

液态金属电池串联复合均衡模式的研究

魏晓东, 黄青丹, 饶锐, 黄慧红, 宋浩永, 徐钦, 赵崇智

(广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510410)

摘要: 液态金属电池是一种新型储能电池, 具有大容量、大充放电电流、长寿命等特点。本文介绍了液态金属电池的原理, 通过实验获得了电池的充放电特性, 根据电池充放电电压低、平台期长等特点, 提出了电池串联复合均衡模式。以4个电池为基本单位组成电池小组, 采用电阻式被动均衡电路实现组内单电池均衡, 利用电感转移电路设计了主动均衡, 实现电池组间的均衡, 在此基础上给出了电池组在充电和放电过程下的均衡策略。对24个电池的串联电路利用设计的复合均衡模式进行了实际测试, 实验结果表明该均衡模式可以实现多电池串联均衡, 为电池管理系统(BMS)的开发打下了良好基础。

关键词: 液态金属电池; 复合均衡; 主/被动均衡电路

Research on Series Compound Equilibrium Mode of Liquid Metal Battery

WEI Xiaodong, HUANG Qingdan, RAO Rui, HUANG Huihong,

SONG Haoyong, XU Qin, ZHAO Chongzhi

(Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510410, China)

Abstract: Liquid metal battery (LMB) is a kind of new energy storage battery with such characteristics as large capacity, large charging and discharging current as well as long service life. The principle of the LMB is introduced firstly in this paper, the charging and discharging characteristic of the battery is obtained by the experiment and, on the basis of such features of the battery as low charging and discharging voltage and long platform, the series compound equilibrium mode is proposed of the battery. The battery group is formed with 4 batteries as the basic unit, the resistive passive equalization circuit is adopted to achieve the single battery equilibrium. The active equalization is designed by the use of inductance transfer circuit so to achieve equalization among the batteries and, on this basis, the equalization strategy of the battery group during the charging and discharging period is given. The designed compound equilibrium mode is used to test the series circuit of the 24 batteries. Test results show that this equalization mode can achieve implement of multiple batteries in series, which lays a good foundation for the development of battery management system(BMS).

Keywords: liquid metal battery; compound equilibrium; active/passive equalization circuit

0 引言

随着传统化石能源的枯竭和自然环境的恶化, 大力发展可再生能源和新能源已经成为人类解决能源问题, 实现可持续发展的必经之路^[1-2]。但是太阳能和风能等新能源受自然环境影响较大, 在实际大规模应用时受到一定的制约^[3-7]。使用储能装置来平抑功率波动是解决其能量输出不稳定的重要

方法^[8-10]。

液态金属电池作为一种新型的储能电池, 具有许多独特的优势, 具有大容量、大电流、长使用寿命、低成本等优点^[11-13]。在实际应用中单电池的电压容量有限, 因此必须进行电池的串联并联。由于电池本身由于材料特性、制造等原因不可能完全一致, 串联电池的均衡充放电是各种电池应用的一大难点^[14-17]。因此, 选择一种适合的均衡策略并设计

收稿日期: 2023-07-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0905600), 南方电网公司科技项目(080037KK52170067)。

相应的均衡电路,对于提高电池组的使用效率及延长使用寿命有着十分重要的意义。

电池的均衡策略包括基于电池外电压的均衡策略和基于电池充电状态(state of charge, SOC)的均衡策略^[18~20]。基于电压的策略选用电池外电压作为均衡判据控制均衡,使电池电压趋于一致,策略实施简单,但外电压受到内部参数和外部使用条件的影响,会发生波动,影响均衡稳定;基于 SOC 的均衡策略估算电池 SOC,使电池 SOC 值都位于目标 SOC 范围内,主要问题是如何准确计算 SOC,特别是实时条件下的计算速度与精度。均衡电路分为主动式和被动式均衡^[21~24]。被动式均衡是通过二极管、电阻等分流器件来实现电池均衡。特点是电路结构简单,但效率低。主动式均衡是通过电感、电容、变压器等储能元件实现能量转移型均衡,特点是效率高,但结构和控制复杂。

笔者针对液态金属电池的特性,提出了电池组内被动均衡,电池组间主动均衡的复合均衡模式,选择合适的均衡判据,并设计了一种可以电池组主动均衡电路。该复合均衡模式具有均衡全面、转移电流大、效率高的优点,适合液态金属电池串联成组的均衡要求。

