

Self-Adaptive Droop Control of Battery Power Applied in Residential Storage System *

SHI Jun^{*}, PENG Hui, CAI Miaomiao, WU Huajie

(School of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang Jiangxi 332005, China)

Abstract: Residential storage system was studied, and droop control was adopted to regulate battery power. In this system, the bus voltage was controlled by the inverter, and the battery power was regulated by the bi-directional DC/DC controller of battery according to the sampled bus voltage. Inter-leaving bi-directional Boost converter was selected as circuit topology, while droop control was selected as control strategy. Two adaptive control strategy of battery power were proposed in detail in order to solve the common issue of power control error because of voltage sampling deviation (the voltage sampling of inverter and DC/DC converter are independent, resulting in sampling deviation), which were voltage compensation and power compensation. Finally, a 5 kW prototype was built and the two adaptive control strategies were both realized, and the effectiveness were verified by the experimental results.

Key words: storage system; DC/DC converter; droop control; self-adaptive; power control; accuracy

EEACC: 1290B; 1210

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.027

应用于户用储能系统的电池功率自适应下垂控制 *

石俊^{*}, 彭辉, 蔡苗苗, 吴华杰

(九江学院电子工程学院, 江西 九江 332005)

摘要:以户用储能系统为研究对象, 采用下垂控制调节电池功率, 即由逆变器控制直流母线, 电池的双向 DC/DC 控制器根据母线电压调节电池功率, 该控制方法的优势在于方便实现多直流源并联。双向 DC/DC 变换器的电路拓扑采用交错式双向 Boost 变换器, 并给出了下垂控制器的具体设计方法。针对系统中普遍存在的因电压采样偏差 (逆变器与 DC/DC 变换器的电压采样是独立的, 存在偏差) 导致的功率控制偏差问题, 提出了两种电池功率自适应控制策略: 电压补偿和功率补偿, 并给出了具体的实施方法。最后设计了一台 5 kW 样机, 分别实现了两种策略, 并进行了对比分析, 实验结果验证了所提出策略的有效性。

关键词: 储能系统; DC/DC 变换器; 下垂控制; 自适应; 功率控制; 精度

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2021)01-0141-04

近年来, 随着各种新能源发电技术的不断进步, 发电方式得到了极大的丰富, 比如光伏发电、风力发电、热能发电等^[1-3]。但是发电技术的发展并没有解决电力系统中普遍存在的电能供给不平衡的问题, 从而造成能量浪费^[4]。与此同时, 随着电动汽车技术的不断发展, 电池技术从成本、性能到安全性都有了进一步的改善^[5]。为此在电力系统中推广储能应用成为研究的热点^[6-9]。

本文以户用储能系统为研究对象, 其系统框图如图 1 所示, 光伏面板和储能电池经过各自的 DC/DC 变换器并联到公共直流母线, 再通过 DC/AC 变换器

(逆变器) 实现并网。相较于传统的户用光伏发电系统, 由于储能电池的参与, 储能系统更有利于实现能量管理, 更好地参与电网调度。

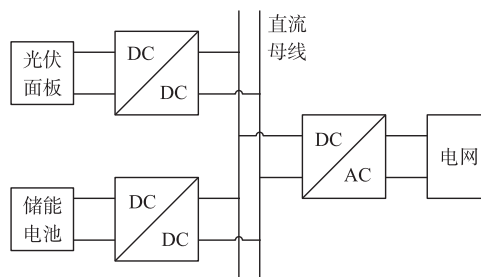


图 1 户用储能系统框图

项目来源: 国家自然科学基金项目 (61563023)

收稿日期: 2020-01-07

修改日期: 2020-05-23

为了实现多直流源并联,本文采用了下垂控制^[10-12]。这是一种在并联系统中得到广泛应用的控制方法。文献[10]提出了一种通过检测并联系统逆变器输出无功功率、瞬时调节逆变器自身输出阻抗的方法的改进策略。文献[11]针对直流微电网系统提出了一种可以自动调节下垂系数的控制策略。文献[12]提出了根据逆变器输出情况对低通滤波器时间常数进行自适应变换器的自适应下垂控制。

