

采用改进矩阵型可重构拓扑的 锂离子电池均衡策略

李艳波¹, 常悦¹, 陈圆媛², 吕浩楠¹, 张云锐¹, 姚博彬³

(1. 长安大学能源与电气工程学院, 710064, 西安; 2. 河南交通投资集团有限公司河南交投服务区
有限责任公司, 450016, 郑州; 3. 长安大学电子与控制工程学院, 710064, 西安)

摘要: 为解决串联锂离子电池组中各电池特性(或参数)不一致性问题,提出了一种采用改进矩阵型可重构拓扑的锂离子电池组均衡策略。将电池组中各电池的荷电状态作为均衡目标参数,通过开关矩阵控制电池小组在串联与并联拓扑之间来回切换,实现各电池单体及电池小组之间的均衡,并通过隔离荷电状态最低的电池单体或电池小组加快均衡速度。使用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真,并与原矩阵型可重构均衡策略进行对比,仿真结果表明:与原矩阵型可重构均衡策略相比,改进均衡策略在负载为 10、20 和 40 W 时可分别提升 13.1%、27.1% 和 30.1% 的均衡速度;在考虑开关导通电阻时,所提出的改进均衡策略在均衡过程后期通过荷电状态差值造成的电压差加速了均衡过程,在导通电阻较大时仍能有效均衡电池组,有效地避免了原矩阵型可重构均衡策略的均衡效果随导通电阻增大而变差,甚至无法均衡电池组的缺陷,成功达到均衡目标。由此证明所提的改进矩阵型均衡策略相较于原矩阵型均衡策略具有更好的均衡效果。

关键词: 锂离子电池;均衡策略;不一致性;荷电状态

中图分类号: TM911.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202406016 **文章编号:** 0253-987X(2024)06-0174-12

A Lithium-Ion Battery Equalization Strategy Using Improved Matrix-Type Reconfigurable Topology

LI Yanbo¹, CHANG Yue¹, CHEN Yuanyuan², LÜ Haonan¹, ZHANG Yunrui¹, YAO Bobin²

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Henan Transportation Investment Expressway Service Area Co., Ltd., Henan Transportation Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China; 3. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;)

Abstract: To solve the problem of inconsistency in the characteristics (or parameters) of cells in a series-connected lithium-ion battery pack, a lithium-ion battery pack equalization strategy using an improved matrix-type reconfigurable topology is proposed in this paper. The strategy takes the state of charge (SOC) of each cell in the battery pack as the equalization target parameter, and uses the switching matrix to control the switching of battery groups between series and parallel topologies and realize the equalization between battery cells and battery groups, and accelerates the equalization speed by isolating the cell or battery group with the lowest SOC. Simulation

results using MATLAB/Simulink and comparison with the original matrix reconfigurable equalization strategy show that, compared with the original matrix reconfigurable equalization strategy, the improved strategy can improve the equalization speed by 13.1%, 27.1% and 30.1% under the loads of 10, 20 and 40 W, respectively. Taking the switch on-resistance into consideration, the improved strategy proposed accelerates the equalization process through the voltage difference caused by the SOC difference at the later stage of the equalization process, and can still effectively equalize the battery pack when the on-resistance is high, which effectively avoids the defects that the equalization effect of the original matrix-type reconfigurable equalization strategy deteriorates or even fails with the increase of on-resistance, and achieves the equalization target successfully. This proves that the improved matrix-type equalization strategy proposed has a better equalization effect compared with the original matrix-type equalization strategy.

Keywords: lithium-ion battery; active equalization; inconsistency; state of charge

为践行低碳环保理念,锂离子电池被广泛应用^[1-2]。由于其单体电压低、容量小,通常需串联、并联多个电池,以满足负载电压和功率要求^[3]。然而,材料、制作工艺和工作条件的不同,会使电池组内部的各个单体之间存在一定的差异,这些差异被称为电池单体之间的不一致性^[4-5]。

