

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.16.007

基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法

张 野, 郭 力, 贾宏杰, 王成山

(智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津市 300072)

摘要: 储能作为一种能量缓冲装置,可以有效抑制可再生能源输出功率的波动。文中介绍了一种基于平滑控制的超级电容与电池混合储能系统的能量管理方法,该方法分别利用超级电容和电池补偿可再生能源输出功率波动的高频分量与中低频分量;在传统限值管理的基础上,引入超级电容端电压预先控制,根据超级电容的剩余容量与充放电状态对超级电容和电池的输出功率进行修正,以防止超级电容因端电压达到上下限而停止工作。最后,利用 PSCAD 仿真验证了所述方法的有效性。

关键词: 可再生能源; 蓄电池; 平滑控制; 混合储能系统; 超级电容; 能量管理; 充放电控制

0 引言

随着光伏发电、风力发电等可再生能源发电装机容量的不断增加,其输出功率波动对传统电网电能质量与安全稳定的影响越来越受到重视。储能装置虽然可在一定程度上起到抑制可再生能源输出功率波动的作用,但是单一储能装置很难同时满足功率与能量两方面的要求,国内外学术界提出利用超级电容与电池组成混合储能系统。该混合储能系统同时具有超级电容功率密度大和电池能量密度高的优点,有效地发挥了各个储能装置的互补特性。

文献[1]利用超级电容器功率密度高和循环寿命长的优点,通过双向 DC/DC 变换器的多滞环控制,优化了蓄电池的充放电过程,延长了其使用寿命。文献[2]提出了一种利用蓄电池与超级电容器混合储能平滑风电波动功率的控制方法,根据实时风电功率及储能元件的荷电状态,在双层控制模型下依次检索预置的专家信息库,得到充放电控制器相应的控制算法,简化了风电功率多种波动状态下的控制逻辑,缩短了控制时间。文献[3]介绍了一种基于超级电容储能的风电场功率调节系统,针对系统结构特点和工作原理,提出了网级控制、超级电容能量管理与变流器控制相结合的控制策略,该系统

在平抑风电场有功功率波动的同时,稳定了风电场母线电压,具有良好的运行性能。文献[4]提出了利用超级电容与电池组成的混合储能系统来实现微电网离网运行时的功率平衡,或抑制并网运行时可再生能源与负荷的功率波动;还提出了基于电压外环与电流内环的超级电容与电池的功率分配方法。文献[5]提出了由超导储能与电池组成的混合储能系统,并通过滤波算法与模糊算法对其进行能量管理,该方法使混合储能系统在抑制系统功率波动的同时,避免了超导储能与电池储能的过充放电。

本文针对超级电容与电池混合储能系统,在平滑控制与传统限值管理的基础上,提出了一种新的能量管理方法,该方法根据超级电容的剩余容量与充放电状态,对超级电容与电池的充放电功率进行修正,以避免其能量达到最大最小限值而退出运行。该方法使混合储能在充分抑制可再生能源输出功率波动的同时,维持其正常运行并避免过充放电。最后,在 PSCAD 中搭建了相应的模型,验证了该算法的有效性。

1 混合储能平滑控制方法

本文以图 1 所示的系统为例对所提出的方法进行详细介绍。图 1 中,超级电容与电池通过各自的 DC/DC 变换器连接到直流母线上,再通过统一的 DC/AC 变换器连接到交流母线上,风力发电系统直接与交流母线相连,整个微电网系统再通过唯一的静态开关与配电网相连。储能系统 DC/AC 变换器控制直流母线电压恒定;电池与超级电容的 DC/DC 变换器采用恒功率控制,分别跟踪各自的功率参考指令 P_{bat_ref} 和 P_{sc_ref} ;风力发电系统采用最大功

收稿日期: 2011-12-09; 修回日期: 2012-03-28。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB219700,2010CB234608);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090032110064);天津市科技发展计划资助项目(09JCZDJC25000);天津大学自主创新基金资助项目。

