

蓄电池-超导磁体储能系统平抑间歇性电源出力波动的研究

施啸寒,王少荣

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 分析了使用蓄电池-超导磁体混合储能系统平抑间歇性电源出力波动的基本原理,给出了电源并网装置和混合储能装置的拓扑结构以及二者间的接口电路。设计并实现了基于中央控制单元和本地控制单元双层控制结构的储能控制系统,中央控制单元使用滑动平均滤波器分离功率指令中的低频成分再指派给蓄电池承担,并将剩余快速变化分量分配给超导磁体承担;本地控制器使用 PI 控制规律控制蓄电池和超导磁体分别跟踪功率指令和电压指令。PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了所设计系统与控制方法的有效性。

关键词: 混合储能系统; 蓄电池; 超导磁体; 储能; 出力波动抑制; 间歇性电源; 滑动均值滤波

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.009

0 引言

风力发电、太阳能发电等可再生能源发电技术具有环境友好、可再生的优点,然而它们的强随机性和间歇性会给电网安全性和稳定性以及电能质量带来不利影响。因此,不少国家制定了严格的间歇式电源的并网标准^[1-2]。只通过电源本身进行调节以满足并网标准不仅会降低可再生能源的利用率,而且限制了间歇式电源的运行灵活性及其向电网提供辅助服务的潜力^[3]。研究和实践工程均表明使用储能装置来平抑此类电源的间歇性和随机性不仅可减小可再生能源发电对电网的影响而且可以提高可再生能源的利用率和运行灵活性^[4]。

现有的储能介质可以分为能量型和功率型 2 类^[5-6]:以锂电池、钠硫电池、液流电池和铅酸电池等蓄电池为代表的能量型储能介质,其具有能量密度较大、功率密度较小的特点,且充放电次数以及放电深度受使用寿命限制;以超级电容、超导磁储能和飞轮储能等为代表的功率型储能介质,其具有能量密度较小、功率密度较大、高倍率充放电不会损害其性能的特点。2 类储能技术各有优劣,因此人们将 2 类储能装置组合使用,取长补短构成混合储能装置^[7-10]。

目前研究较多的是蓄电池和超级电容器构成的混合储能装置。文献^[11-12]建立了直接并联式超级电容器/蓄电池混合储能系统的数学模型,文献^[13-14]讨论了超级电容器/蓄电池混合储能系统可以采用的新型拓扑结构,文献^[7-9]对超级电容器/蓄电池混合储能应用于独立光伏发电系统进行了研究,文献^[10]对混合储能系统在微网中的应用进行了研究。研究表明:混合储能系统有助于实现储能系统储

能容量和储能功率比值的合理配置,改善蓄电池的充放电过程,延长使用寿命,提高整体性能并降低成本。超导储能具有 90% 以上的效率和 ms 级的反应速度,与超级电容器相比有着更高的效率和能量密度。随着超导材料及其应用技术的发展,超导储能装置成本得到了降低,在 20 世纪末已到达了 15 000~25 000 \$/MJ、150~250 \$/kW^[15],可以预见随着超导材料以及制冷技术的进一步发展,低成本的超导储能也将会成为人们储能配置的选择之一,因此研究含有超导储能的混合储能装置的结构及其控制技术具有重要意义。

本文借鉴较为成熟的超级电容器-蓄电池混合储能系统的研究成果,以蓄电池和高温超导磁体构成的混合储能系统为研究对象,以平抑间歇性电源的功率波动为应用目标,研究储能系统的构成及控制策略,并通过仿真实验检验了控制策略及整体系统的有效性。

1 混合储能系统结构

1.1 储能装置的接入方案

含混合储能单元的间歇性电源系统结构示意图如图 1 所示,图中 2 个背靠背变流器可以是双馈风

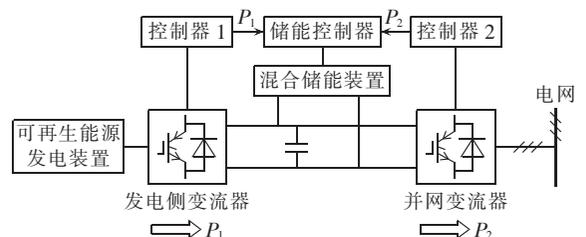


图 1 含储能系统的可再生能源发电装置系统结构图

Fig.1 Structure of renewable power generation system with hybrid energy storage system

