

组合级联式大容量储能系统两级 SOC 自均衡策略研究

艾洪克¹, 吴俊勇¹, 田明杰¹, 郝亮亮¹, 张巨瑞², 张皎³

(1. 北京交通大学, 北京 100044; 2. 北京京能清洁能源电力股份有限公司, 北京 100028;
3. 北京科锐博润电力电子有限公司, 北京 100083)

摘要: 大容量链式电池储能系统是解决光伏发电等可再生能源发电大规模并网问题的有效手段之一。针对所提出的星形组合级联式大容量电池储能系统中存在的电池 SOC 不均衡问题, 通过注入零序电压实现三相相间 SOC 均衡控制, 并通过在各级单元叠加以 SOC 为反馈量的调制波分量实现各相内不同级联单元之间的 SOC 均衡控制。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中搭建了系统模型, 仿真结果表明所提出的两级 SOC 均衡控制策略能够有效地实现电池 SOC 自均衡, 验证了该控制策略的正确性和可行性。

关键词: 组合级联式储能系统; 两级 SOC 均衡; 零序电压; SOC 反馈

Research on two-stage SOC self-balancing control strategy in hybrid cascade energy storage system

AI Hong-ke¹, WU Jun-yong¹, TIAN Ming-jie¹, HAO Liang-liang¹, ZHANG Ju-rui², ZHANG Jiao³

(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Jingneng Clean Energy Co., Limited, Beijing 100028, China;
3. Creat-Poreen Power Electronics Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Large capacity battery energy storage system is one of the effective means to solve the photovoltaic and other renewable energy power station grid-connected issues. In view of the problems of SOC imbalance in the proposed star hybrid cascade energy storage system, the balancing control of SOC among clusters, namely the bridge arms of each phase in this system, is implemented by means of injecting zero-sequence voltage. And the SOC balance of units within the cluster is realized through adding corresponding modulation wave with SOC as feedback components. Its reasonableness and feasibility are verified by an example of hybrid cascade energy storage system established in PSCAD/EMTDC.

Key words: hybrid cascade energy storage system; two-stage SOC self-balancing; zero-sequence voltage; SOC feedback

中图分类号: TM910; TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)22-0075-06

0 引言

风能和太阳能等可再生能源发电具有随机性和波动性, 它们的并网给电力系统的安全稳定运行带来了极大挑战。电池储能系统具有快速、双向有功和无功功率调节能力, 在应对可再生能源发电间歇性、负荷波动和提高电能质量等方面具有很高的应用价值, 受到广泛关注^[1-2]。为了满足系统容量, 采用电池模块进行直接串并联, 但并联的电池组之间容易产生充放电电流不均衡和环流等问题。为了解决这个问题, 可以将较大功率的 DC/DC 变换器集成到电池组, 构成电池功率模块, 然后再连接到 DC/AC 变换器的直流侧。这样不仅避免了电池组间

的环流, 而且高增益的 DC/DC 变换器可以提高直流母线电压, 使功率转换系统(Power Conversion System, PCS) 的拓扑选择更加灵活多样^[3]。本文主要研究基于星形的独立电池供电的组合级联式储能系统^[4]的结构和控制策略。

随着充放电状态的改变, 电池储能系统中各电池由于生产工艺和使用等原因导致的荷电状态(State Of Charge, SOC)的差异, 在充放电过程中很难消除。假设电池 SOC 的正常工作范围为 30%至 100%, 那么在充电过程中当某电池的 SOC 值提前升至 100%, 或者在放电过程中某电池的 SOC 值提前降至 30%时, 整个电池储能系统将被迫退出运行, 形成“短板”效应。可见, 电池 SOC 不均衡成为了制约整个储能系统可用容量和装置可用率的瓶颈因素^[5], 所以这种独立电池供电的储能系统运行的关

基金项目: 北京市科技计划课题资助项目(D131104002013003)

