

文章编号: 1006-4710(2014)03-0299-05

再生能源发电中考虑 SOC 的复合储能控制策略

刘金虹^{1,2}, 张辉^{1,2}, 杨秉翰¹, 李洁¹, 闵阳¹, 杨凯¹

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 为了维持微网中各发电单元输出功率与负荷功率的瞬时平衡, 需要储能单元频繁地充放电, 对传统大功率锂离子电池的内部温度等产生较大的负面影响, 导致电池容量积累性亏损并在短时间内快速下降, 缩短其使用寿命。文中提出了适用于微网的超导磁储能与锂离子电池混合储能结构, 将 SMES 与锂离子电池通过各自 DC/DC 变换器并联到直流母线, 并推导了混合储能的简化模型, 利用滑动平均滤波法将波动功率高频部分分配给 SMES, 低频波动部分分配给锂离子电池。根据不同的 SOC 工作状态(正常, 警告, 报警等), 动态调节滤波时间常数, 从而调节功率分配。该 HESS 在风力发电中的仿真试验验证了所提出的混合储能拓扑及滑动平均滤波法动态分配策略的有效性。

关键词: 复合储能; 荷电状态; 超导磁储能; 锂电池; 变截止频率

中图分类号: TM 921 **文献标志码:** A

Control strategy of hybrid energy storage for renewable energy considering SOC

LIU Jinhong^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, YANG Binghan¹, LI Jie¹, MIN Yang¹, YANG Kai¹

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. Open Fund of State Key Laboratory of Electrical Insulation and

Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to maintain the instantaneous power balance of each micro-grid power generation unit and load, frequent charging and discharging of the energy storage unit is urgently needed, which has a great negative effect on the internal temperature of traditional high-power lithium-ion battery, leading to the accumulation loss of battery capacity in a rapid way in a short time and shortening its life span. In this paper, a hybrid energy storage system (HESS) topology of superconducting magnetic energy storage (SMES) and lithium-ion battery suitable for micro-grid is proposed, SMES and lithium-ion batteries are connected in parallel to the DC bus by respective DC/DC converters, and simplified model of hybrid energy storage is derived, high frequency part of the fluctuation of the power is allocated to SMES, the low-frequency fluctuation part is assigned to lithium-ion battery by using moving average filtering method. The filter time constant is dynamically adjusted depending on the SOC work status (normal, warning, alarm, etc.), thereby adjusting the power distribution. Simulation test of HESS used in wind power generation can validate the effectiveness of the proposed topology and moving average filtering method.

Key words: HESS, SOC, SMES, Li-ion battery, variable cut frequency

收稿日期: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977078); 国家自然科学基金资助项目(51277150/E070602); 陕西省工业攻关(2013K07-05); 陕西省教育厅产业化培育资助项目(14JF020); 电力设备电气绝缘国家重点实验室开放基金资助项目(EIPE12209); 西安市碑林区科技计划资助项目(GX1210); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(105-00X1201)。

作者简介: 刘金虹, 男, 博士生, 研究方向为再生能源发电及其储能解决方案。E-mail: ljhrainbow@163.com。

张辉, 男, 教授, 博导, 研究方向为节能与新能源发电、电动车驱动系统。E-mail: zhangh@xaut.edu.cn。

随着再生能源爆发式增长,储能逐渐成为其发展的瓶颈,纵观现有的储能方式,没有一种储能方式能同时满足功率和能量的性能要求,因此采用复合储能(HESS:Hybrid Energy Storage System)势在必行。采用 SMES 及锂电池组合的复合储能方式兼具功率型及能量型储能的优势^[1]。SMES 负责处理快速变化的风电功率,锂电池负责处理缓慢变化的风电功率,如图 1 所示^[2]。

近年来,风力发电日益渗透到电网中,引起了许多电网运行问题,因为在补偿供电及负载平衡时,风机控制能力有限。由于现有的负载跟踪旋转备用设备对不平衡的响应太慢,风力发电自身功率的随机变化需要更先进的控制管理策略^[3]。