1 液态金属电池特性的实验研究

液态金属电池是由麻省理工学院唐纳德·萨多威提出的一种新型储能电池^[25],图1为液态金属电池充放电示意图。液态金属电池以中低温熔盐作为电解质,分别采用融化为液态的金属 A 和 B 作为电池的负极和正极。由于密度的区别和重力的作用,A 和 B 自动被熔盐电解质分开,形成三层液态体系。放电过程中,负极: $A \rightarrow A^{n+} + ne^{-}$; 正极: $A^{n+} + ne^{-} \rightarrow A_B$; 充电过程中,负极: $A^{n+} + ne^{-} \rightarrow A$; 正极: $A_B \rightarrow A^{n+} + ne^{-}$ 。

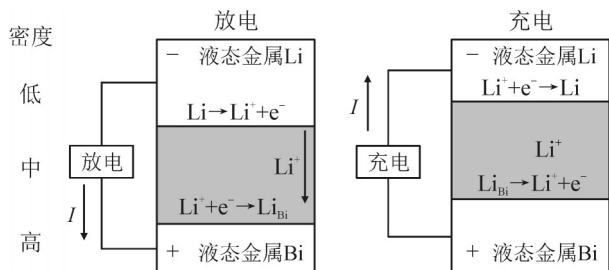
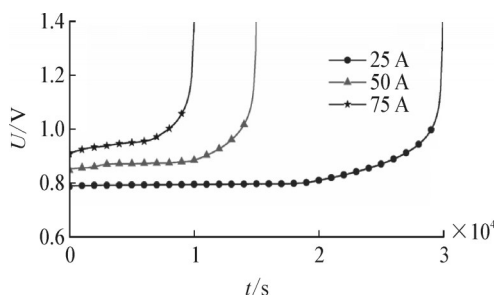


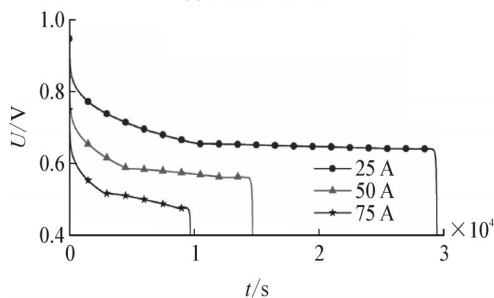
图1 液态金属电池的工作原理
Fig. 1 Working principle of liquid metal battery

本文搭建了液态金属电池的实验环境,并对200 Ah 的液态金属电池进行了充放电循环测试,在进行电池特性测试时电池工作于恒流模式,在电流25 A、50 A 和 75 A 充放电条件下电池的充放电电

压和电流典型曲线见图2。



(a) 恒流充电工况



(b) 恒流放电工况

图2 恒流工况下不同电流的充放电电压-时间曲线
Fig. 2 Charging/discharging voltage-time curve with different currents under constant current working condition

从图2可以看出在不同电流下,电池的单体充放电电压都比锂离子电池或铅酸电池低,在电池的充放电末期,电池电压变化剧烈,迅速升/降至截止电压,其过程在整个放电阶段的占比非常低。

为深入探究液态金属电池不一致性的表现,本文使用两个标称容量均为200 Ah 的液态金属电池单体串联而成的最简单电池组,在无任何均衡措施的情况下进行充放电实验。实验所得的电压-时间曲线见图3。由图3可知,随着充放电循环次数的增多,两个单体电池的电压-时间曲线差异逐渐增大,至第5次充电截止时,2号电池电压已大于1.5 V,这导致2号电池会过充、1号会过放,循环次数增多,两电池之间的电压差异会更加严重,直至电池损坏。因此研究开发电池均衡管理系统是十分必要的。