机转子变流器、永磁同步发电机的并网变流器或光伏并网变流器,它们都用来完成将可再生能源发出的电力变换并馈入电网的功能。控制器 1 为发电侧变流器控制器,依据不同的控制目标可执行恒功率控制或最大功率追踪等发电运行方式,控制发电单元的出力。控制器 2 为网侧变流器控制器,其根据调度的指令或按照预先制定的发电计划控制电源馈入系统的功率。未配置储能装置时,为维持直流侧电压恒定,发电侧变流器的有功功率必须和并网变流器相同,从而电源的功率波动直接反映到并网功率中。装设储能装置后,2 个变流器功率差值可以被储能装置补偿,从而隔离发电功率波动对并网功率的影响,实现对并网功率波动的平抑。

储能接入发电系统有经逆变器接入交流电网和并联接入电源变流器直流母线 2 种方式。并联接入电源变流器直流母线方式省去了储能装置到电力系统的逆变器,且控制更为简单,更适合应用在已配置变流器的可再生能源发电场合,故本文采用此接入方式。图 1 中,储能单元的加入使得发电控制器 1 和并网控制器 2 对有功功率的控制实现了解耦,达到了对发电装置出力 P_1 和电源馈入电网功率 P_2 独立控制,隔离 P_1 波动对 P_2 的影响的目的。 P_1 和 P_2 间的差值即为储能单元需要补偿的总功率,它决定了要求配置储能装置的最大功率,影响因素主要为电源出力的预测精度。

1.2 储能装置的接口电路

蓄电池-超导磁体混合储能系统中蓄电池与超导磁体具有不同的特点,因而需要设计不同的接口电路。

蓄电池的外特性为理想电压源与内阻串联,可以直接并接到变流器间的直流母线处。然而直接并联方式使蓄电池的出力完全取决于直流母线的电压大小,受控性较差。目前通常采用 Buck/Boost 型双向变换器将其连接到直流母线处^[16],通过改变斩波电路占空比实现蓄电池输出功率的控制,见图 2。

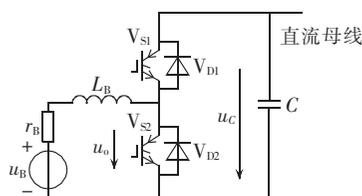


图 2 蓄电池接口电路

Fig.2 Interface circuit of battery

图中 V_{S1} 与 V_{D2} 构成 Buck 电路,控制输出电压 u_o 在小于直流母线电压 u_C 的范围内变化,此期间蓄电池释放能量; V_{S2} 和 V_{D1} 构成 Boost 电路,控制 u_o 在

大于 u_C 的范围内变化,此期间蓄电池吸收能量。接口电路工作在 Buck 模式还是 Boost 模式取决于蓄电池指令功率的符号,2 种模式均通过调整占空比的大小改变蓄电池释放或吸收功率的大小。

与蓄电池电压源的性质不同,超导磁体具有电流源的性质,其接口电路如图 3 所示。2 个全控型开关和 2 个二极管构成的斩波器电路保证了任意时刻都有电流通路,符合超导磁体电流源要求。全控型开关 V_{S3} 和 V_{S4} 同时开通时,超导磁体承受的电压为 u_C ,磁体吸收能量;全控型开关 V_{S3} 和 V_{S4} 同时关断时,超导磁体承受的电压为 $-u_C$,磁体释放能量。因而通过调节开关 V_{S3} 、 V_{S4} 的开通占空比即可控制超导磁体一个开关周期里的平均功率,占空比大于 0.5 时超导磁体吸收能量,占空比小于 0.5 时超导磁体释放能量。