率跟踪控制。混合储能系统协调控制框图见附录 A 图 A1。

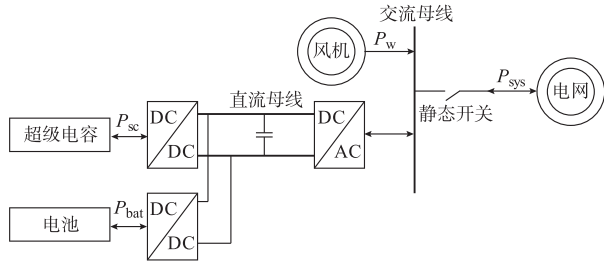


图 1 系统结构
Fig. 1 System structure

忽略系统各部分的能量损耗,由能量守恒可得上述系统中各进线功率之间的关系为:

$$P_{sc} + P_{bat} + P_w = P_{sys} \quad (1)$$

式中: P_{sys} 为联络线功率, $P_{sys} > 0$ 表示向电网放电, $P_{sys} < 0$ 表示从电网取电; P_{sc} 为超级电容输出功率; P_{bat} 为电池输出功率; P_w 为风力发电系统输出功率。

电池与超级电容混合储能平滑控制利用电池与超级电容对可再生能源输出功率中不同频段的波动成分进行补偿,以达到平滑其输出的目的^[6-7]。

在混合储能系统中,超级电容属于功率型储能装置,输出功率变化范围大、变化速率快且充放电循环次数多,因此,超级电容主要用来补偿可再生能源输出功率中的高频波动分量;而电池属于能量型储能装置,输出功率变化范围小、变化速率慢且充放电循环次数少,因此,电池主要用来补偿可再生能源输出功率中的低频波动分量^[8-10]。

电池与超级电容混合储能平滑控制框图如图 2 所示。

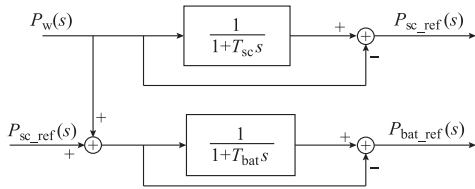


图 2 混合储能系统平滑控制
Fig. 2 Smoothing control of hybrid energy storage system

其中低通环节采用一阶巴特沃兹低通滤波器,其传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT} \quad (2)$$

式中: s 为微分算子; T 为滤波时间常数。

图 2 中,风力发电系统输出功率 $P_w(s)$ 通过滤波时间常数为 T_{sc} 的滤波器获得联络线功率一次目标值,再与 $P_w(s)$ 相减得到超级电容输出功率参考值 $P_{sc_ref}(s)$; $P_w(s)$ 与 $P_{sc_ref}(s)$ 相加后,通过滤波时

间常数为 T_{bat} 的滤波器,得到联络线功率的二次目标值,再与滤波之前的值相减得到电池输出功率参考值 $P_{bat_ref}(s)$ 。其中,联络线一次目标值是指只经超级电容补偿后的联络线功率理想值;联络线二次目标值是指经超级电容和电池补偿后的联络线功率理想值。图中: $P_{sc_ref}(s)$ 与 $P_{bat_ref}(s)$ 若为负,则表示充电,否则表示放电; $T_{bat} > T_{sc}$ 。

超级电容与电池输出功率传递函数为:

$$P_{sc_ref}(s) = -P_w(s) \frac{T_{sc}s}{1 + T_{sc}s} \quad (3)$$

$$P_{bat_ref}(s) = -P_w(s) \frac{1}{1 + T_{sc}s} \frac{T_{bat}s}{1 + T_{bat}s} \quad (4)$$

超级电容与电池输出功率传递函数的波特图如图 3 所示。

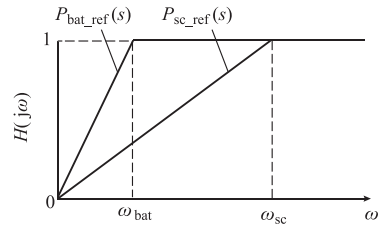


图 3 超级电容与电池输出功率传递函数波特示意图
Fig. 3 Bode schematic diagram of output power transfer function of ultracapacitor and battery

图 3 中: ω_{sc} 为超级电容滤波时间常数 T_{sc} 所对应的角频率; ω_{bat} 为电池滤波时间常数 T_{bat} 所对应的角频率。由图 3 可以看出: $P_{sc_ref}(s)$ 对于角频率大于 ω_{sc} 的频率分量的输出幅值为 1, 即超级电容可以补偿所有角频率大于 ω_{sc} 的高频波动分量; 同理, 电池可以补偿所有角频率在 ω_{bat} 与 ω_{sc} 之间的中低频分量。因此, 该方法可以使电池与超级电容对可再生能源输出功率中不同频段的波动成分进行补偿。