锂离子电池组的不一致性通常源于电池的生产过程和使用过程两方面^[6]。若不及时进行处理,电池单体间的不一致性会越来越大,造成电池过充或过放^[7],进而导致电池性能恶化,缩短电池使用寿命,降低整个电池组的工作效率,甚至发生爆炸^[8]。为了提高电池组的容量利用率,延长使用寿命,最为有效的途径是在电池组充放电过程中对各电池单体进行均衡管理^[9]。锂离子电池的均衡可分为被动均衡^[10-11]和主动均衡^[12-13]。被动均衡一般采用并联电阻放热的方式将高容量电池“多出的电量”进行释放,从而达到均衡的目的。主动均衡充电时将多余电量转移至高容量电池,放电时将多余电量转移至低容量电池。主动均衡方法主要使用电容、电感、变压器、变换器作为能量传递装置^[14-17],主动均衡可提高电池组的最大输出容量和能量利用效率,但是成本更高,电路更复杂。

传统均衡电路中电池组中的电池永久串联连接^[18],只要有一个电池出现故障,就会导致整个电池组故障。为了解决这一问题,Ci等^[19]提出一种新的电池组均衡拓扑,称为可重构拓扑。这种结构允许所有单体电池在串联与并联之间切换或者切除任意电池,这种拓扑灵活性很高,但每个单体电池需要配置5个全控型开关,随之而来的是成本、能量损耗

和复杂度的上升。其后又发展出了串联型、DESA (dependable, efficient, scalable architecture)型、基于图(graph-based)型、矩阵型等拓扑结构^[20-23],这些结构在成本、灵活性、控制复杂度等方面各有优劣。

Wang等^[23]提出了一种矩阵型可重构电池结构的锂离子电池组快速均衡策略,并设计了一种以电压差为均衡指标的开关电路拓扑结构,将 n^2 个锂离子按 $n \times n$ 排列并通过开关控制,在开关电路中加入脉冲宽度调制(PWM)信号,用PWM波控制开关阵列,使同一组内电池在串联与并联中切换。该均衡策略在不大幅增加开关器件数量的情况下,大大降低了均衡策略的复杂性。均衡后,电池组的可用容量增加,老化速度减慢,使用寿命延长。但是,并联电池或电池组的电压差会随着均衡过程逐渐减小而导致均衡速度减慢,并且即使两电池具有相同的输出电压,也无法保证它们的荷电状态(SOC)^[24-25]相同。

本文对Wang等提出的原矩阵型可重构均衡电路拓扑结构做出改进,并提出了全新的以荷电状态一致为目标的控制策略,有效提高了电池组的均衡速度和均衡效率。

1 均衡电路拓扑

1.1 原矩阵型可重构均衡电路

原矩阵型均衡电路由 n^2 个锂离子电池组成,锂离子电池按 $n \times n$ 排列。其中每一列为一个电池小组,第 i 列电池即第 i 个电池小组。记第 i 小组第 j 个锂电池为 B_{ij} ,第 a 个串联开关为 $S_{s_{ia}}$,第 b 个并联开关为 $S_{p_{ib}}$ 。以第一列电池小组为例,电池 B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 、 $\cdots$ 、 B_{1n} 之间通过开关 $S_{s_{11}}$ 、 $S_{s_{12}}$ 、 $\cdots$ 、 $S_{s_{1(n-1)}}$ 串联,

或通过开关 S_{p11} 、 S_{p12} 、 $\cdots$ 、 $S_{p1(2n-2)}$ 并联,其余 $n-1$ 列电池小组采用同样的组内控制方式。

不同电池小组之间通过开关 $S_{p1(2n-1)}$ 、 $S_{p1(2n)}$ 、 $S_{p2(2n-1)}$ 、 $S_{p2(2n)}$ 、 $\cdots$ 、 $S_{p(n-1)(2n-1)}$ 、 $S_{p(n-1)(2n)}$ 并联连接,或通过开关 S_{s1n} 、 S_{s2n} 、 $\cdots$ 、 $S_{s(n-1)n}$ 串联连接。当电池小组内电池单体相互串联时,电池小组间相互并联;当电池小组内电池单体相互并联时,电池小组间相互串联。