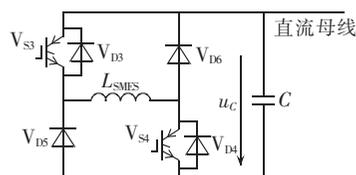


图 3 超导磁体储能装置接口电路

Fig.3 Interface circuit of superconducting magnet energy storage

2 混合储能系统的控制方法

储能控制系统的任务为根据发电单元的实时功率与调度要求的发电功率之间的差值控制储能单元发出或吸收相应的功率。混合储能控制系统包括 2 个层次的控制:中央控制和本地控制。中央控制完成储能装置的指令功率在不同储能装置间的分配,即上层能量管理任务;本地控制通过对接口电路的触发控制实现各储能单元对各自指令的跟踪。

2.1 中央控制单元

中央控制单元依据 2 类储能装置的特点将总功率指令在蓄电池和超导磁体之间分配。超导磁体具有功率密度大、反应速度快、循环寿命长、功率突变承受能力强等特点,可用来提供指令功率中高频波动部分。磁体承担功率指令中的高频成分,同时避免了超导磁体储能容量小而导致的满充或满放问题。蓄电池承担功率指令中的平滑部分,提供长时间的充电或放电能力,不仅避免了蓄电池承受大的电流变动而损坏电池,而且通过减少小循环充放电次数延长了蓄电池的使用寿命。

本文使用滑动平均滤波法^[3,6]分离储能系统总功率指令 P_0 (即图 1 中 P_2 与 P_1 的差值)中的高频分量和平滑成分,分离结果传输给蓄电池和超导储能磁体的本地控制器。滑动平均滤波是时间序列分析

中的常用方法,具有参数少、实现简单等优点。时间窗长度 T 是滑动平均滤波的唯一参数, T 越大,滑动平均滤波的通频带越窄,滤波结果越平滑; T 越小,滑动平均滤波器的通带越宽,功率指令经过滑动平均滤波后得到的蓄电池指令频率成分的最高频率越高。

由于超导磁体所能存储的能量较小,其连续吸收或释放能力受连续工作的影响很大,因而滑动滤波器的时间窗长度 T 应该根据超导磁体储能状态进行调整。滑动滤波时间窗长度调整规则如下。

a. 当超导磁体的储能量大于设定值 Q_{SMES1} 时,可认为超导磁体的储能量偏高。当 P_0 为正时,应减小 T ;当 P_0 为负时,应增加 T 。

b. 当超导磁体的储能量小于设定值 Q_{SMES2} 时,可认为超导磁体的储能量偏小。当 P_0 为正时,应增加 T ;当 P_0 为负时,应减小 T 。

c. 当超导磁体储能量介于设定值 Q_{SMES1} 和 Q_{SMES2} 时,可认为超导磁体储能状态良好,滑动窗口宽度设置合理,应保持 T 不变。

上述滤波器时间窗长度 T 调整原则带有滞环特性,能够自动防止 T 振荡。由 P_0 得到蓄电池功率指令 P_{bat}^* 及滤波器时间窗长度 T 的过程如图 4 所示。其中,超导磁体储能状态可通过磁体电流反映,蓄电池储能状态通过可蓄电池端电压反映。

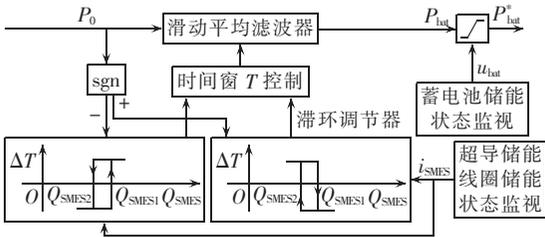


图 4 蓄电池功率指令生成过程

Fig.4 Process of power order generation for battery

2.2 本地控制单元

本地控制单元的任务是控制蓄电池和超导储能磁体跟踪各自指令。得到蓄电池功率指令后,从总功率指令中减掉此值即得到超导磁体功率指令。但如果直流母线连接的各单元均采用功率控制,可能会出现控制系统的稳定问题,因而需要各单元中的一个作为平衡功率源。超导磁体储能装置反应迅速,适合作为平衡功率源来维持母线电压,因此超导储能装置应采用定电压控制。分别以直流电压和有功功率为控制目标,2 种储能装置的本地控制方法如下。

