

DOI: 10.7652/xjtuxb201910011

分布式电池电源模块储能系统的 荷电状态均衡控制

续丹, 毛景禄, 王斌, 周佳辉
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对储能系统中锂电池充放电程度不一致而造成的电池过放/过充,从而导致电池使用寿命缩短的问题,提出了一种分布式储能系统的荷电状态(SOC)均衡控制方案。首先,采用单体电池电源模块串联的分布式储能结构,以单体锂电池估算 SOC 为控制对象;然后,设计基于 SOC 均衡的加权因子分配公式,通过对电源模块分配不同的加权因子来调整各电源模块的占空比,从而动态调节各单体锂电池的充放电速率,实现分布式储能系统的 SOC 均衡控制,改变了传统电池组组内、组间两级均衡控制形式,消除了组内单体锂电池间能量传递造成的功率损失;最后,采用负载电压调节与 SOC 均衡的双闭环控制结构,保证均衡过程中系统运行的稳定性。仿真结果表明:所提出的均衡控制方法能够有效实现储能系统的动态均衡控制,与 SOC 比例均衡控制方法相比均衡时间缩短了 47%。

关键词: 分布式储能系统;荷电状态均衡;加权因子;负载电压调节

中图分类号: TM910 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)10-0079-07

A Balance Control Scheme of SOC for Power Module Energy Storage Systems with Distributed Batteries

XU Dan, MAO Jinglu, WANG Bin, ZHOU Jiahui
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A balance control scheme of state of charge (SOC) for distributed energy storage systems is proposed to deal with the problem that inconsistencies of charge and discharge degree of lithium batteries lead to the over-charge/over-discharge of the batteries, and shorten the life of batteries in an energy storage system. A distributed energy storage structure with a single battery power module series is adopted and estimations of SOC of single lithium batteries are used as control object. An allocation formula of weighting factors is designed based on balance of SOC to adjust the charge and discharge rate of each single lithium battery dynamically and to achieve the SOC balance of the distributed energy storage system, which breaks the double-stage balance control mode in the traditional battery pack balance and eliminates the power loss caused by the energy transfer between the battery cells in the group. Moreover, the double closed-loop control of load voltage regulation and SOC balance control are adopted to ensure the stability of the system operation during the balance process. Simulation results and a comparison with the traditional balance control mode show that the proposed balance control scheme effectively

realizes the dynamic balance control of the energy storage system, ensures the load voltage stability regulation, and reduces the complexity of the system control.

Keywords: distributed energy storage system; state of charge balance; weighting factor; load voltage regulation

锂离子电池以其高工作电压、高比能量、低自放电率和较高的循环寿命等明显优势已经成为新能源汽车、电网等中的储能系统的主流选择^[1]。为了满足新能源汽车的高电压、高功率驱动的要求,通常将大量的单体锂电池串联成电池组进行使用^[2]。当大量的锂电池成组使用时,单体锂电池间会由于生产过程、存放条件以及使用过程中存在的差异造成充放电程度的不一致性。由于不一致性问题会导致个别单体锂电池的过充和过放,大大降低电池的使用寿命,因此设计合理的电池组均衡控制策略^[3-4]对于改善电池组中单体锂电池充放电程度的不一致性具有十分重要的意义。

传统的电池管理系统中,通常通过设计主动均衡电路来解决电池组中单体锂电池间的不一致性问题,主要包括以锂电池端电压^[5-7]为控制对象的电池组均衡方案和以锂电池荷电状态(SOC)^[8-10]为控制对象的电池组均衡方案。然而,传统的电池组均衡控制主要存在两个弊端:①组内、组间均衡的两级均衡控制形式增加了均衡控制的复杂度;②组内单体锂电池间能量传递造成的功率损失降低了电池组的电池能量利用率。

为了解决传统电池组均衡控制的弊端,本文采用单体电池电源模块串联的分布式储能结构^[11-13]的均衡控制方案,改变了传统电池组组内、组间两级均衡控制形式,消除了组内单体锂电池间能量传递造成的功率损失。均衡控制方案采用功率分配理念,以单体锂电池 SOC 为控制对象,设计权重因子,达到对单体电池电源模块中单体锂电池充放电速率动态调节的目的,实现分布式电池电源模块储能系统的 SOC 均衡;同时,采用负载电压调节与均衡的双闭环控制,保证系统运行的稳定性。