2 混合储能限值管理方法

2.1 传统的限值管理方法

为防止超级电容与电池过充放电, 一般情况下需对其充放电功率进行调整。传统限值管理如图 4 所示。图 4 中: P_{dis_ref} 和 P_{cha_ref} 分别为电池与超级电容的放电和充电功率参考值; 上半平面表示放电, 下半平面表示充电; S_{socmax} 与 S_{socmin} 为电池与超级电容存储能量的上下限。当储能达到上限时, 限制储能充电, 允许放电; 当储能达到下限时, 限制储能放电, 允许充电。通过此最大最小限值管理, 可以避免储能的过充放电, 但是混合储能系统中超级电容能量密度较小, 其容量极易达到限值, 而频繁地限制储能充放电会导致联络线功率出现剧烈波动, 影响系统的电能质量与稳定运行。

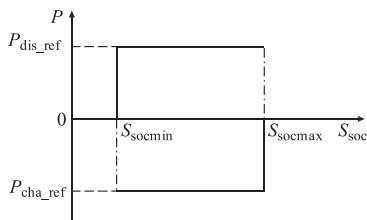


图4 传统限值管理

Fig. 4 Traditional threshold management

2.2 超级电容端电压预先控制方法

超级电容存储的能量 E_{sc} 与其端电压 U_{sc} 的关系为:

$$E_{sc} = \frac{1}{2} C U_{sc}^2 \quad (5)$$

式中: C 为超级电容的电容值。

由式(5)可以看出, 超级电容的能量 E_{sc} 与其端电压 U_{sc} 的平方成正比。

由于超级电容能量密度较小, 因此其输出功率越大, 输出时间越长, 超级电容的能量越容易达到最大最小限值, 也就是说其端电压越容易达到上下限值。超级电容端电压过高会严重损坏超级电容的使用寿命, 甚至击穿电容, 而其端电压过低又会导致输出同等功率时的输出电流过大而引起过热。因此, 对超级电容的端电压进行有效管理是十分必要的^[11-15]。

超级电容的剩余容量 S_{socsc} 为:

$$S_{socsc} = \frac{U_{sc} - U_{sc_min}}{U_{sc_max} - U_{sc_min}} \quad (6)$$

式中: U_{sc_max} 和 U_{sc_min} 分别为超级电容端电压的最大和最小限值, 对应的超级电容剩余容量值分别为 1 和 0。

由此可见, 超级电容的剩余容量与其端电压成正比。因此, 本文中用超级电容的端电压来近似表示超级电容的剩余容量。

混合储能系统能量管理控制框图如图 5 所示。

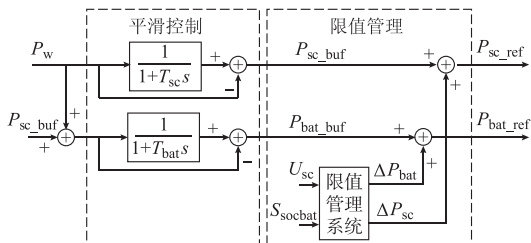


图5 混合储能系统能量管理方法

Fig. 5 Energy management method of hybrid energy storage system

图 5 中, 平滑控制与限值管理都属于混合储能的能量管理系统, 其中平滑控制属于底层能量管理系统, 而限值管理属于上层能量管理系统。 P_{sc_buf} 和

P_{bat_buf} 分别为修正前的超级电容和电池的功率参考值; S_{socbat} 为电池剩余能量; ΔP_{sc} 和 ΔP_{bat} 分别为由限值管理计算出来的超级电容与电池输出功率的修正量, 且

$$\Delta P_{bat} = -\Delta P_{sc} \quad (7)$$

式(7)表明, 当超级电容端电压过高或过低而导致其充放电功率不能满足要求时, 由电池来承担相应的充放电功率差额。

基于超级电容端电压预先控制的电池与超级电容混合储能能量管理方法首先需要使 $U_{sc_min} < U_{sc_down} < U_{sc_up} < U_{sc_max}$ 。其中, U_{sc_up} 和 U_{sc_down} 分别为超级电容端电压预先控制判断条件上下限值, 超级电容端电压预先控制就是要在其端电压达到最大最小限值之前采取相应的预先控制^[16-18]。