键问题在于系统充放电时各电池间 SOC 保持均衡。文献[6]提出了注入零序电流法,通过调节零序电流相量维持各电池 SOC 值趋同,但这种方法只适用于没有物理中性点的三角型接线拓扑结构的变流器[7]。文献[8]提出了注入零序电压法,结果验证通过注入零序电压可以实现星形结构中 SOC 均衡控制。文献[9]采用混合储能技术,在基于锂电池的储能系统中采用超级电容器对电池进行保护,但需附加电路和复杂的协调控制,成本较高。

针对本文的星形组合级联式拓扑结构,提出一种相间相内两级电池 SOC 自均衡策略,相间均衡是通过调节以 SOC 值为反馈量的零序电压相量改变各相的调制波,相内均衡是通过各级 H 桥单元调制波叠加以 SOC 为反馈量的分量进行微调。在充电过程中使 SOC 值较小的电池以较大幅值的调制波快速充电,而在放电过程中使 SOC 较大的电池以较大幅值的调制波快速放电,逐步缩小电池间 SOC 的差异,最终达到趋同的目的。最后在 PSCAD / EMTDC 仿真环境下建立基于星形接法的独立电池供电的组合级联式储能系统模型,验证两级电池 SOC 自均衡控制策略的有效性。

1 组合级联式储能系统结构及基本控制策略

组合级联式储能系统主电路[4]如图 1 所示,采用星形接线,以 A 相为例,每相由 n 级 H 桥逆变单元串联而成,形成阶梯波电压 V_a ,通过滤波电抗 L_s 和启动电阻 R_s 直接接入交流电网。每个逆变单元由独立电池通过隔离型半桥 DC/DC 变换器并联到 H 桥型 DC/AC 变换器的直流侧。DC/DC 变换器实时动态匹配电池端电压 V_{ni} 和直流侧电容(C_0)电压 V_{dc} ,平衡两侧传递的有功和无功功率;DC/AC 变换器对系统进行有功功率和无功功率解耦的独立控制,并由这两个变换器共同维持直流侧电容电压恒定[4]。

2 两级电池 SOC 自均衡控制策略

在星形组合级联式大容量储能系统运行中,如何控制各电池 SOC 处于均衡状态是保证整个储能系统高可用率的前提。针对这个问题本文提出了相应的两级电池 SOC 自均衡控制策略,该策略分为相间与相内均衡控制。

2.1 以 SOC 为反馈量的函数

星形组合级联式系统的电池 SOC 均衡控制是将各单元 SOC 值与各相间的 SOC 平均值、各相内的 SOC 平均值的差值作为反馈量的闭环控制策略。首先定义以下变量(以级联系统中的 A 相为例):

