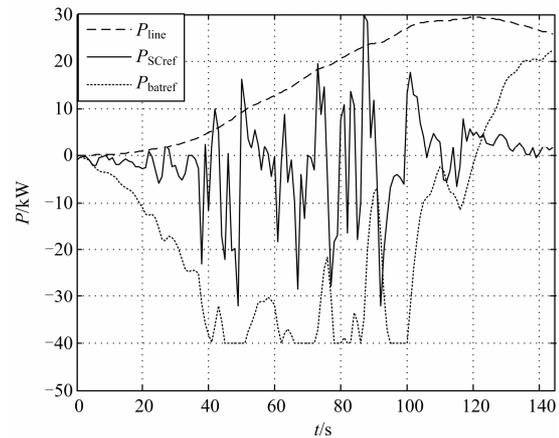


图 11 经限值处理的参考功率波形

Fig. 11 Reference power waveforms with limiting value

一般原则。基于二级低通滤波, 提出根据频谱图确定滤波时间常数的混合储能控制方法, 并结合超级电容和电池各自的储能特点, 设置电池充放电功率限值, 对滤波输出功率进行修正, 由超级电容补偿波动尖峰, 充放利用超级电容反应快、循环寿命长及瞬间大电流充放电的特点, 有效延长电池使用寿命。用 Matlab 对算法平滑实际光伏出力进行了仿真验证, 结果证明该算法对平滑波动、改善电池充放电具有明显效果。研究内容对混合储能拓扑结构的选择及协调控制有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.
LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [2] 周林, 黄勇, 郭珂, 等. 微电网储能技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 147-152.
ZHOU Lin, HUANG Yong, GUO Ke, et al. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [3] 吴晋波, 文劲宇, 孙海顺, 等. 基于储能技术的交流互联电网稳定控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 262-267.
WU Jin-bo, WEN Jin-yu, SUN Hai-shun, et al. Study of control method for improving AC interconnected grid stability based on energy storage technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,

- 27(6): 262-267.
- [4] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
ZHANG Bu-han, ZENG Jie, MAO Cheng-xiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 54-58.
- [5] 李军徽, 朱昱, 严干贵, 等. 储能系统控制策略及主电路参数设计的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 7-12.
LI Jun-hui, ZHU Yu, YAN Gan-gui, et al. Research on the control strategy and the design of main circuit parameters of energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 7-12.
- [6] Li W, Joós G A power electronic interface for a battery supercapacitor hybrid energy storage system for wind applications[C] // Power Electronics Specialists Conference IEEE, 2008: 1762-1768.
- [7] Etxeberria A, Vechiu I, Vinassa J M. Hybrid energy storage systems for renewable energy sources integration in microgrids: a review[C] // Power Electronics Conference IEEE, 2010: 532-537.
- [8] 赵坤, 王榭榕, 王德伟, 等. 车载超级电容储能系统间接电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 124-129.
ZHAO Kun, WANG Shen-rong, WANG De-wei, et al. Indirect current control strategy of on-board supercapacitor energy storage system of railway vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 124-129.
- [9] 张坤, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 7-14.
ZHANG Kun, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Power control strategy of directly driven wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 7-14.
- [10] 张坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 235-241.
ZHANG Kun, WU Jian-dong, MAO Cheng-xiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 235-241.
- [11] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 29-33.
QIU Pei-chun, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Battery energy storage-based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-33.
- [12] 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): 36-38.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hong-jie, et al. An energy storage control method based on state of charge and variable filter time constant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 36-38.
- [13] 杨珺, 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 Jun, 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.
- [14] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 36-42.
ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hong-jie, et al. An energy management method of hybrid energy storage system based on smoothing control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 36-42.

收稿日期: 2013-03-10; 修回日期: 2013-09-09

作者简介:

桑丙玉(1983-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事新能源、分布式发电与微电网、储能规划设计与运行控制技术研究。E-mail: sangbingyu@epri.sgcc.com.cn