图 1 中,以直流电压为状态变量建立状态方程得到:

$$u_c C p u_c = P_0 - P_{bat} - P_{SMES} \quad (1)$$

其中, p 为时间微分算子, C 为直流电容大小, u_c 为直

流电压, P_{bat} 、 P_{SMES} 为蓄电池和超导磁体有功出力。

可以看到以 u_c 为状态变量的状态方程是非线性的,以电容储能 $Q = \frac{1}{2} C u_c^2$ 为新的状态变量代入式(1)得:

$$pQ = P_0 - P_{bat} - P_{SMES} \quad (2)$$

可看到式(2)是 Q 的线性微分方程,由于 u_c 是单极性,故与电容器储能 Q 一一对应,因而这种代换是合理的。

结合式(2),得到包含电压控制器的超导储能系统结构框图如图 5 所示,其中虚线框部分为电压控制器,控制器采用 PI 控制律+前馈控制,超导储能装置功率指令表达式如式(3)所示。

$$P_{SMES}^* = P_0 - (K + \tau / s)(Q_{ref} - Q) - P_{bat} \quad (3)$$

其中, Q_{ref} 为指令电压 u_{Cref} 对应的电容器能量, K 、 τ 为 PI 控制器参数。超导储能装置的功率指令可根据 $P_{SMES} = u_c(2D - 1)i_{SMES}$ 转化为斩波电路的占空比 D ,并根据占空比生成开关管的触发脉冲。

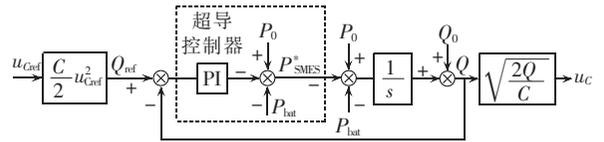


图 5 超导磁体控制系统框图

Fig.5 Block diagram of superconducting magnet control system

对图 5 进行化简,可得到 Q_{ref} 到 Q 的闭环传递函数为:

$$Q(s) = \frac{Ks + \tau}{s^2 + Ks + \tau} Q_{ref}(s) \quad (4)$$

传递函数对应 I 型系统,能够无差跟踪电压指令的阶跃,因而可以维持直流母线电压在指定值。同时由于超导磁体控制器中采用了前馈控制, P_0 、 P_{bat} 的变化会直接引起 P_{SMES}^* 的变化,与无功功率前馈相比,系统具有更好的扰动恢复能力和更短的扰动恢复时间。

蓄电池承担功率的平滑部分,功率变化较慢,可以采用基于电流控制的双 PI 环功率控制。外层功率控制环保证功率控制无稳态误差,内环电流在加快系统动态响应的同时抑制调节过程中的振荡。功率控制环和蓄电池电压前馈共同给出电流指令,电流指令一方面为电流内环提供参考值,用来计算斩波占空比 D ,另一方面其符号决定蓄电池接口电路的工作模式。电流指令大于零时,电路工作于 Buck 模式,上桥臂受占空比为 D 的触发脉冲控制,下桥臂截止;电流小于零时,电路工作于 Boost 模式,下桥臂受占空比为 D 的触发脉冲的互补信号控制,上桥臂截止。完整的控制系统结构如图 6 所示。图中, P 、 I 为蓄电

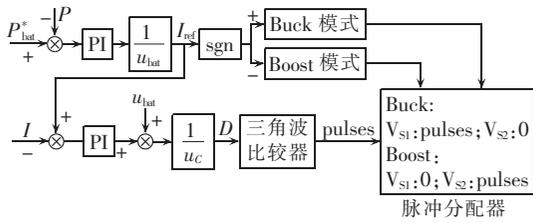


图 6 蓄电池控制系统框图

Fig.6 Block diagram of battery control system

池实际输出功率和电流, I_{ref} 为电流指令。

3 仿真实验

为验证文中设计的系统结构和控制方法的有效性,本文采用 PSCAD/EMTDC 按照图 1 所示系统结构搭建模型进行仿真实验。仿真模型使用三相变流器模拟图 1 中的发电功率和并网功率的差值 P_0 , 并以此作为储能系统的功率总指令。