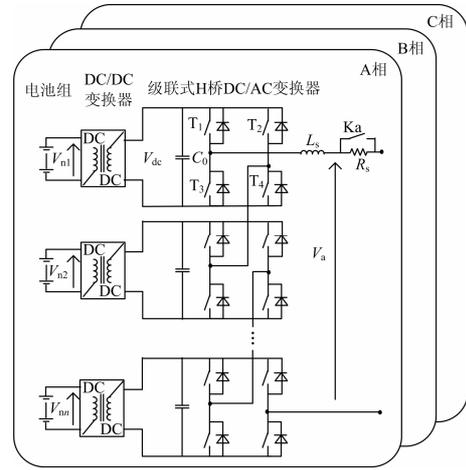


图 1 组合级联式储能系统主电路

Fig. 1 Main circuit of hybrid cascade energy storage system

SOC_{ai} 为 A 相簇第 i 个电池单元的 SOC 值($i=1,2,\dots,n$), 则 A 相簇 SOC 平均值为

$$SOC_a = \frac{1}{n}(SOC_{a1} + SOC_{a2} + \dots + SOC_{an}) \quad (1)$$

同理可得到 B、C 相簇 SOC 平均值,则三相相间 SOC 平均值为

$$\overline{SOC} = \frac{1}{3}(SOC_a + SOC_b + SOC_c) \quad (2)$$

三相相间平均值与每相平均值之差为

$$\Delta SOC_j = \overline{SOC} - SOC_j (j = a, b, c) \quad (3)$$

以 SOC 函数为反馈量,包含电池自均衡控制的组合级联式储能系统控制策略如图 2 所示。

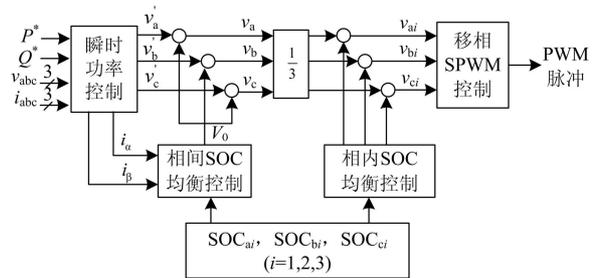


图 2 含 SOC 均衡策略的 PCS 控制策略示意图

Fig. 2 PCS control strategy with SOC equilibrium

图中, P^* 和 Q^* 为系统的有功和无功功率指令, V_{abc} (其正序为 \dot{V}'_a 、 \dot{V}'_b 、 \dot{V}'_c) 和 i_{abc} (即 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c) 表示检测到的电网侧三相电压和电流相量。

2.2 组合级联式系统相间 SOC 均衡策略

针对本文提出的星形组合级联式电池储能系统,在选取其中性点电位时[10],引入以 SOC 为反

馈量的可控零序电压, 通过调节其幅值和相位来改变各相之间的功率分布, 达到相间 SOC 均衡控制的目的。星形系统电压电流相量图如图 3 所示。

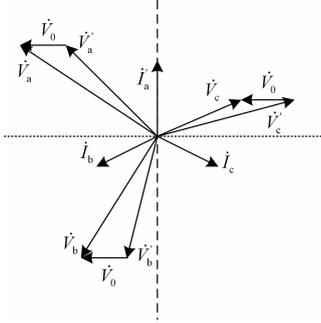


图 3 星形系统电压电流相量图

Fig. 3 Voltage and current vectors of star system

系统三相电压对称, 在变流器输出三相正序电压上叠加零序分量 \dot{V}_0 , 则可得到装置输出总的相电压, 同时可以得到 A 相输出功率 P_a 为

$$P_a = \text{Re}(\dot{V}_a \cdot \dot{I}_a) = \text{Re}(\dot{V}_a' \cdot \dot{I}_a + \dot{V}_0 \cdot \dot{I}_a) \quad (4)$$

式中, P_a 可分解为正序电压 \dot{V}_a' 产生的功率分量和零序电压 \dot{V}_0 产生的功率分量。相比之下, 各相正序电压产生的功率分量均等, 为平衡功率分量; 而 \dot{V}_0 在三相中产生的功率分量互不相等, 为不平衡功率分量。通过调节零序电压 \dot{V}_0 的幅值和相角, 可以在级联式系统输出电压容许的范围内灵活调节不平衡功率大小, 起到均衡电池 SOC 的作用。

为求取该零序电压, 将三相相间的 SOC 不均衡度变换至 $\alpha-\beta$ 静止坐标系下:

$$\begin{bmatrix} \Delta SOC_\alpha \\ \Delta SOC_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \Delta SOC_a \\ \sqrt{\frac{1}{2}} (\Delta SOC_b - \Delta SOC_c) \end{bmatrix} \quad (5)$$

定义 ΔSOC 为相间 SOC 不均衡程度:

$$\Delta SOC = \sqrt{\Delta SOC_\alpha^2 + \Delta SOC_\beta^2} \quad (6)$$

角 γ 表征了相间 SOC 不均衡程度在 $\alpha-\beta$ 轴上的分布:

$$\gamma = \begin{cases} \arctan \frac{\Delta SOC_\beta}{\Delta SOC_\alpha} & (\Delta SOC_\alpha \neq 0) \\ \frac{\pi}{2} & (\Delta SOC_\alpha = 0, \Delta SOC_\beta > 0) \\ -\frac{\pi}{2} & (\Delta SOC_\alpha = 0, \Delta SOC_\beta < 0) \end{cases} \quad (7)$$

则各相叠加的参考零序电压为

$$V_0 = K_1 \cdot K_0 \cdot \Delta SOC \cdot \cos(\omega t + \delta - \gamma) \quad (8)$$