1 分布式电池电源模块储能系统

分布式电池电源模块储能系统如图 1 所示,每个单体锂电池通过连接一个 DC-DC 转换器和一个微处理器组成一个单体电池电源模块,各单体电池电源模块串联连接。系统的中心处理器通过对负载电压的需求和储能系统中各单体锂电池充放电程度的监控,借助于不同功率分配策略的切换^[14-15],通过

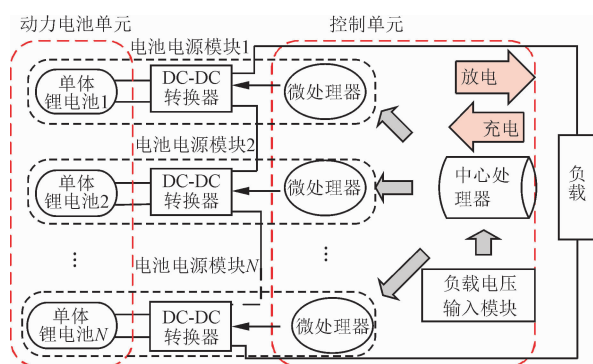


图1 分布式电池电源模块储能系统

集中控制方式,利用控制器局域网络(CAN)总线协议,实现中心处理器与微处理器间的信息通信,达到对各单体电池电源模块的实时控制的目的。

为满足大电压、大功率负载的要求,本文采用升压型分布式电池电源模块结构,如图 2 所示,每个电池电源模块采用升压 DC-DC 转换器,每个升压 DC-DC 转换器由 2 个功率开关、1 个电感与 1 个滤波电容组成,开关通过 PWM 驱动采用互补的方式进行控制。根据工作条件,所有的升压型 DC-DC 转换器都可以在连续导通模式或非连续导通模式下运行,在本文中采用连续导通模式。每个电池电源模块配备一个故障隔离开关,在单体锂电池出现受损的情况下,与储能系统进行隔离,避免储能系统的损坏。

在串联结构中,负载输出电流 I_o 与串联的单体电池电源模块的输出电流 I_i 的关系为

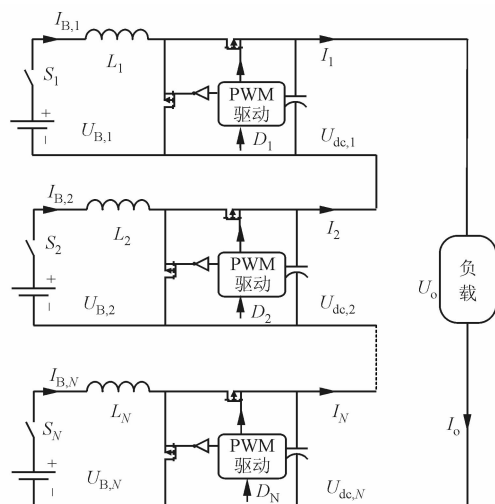


图2 升压型分布式电池电源模块结构

$$I_1 = I_2 = \cdots = I_N = I_o \quad (1)$$

负载电压 U_o 与单体电池电源模块输出电压 $U_{dc,i}$ 的关系为

$$U_{dc,1} + U_{dc,2} + \cdots + U_{dc,N} = U_o \quad (2)$$

在连续导通模式下,单体锂电池端的平均输出电流 $I_{B,i}$ 与 DC-DC 转换器占空比 D_i 的关系为

$$I_{B,1} : I_{B,2} : \cdots : I_{B,N} = \frac{1}{1-D_1} : \frac{1}{1-D_2} : \cdots : \frac{1}{1-D_N} \quad (3)$$

由此可见,在各单体锂电池存在充放电程度不一致的情况下,可以通过控制升压 DC-DC 转换器的占空比,对锂电池端的平均输出电流进行控制,实现对各单体锂电池不同充放电速率的控制。