本文所搭建的系统由逆变器控制直流母线电压,储能电池 DC/DC 变换器内置的下垂控制器根据母线电压控制电池功率。实际应用中发现,由于逆变器与 DC/DC 变换器的电压采样是独立的,两者之间存在偏差。该电压偏差会导致功率控制存在偏差,为此本文以提高功率控制精度为出发点,提出了基于电压补偿或功率补偿的电池功率自适应下垂控制,并给出了具体的实施方法。

1 下垂控制器设计

本文选用交错式双向 Boost 变换器,其拓扑结构如图 2 所示。电池端采用 3 个电池模块串联,单个模块采用 16 个单体串联而成。电池额定容量为 64 Ah,工作电压范围为 156 V~192 V,设计最大充放电功率为 5 kW。变换器输出电压范围为 320 V~430 V。 C_{bat} 为电池侧滤波电容, L_a 、 Q_{a1} 、 Q_{a2} 、 C_a 分别为 A 路 Boost 变换器的输入滤波电感、开关桥臂上管、开关桥臂下管和输出吸收电容, L_b 、 Q_{b1} 、 Q_{b2} 、 C_b 分别为 B 路 Boost 变换器的输入滤波电感、开关桥臂上管、开关桥臂下管和输出吸收电容, C_{bus} 为输出侧亦即母线侧滤波电容。 R_{sense} 为母线电流采样电阻。

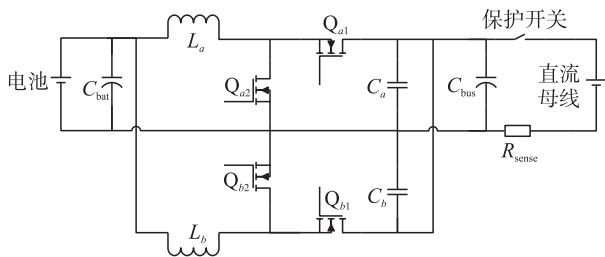


图 2 双向 DC/DC 变换器拓扑结构

变换器控制采用双环结构,其控制框图如图 3 所示。电流内环控制输入电感电流, $G_{o1}(s)$ 为电流内环开关传递函数, G_{iL} 为电感电流采样系数。电压外环控制母线侧功率, $G_{o2}(s)$ 为电流变换系数, $G_{o3}(s)$ 为负载变换系数, G_{iBus} 为母线电流采样系数, G_{vBus} 为母线电压采样系数。根据采样的母线电压得到下垂控制器的给定电压 V_{ref} ,进而根据下垂曲线得到功率外环的给定功率 P_{ref} 。

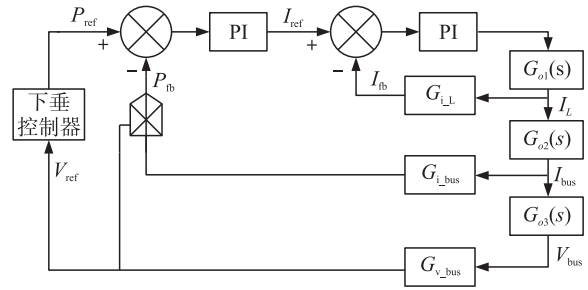


图 3 变换器控制框图

本文采用的下垂控制曲线如图 4 所示,横坐标为母线电压 V_{bus} ,纵坐标为电池功率 P_{bat} 。图中(V_1 , V_3)构成了电池放电区间, V_1 为最小母线电压, V_2 为最大放电功率 ($-P_{discharge_pk}$) 时对应的转折电压。 $[V_3, V_4]$ 构成了电压死区,在死区范围内,电池处于既不充电也不放电状态。 (V_4, V_6) 构成了电池的充电区间, V_5 为最大充电功率 (P_{charge_pk}) 时对应的转折电压, V_6 为最大母线电压。

充电下垂系数 K_{charge} 可以表示为:

$$K_{charge} = \frac{P_{charge_pk}}{V_5 - V_4} \quad (1)$$

放电下垂系数 $K_{discharge}$ 可以表示为:

$$K_{discharge} = \frac{P_{discharge_pk}}{V_3 - V_2} \quad (2)$$

设计最大充电功率和最大放电功率均为 5 kW,死区电压范围为 [370 V, 380 V]。设计充电下垂系数 K_{charge} 为 125 W/V,放电下垂系数 $K_{discharge}$ 为 125 W/V。