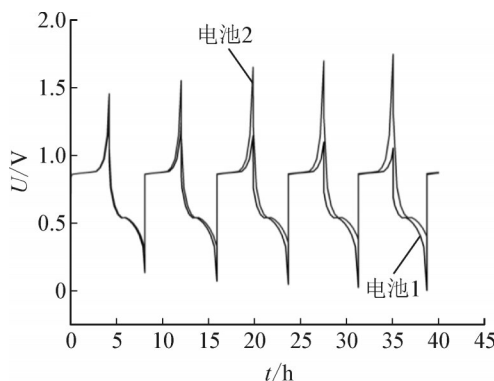


图3 液态金属电池串联充放电曲线
Fig. 3 Charging/discharging curve of LMB

2 电池复合均衡模式的研究

从液态金属电池的特性研究和不一致性分析可以看出,液态金属电池是一种大容量、低电压的储能电池,但是各单体电池性能参数存在差异,为了实现大规模串联储能,必须为其增加均衡控制。液态金属电池容量很大均衡时间有限,因而均衡电流要求比较大,单一的被动均衡发热严重效率低下。另外由于单体电池电压很低,仅为锂离子电池的 $1/4$,而常用的半导体开关压降比较大,这也给主动均衡的使用带来困难。因此,需要改进设计出能够在低电压下使用,不受电压差影响、效率高、转移速度快的均衡电路。

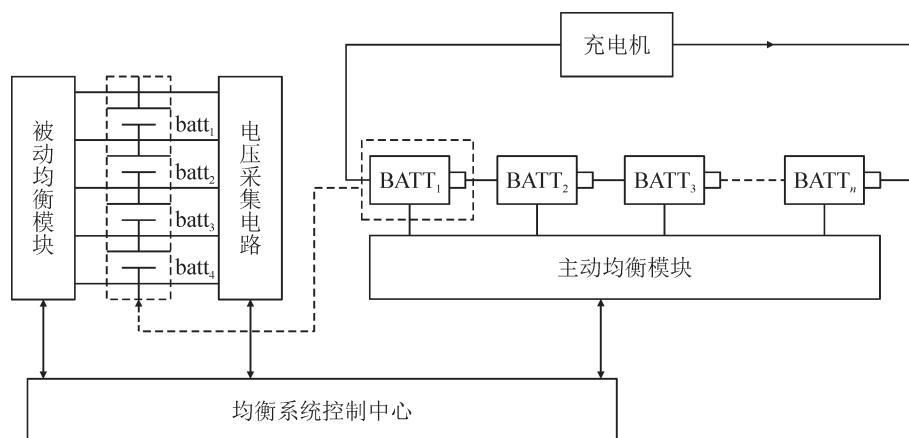


图4 复合均衡方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of compound equilibrium scheme

2.1 均衡判据的选取

由电池的不一致性分析能够看出即使同一批生产的单体电池其内部参数仍存在较大差异。在串联成组使用的过程中,无法实时测量各单体电池内部参数,因此单体电池之间的差异由外部特性如电池外电压和实时 SOC 值所体现。

液态金属电池在充放电的过程中存在电压平台,在平台区内电池电压变化小而电池 SOC 变化较大,以充电过程为例,由图 5 可知,当 SOC 从 20% 上升到 70% 时,电池电压从 0.844 8 V 上升到 0.865 8 V,仅上升 0.021 V,这说明在电池组电压差异不大的情况下,电池组 SOC 值差异可以很大,因此只用电池电压作为均衡判据难以保证均衡的精度。以 SOC 作为均衡判据的主要问题是当前的 SOC 在线估算误差较大而且需要一定时间才能收敛。

因此本文综合考虑了电池电压和 SOC 两种均衡判据的优点,选择以电池电压为主、SOC 为辅的均衡判据。在电池组充放电的初期和末期电池电压变化迅速时以电池电压为均衡判据可以保证均衡的精度和灵敏性,在电池组处于充放电平台电池

基于以上分析,本文提出了一种主动均衡加被动均衡的复合均衡方案,其示意图见图 4。其中 $batt_1$ – $batt_4$ 分别表示 4 节液态金属电池, $BATT_1$ – $BATT_n$ 分别表示由 4 节单体电池组成的 n 个电池包。具体方案如下:首先运用分选成组技术挑选充放电容量、电压平台及库伦效率等参数一致性较高的 4 节液态金属电池串联组成电池包,以电池包作为主动均衡模块的均衡对象,从而提高了主动均衡模块电池单元的电压,有利于主动均衡模块快速高效的转移能量。同时给电池包内的各个单体电池加上被动均衡模块,避免随着使用时间的加长和循环次数的增加使得电池包内各单体电池不一致性增大。其中,被动均衡模块选用开关电阻法,主动均衡模块在后面会详细介绍。