本文提出一种新的复合储能 SOC 控制策略,实际情况下的仿真验证了控制策略的可行性和有效性。

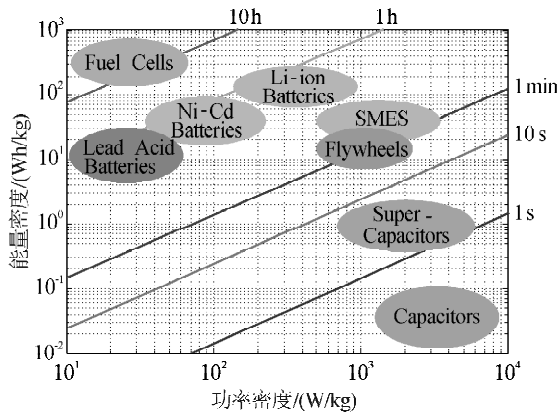


图 1 各种储能的充放电特性
Fig.1 Charge & discharge characteristics of variable storages

1 复合储能模型

现有的储能装置有能量型和功率型之分,本文将锂离子电池和超导磁储能结合构成复合储能装置,可以消除单一储能装置的缺陷,充分发挥各自优势,SMES 补偿高频功率波动部分,锂离子电池补偿低频功率波动部分。图 2 所示是复合储能系统拓扑结构^[4],SMES 和锂电池经 DC/DC 变换器连接到直流母线侧。电压源变换器通过控制 SMES 和锂电池的功率流向实现母线电压的稳定。

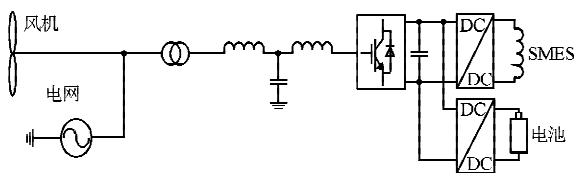


图 2 复合储能系统及其拓扑
Fig.2 Hybrid ESS and system topology

表 1 系统参数
Tab.1 System parameters

参数	数值	参数	数值
风电场功率等级	80 GW	锂电池最大容量	20 MWh
SMES 最大容量	19 GJ (5.3 MWh)	锂电池可用容量	12 MWh
SMES 可用容量	18 GJ (5 MWh)	逆变器功率等级	25 MVA

1.1 SMES 简化模型

图 3 所示为 SMES 拓扑及充放电运行等效电路。SMES 的工作状态包括充电、环流、放电三个模式^[5-6]。图 3(a)中,当 SMES 充电时, S_1 、 S_2 均开通,在此期间线圈电流上升。图 3(b)中,当 S_2 开通时,SMES 处于环流并储能状态。图 3(c)SMES 放电时, S_1 、 S_2 均关断,SMES 电流流向直流侧。

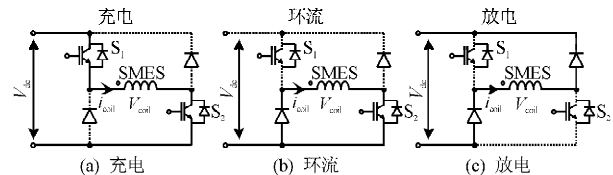


图 3 SMES 拓扑及等效模式
Fig.3 SMES topology and its equivalent circuit

SMES 的电流方程:

$$i_{coil} = \frac{1}{L_{coil}} \int_{t_0}^t V_{coil} dt + i_0 \quad (1)$$

其中,充电时 $V_{coil} = V_{dc}$,环流时 $V_{coil} = 0$,放电时 $V_{coil} = -V_{dc}$,为了计算超导电流的 SOC,将电压变化的频率设置为 2 kHz^[7]。