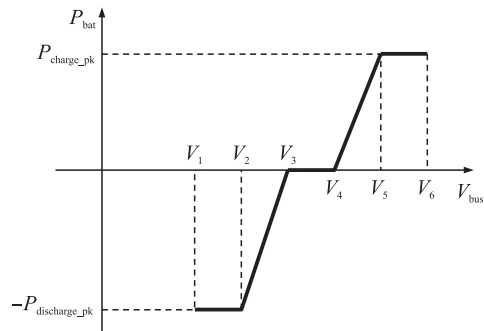


图 4 下垂控制曲线

2 功率控制精度改善策略

所设计的如图 1 所示的户用储能系统,由于电池用的双向 DC/DC 变换器采用了下垂控制,逆变器通过控制母线电压来调节电池的充放电功率,系统的能量管理也就变得简单有效。但是由于逆变器与双向 DC/DC 变换器的电压采样存在偏差,导致了电池功率控制存在偏差,并且该偏差会随着下垂系数的变大而变大。

功率控制最大偏差 ΔP_{pk} 可以表示为:

$$\Delta P_{pk} = \varepsilon \cdot \max(K_{\text{charge}}, K_{\text{discharge}}) \quad (3)$$

式中: ε 为电压采样偏差。

本系统中, 考虑 1% 的电压采样偏差, 下垂系数为 125 W/V 的, 计算得到功率控制最大偏差为 525 W。

为了减小功率控制偏差, 改善功率控制精度, 本文提出了两种自适应控制策略, 分别为基于电压补偿的自适应策略 I 和基于功率补偿的自适应策略 II。

策略 I 采用了电压补偿, 其控制框图如图 5 所示。在原有的控制系统中, 增加了虚线框所示的电压补偿环节。其中 $V_{\text{ref_cmd}}$ 是 Host 通过通信方式发送的电压给定命令, 本系统中 Host 即为逆变器。 $V_{\text{ref_comp}}$ 为电压补偿环节输出的给定电压补偿量。实际实现时, 电压补偿环节只是在双向 DC/DC 变换器正常工作前, 增加一个电压偏差自动校准过程。逆变器每隔 100 ms 向 DC/DC 变换器发送一次母线电压平均值, DC/DC 变换器再计算得到实时电压偏差, 连续发送 1 min。发送完成后, 输出电压偏差平均值并计算得到电压误差校正系数。之后根据当前母线电压 V_{bus} 结合电压误差校正系数计算补偿电压作为 $V_{\text{ref_comp}}$, 该偏差的补偿值直接输入到下垂控制器调整功率控制偏差。

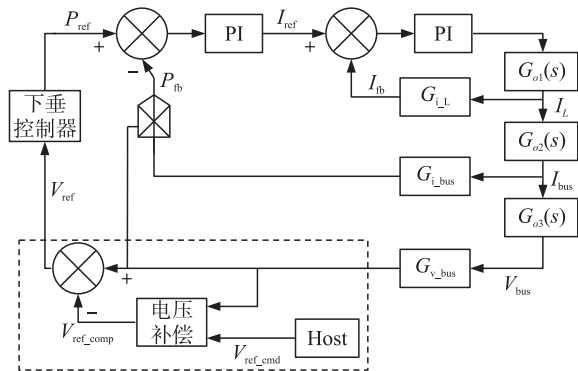


图 5 基于电压偏差自动校准的控制框图

功率控制最大偏差 $\Delta P'_{pk}$ 可以表示为:

$$\Delta P'_{pk} = \varepsilon' \cdot \max(K_{\text{charge}}, K_{\text{discharge}}) \quad (4)$$