超级电容端电压调整规则如图 6 所示。

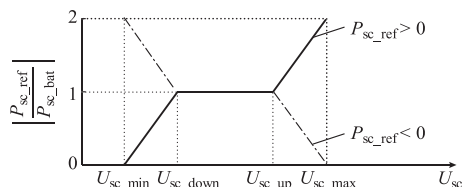


图6 超级电容端电压调整规则

Fig. 6 Adjustment rule of ultracapacitor terminal voltage

由图 6 可以看出, 利用 4 个电压限值划分出 5 个工作区域, 具体如下。

1) 高压越限区: $U_{sc} \geq U_{sc_max}$ 时, 超级电容限制充电, 只允许放电。如果 $P_{sc_buf} < 0$, 则

$$\Delta P_{sc} = -P_{sc_buf} \quad (8)$$

否则

$$\Delta P_{sc} = 0 \quad (9)$$

2) 高限值区: $U_{sc_max} > U_{sc} > U_{sc_up}$ 时, 超级电容端电压预先控制的基本原则是少充电多放电, 控制目的是减缓超级电容端电压上升的速度。如果 $P_{sc_buf} < 0$, 则

$$\Delta P_{sc} = -\frac{U_{sc} - U_{sc_up}}{U_{sc_max} - U_{sc_up}} P_{sc_buf} \quad (10)$$

否则

$$\Delta P_{sc} = \frac{U_{sc} - U_{sc_up}}{U_{sc_max} - U_{sc_up}} P_{sc_buf} \quad (11)$$

3) 正常工作区: $U_{sc_up} \geq U_{sc} \geq U_{sc_down}$ 时, 超级电容与电池输出功率不作调整。

4) 低限值区: $U_{sc_down} > U_{sc} > U_{sc_min}$ 时, 超级电容端电压预先控制的基本原则是少放电多充电, 控制目的是减缓超级电容端电压下降的速度。如果 $P_{sc_buf} < 0$, 则

$$\Delta P_{sc} = \frac{U_{sc_down} - U_{sc}}{U_{sc_down} - U_{sc_min}} P_{sc_buf} \quad (12)$$

否则

$$\Delta P_{sc} = -\frac{U_{sc_down} - U_{sc}}{U_{sc_down} - U_{sc_min}} P_{sc_buf} \quad (13)$$

5) 低压越限区: $U_{sc_min} \geq U_{sc}$ 时, 超级电容限制放电, 只允许充电。如果 $P_{sc_buf} < 0$, 则

$$\Delta P_{sc} = 0 \quad (14)$$

否则

$$\Delta P_{sc} = -P_{sc_buf} \quad (15)$$

上述超级电容端电压预先控制算法控制效果如图 7 所示。

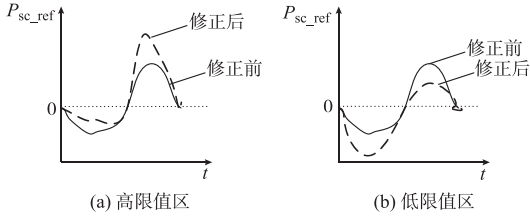


图 7 超级电容端电压控制效果

Fig. 7 Effect of ultracapacitor terminal voltage control

图 7 中, 实线为限值管理修正前的超级电容输出功率参考值, 虚线为限值管理修正后的超级电容输出功率参考值。 $P_{sc_ref} > 0$ 表示放电; 否则表示充电。由图 7 可以看出: 当超级电容处于高限值区时, 超级电容少充电多放电; 当超级电容处于低限值区时, 超级电容少放电多充电。

3 PSCAD 仿真验证

仿真所用的风力发电系统输出功率如图 8 所示。

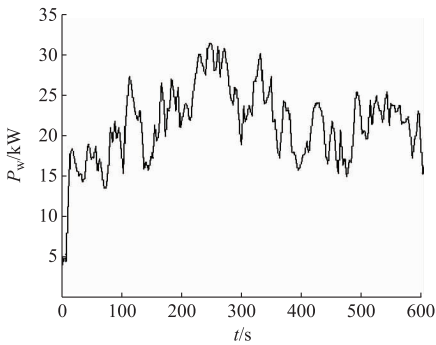


图 8 风力发电系统输出功率波形

Fig. 8 Output power waveform of wind power generation system

风电功率波动范围为 4~32 kW, 平均值约为 22 kW, 波动峰值为 13 kW。电池储能系统额定功率为 15 kW, 按照其满容量且以最大功率输出时持续时间不小于 10 h 的原则, 确定其容量为 300 Ah, 额定电压为 500 V, 超级电容储能系统额定功率为 20 kW; 按照其满容量且以最大功率输出时持续时