SOC 方程可从能量密度推导得到:

$$SOC\% = \frac{100}{2hW_{SMES}} L_{coil} i_{coil}^2 \quad (2)$$

其中, W_{SMES} 为每小时可用的能量。

1.2 锂离子电池模型

许多文献中都有研究过锂离子电池充放电特性及等效模型^[8],本文不再详细论述。锂电池通过双向 DC/DC 变换器连接电网。通过电流数据计算 SOC:

$$SOC\% = SOC_0 + \frac{1}{Q_n h} \int_{t_0}^t i(t) dt \quad (3)$$

式中, Q_n 、 SOC_0 分别是锂电池额定容量及初始荷电状态,为了便于精确计算电池电压及 SOC,对锂电池做以下假设:

- 1) 充放电过程中内部阻抗恒定;
- 2) 忽略温度影响;
- 3) 没有自放电效应;
- 4) 无记忆效应。

2 考虑 SOC 的复合储能控制策略

在所设计的复合储能中,SMES 负责平滑风电功率高频变化部分,锂电池负责低频部分。为了系统的、自适应的配置它们各自承担的功率部分,在考虑锂电池及 SMES 最优性能的基础上设计了两个滤波器。

图 4 中,为了便于分析平滑风电功率输出、低通滤波器的输出以及电网功率,假设风电功率阶跃变化。由图 4 可以看出,SMES 承担的功率部分位于风电功率及分界线之间,锂电池承担的功率部分位于分界线及电网功率之间。

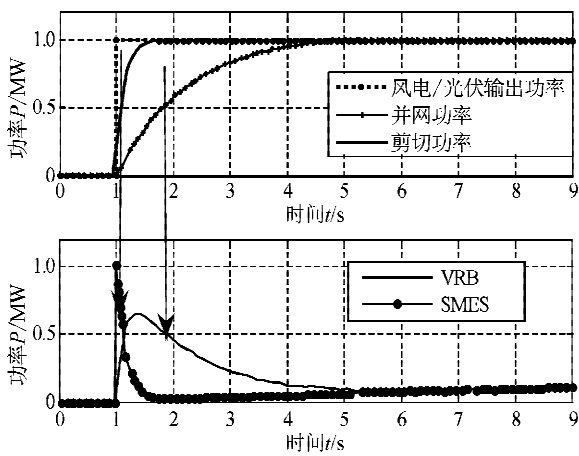


图 4 SMES 和锂电池功率分配关系

Fig. 4 Role sharing operation between battery and SMES

复合储能系统功率是锂电池和 SMES 功率之和,补偿原始风电输出,让期望的并网功率传输给电网,采用了滑动平均的概念确定期望的参考并网功率,进而设计一阶滤波器。

图 5 显示了滑动平均的功率分配框图。功率分配时,由低通滤波器确定 SMES 和锂电池承担的功率部分。截止频率越高,分配给锂电池的功率越大。反之截止频率越低,分配给 SMES 的功率越大。

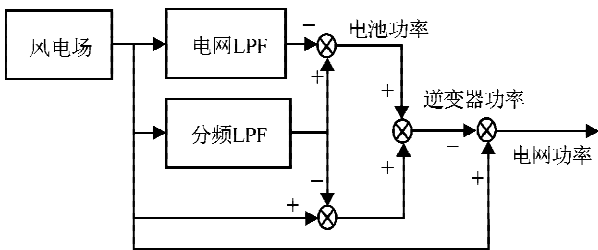


图 5 滑动平均分配功率控制框图

Fig. 5 Role sharing control block diagram for the moving average

为了系统的管理复合储能的 SOC,笔者将 SOC

系统的分为三类:正常、警告、报警状态,如表 2 所示。

表 2 SOC 工作状态
Tab. 2 Working states of SOC

工作状态	正常	警告	报警
SOC	2 ESS 20%~80%	1 ESS 10%~20% 80%~90%	2 ESS 10%~20% 80%~90% 1 ESS 0%~10% 90%~100%
	ESS	变化慢	变化快
T	滑动 T	滑动 T	T 很小

当 SMES 的 SOC 很大时,增大截止频率,让锂电池多承担一部分功率,如图 4 所示。复合储能承担风电功率及并网功率之间的差值部分,因此两个储能装置在支撑电网功率及保障电网正常运行方面具有非常重要的作用。