2 在线 SOC 估算

相较于以电池电压为控制对象的均衡控制方案,采用锂电池 SOC 值作为控制对象能够较准确反映单体锂电池间的充放电程度的不一致性,因此本文采用以单体锂电池估算 SOC 值 ξ_{SOC} 作为控制对象的均衡控制方案。

2.1 电池模型建立

实验研究表明,锂电池开路电压 U_{ocv} 与 ξ_{SOC} 存在单一映射关系^[16]

$$U_{ocv} = a\xi_{SOC} + b \quad (4)$$

式中: a 、 b 为 U_{ocv} 与 ξ_{SOC} 分段函数的系数。

因此,可以通过估算开路电压来在线估算值 ξ_{SOC} ,但在电池运行过程中开路电压无法直接获得,需通过电池的端电压来进行估算。采用一阶 RC 等效电路模型,如图 3 所示,得出电池模型的离散状态空间方程和输出方程为

$$\begin{bmatrix} \xi_{SOC,k+1} \\ U_{P,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-T/(R_{P,k}C_{P,k})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_{SOC,k+1} \\ U_{P,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\eta T/Q \\ R_{P,k}(1 - e^{-T/(R_{P,k}C_{P,k})}) \end{bmatrix} I_k + W_k \quad (5)$$

$$U_{t,k} = [a \quad -1] \begin{bmatrix} \xi_{SOC,k} \\ U_{P,k} \end{bmatrix} - R_{0,k}I_k + b + V_k \quad (6)$$

式中: T 为采样时间; η 为传递效率; $U_{P,k}$ 和 $U_{t,k}$ 分别

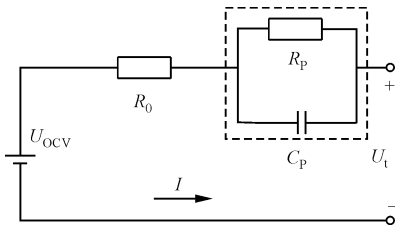


图 3 一阶 RC 等效电路模型图

为电池模型的极化电压和端电压; $R_{0,k}$ 、 $R_{P,k}$ 和 $C_{P,k}$ 分别为电池模型的内阻、极化电阻和极化电容; W_k 和 V_k 分别为系统的过程噪声矩阵和测量噪声。

2.2 动态电池模型的 SOC 估算

目前 SOC 估算方法有卡尔曼滤波^[17-18]、粒子滤波^[19-20]等多种方法。由于锂电池模型是一个强非线性和时变性系统,内部参数受到剩余电量、环境温度、剩余寿命等因素的影响,固定的电池等效电路模型参数会降低锂电池 SOC 的估算精度,因此本文采用自适应遗忘因子递推最小二乘法(AFFRLS)与扩展卡尔曼滤波(EKF)组合的动态电池模型的 SOC 估算(AFFRLS-EKF)方法,如图 4 所示。本文算法在 SOC 估算过程中通过对电池参数进行在线辨识、动态更新,从而实现自适应电池模型的 SOC 估算。

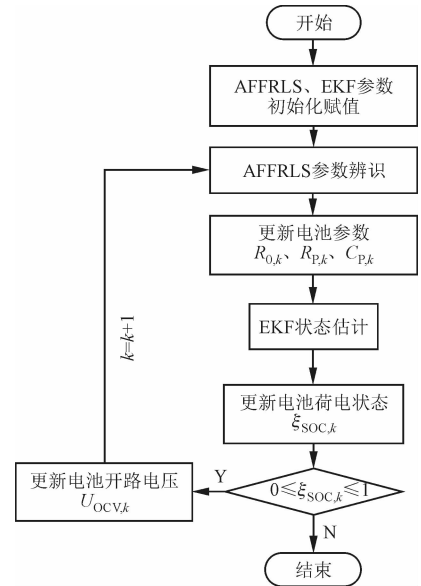


图 4 AFFRLS-EKF 算法流程图

3 储能系统均衡控制

3.1 加权因子设计

为实现分布式电池电源模块储能系统的均衡控制,本文根据功率分配理念设计的单体锂电池输出电流调节的加权因子关系式为

$$\frac{I_{B,1}}{\lambda_1} = \frac{I_{B,2}}{\lambda_2} = \cdots = \frac{I_{B,N}}{\lambda_N} \quad (7)$$