式中: K_0 为比例系数, 取值与具体电池选型有关; K_1 表征电池的充放电状态, 其值由式(9)决定; δ 为电流相角, 计算式如(10)所示。

$$K_1 = \begin{cases} 1 & I_d \geq 0 \\ -1 & I_d < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta = \begin{cases} \arctan \frac{I_q}{I_d} & (I_d \neq 0) \\ \frac{\pi}{2} & (I_d = 0, I_q > 0) \\ -\frac{\pi}{2} & (I_d = 0, I_q < 0) \end{cases} \quad (10)$$

生成零序电压 \dot{V}_0 的原理如图 4 所示。

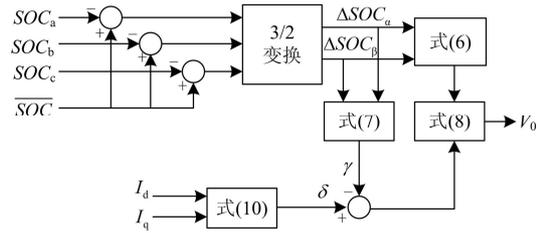


图 4 相间 SOC 均衡控制原理图

Fig. 4 Balancing control of SOC among clusters

各相附加的有功功率为

$$\begin{bmatrix} P_{a0} \\ P_{b0} \\ P_{c0} \end{bmatrix} = \text{Re} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \cdot \dot{I}_a \\ \dot{V}_0 \cdot \dot{I}_b \\ \dot{V}_0 \cdot \dot{I}_c \end{bmatrix} = V_0 \cdot I \begin{bmatrix} \cos \gamma \\ \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, V_0 和 I 分别为零序电压及相电流的幅值。由式(11)可知, 各相有功功率与 SOC 不均衡程度呈正比, 而且零序电压产生的三相有功功率之和为零, 表明注入的零序电压不会对 PCS 总功率及三相电流产生影响。

2.3 组合级联式系统相内 SOC 均衡策略

根据各单元 SOC 与相平均值之间的差值对各链节调制波的幅值进行微调, 从而使存在 SOC 差异的链节单元充放电速度不同: SOC 值大的电池单元在放电过程中以较大的调制波多释放功率, 在充电过程中则以较小的调制波少吸收功率。依此规律, 通过不同速度的充放电调节, 最终使各 SOC 趋同,

实现各级联 H 桥单元间的 SOC 自均衡。将 A 相电池的 SOC 差做如下计算:

$$\Delta SOC_{ai} = SOC_a - SOC_{ai} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (12)$$

各单元附加的调制波分量为

$$\Delta \dot{V}_{cai} = K_1 \cdot K_2 \cdot \Delta SOC_{ai} \cdot \dot{V}_{ca} \quad (13)$$

式中: K_2 为比例系数, 取值与具体电池选型有关; \dot{V}_{ca} 为 A 相原均衡状态下的调制波。

A 相中各单元附加的有功功率为

$$\Delta P_{ai} = \text{Re}(\Delta V_{cai} \cdot e^{j\delta} \cdot I_a \cdot e^{-j\delta}) = \Delta V_{cai} \cdot I_a \quad (14)$$

可以证明各单元附加的有功功率与各单元 SOC 不均衡程度呈正比。

附加在 A 相上的电压值和为

$$\sum_{i=1}^n \Delta V_{cai} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dot{V}_{ca} \sum_{i=1}^n \Delta SOC_{ai} = 0 \quad (15)$$

式(15)表明相内各单元 SOC 均衡不会影响整个系统的瞬时功率控制和相间 SOC 均衡控制。

相内 SOC 均衡控制原理如图 5 所示。

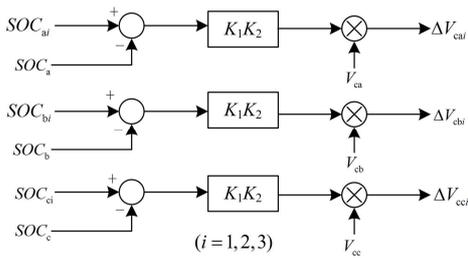


图 5 相内 SOC 均衡控制原理图

Fig. 5 Balancing control of SOC units within the cluster

2.4 比例系数 K_1K_2 的选取

根据电网对电能质量的要求, 规定各单元的调制比必须在合适的范围内^[11], 过低会导致系统利用率低, 过高会导致输出谐波含量高, 在 1.0 附近取值才能保证两级均衡策略不会影响系统其他环节的控制性能。式(15)在调制波不受限幅影响的条件下成立, 然而一旦调制波被限幅, 便会造成输出波形的畸变影响到上层控制的效果, 若要避免这一点可以在运行时在线调节 $K_1 \cdot K_2$ 或在设计时适当提高直流母线电压, 令其满足式(16)的约束。