原矩阵型可重构均衡电路拓扑图如图 1 所示。

设置由 $3(n^2-1)$ 个开关组成的开关阵列,通过 PWM 波控制开关阵列,使同一组内电池在串联与

并联中切换。当电池组处于先并联后串联拓扑时,并联的电池单体通过电压差进行均衡;当电池组处于先串联后并联时,并联的电池组通过电压差进行均衡。控制模块由参数检测和采集电路、比较电路和 PWM 信号发生电路组成。参数采集电路采集各电池单元的电压,采集到的电压送入比较电路,找出电压最高值和最低值,得到其差值。当差值未达到预设阈值时,不会产生 PWM 信号,均衡电路不工作。当差值达到预设阈值时,即产生两组互补的 PWM 信号,分别发送至两组开关,从而控制开关的通断,重新配置电池组的内部结构。

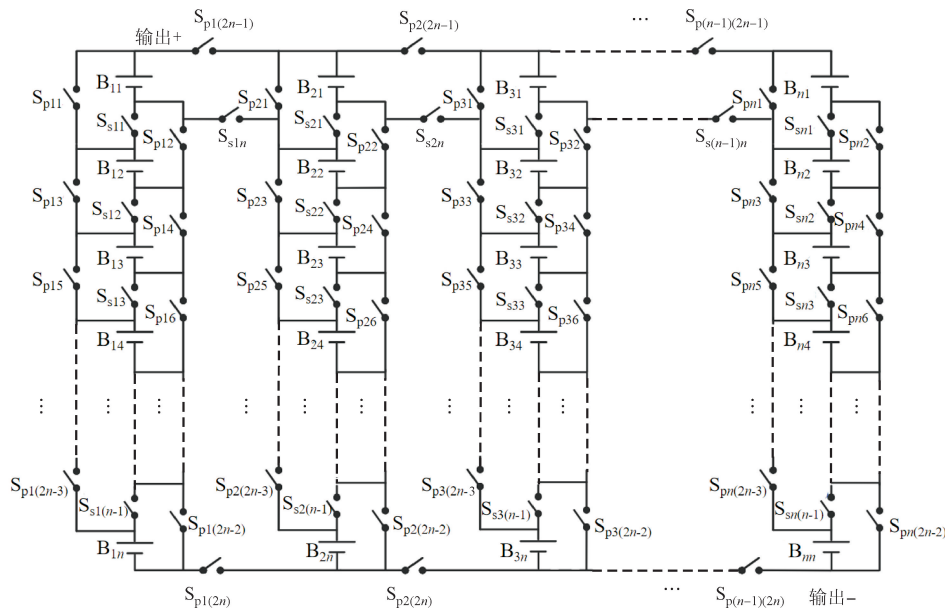


图 1 原矩阵型可重构均衡电路拓扑图

Fig. 1 Topology of original matrix-type reconfigurable equalization circuit

1.2 改进矩阵型可重构电路

与原矩阵型电路相同,改进矩阵型可重构电路由 n^2 个锂电池组成,锂离子电池按 $n \times n$ 排列。其中,每一列为一个电池小组,第 i 列电池即第 i 个电池小组。

记第 i 小组第 j 个锂电池为 B_{ij} ,第 a 个串联开关为 S_{sia} ,第 b 个并联开关为 S_{pijb} 。以第一列电池小组为例,电池 B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 、 $\cdots$ 、 B_{1n} 之间通过开关 S_{s11} 、 S_{s12} 、 $\cdots$ 、 $S_{s1(n-1)}$ 串联,或通过开关 S_{p11} 、 S_{p12} 、 $\cdots$ 、 $S_{p1(2n-2)}$ 并联,其余 $n-1$ 列电池小组采用同样的组内控制方式。不同电池小组之间通过开关 $S_{p1(2n-1)}$ 、 $S_{p1(2n)}$ 、 $S_{p2(2n-1)}$ 、 $S_{p2(2n)}$ 、 $\cdots$ 、 $S_{pn(2n-1)}$ 、 $S_{pn(2n)}$ 并联连接,或通过开关 S_{s1n} 、 S_{s2n} 、 $\cdots$ 、 $S_{s(n-1)n}$ 和 $S_{p1(2n-1)}$ 、 $S_{pn(2n)}$ 串联连接。当电池小组内电池单体相互串联时,电池小组间相互并联;当电池小组内电池单体相互并联时,电池小组间相互串联。