式中: λ_i 为权重因子, λ_i 与电池的 SOC 和标称容量 Q 成正比,即 $\lambda_i \propto Q\xi_{SOC,i}$ 。

在理想情况下,忽略 DC-DC 转换器的阻抗值,在只考虑单体锂电池的内部阻抗的情况下,单体锂电池的输出功率与电池电源模块的输出功率基本相同,即

$$U_{B,i} I_{B,i} = U_{dc,i} I_i = U_{dc,i} I_o \quad (8)$$

式中: $U_{B,i}$ 为单体锂电池的端电压。

由式(7)(8)可得

$$\frac{U_{dc,1}}{\omega_1} = \frac{U_{dc,2}}{\omega_2} = \dots = \frac{U_{dc,N}}{\omega_N} \quad (9)$$

式中: $\omega_i = U_{B,i} \lambda_i$, 由于 $\lambda_i \propto Q_i \xi_{SOC,i}$, 因此 $\omega_i \propto Q_i \xi_{SOC,i} U_{B,i}$ 。

因此,对加权因子的设计由单体锂电池输出电流控制加权因子转化为对单体电池电源模块输出电压的控制加权因子。

3.2 均衡控制方案设计

为保证系统运行的稳定性,本文采用双闭环的均衡控制方案,以系统均衡控制作为外环、负载电压调节作为内环。

储能系统均衡控制外环中,加权因子表达式为

$$\omega_i = (1 \pm G_{PI}(s)(\xi_{SOC,i} - \xi_{SOC,ref})) U_{B,i} Q_i / N \quad (10)$$

式中: N 为储能系统中单体锂电池数量,在放电过程中取负值,在充电过程中取正值; $\xi_{SOC,ref} = \sum_{i=1}^N \xi_{SOC,i} / N$ 为储能系统的平均 SOC 值,当 $\xi_{SOC,i} \neq \xi_{SOC,ref}$ 时,其差值通过 $G_{PI}(s)$ 函数进行补偿,从而对加权因子进行分配,在 $\xi_{SOC,i} = \xi_{SOC,ref}$ 后,维持加权因子不变。

储能系统均衡控制内环中,设置的负载电压参考电压 $V_{bus,ref}$ 通过分配策略,根据均衡加权因子 ω_i , 计算出加权因子之和 W 导出电池电源模块的输出参考电压 $U_{dc,i,ref}$, 分配策略表达式为

$$W = \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_N \quad (11)$$

$$U_{dc,i,ref} = U_{bus,ref} \frac{\omega_i}{W} \quad (12)$$

计算得到的 $U_{dc,i,ref}$ 通过图 5 所示的电压调节回路,对单体电池电源模块的输出电压 $U_{dc,i}$ 进行稳压调节控制。

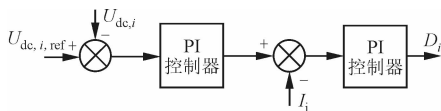


图 5 电压调节框图

对于升压型分布式电池电源模块储能系统,应保证储能系统中单体电池电源模块的最小输出电压 $U_{dc,imin} = U_{B,i}$, 因此最小占空比 $D_{min} = 0\%$, 并且为保证稳压控制时不超过电压调节的控制范围,在工程上一般限制储能系统中单体电池电源模块的最大输出电压 $U_{dc,imax} = 5U_{B,i}$, 因此最大占空比 $D_{max} =$

80%。

3.3 储能系统均衡控制流程

储能系统均衡控制流程如图 6 所示,对电池组中单体锂电池的估算 SOC 值 ξ_{SOC} 与储能系统平均 SOC 值 $\xi_{SOC,ref}$ 进行比较,当任意单体锂电池的 ξ_{SOC} 与储能系统平均 $\xi_{SOC,ref}$ 存在差值时,所设计的基于差值传递补偿的均衡控制策略将通过 PI 控制的差值补偿,实现权重因子的再分配,完成对电池电源模块的输出电压的调整,达到重新分配各单体电池的充放电速率的目的,实现分布式电池电源模块储能系统的动态均衡。