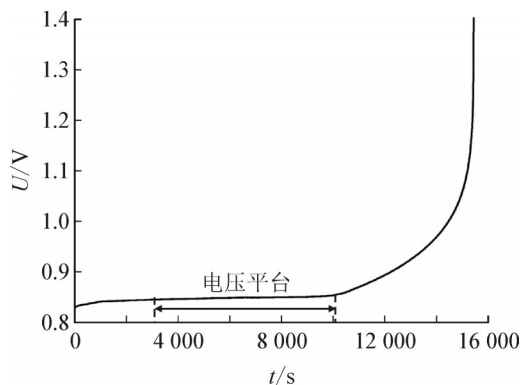


图5 单体电池充电曲线

Fig. 5 Charging curve of single battery

压差很小时以 SOC 作为均衡判据可以保证均衡的可靠性,弥补只用电压作为判据的不足。均衡判断流程图见图 6。

首先采集各单体电池电压、电流,根据安时累积法估算对应电池的 SOC 值,然后计算电压和 SOC 不均度。当电压不均度大于 r_1 时,说明电池组电压不一致性较差,均衡电路开始工作;当电压不均度小于等于 r_1 时,判断电池组是否处于电压平台区(即 $20\% < SOC < 70\%$)且 SOC 不均度大于 r_2 ,

满足条件说明电池组电压差异小, SOC 差异大, 均衡电路开始工作, 不满足条件说明电池组一致性良好, 均衡电路不工作, 返回第一步重新计算。

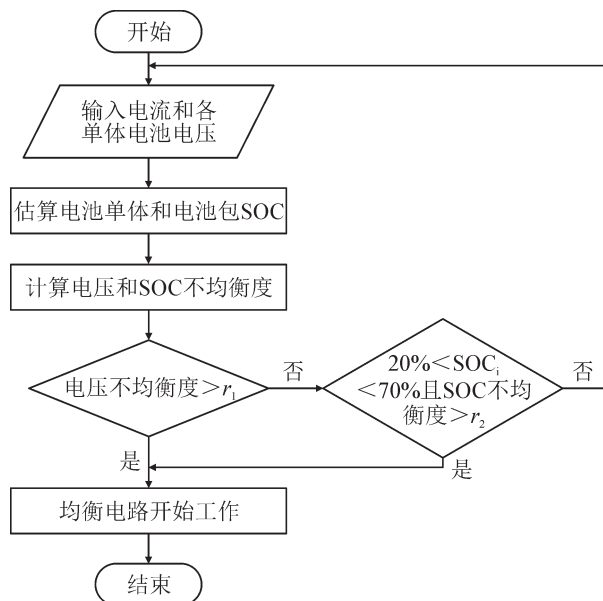


图6 均衡判断流程图

Fig. 6 Flow chart of equalization judgement

其中, 电压不均衡度和 SOC 不均衡度的计算方法如下。在充电时, 电压不均衡度为电压最高值减去电压平均值, SOC 不均衡度为 SOC 最高值减去 SOC 平均值; 放电时, 电压不均衡度为电压平均值减去电压最低值, SOC 均衡度为 SOC 平均值减去 SOC 最低值。

3 主动均衡电路的设计

3.1 电感型均衡电路原理分析

为使能量转移的快慢不受电池电压差的限制, 主动均衡电路结构选择以电感为储能元件, 获得较大的均衡电流实现能量的快速转移。电感型均衡电路基本模型见图 7, 图中 BATT₁、BATT₂ 表示电池, R₁、R₂ 分别表示回路 A、B 的电阻。电路的基本工作原理为: 当开关管 M 导通时, 电流流向如图 7 中 A 所示, BATT₁ 与电阻 R₁、电感 L 构成回路, BATT₁ 释放能量, 电感 L 储存能量; 当 M 关断时, 电流流向如 B 所示, BATT₂ 与电阻 R₂、电感 L 和二极管 D 构成回路, 电感 L 释放能量, BATT₂ 储存能量。

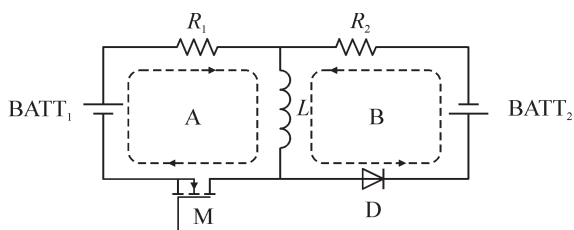


图7 电感型均衡电路基本模型

Fig. 7 Basic model of inductive equalization circuit

显然, 该电路在去掉开关和二极管后即为基本的一阶 RL 电路, 其中电感储存能量的过程为 0 状态响应, 电感释放能量的过程为 0 输入响应。

根据电路理论可得电感储存能量时电感电流的计算公式为

$$i_L(t) = \frac{U_1}{R_1}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (1)$$