间不小于 30 s 的原则, 确定其电容值为 10 F, 额定电压为 400 V。系统结构如图 1 所示。超级电容端电压控制限值 $U_{sc_min} = 250$ V, $U_{sc_down} = 300$ V, $U_{sc_up} = 400$ V, $U_{sc_max} = 450$ V; $T_{sc} = 20$; $T_{bat} = 250$ 。

在 PSCAD 中搭建相应的仿真模型, 利用恒压直流源接 DC/AC 变换器模拟风力发电系统的出力; 电池采用理想电压源与内阻串联的模型; 超级电容采用电容值与电阻串联的模型。

为了验证本文所述方法的有效性, 现设计如下 3 个仿真算例。

算例 1: 当超级电容端电压或电池容量达到上限时, 限制其充电, 只允许放电; 当超级电容端电压或电池容量达到下限时, 限制其放电, 只允许充电。

算例 2: 在算例 1 的基础上, 当超级电容由于端电压达到上下限而不能正常工作时, 由电池来承担超级电容应该输出的功率值, 直到电池输出功率达到最大限值为止。

算例 3: 在算例 2 的基础上, 加入超级电容的端电压预先控制, 即在超级电容端电压达到最大最小限值之前, 采取预先控制。

联络线平抑效果如图 9 所示。由图 9 可以看出: 采用传统限值管理方法的算例 1 中的联络线功率波动峰值最大, 达到了 7 kW 左右; 采用互补控制的算例 2 中的联络线功率波动峰值为 3 kW 左右; 而采用本文所述超级电容端电压预先控制方法的算例 3, 经超级电容与电池混合储能系统补偿后的联络线功率最平滑, 波动峰值只有 1 kW 左右。

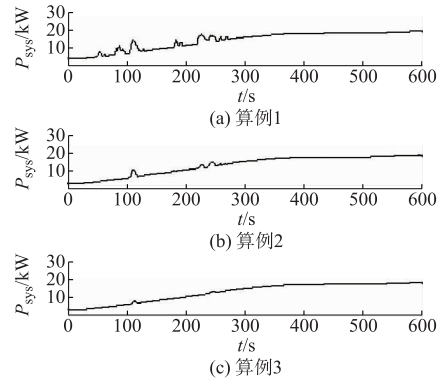


图 9 联络线输出功率波形

Fig. 9 Output power waveforms of tie-line

超级电容和电池输出功率波形如图 10 所示。由图 10 可以看出, 算例 1 和算例 2 未采用超级电容端电压预先控制, 因此, 存在因超级电容端电压达到最大值而导致其输出功率为 0 的时间段。算例 1 中若超级电容输出功率为 0, 则联络线功率会出现波动; 算例 2 与算例 3 中只有在电池输出功率达到最

大限值时,联络线功率才会出现波动;但是由于算例 3 采用了超级电容端电压预先控制,因此其输出功率不存在为 0 的时间段。且由于超级电容吸收了一部分波动分量,所以电池输出功率达到最大限值的情况有所减少。因此,算例 3 中联络线功率波动最小,算例 2 次之,算例 1 中联络线功率波动最大。

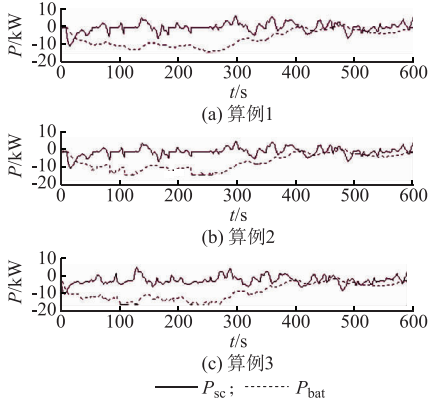


图 10 超级电容和电池输出功率波形

Fig. 10 Output power waveforms of ultracapacitor and battery

超级电容端电压波形如图 11 所示。算例 1 和算例 2 没有采用超级电容端电压预先控制方法,超级电容都因端电压达到上限值而限制充电,导致联络线功率出现波动;而算例 3 采用端电压预先控制方法后,超级电容端电压没有达到最大限值,超级电容始终处于平滑联络线输出的工作状态。