$$\frac{V_{amax}}{nV_{dc}} \leq 1 - K_1 \cdot K_2 \cdot \max\{SOC_{ai} - SOC_a\} \quad (16)$$

其中: V_{amax} 为正常运行时装置 A 相输出电压幅值的

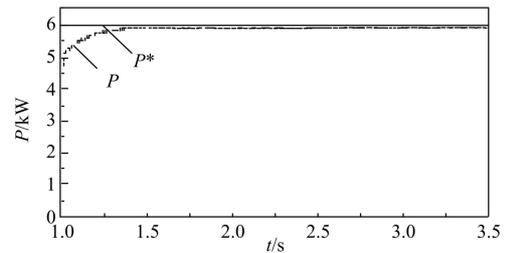
最大值; V_{dc} 为单元直流母线电压; K_1K_2 所在的乘积项表示相内各单元均衡控制施加给调制波的最大偏移量, 其值大小决定了相间均衡的响应速度, 但同时要考虑到各组电池最大电压的限制。对链式拓扑而言, 提高直流母线总电压可以通过增加串联单元数和提高各单元母线电压来实现。

装置越是接近额定功率运行, 受限幅影响均衡控制的效果越弱, 因此不能保证在一个充放电过程中均衡任意的 SOC 分布, 当电池 SOC 差异较大时, 这一均衡过程可能需要在多次充放电过程中完成。

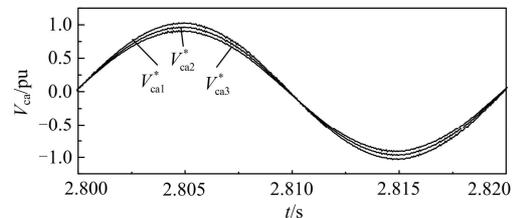
3 仿真实验

系统参数: 电池组额定电压为 $V_N = 60 \text{ V}$, 额定容量均 $S_N = 30 \text{ Ah}$, 电池组 SOC 初值分别为: $SOC_{a1} = 90.01\%$, $SOC_{a2} = 90.00\%$, $SOC_{a3} = 89.99\%$, $SOC_{b1} = 89.97\%$, $SOC_{b2} = 89.99\%$, $SOC_{b3} = 89.98\%$, $SOC_{c1} = 89.99\%$, $SOC_{c2} = 89.98\%$, $SOC_{c3} = 90.00\%$ 。电池组均衡工作时, 整个储能装置输出的有功功率可控范围为 $[-6 \text{ kW}, 6 \text{ kW}]$, 交流侧电网线电压为 380 V , 直流侧电容电压目标值为 120 V , DC/DC 变换器采用隔离型半桥结构, 高频变压器变比 1:1, DC/AC 变换器每相 H 桥级联数 $n=3$, 开关频率 2 kHz , 采用星型接线, $R_s = 50 \Omega$, $L_s = 9.54 \text{ mH}$, $C_0 = 6 \text{ mF}$ 。

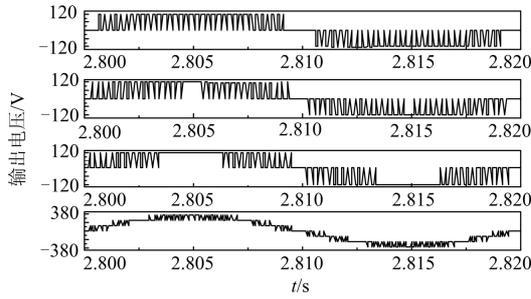
当整个储能系统启动后, 给定功率指令为 $P^* = 6 \text{ kW}$, 系统工作在正向放电状态下, 为了缩短仿真时间, 选择合适的电池参数, 在 2.5 s 的放电过程中 SOC 相间相内均衡结果如图 6 所示。