并网功率通过 LPF 的时间常数 T 控制,它决定了 HESS 承担多大的功率。公式(4)所示为并网滤波器的传递函数。

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT} \quad (4)$$

SOC 在 10%~90% 之间变化时,控制时间常数 T 使它随着 SOC 变化。SOC 进入报警状态时刻,控制 $T=250$ s,如图 6 所示。依据风功率变化速率改变 T ,因为区分风功率变化是上升还是下降非常重要。比如,当锂电池基本上充满且风电功率开始下降时, T 增加使并网功率下降。当锂电池基本上充满且风电功率开始上升时, T 减小使并网功率上升。

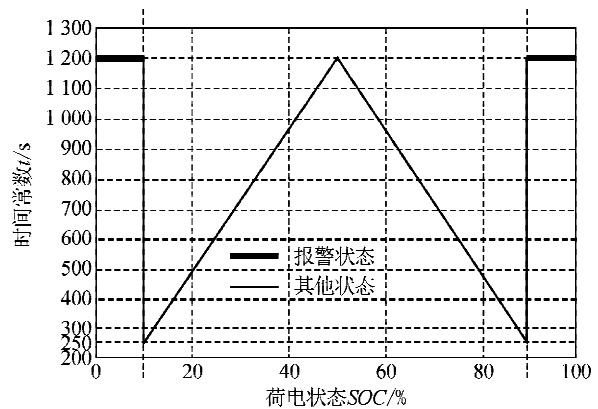


图 6 根据 SOC 计算并网功率的时间常数

Fig. 6 Grid power time constant calculated by battery SOC

2.1 正常情况

图 7 为正常情况下 SMES 及锂电池 SOC 的自适应剪切频率控制响应图。图 7 (a) 描述的是并网功率随风电功率缓慢变化的过程,HESS 补偿两者功率之差。注意 T 影响整个 HESS SOC 水平,因为功率差是由 HESS 提供。正常运行时,频率变化不

快,因此锂电池和 SMES 的 SOC 变化平缓,如图 7 (b)所示。图 7 (c)是剪切频率变化趋势。

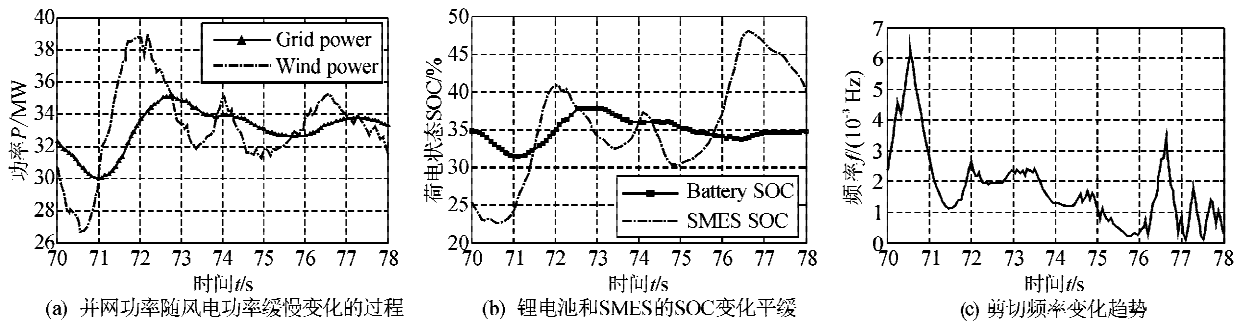


图 7 SMES 及锂电池 SOC 的自适应剪切频率控制
Fig.7 Adaptive cut-off frequency control for SMES and battery SOC

2.2 警告状态

图 8 为警告状态下通过功率分配控制 SOC 的响应图。

图 8 (a)中,因为风电功率开始下降,因此增大剪切频率,使锂电池多承担一部分功率,通过图8(c)