式中: ε' 为校准后的电压采样偏差。根据实测结果, 该偏差可以从 1% 降低到 0.05%。

策略 II 采用了功率补偿, 其控制框图如图 6 所示。在原有的控制系统中, 增加了虚线框所示的功率补偿环节。其中 $V_{\text{ref_cmd}}$ 是 Host 通过通信方式发送的电压给定命令, 本系统中 Host 即为逆变器。 P_{comp} 为功率补偿环节输出的功率补偿量。实际实现时, 逆变器每隔 100 ms 向 DC/DC 变换器发送一次母线电压平均值, V_{ref} 与 $V_{\text{ref_cmd}}$ 的偏差经过 PI 环节输出功率补偿值, 再经过限幅环节处理, 参与到实时功率控制中, 由于闭环环节的参与, 功率控制偏差得以实时

调整, 达到改善功率控制精度的目的。

功率控制最大偏差 $\Delta P'_{pk}$ 可以表示为:

$$\Delta P'_{pk} = P_{\text{error}} \quad (5)$$

式中: P_{error} 为功率补偿环的调节误差。

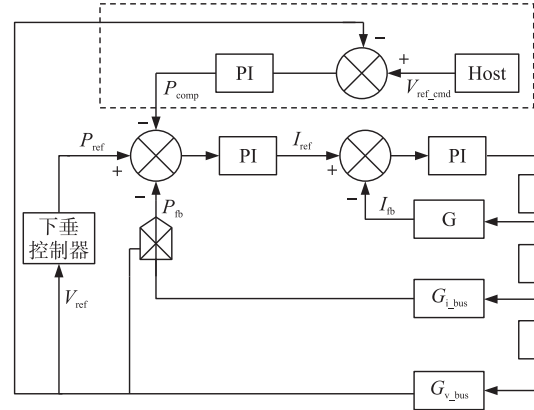


图 6 基于功率补偿的控制框图

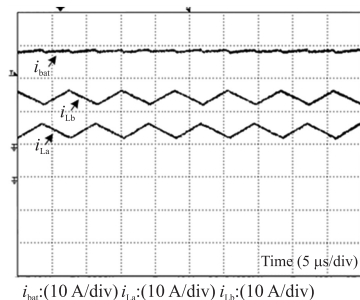
3 实验与分析

本文设计了一台 5 kW 样机, 样机低压侧电压范围为 156 V~192 V, 高压侧电压范围为 320 V~430V。开关频率设计为 130 kHz, 输入电感设计为 148 μH 。开关管选用 IPW65R019C7(650 V, 75 A)。高压侧吸收电容选用薄膜电容, 容值为 1 nF。变换器满载放电波形如图 7(a) 所示, 图中, i_{L_a} 为 A 路电感电流, i_{L_b} 为 B 路电感电流, i_{bat} 为电池侧电流; 满载工作时电池侧电流纹波为 14.8%。满载充电波形如图 7(b) 所示, 满载工作时电池侧电流纹波为 19.6%。图 7(c) 为变换器放电到充电切换波形, 图中 i_{bus} 为 DC/DC 变换器母线侧电流, i_{grid} 为电网电流, 调节时间约为 2.4s。图 7(d) 为变换器充电到放电切换波形, 调节时间约为 4.5 s。

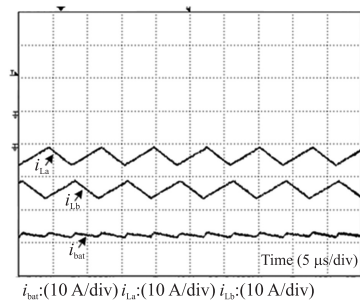
三种控制效果的对比结果如图 8 所示。原始策略如图中圆圈(●)标识线所示, 功率控制偏差在 $[-441 \text{ W}, -350 \text{ W}]$ 之间。自适应策略 I 如图中三角(▲)标识线所示, 其功率控制偏差在 $[0, 100 \text{ W}]$ 之间, 这主要是因为单点不带载工况下的电压校准系数无法实现全范围内电压的准确校准。自适应策略 I 中电压校准后依然存在静态误差, 从而导致功率控制偏差也存在偏置, 而且功率偏差随着直流母线电压的升高而略微升高。相比于原始策略, 其功率控制偏差从最大的 8.82% 降低到了最大的 1.06%, 改善效果明显。

自适应策略 II 如图中菱形(◆)标识线所示, 其控制偏差在 $[-20 \text{ W}, 20 \text{ W}]$ 之间, 这主要是功率补偿环的调节误差。相比于原始策略, 其功率控制偏差从最大的 8.82% 降低到了最大的 0.4%, 改善效果显著。相比于策略 I, 由于闭环控制的引入使得功