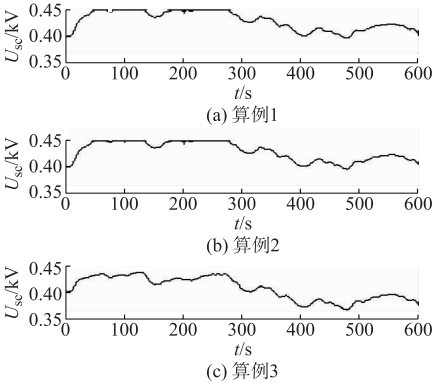


图 11 超级电容端电压波形

Fig. 11 Terminal voltage waveforms of ultracapacitor

当 U_{sc_up} 分别取 400, 350, 300 V 时,超级电容端电压波形如图 12 所示。由图 12 可以看出, U_{sc_up} 取值越小,超级电容端电压控制高限值区越大,超级电容端电压距离其最大限值的裕度就越大。但是, U_{sc_up} 过低会导致超级电容正常工作区过小,影响了超级电容抑制可再生能源输出功率波动的效果。因此,应该综合考虑端电压控制效果与平滑控制效果,

合理地选择 U_{sc_up} 的数值。

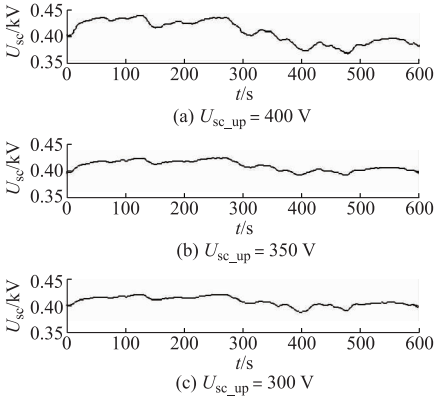


图 12 U_{sc_up} 参数不同时超级电容端电压波形
Fig. 12 Terminal voltage waveforms of ultracapacitor with different U_{sc_up}

4 结语

由于风电、光伏发电等可再生能源发电系统的输出功率具有波动性大、随机性强的特点,当其渗透率较大时,必将影响电网的安全稳定运行。本文所述混合储能系统能量管理方法分别利用超级电容与电池补偿可再生能源输出功率波动中的高频分量和中低频分量,并在传统限值管理方法的基础上引入超级电容端电压预先控制,以避免超级电容端电压达到最大最小限值而退出运行。仿真结果表明,本文所述方法充分发挥了混合储能功率密度大和能量密度大的优势,有效控制了超级电容的端电压,实现了超级电容的高效运行。但本文中该能量管理系统相关控制参数选取原则相对简单,今后将进一步研究在综合考虑混合储能系统容量配比和可再生能源波动等因素下求解最优控制参数的计算方法。

附录见本刊网络版 (<http://aepe.sgepri.sgcc.com.cn/aepe/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 张国驹,唐西胜,齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
ZHANG Guojun, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 85-89.

[2] 于芃,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.

[3] 李霄,胡长生,刘昌金,等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 86-90.
LI Xiao, HU Changsheng, LIU Changjin, et al. Modelling and controlling of SCES based wind farm power regulation system