式中: R₁ 为回路 A 总电阻; U₁ 表示 BATT₁ 的电压。

电路时间常数公式为

$$\tau_1 = \frac{L}{R_1} \quad (2)$$

假设电感储能结束时电感电流为 I₀, 电感释放能量时电感电流的计算公式为

$$i_L(t) = -\frac{U_2}{R_2}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) + I_0 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3)$$

式中: R₂ 为回路 B 总电阻; U₂ 表示 BATT₂ 的电压。

电路时间常数公式为

$$\tau_2 = \frac{L}{R_2} \quad (4)$$

于是, 可以得到电感电流的波形, 见图 8。

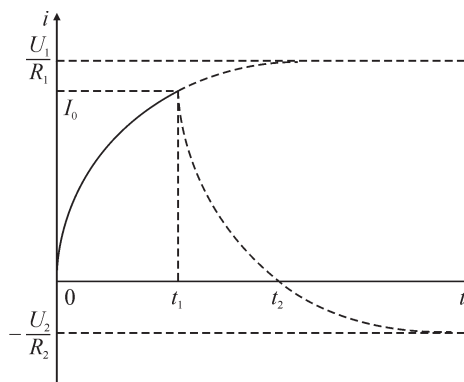


图8 电感电流波形图

Fig. 8 Waveform of inductive current

在 0 时刻, 使得开关处于导通状态, 电感电流从 0 开始逐渐增加, 电感开始储能能量, 在 t₁ 时刻电感电流达到最大, 此时断开开关, 电感电流逐渐减小, 电感开始释放能量, 至 t₂ 时刻电感电流到 0, 能量转移完毕。由于二极管具有单向导电性, 电流不会反向增加。

导线电阻 R₁、R₂ 很小, 将其忽略不计后可以近似计算为

$$\frac{t_1}{t_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \quad (5)$$

由此可以推出电流断续状态下开关管 M 所加占空比的最大值为

$$D = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{U_2}{U_1 + U_2} \quad (6)$$

3.2 主动均衡电路的设计

基于电感型均衡电路的基本原理,本文设计了一种可以适用于液态金属电池的均衡电路,包含4个串联电池包电路拓扑结构见图9。其中 $BATT_1$ – $BATT_4$ 表示电池包,每个电池包由4节单体电池组成,实际应用时可根据需求增减电池包的数目。该均衡电路包括一组P沟道MOSFET管(P_1 – P_5),一组N沟道MOSFET管(N_1 – N_5),一个大功率电感 L 。根据串联电池包的数目选择不同功率和额定电压的MOSFET管,并尽量选择导通电阻小的管子。由于MOSFET管存在寄生二极管,为了避免电池短路,在每个MOSFET管上串联一个二极管。

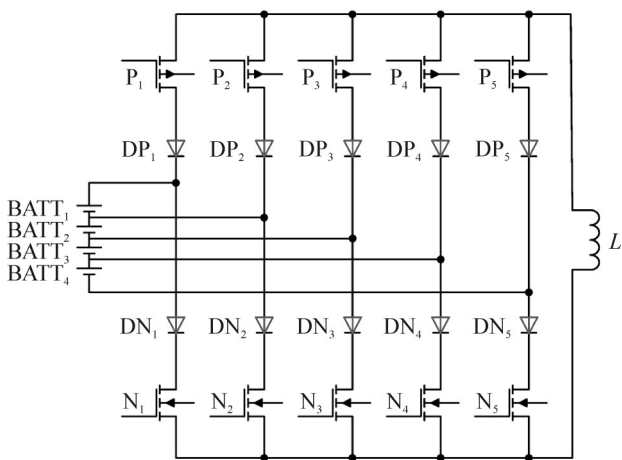


图9 主动均衡电路拓扑结构图

Fig. 9 Topological diagram of active equalization circuit

在充电时,通过此均衡电路可以实现能量最高电池包向相邻任意多个电池包转移能量;在放电时,通过此均衡电路可以实现相邻任意多个电池包向能量最低电池包转移能量。

4 复合均衡模式的实验验证

将24节液态金属电池串联成组,每4节单体电池组成一个电池小组,采用电池测试仪对电池组进行恒流充放电,测试主/被动均衡电路功能和电池组的整体均衡效果,充放电电流取为50 A。