系统参数如下:直流母线电压 660 V, 电容 5000 μ F, 交流系统电压 380 V; 交流侧滤波器参数为 2 mH、0.01 Ω ; 超导磁体使用 10 H、0.01 Ω 电感建模, 斩波电路工作频率 4 kHz; 蓄电池使用 360 V、1 Ω 内阻的电压源建模, Buck/Boost 接口电路直流侧电感 10 mH, 开关频率 10 kHz。滑动滤波器时间窗初始值为 4 s, 调整步长 0.01 s, 超导磁体门槛上、下限电流为 350 A 和 200 A, 蓄电池最大充放电功率 30 kW, 设计抑制的波动功率的波动范围为 ± 100 kW。

变流器与交流系统间的功率交换波形如图 7 所示, 图中前 5 s 为超导磁体的充电过程, 随后为间歇性电源出力与并网功率(发电平均值)之差变动的过程。蓄电池功率指令 P_{order} 和实际功率 P_{bat} 如图 8 所示。对比图 7 和图 8, 可以看出滑动均值滤波器成功将功率指令中的低频分量分离出来作为蓄电池出力指令, 蓄电池在大部分时间里承担了变化周期为 4 s 及以上的低频分量的功率。从图 8 中可以看到, 蓄电池的出力变化平稳, 基本不存在充放电小循环, 与图 7 相比往复充放电次数大幅减少, 对于充放电次数有上限的蓄电池装置而言, 此特点极大延长了蓄电池的使用寿命。

超导储能装置出力 P_{SMES} 及其电流 i_{SMES} 分别如图 9 和图 10 所示。由图 9 可见, 超导储能磁体承担了总功率指令中快速变化的分量。由于蓄电池承担了总功率指令中的低频变化成分, 超导储能磁体的出力变化的峰峰值减小。对比图 9 与图 7 可看到, 多数时间段内功率偏离纵轴 0 线的幅值减小, 只有在蓄电池出力受限时偏离幅值才会较大, 如在 40 s 和 120 s 附近出现的大幅偏移。图 10 中超导磁体电流波形体现了超导磁体的储能状态: 大部分时间里