- [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 86-90.
- [4] ZHOU Haihua, BHATTACHARYA T, TRAN D, et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(3): 923-930.
- [5] ISE T, KITA M, TAGUCHI A. A hybrid energy storage with a SMES and secondary battery[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.
- [6] TELEKE S, BARAN M E, HUANG A Q, et al. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732.
- [7] LI Wei, JOOS G, BELANGER J. Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1137-1145.
- [8] 鲁鸿毅,何奔腾. 超级电容器在微型电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 87-91.
LU Hongyi, HE Benteng. Application of the super-capacitor in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 87-91.
- [9] 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 Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [10] 彭思敏,曹云峰,蔡旭. 大型蓄电池储能系统接入微电网方式及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 38-43.
PENG Simin, CAO Yunfeng, CAI Xu. Control of large scale battery energy storage system interface to microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 38-43.
- [11] KANCHEV H, LU D, COLAS F, et al. Energy management and operational planning of a microgrid with a PV-based active generator for smart grid applications[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4583-4592.
- [12] THOUNTHONG P, PIERFEDERICI S, MARTIN J P, et al. Modeling and control of fuel cell/supercapacitor hybrid source based on differential flatness control[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 2700-2710.
- [13] 俞红祥,沈亚强,马世平. 一种基于超级电容储能的新型交流电压动态调节器[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 52-55.
YU Hongxiang, SHEN Yaqiang, MA Shiping. A novel dynamic AC voltage regulator based on super-capacitor storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 52-55.
- [14] ROTENBERG D, VAHIDI A, KOLMANOVSKY I. Ultracapacitor assisted powertrains: modeling, control, sizing, and the impact on fuel economy[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 576-589.
- [15] GARCIA P, FERNANDEZ L M, GARCIA C A, et al. Energy management system of fuel-cell-battery hybrid tramway[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 4013-4023.
- [16] ABBEY C, LI Wei, JOÓS G. An online control algorithm for application of a hybrid ESS to a wind-diesel system[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 3896-3904.
- [17] 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 Buhuan, ZENG Jie, MAO Chengxiong, 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.
- [18] 唐西胜,齐智平. 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3): 37-41.
TANG Xisheng, QI Zhiping. Study on an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid in stand-alone PV system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(3): 37-41.

张 野(1986—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:分布式发电及微电网技术。E-mail: zhangye86@gmail.com

郭 力(1981—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:分布式发电及微电网技术。

贾宏杰(1973—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统安全与稳定性、配电系统优化规划。

An Energy Management Method of Hybrid Energy Storage System Based on Smoothing Control

ZHANG Ye, GUO Li, JIA Hongjie, WANG Chengshan

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The energy storage system (ESS) as an energy buffering unit can effectively suppress power fluctuation. A new energy management method of hybrid battery and ultracapacitor storage system based on smoothing control is proposed. In this method, batteries and ultracapacitors are used to compensate for the low-frequency components and high-frequency components of fluctuating power, respectively. Meanwhile on the basis of traditional threshold management method, ultracapacitor terminal voltage pre-control is presented, in which according to the charging/discharging mode and state of charge (SOC) of ultracapacitors, the output power references of batteries and ultracapacitors are modified to prevent ultracapacitors from stopping working when terminal voltage reaches limits. Finally, a PSCAD model is used to verify the validity of this method.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2009CB219700, No. 2010CB234608), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (SRFDP) of China (No. 20090032110064), Tianjin Municipal Science and Technology Development Program (No. 09JCZDJ25000), and Innovation Foundation of Tianjin University.

Key words: renewable energy; battery; smoothing control; hybrid energy storage system; ultracapacitor; energy management; charging and discharging control

附录 A

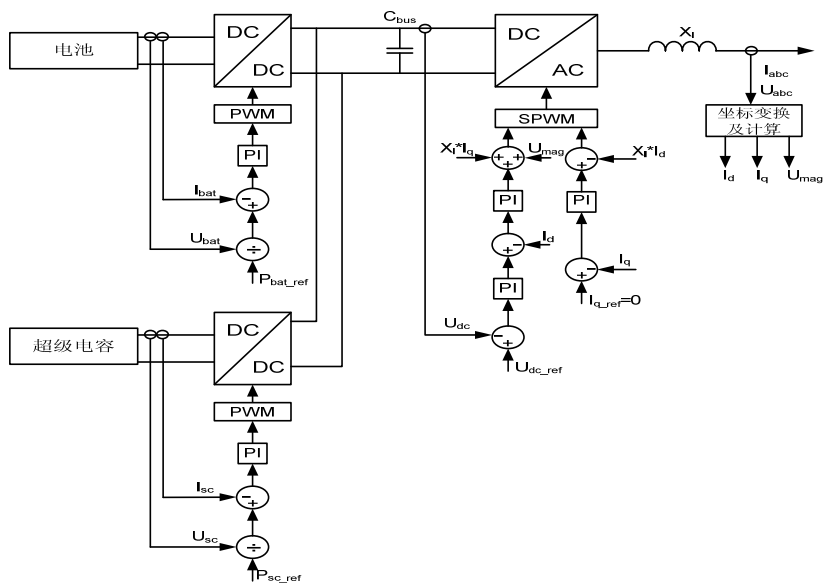


图 A1 混合储能系统协调控制框图

Fig.A1 Cooperative control block diagram of hybrid energy storage system