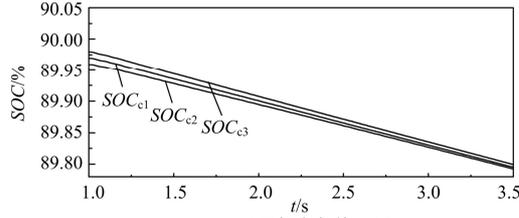
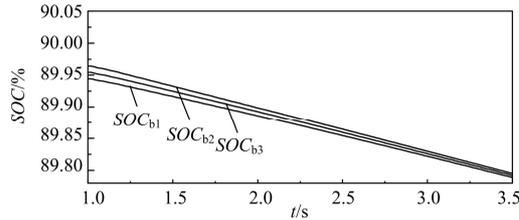
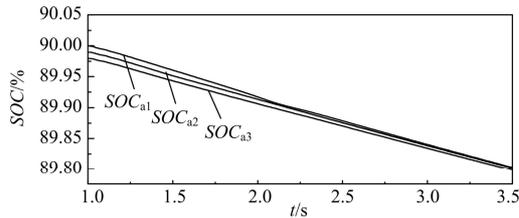
(a) 装置输出功率



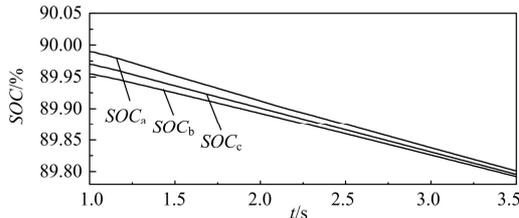
(b) A 相各单元的调制波



(c) A相各链节单元的输出电压



(d) ABC三相内各单元SOC



(e) ABC三相相间SOC

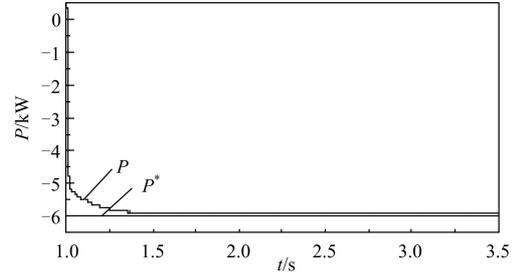
图6 放电过程相间相内SOC均衡结果

Fig. 6 Results of SOC equilibrium among and within clusters during discharge

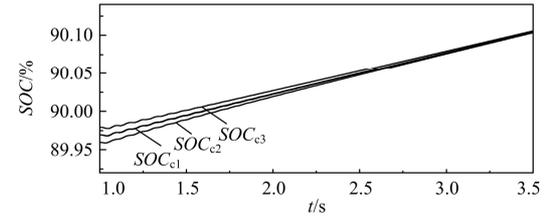
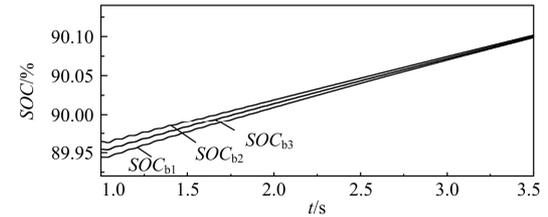
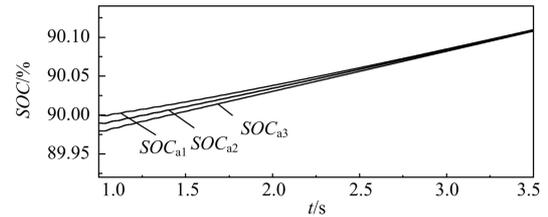
结合图6(b)~图6(d)可知,当PCS装置输出额定功率,电池组处于放电状态时,A相第1个链节单元的 $SOC_{a1} > SOC_a$,其参考波幅值 V_{ca1}^* 较大,放电量较多;第3个链节单元的 $SOC_{a3} < SOC_a$,其参考波幅值 V_{ca3}^* 较小,放电量较少,通过调节相同时间内各链节电池的不同放电量,使SOC最终趋于一致;B、C相内SOC均衡同理。附加零序电压后的三相相间SOC均衡结果如图6(e)所示,运行