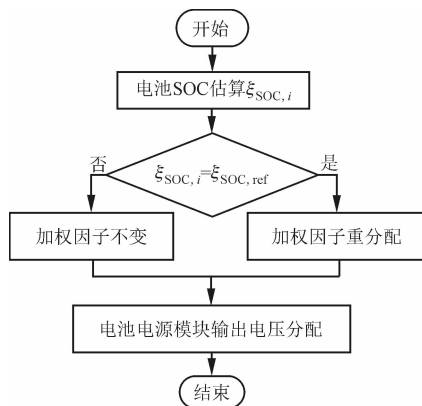


图 6 储能系统均衡控制流程图

4 仿真实验

本文利用 MATLAB/Simulink 模块,搭建由 3 个单体锂电池 (B_1 、 B_2 、 B_3) 组成的分布式电池电源模块储能仿真系统, B_1 、 B_2 、 B_3 的初始 SOC 状态值分别为 59%、60%、61%, 验证所提出的均衡控制方案在恒压放电、变压放电和恒压充电 3 种工况下的有效性, 结果如图 7~图 9 所示。电池参数采用 NCR 18650B 锂电池参数, 如表 1 所示, 升压 DC-DC 转换器电路参数如表 2 所示。

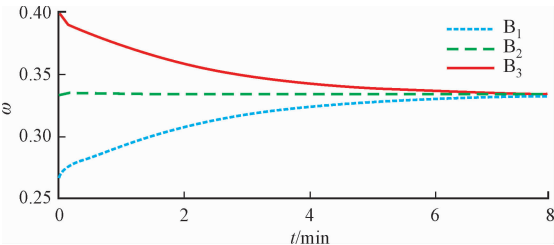
表 1 NCR 18650B 电池基本参数

电池参数	数值
标称容量/A · h	3.1
标称电压/V	3.7
充电截止电压/V	4.2
放电截止电压/V	2.8

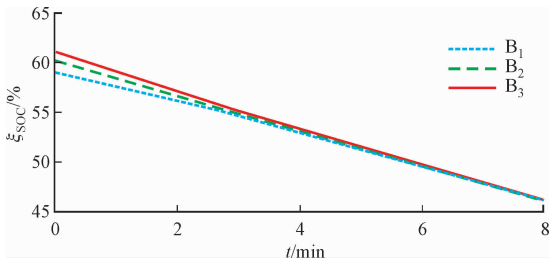
设置 $U_{bus,ref} = 25$ V 的恒压放电工况下的仿真, 结果如图 7 所示。在均衡初始时刻, 由于各单体锂电池间 SOC 初始值不一致, 需分配加权因子数值, 依次分配为 0.27、0.33、0.4, 如图 7a 所示, 图中各加权因子的轨迹曲线呈连续平稳的变化趋势, 最终

表 2 升压 DC-DC 转换器电路参数

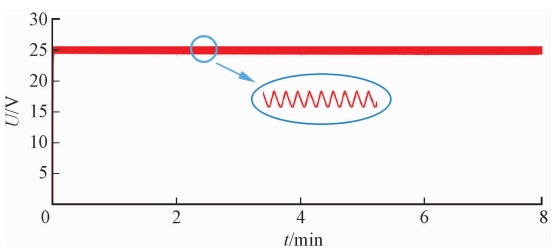
电路参数	数值
工作频率 f_s/kHz	20
电感 $L_i/\mu\text{H}$	500
电容 $C_i/\mu\text{F}$	220
最大占空比 $D_{\max}/\%$	80
最小占空比 $D_{\min}/\%$	0