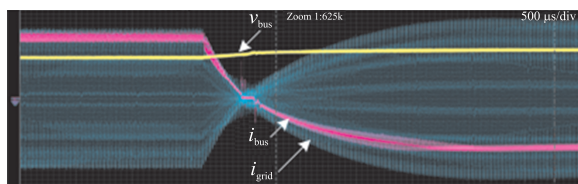
率控制偏差的偏置量得以消除,但同时动态响应相对要较慢些。



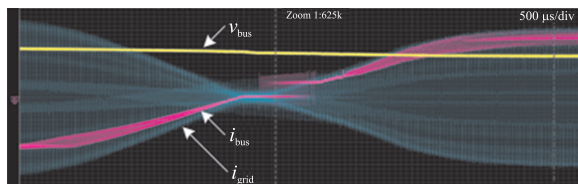
(a) 满载放电波形



(b) 满载充电波形



(c) 放电切换到充电波形



(d) 充电切换到放电波形

图 7 工作波形

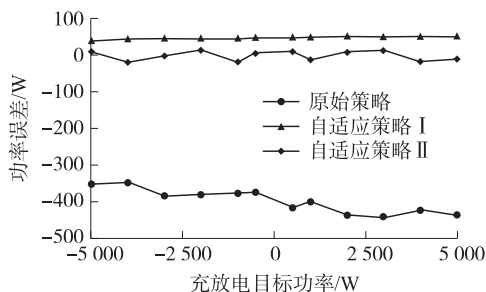


图 8 控制精度对比图

4 总结

本文以户用储能系统为研究对象,提出了两种提高电池功率控制精度的自适应下垂控制策略,给出了具体实现方式并进行了实验对比分析。本文研

究发现,基于电压补偿和功率补偿的自适应下垂控制策略都能明显降低功率控制偏差。功率补偿的静态误差更小,却也存在动态特性不如电压补偿的劣势。因此实际应用时,应根据控制精度和动态响应要求综合考虑后选择。在实际下垂控制系统中,由于电压采样偏差的普遍性和不可忽略性,本文所提出的基于电压补偿和功率补偿的自适应控制策略具有较大的实用价值。本文虽以单电池系统为验证对象,但是所提出的控制策略可以推广到多电池系统中,改善并联均流效果。

参考文献:

- [1] 施鹏飞. 全球风力发电现状及发展趋势[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(7): 3-5.
- [2] Wang Yanzhi, Lin Xue, Pedram Massoud. A Near-Optimal Model-Based Control Algorithm for Households Equipped with Residential Photo-Voltaic Power Generation and Energy Storage Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 77-86.
- [3] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态——基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16.
- [4] 张伟明, 许德智, 颜文旭, 等. 基于自适应积分滑模约束控制的电池储能系统能量管理[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6): 1282-1289.
- [5] 邓涛, 李志飞, 李德才, 等. 电动汽车动力电池主动均衡控制研究[J]. 电源技术, 2019, 43(2): 297-300.
- [6] Li Xiangjun, Hui Dong, Lai Xiaokang. Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 464-473.
- [7] Wang W, Xue J H, Ye J L, et al. An Optimization Control Design of Battery Energy Storage Based on SOC for Leveling off the PV Power Fluctuation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 75-80.
- [8] 曾国宏, 谢小波, 吴学智, 等. 五电平光储一体机的研制[J]. 电力电子技术, 2017, 51(6): 11-14.
- [9] 张明理, 王璐, 徐建源, 等. 风光储联合发电系统复合控制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 64-72.
- [10] 谢玲玲, 时斌, 华国玉, 等. 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 992-998.
- [11] 马中静, 姜文材. 一种应用于直流微电网的改进型下垂控制策略[J]. 电力电子技术, 2015, 49(9): 16-18.
- [12] 华磊杰, 江峰, 赵斌, 等. 基于自适应下垂控制的柔性能源变换器[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 59-68.



石 俊(1970—),男,汉族,江西九江人,硕士,讲师,研究方向为新能源发电、电力系统自动化等,shijun70@163.com。