的 SOC 控制使锂电池释放的功率比 SMES 多一些。图 8(b)中,因为 SOC 超过 80%,频率控制立即起作用。此时只需要按图 6 改变 T ,不需要其他的并网功率控制算法。报警状态控制时,只需要将剪切频率增大或减小到合适的位置即可。

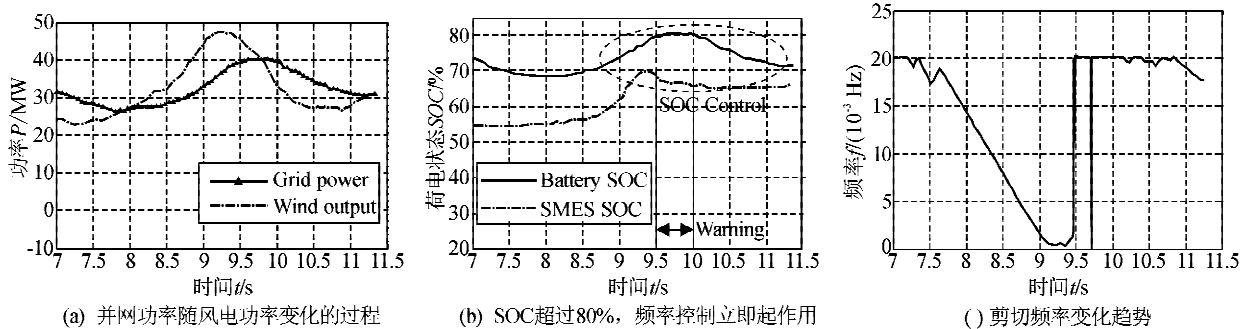


图 8 通过功率分配控制 SOC
Fig.8 SOC regulation through role sharing control

2.3 报警状态

当满足以下任一条件时发出警报:

- 1) 有一个储能装置的 SOC 超过 90%或低于 10%;
- 2) 两个储能装置的 SOC 都进入警告区。

SOC 进入报警状态时,HESS 必须使 SOC 恢复到正常的水平,并且使 T 恢复到图 6 中的峰值(标识为反向移动)。

当风电功率上升,并网功率以 $T=250$ s 快速上升,快速的电网功率跟踪可以增加稳定性。

当风电功率下降时,HESS 放电,SOC 下降,脱离警报区,如图 9 所示。

总之,警报状态的目的是控制 SMES 和锂电池的总功率。

2.4 复合储能长时间运行的研究

风功率不能准确预测,意识到这一点非常重要,因此很难控制储能的状态,但是利用所提出的控制

策略对 SMES 和锂电池进行协调控制有助于缓解这个问题。图 10 给出了复合储能长时间运行的情况,试验结果表明 HESS 具有良好的稳定功率输出性能。

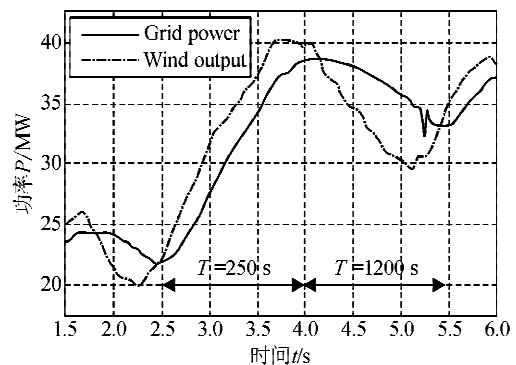
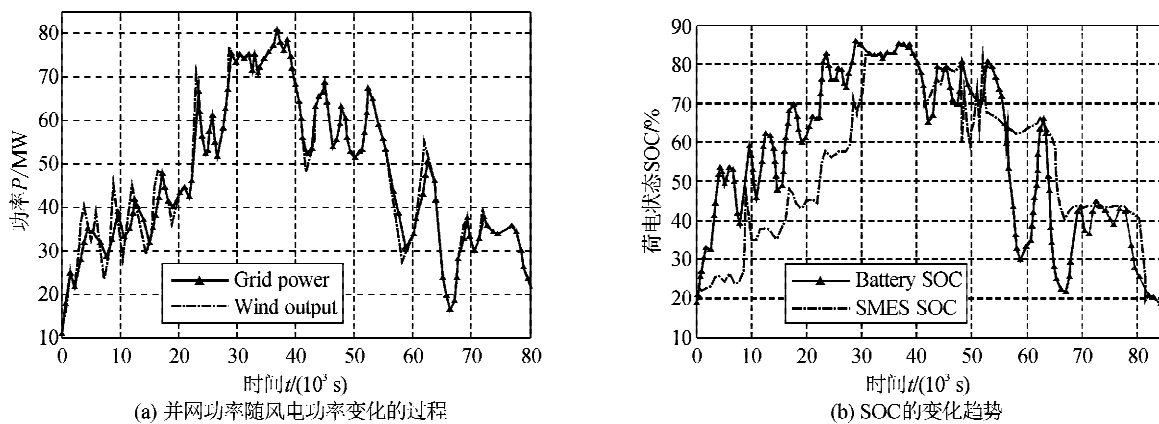