(a) 加权因子轨迹



(b) 锂电池 SOC 轨迹



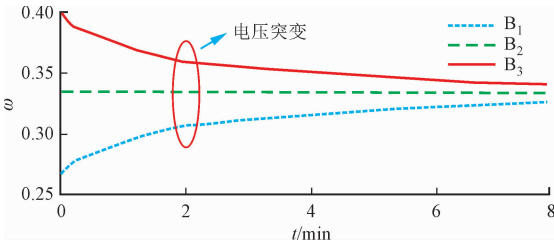
(c) 负载电压

图 7 恒压放电仿真结果

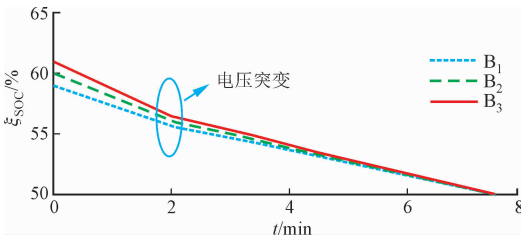
稳定在 0.33 附近。随着均衡过程的进行,如图 7b 所示,单体锂电池间 SOC 的差异不断减小,直至为 0,实现了储能系统的 SOC 均衡控制。如图 7c 所示,所设计的均衡控制方案有效地实现了系统负载电压的稳定调节,保证了系统运行的稳定性。

设置 $t=0\sim 2\text{ min}$ 时 $U_{\text{bus,ref}}=30\text{ V}$ 、 $t=2\sim 8\text{ min}$ 时 $U_{\text{bus,ref}}=20\text{ V}$ 的变压放电工况下的仿真,结果如图 8 所示。均衡初始时刻,如图 8a 所示,所分配的加权因子数值相较于恒压放电工况不发生改变,因而各单体锂电池加权因子数值的分配与负载电压的大小无关;同时,在负载电压发生突变时,加权因子轨迹曲线只产生很小的变化,基本仍呈连续

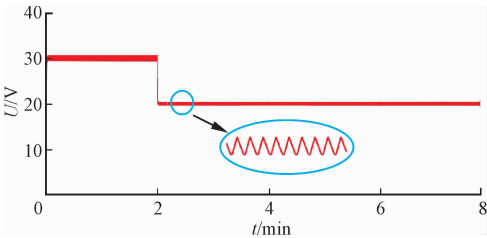
平稳的变化趋势,并最终稳定在 0.33 附近。在变压放电工况下,如图 8b 所示,负载电压的突变只改变了储能系统的放电速率,并不能影响储能系统的 SOC 均衡;如图 8c 所示,在变压放电工况下系统仍能有效地实现负载电压的稳定调节。



(a) 加权因子轨迹



(b) 锂电池 SOC 轨迹

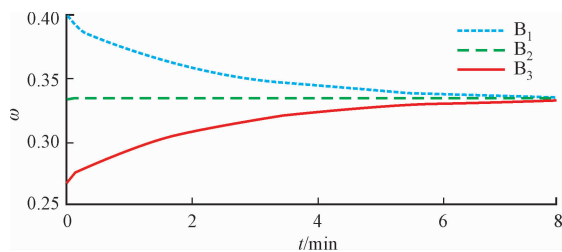


(c) 负载电压

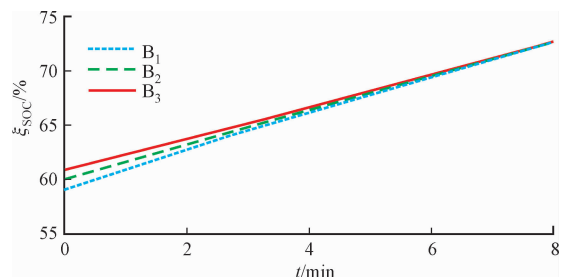
图 8 变压放电仿真结果

设置 $U_{\text{bus,ref}}=25\text{ V}$ 的恒压充电工况下的仿真,结果如图 9 所示。各加权因子的分配值相较于恒压放电工况发生了改变,如图 9a 所示,数值依次为 0.4、0.33、0.27,但其变化趋势未发生改变,同样各加权因子数值最终稳定在 0.33 附近,因此在充电工况下,如图 9b 所示,仍能够有效地实现储能系统的 SOC 均衡,同时如图 9c 所示,在恒压充电工况下系统仍能有效地实现负载电压的稳定调节,保证了系统运行的稳定性。