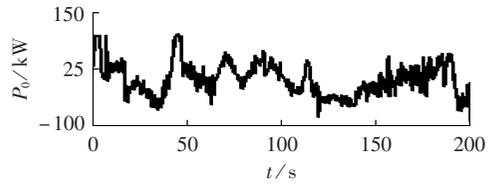


图 7 变流器与系统交换功率波形

Fig.7 Curve of power exchange between converter and system

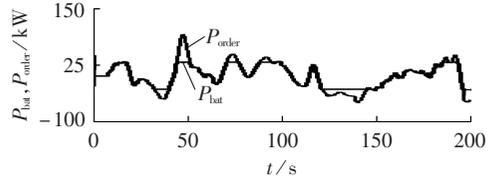


图 8 蓄电池功率指令及实际出力波形

Fig.8 Waveform of battery power order and its actual power output

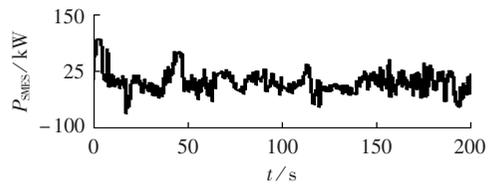


图 9 超导磁体出力波形图

Fig.9 Waveform of superconducting magnet power output

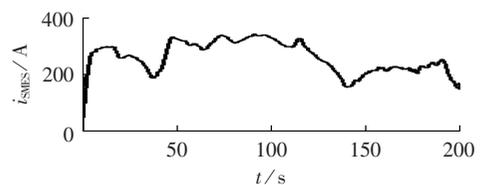


图 10 超导磁体电流波形

Fig.10 Current curve of superconducting magnet

超导磁体电流只有小幅度波动, 只有在蓄电池出力受限、超导磁体被迫承担平抑功率指令的低频分量时才会出现较大幅度变化。

储能系统接入点直流母线电压如图 11 所示, 图中可见直流母线电压含有一定的纹波。这是由超导磁体电流源通过对电容充放电维持电压恒定的工作原理决定的, 纹波的大小取决于直流电容大小、超导磁体电流以及斩波器工作频率, 通过提高斩波器的工作频率或采样多重斩波器可以进一步减小电压纹波。图 11 可以看出直流电压抗扰动能力较强, 在大的有功冲击下电压偏离较小, 如 40 s 附近平抑功率由 -50 kW 快速增加为 100 kW 时, 直流电压没有出现大的凹陷。

滑动平均滤波器时间窗口长度变化波形如图 12 所示。当超导磁体储能状态在设计范围内运行时(130 s 之前), 时间窗长度基本不变, 蓄电池承担预先设计的低频成分(变化周期为 4 s 及以上)。在

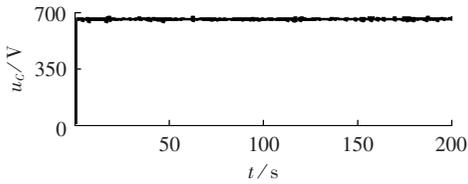


图 11 储能系统接入直流母线电压

Fig.11 DC bus voltage curve when energy storage system is connected in

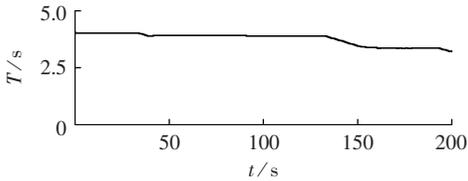


图 12 滑动平均滤波器时间窗长度波形图

Fig.12 Waveform of time window length of moving average filter

130 s 左右,超导磁体储能状态越过下限,时间窗长度自动增减,在指令功率为负时调高超导磁体功率指令的频率下限,使蓄电池承担功率指令高频成分增加,从图 8 的蓄电池出力也可看到此点。

4 结论

本文给出了使用蓄电池-超导磁体混合储能系统平抑间歇性电源出力波动的系统结构及其基于中央控制单元和本地控制单元双层控制结构的控制方法和具体实现,并通过 PSCAD/EMTDC 进行了仿真实验。理论分析和仿真实验得到以下结论。

a. 蓄电池-超导磁体混合储能系统能够有效隔离间歇性电源发电出力的波动对并网功率的影响,从而维持并网功率的稳定。

b. 使用具有滞环特点的时间窗长度调整方案调整滑动平均滤波器的时间窗,能够将补偿总功率在蓄电池和超导磁体之间合理分配,充分利用功率型和能量型储能装置各自的优势。蓄电池承担慢变化分量,保证其出力稳定,减小功率变化对蓄电池的冲击,减少充放电小循环,从而延长蓄电池寿命;超导磁体承担快变化分量,避免磁体充满和放空,减小对超导磁体的容量要求,从而减小体积,降低成本。

参考文献:

[1] IEEE Standards Coordinating Committee 21. IEEE Std 1547-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electronic power systems[S]. New York,USA:IEEE,2003.
 [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
 [3] 张国驹,唐西胜,齐智平. 平抑间歇性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 output of intermittent sources [J]. Automation of Electric Power Sys-