一段时间后,SOC都趋于一致。

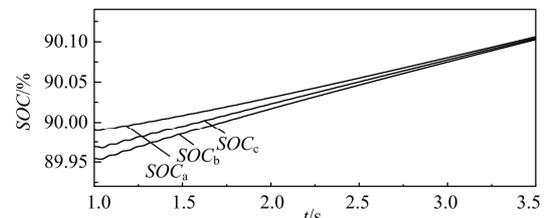
同理可得充电过程SOC相间相内两级均衡结果,如图7所示。



(a) 装置输出功率



(b) ABC三相内各单元SOC



(c) ABC三相相间SOC

图7 充电过程相间相内电池SOC均衡结果

Fig. 7 Results of SOC equilibrium among and within clusters during charge

4 结论

本文基于星形接法设计了独立电池供电的组合级联式大容量储能系统模型,以及适用于该系统的

两级电池 SOC 自均衡控制策略。通过注入可控的零序电压实现了三相相间 SOC 自均衡控制,通过相内各级联单元调制波叠加 SOC 反馈量进行微调,使得装置在充放电过程中,三相相间和相内各级联单元间电池 SOC 同时自动趋于均衡,并且不会影响 PCS 总功率和三相电压,提高了储能装置运行的可用率和系统有效容量。仿真结果证明了本文所提出的控制策略的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 周林, 黄勇, 郭珂. 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. A survey of energy storage technology for micro grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 147-152.
- [2] 蔡国伟, 孔令国, 潘超. 风光储联合发电系统的建模及并网控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 196-204.
CAI Guo-wei, KONG Ling-guo, PAN Chao. System modeling of wind-PV-ES hybrid power system and its control strategy for grid-connected[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 196-204.
- [3] 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.
- [4] MIAO Qing, WU Jun-yong, AI Hong-ke. Study on coordinating control strategy of hybrid cascade energy storage and bi-directional power regulation device[C] // Asia-Pacific Conference on Electrical Engineering and Automation, 2013.
- [5] 彭思敏, 窦真兰, 凌志斌. 并联型储能系统孤网运行协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 128-134.
PENG Si-min, DOU Zhen-lan, LING Zhi-bin. Cooperative control for parallel-connected battery energy storage system of islanded power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 128-134.
- [6] 金一丁, 宋强, 刘文华. 大容量链式电池储能系统及其充放电均衡控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 6-11.
JIN Yi-ding, SONG Qiang, LIU Wen-hua. Large scaled cascaded battery energy storage system with charge/discharge balancing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(13): 6-11.
- [7] MAHARJAN L, INOUE S, AKAGI H. A transformerless battery energy storage system based on a multilevel cascade PWM converter[C] // 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008: 4798-4804.
- [8] 毛苏闽, 蔡旭. 大容量链式电池储能功率调节系统控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 226-231.
MAO Su-min, CAI Xu. Control strategy for power conditioning system of large capacity cascaded battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 226-231.
- [9] 桑丙玉, 陶以彬, 郑高. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 1-6.
SANG Bing-yu, TAO Yi-bin, ZHENG Gao. Research on topology and control strategy of the super-capacitor and battery hybrid energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 1-6.
- [10] 王翠. n 级逆变器 SVPWM 调制零序电压优化算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 158-164.
WANG Cui. An optimal algorithm on zero order voltage of space vector PWM modulation for n-cell inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 158-164.
- [11] 杨波, 曾光, 钟彦儒. 大容量链式多电平变换器的优化 CPS-PWM 方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 167-177.
YANG Bo, ZENG Guang, ZHONG Yan-ru. An optimal CPS-PWM strateg for high-power cascaded multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 167-177.

收稿日期: 2014-06-18; 修回日期: 2014-08-05

作者简介:

艾洪克(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 12121459@bjtu.edu.cn

吴俊勇(1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制, 新能源发电和智能电网, 铁道电气化, 电力信息化。