图 9 HESS 几乎充满且报警情况下的电网参考功率
Fig.9 Grid reference during the alarm case in considerably charged situation



(a) 并网功率随风电功率变化的过程

(b) SOC的变化趋势

图 10 结合自适应频率及时间常数控制的一天运行

Fig. 10 One day operation combined with adaptive frequency and T control

3 结 语

本文通过观测电网条件及复合储能 SOC 状态研究了锂电池和 SMES 的协调控制及运行策略。定义了三个运行状态:正常、警告、报警状态,以便系统的管理 HESS。试验结果验证了所提出的控制策略的有效性。

对于最优储能容量大小,HESS 运行策略非常重要,因为它与总投资及期望的性能关系密切。SOC 变化和复合储能的容量大小也有关系,比如说,小型储能装置的 SOC 变化很大且很频繁,当储能容量取最小值时,很有必要适当地管理 SOC。如果 SOC 管理不当,很可能导致 SMES 或锂电池寿命减小及未知故障。对于小型储能装置,这种情况可能更严重。所设计的 HESS 运行策略应该有助于减小储能容量并保证或者延长储能装置的设计寿命。

参考文献:

- [1] Bizon N, Stork M, Oproescu M. Fuel cell hybrid power source for pulsed current loads[C]//2012 International Conference on Applied Electronics (AE), Pilsen, 2012: 5-7.
- [2] Kesler S E, Gruber P W, Medina P A, et al. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits [J]. Ore Geology Reviews, 2012, 48: 55-69.
- [3] Ise T, Kita M, Taguchi A. A hybrid energy storage

with a SMES and secondary battery[J]//IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.

- [4] Chen C, Jih-Sheng L, Yu-Bin W, et al. Design and control for LCL-based inverters with both grid-tie and standalone parallel operations [C]//Industry Applications Society Annual Meeting, 2008, IAS '08. IEEE, Edmonton, Alta, 2008:1-7.
- [5] 诸嘉慧, 杨斌, 黄宇淇, 等. 基于 DSP2812 高温超导储能系统斩波器控制设计[J]. 电力电子技术, 2010, (10): 100-102.
Zhu Jiahui, Yang Bin, Huang Yuqi, et al. Control design of HT-SMES chopper based on DSP2812[J]. Power Electronics, 2010, (10): 100-102.
- [6] 张辉, 王鑫, 路亚新, 等. 基于虚拟磁链的超导储能装置直接功率控制策略[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(1): 62-67.
Zhang Hui, Wang Xin, Lu Yaxin, et al. A direct power control method for superconducting magnetic energy storage system based on virtual flux[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(1): 62-67.
- [7] Jae W S, Youngho C, Seog-Joo K, et al. Synergistic control of SMES and battery energy storage for enabling dispatchability of renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 5701205-5701205.
- [8] Min C, Rincon-Mora G A. Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 504-511.

(责任编辑 杨小丽)