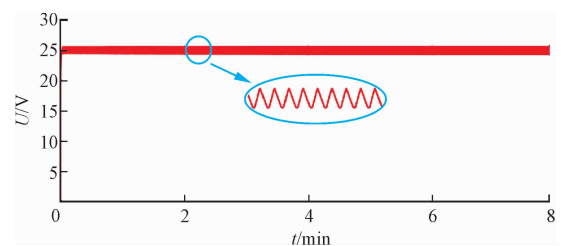
在 $U_{\text{bus,ref}}=25\text{ V}$ 恒压放电工况下,以储能系统中单体电池间的最大 SOC 值与最小 SOC 值的差值 $\Delta\xi_{\text{soc}}\leq 0.1\%$ 作为均衡标准比较比例均衡标准与本文方案的性能,结果如图 10 所示。从图 10 可见,本文提出的均衡控制方案的均衡时间为 4 min,与比例均衡控制方法的均衡时间相比缩短了 46.7%。



(a) 加权因子轨迹



(b) 锂电池 SOC 轨迹



(c) 负载电压

图9 恒压充电仿真结果

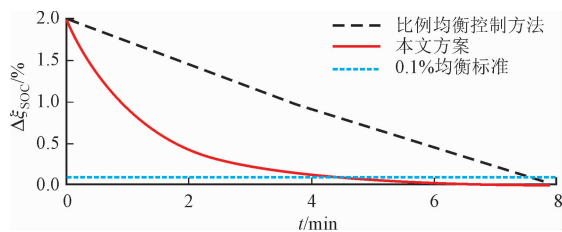


图10 均衡方法对比图

5 结 论

(1) 本文提出一种采用分布式电池电源模块储能结构的均衡控制方案,改变了传统电池组组内、组间两级均衡控制结构,消除了组内单体锂电池间能量传递造成的功率损失,降低了电池组均衡控制设计的复杂度。

(2) 本文提出的均衡控制方案,采用功率分配理念,以单体锂电池 SOC 为控制对象设计加权因子,达到各单体锂电池充放电速率动态调节的目的,实现分布式电池电源模块储能系统的 SOC 均衡;同时,采用双闭环的控制方案,以系统均衡控制作为外

环、负载电压调节控制作为内环,保证了系统运行的稳定性。

(3) 本文通过 MATLAB/Simulink 模块搭建电路仿真模型,分别在恒压放电、变压放电和恒压充电工况下,验证了均衡控制方案的有效性。仿真结果表明:本文所提出的均衡控制方案能够有效改善分布式电池电源模块储能系统 SOC 的不一致性,实现储能系统的 SOC 均衡,且均衡时间较传统的比例均衡控制方法缩短了 46.7%。

参考文献:

- [1] TIE S F, TAN C W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20 (4): 82-102.
- [2] YUANMAO Y, CHENG K W E, YEUNG Y P B. Zero-current switching switched-capacitor zero-voltage-gap automatic equalization system for series battery string [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(7): 3234-3242.
- [3] XIONG R, DUAN Y. Development and verification of the equilibrium strategy for batteries in electric vehicles [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (English Edition), 2018, 27(1): 22-28.
- [4] 黄勤, 严贺彪, 凌睿. 串联锂电池组无损均衡管理方案设计与实现 [J]. 计算机工程, 2011, 37(12): 226-229.
HUANG Qin, YAN Hebiao, LING Rui. Design and implementation of non-dissipative equalization management scheme for series connected li-ion battery pack [J]. Computer Engineering, 2011, 37(12): 226-229.
- [5] 杨春雷, 刘志远. 一种电动汽车动力电池均衡控制方法的设计 [J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(8): 1186-1190.
YANG Chunlei, LIU Zhiyuan. Equalization control method design for power batteries in an electric vehicle [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(8): 1186-1190.
- [6] UNO M, KUKITA A. Single-switch single-transformer cell voltage equalizer based on forward-flyback resonant inverter and voltage multiplier for series-connected energy storage cells [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4232-4247.
- [7] HOQUE M M, HANNAN M A, MOHAMED A. Voltage equalization control algorithm for monitoring and balancing of series connected lithium-ion battery [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy,