4.1 主动均衡电路的实验

在充电时,电池组很快会到达充电电压平台,各单体电池电压都在0.85 V左右,此时测得前4个电池包的电压为3.52 V、3.43 V、3.47 V、3.56 V,采用一个电池包向相邻3个电池包转移能量的策略测试充电均衡电流,PWM频率设置为10 kHz,占空比设置为75%。利用霍尔电流传感器测得电感电流波形见图10。

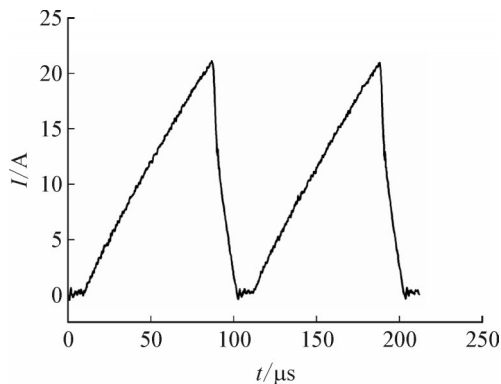


图10 主动均衡电路充电均衡电流

Fig. 10 Charging equalization current of active equalization circuit

在放电时,电池组很快会到达放电电压平台,各单体电池电压都在0.55 V左右,此时测得前4个电池包的电压为2.21 V、2.23 V、2.18 V、2.26 V,采用3个电池包向相邻一个电池包转移能量的策略测试放电均衡电流,PWM频率设置为10 kHz,占空比设置为25%。利用霍尔电流传感器测得电感电流波形见图11。

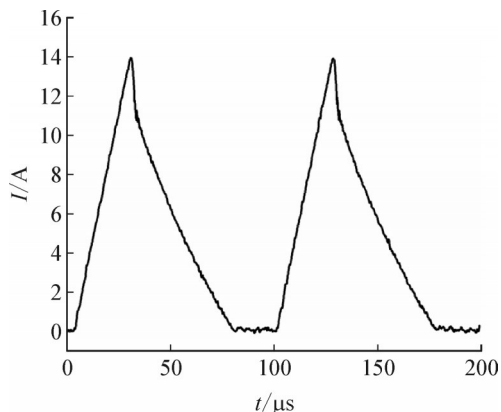


图11 主动均衡电路放电均衡电流

Fig. 11 Discharging equalization current of active equalization circuit

由图10、图11可以看出,主动均衡电路可以完成能量转移的功能。

4.2 被动均衡电路的实验

为了验证被动均衡电路的功能,取一单体电池对其进行50 A恒流充电,进入电压平台后电池电压为0.9 V,此时开启被动均衡,电流传感器测得的均衡电流波形见图12,均衡电流值为15.8 A,可以实现能量耗散功能。被动均衡电路中所用电阻值为50 mΩ,理论上均衡电流为18 A,比较可知,实测值小于理论值,这主要是由于电路中还存在MOS管导通电阻、导线电阻和接触电阻。此外,通过改变PWM占空比可以动态调节被动均衡的电流大小,以满足不同需求。通过以上分析可以看出被动均衡模块可以实现预期功能。

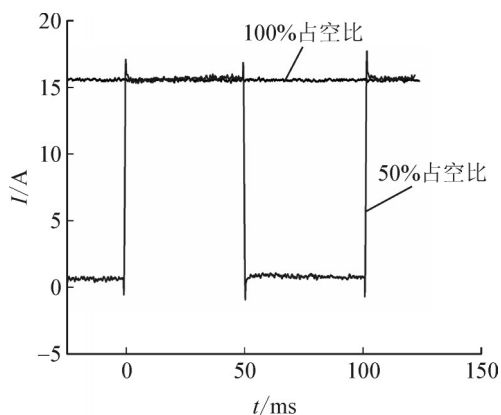


图12 被动均衡电路均衡电流
Fig. 12 Current of passive equalization circuit

4.3 电池组均衡效果的实验

针对上述24节液态金属电池组,利用已开发的电池管理系统和本文设计的复合均衡模式,对电池组进行了均衡效果测试。

分别给各电池小组充电,使电池小组初始SOC分别为:0.40、0.30、0.29、0.28、0.27、0.26,静置30 min后,将电池组接入实验平台,分别进行不加均衡和加均衡充电测试,充电时间为2 h。实验结果见图13。