tems,2011,35(20):24-28.
 [4] 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. Modeling and controlling of SCES based wind farm power regulation system [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):86-90.
 [5] 王虹富,曹军,邱家驹,等. 一种用于分布式发电系统的有功功率补偿模型[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):94-98.
 WANG Hongfu,CAO Jun,QIU Jiaju,et al. An active power compensation model for grid connected distributed generation system[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8):94-98.
 [6] 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.
 [7] NOZAKI Y,AKIYAMA K,KAWAGUCHI H,et al. Evaluation of an EDLC-battery hybrid stand-alone photovoltaic power system [C]//Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Anchorage,AK,USA:IEEE,2000:1634-1637.
 [8] AKIYAMA K,NOZAKI Y,KUSO M,et al. Ni-MH batteries and EDLCs hybrid stand-alone photovoltaic power system for digital access equipment [C]//Proceedings of the 22nd International Telecommunications Energy Conference. Phoenix,AZ,USA:IEEE,2000:387-393.
 [9] 唐西胜,武鑫,齐智平. 超级电容器蓄电池储能独立光伏系统研究[J]. 太阳能学报,2007,28(2):178-183.
 TANG Xisheng,WU Xin,QI Zhiping. Study on a stand-alone PV system with battery/ultracapacitor hybrid energy storage[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2007,28(2):178-183.
 [10] 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 Guoju,TANG Xisheng,QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitor and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(12):85-89.
 [11] DOUGAL R A,LIU Shengyi,WHITE R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids [J]. IEEE Trans on Components and Packaging Technologies,2002,25(1):120-130.
 [12] 张丹丹,罗曼,陈晨,等. 超级电容器-电池复合脉冲电源系统的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(30):36-30.
 ZHANG Dandan,LUO Man,CHEN Chen,et al. Experimental study on composite power source of supercapacitor battery [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(30):36-30.
 [13] GAO Lijun,DOUGAL R A,LIU Shengyi. Power enhancement of an actively controlled battery-ultracapacitor hybrid [J]. IEEE Trans on Power Electronics,2005,20(1):236-243.
 [14] PAY S,BAGHZOUZ Y. Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles[C]//Power Tech Conference Proceedings. Bologna,Italy:IEEE,2003:23-26.
 [15] KARASIK V,DIXON K,WEBER C,et al. SMES for power utility applications:a review of technical and cost considerations [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity,1999,9(2):541-546.

- [16] 张国驹,唐西胜,周龙,等. 基于互补 PWM 控制 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011,31(6):15-21.
ZHANG Guoju,TANG Xisheng,ZHOU Long,et al. Research on complementary PWM controlled Buck/Boost bi-directional converter in supercapacitor energy storage[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(6):15-21.
- [17] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):34-38,62.
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):34-38,62.
- [18] 和贝,张建成,钟云,等. 基于双并联 Boost Buck 电路的光伏发电系统电压稳定控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):100-103.
HE Bei,ZHANG Jiancheng,ZHONG Yun,et al. Voltage stability control of PV generation systems based on double parallel Boost Buck chopper[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010,30(7):100-103.
- [19] 郑文迪,蔡金锭. 燃料电池超级电容器混合发电系统能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):28-32,42.
ZHENG Wendi,CAI Jinding. Energy management strategy for hybrid generation system with fuel cell and super-capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):28-32,42.
- [20] 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.
ZHANG Ye,GUO Li,JIA Hongjie,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):34-38,62.
- [21] 于芑,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.
- [22] 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.

作者简介:

施啸寒(1986-),男,山东滕州人,博士研究生,主要研究方向为储能技术在电力系统中的应用(E-mail:xiaohan4000@163.com);

王少荣(1960-),男,浙江丽水人,教授,主要研究方向为电力系统运行控制及 FACTS 装置在电力系统中的应用(E-mail:wswy96@vip.sina.com)。

Power output fluctuation suppression by hybrid energy storage system for intermittent source

SHI Xiaohan,WANG Shaorong

(School of Electrical and Electronic Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: A hybrid energy storage system composed of battery and superconducting magnet is designed to suppress the power output fluctuation of intermittent source and its basic principle is analyzed. The topological structure of the grid-connection equipment for intermittence power source and the hybrid energy storage system,as well as the interfaces between them,are presented. A dual-layer energy storage control system is designed and implemented. Its central control unit applies the moving average filter to extract the low frequency components from the power order and assigns them to the battery,while the remained fast changing components to the superconducting magnet. The local control unit adopts PI control regulation to force the battery and superconducting magnet following the power order and voltage order respectively. The effectiveness of the designed system and control method is verified by the results of simulation with PSCAD/EMTDC.

Key words: hybrid energy storage system; electric batteries; superconducting magnet; energy storage; output fluctuation suppression; intermittent power source; moving average filter