- 2016, 8(2): 025703.
- [8] SPELTINO C, STEFANOPOULOU A, FIENGO G. Cell equalization in battery stacks through state of charge estimation polling [C] // Proceedings of the 2010 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 5050-5055.
- [9] 孙金磊, 逯仁贵, 魏国. 串联电池组双向全桥 SOC 均衡控制系统设计 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 76-81.
- SUN Jinlei, LU Rengui, WEI Guo. Bidirectional full-bridge converter based SOC equalization system design for series-connected battery string [J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(3): 76-81.
- [10] WANG S, SHANG L, LI Z, et al. Online dynamic equalization adjustment of high-power lithium-ion battery packs based on the state of balance estimation [J]. Applied Energy, 2016, 166: 44-58.
- [11] WANG Y, TAN K T, PENG X Y, et al. Coordinated control of distributed energy storage systems for voltage regulation in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1132-1141.
- [12] LEE S J, KIM J H, KIM C H, et al. Coordinated control algorithm for distributed battery energy storage systems for mitigating voltage and frequency deviations [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1713-1722.
- [13] MUKHERJEE N, STRICKLAND D. Analysis and comparative study of different converter modes in modular second life hybrid battery energy storage systems [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 4(2): 547-563.
- [14] HUANG W, QAHOUQ J A A. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2764-2776.
- [15] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2804-2815.
- [16] 徐欣歌, 杨松, 李艳芳. 一种基于预测开路电压的 SOC 估算方法 [J]. 电子设计工程, 2011(14): 127-129.
- XUN Xinge, YANG Song, LI Yanfang. A method of SOC-estimate based on forecast of open-circuit voltage [J]. Electronic Design Engineering, 2011(14): 127-129.
- [17] 鲁伟, 续丹, 杨晴霞. 锂电池分数阶建模与荷电状态研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017(7), 51(7): 124-129.
- LU Wei, XU Dan, YANG Qingxia. Fractional model and state-of-charge of Lithium battery [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(7): 124-129.
- [18] DOMENICO D D, FIENGO G, STEFANOPOULOU A. Lithium-ion battery state of charge estimation with a Kalman filter based on a electrochemical model [C] // 17th IEEE International Conference on Control Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 702-707.
- [19] 赵又群, 周晓凤, 刘英杰. 基于扩展卡尔曼粒子滤波算法的锂电池 SOC 估计 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(3): 394-397.
- ZHAO Youqun, ZHOU Xiaofeng, LIU Yingjie. SOC estimation for Li-ion battery based on extended Kalman particle filter [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(3): 394-397.
- [20] YE M, GUO H, XIONG R, et al. A double-scale and adaptive particle filter-based online parameter and state of charge estimation method for lithium-ion batteries [J]. Energy, 2018, 144: 789-799.
- [本刊相关文献链接]**
- 赵云飞, 徐俊, 王霄, 等. 双自适应衰减卡尔曼滤波锂电池荷电状态估计. 2018, 52(12): 99-105. [doi: 10.7652/xjtuxb201812015]
- 路昭, 余小玲, 张立玉, 等. 锂电池组高温节点空气冷却方案的数值模拟. 2018, 52(7): 25-31. [doi: 10.7652/xjtuxb201807004]
- 张立玉, 路昭, 韦立川, 等. 锂电池性能与温度相关性的基础实验研究. 2018, 52(5): 133-141. [doi: 10.7652/xjtuxb201805019]
- 王霄, 徐俊, 曹秉刚, 等. 小波降噪卡尔曼滤波锂电池荷电状态估计. 2017, 51(10): 71-76. [doi: 10.7652/xjtuxb201710012]
- 张立军, 程洪正, 孟德建. 锂离子电池电-热-机耦合特性实验研究及关键参数辨识. 2017, 51(8): 142-148. [doi: 10.7652/xjtuxb201708023]
- 鲁伟, 续丹, 杨晴霞, 等. 锂电池分数阶建模与荷电状态研究. 2017, 51(7): 124-129. [doi: 10.7652/xjtuxb201707018]
- 陈浩, 孙权, 张鸿, 等. 用于超低频信号测量的高精度低功耗增量式模数转换器. 2017, 51(6): 79-85. [doi: 10.7652/xjtuxb201706013]
- 杨晴霞, 曹秉刚, 徐俊, 等. 一种估计锂电池充电状态的分数阶阻抗模型. 2015, 49(8): 128-132. [doi: 10.7652/xjtuxb201508021]

(编辑 刘杨)