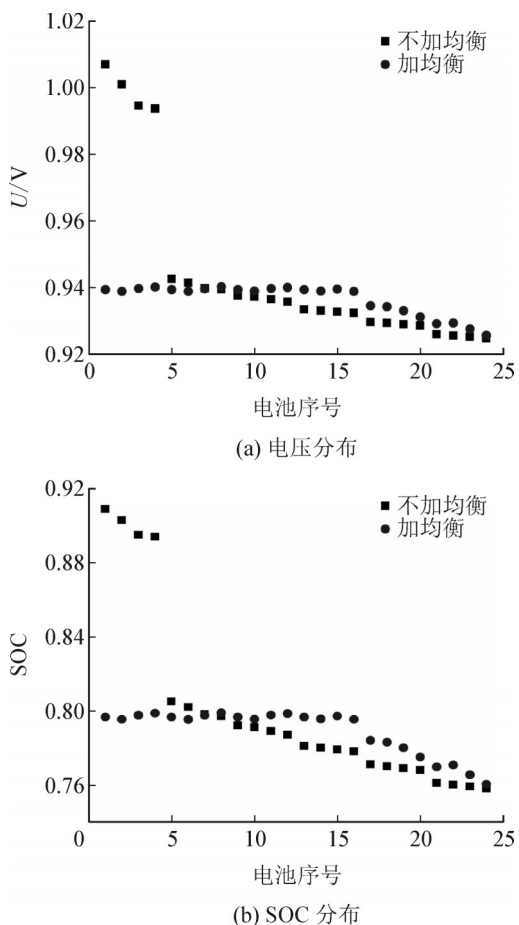


图13 充电结束后各单体电池电压和SOC分布
Fig. 13 Voltage and SOC distribution of each cell after charging

从图13看出,在使用了均衡系统后,整个电池组电压和SOC的极差和标准差都要小于不加均衡时的值,说明电池组的离散程度明显减小,电池组不一致性得到了改善,系统均衡效果良好。

5 结语

本文针对液态金属电池组,提出了一种主动被动复合的均衡模式,该模式利用电阻型被动均衡实现电池间均衡,采用电感转移型主动均衡电路实现电池组间均衡,并给出了充放电下的复合均衡策略。通过实验对24个电池的串联电池组进行了主被动均衡电路和复合均衡效果测试,验证了负荷均衡模式的正确性和有效性,为后续实际利用液态金属电池进行电力储能应用奠定了理论基础。

参考文献

- [1] 矫真,王兆军,李骁,等. 新能源汽车充电桩浪涌侵入波防护分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 103-106.
JIAO Zhen, WANG Zhaojun, LI Xiao, et al. Lightning surge protection for the new energy vehicle charging station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 103-106.
- [2] 孔庆香,卿子龙. 新能源智慧型远程集中管控系统的探讨[J]. 东北电力技术, 2021, 42(12): 1-4.
KONG Qingxiang, QING Zilong. Discussion on intelligent remote centralized management and control system of new energy[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(12): 1-4.
- [3] 张长云,黄景光,李振兴,等. 极地环境含风氢储混合微电网容量优化配置[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 108-116.
ZHANG Changyun, HUANG Jingguang, LI Zhengxing, et al. Optimal configuration of wind-Hydrogen-storage hybrid microgrid capacity in polar environment[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 108-116.
- [4] 丁明,陈忠,苏建徽,等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25.
DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25.
- [5] HILL C A, SUCH M C, CHEN Dongmei, et al. Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 850-857.
- [6] 仲泽天,李梦月,王加澍,等. 一种有源配电网分布式光伏消纳能力评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 60-68.
ZHONG Zetian, LI Mengyue, WANG Jiashu, et al. An as-

- assessment method for distributed photovoltaic absorption capacity of active distribution networks[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(2): 60-68.
- [7] 周雪松, 张波, 马幼捷. 基于滤波函数的风电并网逆变器改进线性自抗扰控制[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(10): 137-144.
- ZHOU Xuesong, ZHANG Bo, MA Youjie. Improved linear active disturbance rejection control of wind power grid-connected inverter based on filter function[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(10): 137-144.
- [8] HITTINGER E, WHITACRE J F, APT J. What properties of grid energy storage are most valuable[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 206(3): 436-449.
- [9] 乔志杰, 马临超. 适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(12): 75-84.
- QIAO Zhijie, Ma Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(12): 75-84.
- [10] 蒋凯, 李浩秒, 李威, 等. 几类面向电网的储能电池介绍[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(1): 47-53.
- JIANG Kai, LI Haomiao, LI Wei, et al. On several battery technologies for power grids[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 47-53.
- [11] 彭勃, 郭姣姣, 张坤, 等. 液态金属电池——前景广阔的电网储能新技术[J]. *电源技术*, 2017, 41(3): 498-501.
- PENG Bo, GUO Jiaojiao, ZHANG Kun, et al. Liquid metal battery: A promising new technology for power grid energy storage[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2017, 41(3): 498-501.
- [12] 李正力, 李肖辉, 王京, 等. 锂离子电池储能电站热失控预警与防护研究进展[J]. *高压电器*, 2023, 60(1): 87-99.
- LI Zhengli, LI Xiaohui, WANG Jing, et al. Research progress on thermal runaway warning and protection of Lithium-ion battery in energy storage power station[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 60(1): 87-99.
- [13] FAN Liuyang, WANG Keyou. The study of battery energy storage system deterioration and inconsistency[C]//2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). [S.l.]: IEEE, 2015: 207-212.
- [14] 王震坡, 孙逢春. 不一致性对动力电池组使用寿命影响的分析[J]. *北京理工大学学报*, 2006, 26(7): 577-580.
- WANG Zhenpo, SUN Fengchun. An analysis on the influence of inconsistencies upon the service life of power battery packs[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(7): 577-580.
- [15] LIU Ping, ZHU Honghui, CHEN Jie, et al. An equalization control strategy conducive to uniform aging for battery pack [C]//2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). [S.l.]: IEEE, 2016: 6228-6231.
- [16] 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.
- [17] 朱方方, 王康丽, 王大磊, 等. 串联液态金属电池组均衡控制策略研究[J]. *电源技术*, 2018, 42(8): 1209-1212.
- ZHU Fangfang, WANG Kangli, WANG Dalei, et al. Study on strategy of balance control for liquid metal battery in series[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(8): 1209-1212.
- [18] 张金龙. 动力电池组SOC估算及均衡控制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [19] GUO X, KANG L, YAO Y, et al. Joint estimation of the electric vehicle power battery state of charge based on the least squares method and the Kalman filter algorithm[J]. *Energies*, 2016, 9(2): 100.
- [20] KUO T J, LEE K Y, HUANG C K. State of charge modeling of lithium-ion batteries using dual exponential functions[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 315(2): 331-338.
- [21] 杨世彦, 刘晓芳, 杨威. 串联储能电源能量变换与均衡技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014: 147-150.
- [22] KIM M Y, KIM C H, KIM J H, et al. A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of Lithium-Ion batteries[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(8): 3989-3999.
- [23] 肖峰. 电动汽车锂离子电池组均衡充电技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2010.
- [24] 郑文一, 胡社教, 牛朝, 等. 动力电池组主动均衡方案研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2014, 28(7): 710-716.
- ZHENG Wenyi, HU Shejiao, NIU Chao, et al. Research on active equalization scheme of power battery pack[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2014, 28(7): 710-716.
- [25] BRADWELL D, CEDER G, ORTIZ L, et al. Liquid electrode battery: US, US20110014505 A1[P]. 2011.
- 作者简介:**
- 魏晓东(1989—), 男, 工程师, 主要从事电网中新能源与储能的研究工作。
- 黄青丹(1982—), 男, 正高级工程师, 主要从事电网中新能源与储能的研究工作。E-mail: 18829588@qq.com。
- 饶锐(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事电网中新能源与储能的研究工作。
- 黄慧红(1976—), 女, 高级工程师, 主要从事电网中电力化学的研究工作。
- 宋浩永(1985—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力新技术开发及应用研究工作。
- 徐钦(1991—), 男, 工程师, 主要从事电网中新能源与储能的研究工作。
- 赵崇智(1977—), 男, 工程师, 主要从事电网中电力化学的研究工作。