改进矩阵型可重构均衡电路拓扑如图 2 所示。

同一小组内的电池可以通过由 $3n^2-1$ 个开关构成的开关矩阵在串联与并联中切换,也可以将某一个电池切出电路。该电路保留了原矩阵型可重构均衡电路通过电压差均衡电池的优点,又通过隔离荷电状态最低电池加快电池组的均衡速度,减少了电池间的能量流动,因此提升了均衡效率。

2 均衡控制策略

以图 3 所示 16 个电池构成的 4×4 矩阵型可重构均衡电路为例,默认状态下串联开关 S_{s11} 、 S_{s12} 、 S_{s13} 及并联开关 S_{pi7} 、 S_{pi8} 闭合,其余开关断开,小组内的电池相互串联,4 个电池小组相互并联,16 个电池同时工作。

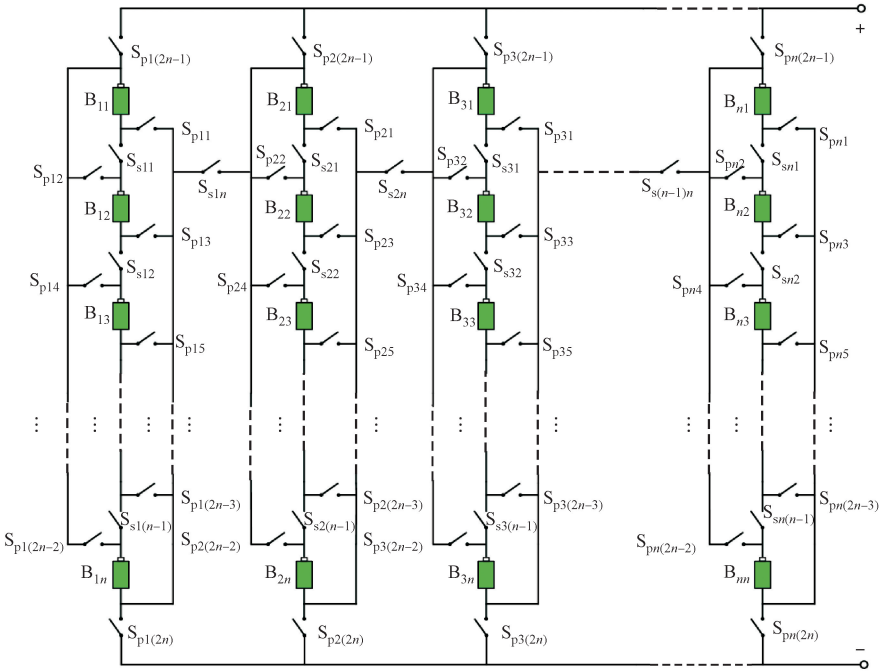


图 2 改进矩阵型可重构均衡电路拓扑

Fig. 2 Topology of improved matrix-type reconfigurable equalization circuit

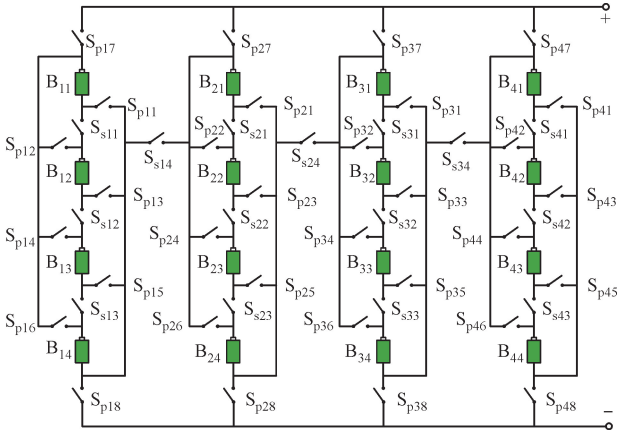


图 3 4×4 矩阵型可重构均衡电路拓扑

Fig. 3 Topology of 4×4 matrix-type reconfigurable equalization circuit

2.1 先串联后并联结构均衡原理

记平均荷电状态最高的电池小组组号为 $G_{\max}$,其平均荷电状态为 $\xi_{\text{SOC},G_{\max}}$,荷电状态最低的电池小组组号为 $G_{\min}$,其平均荷电状态为 $\xi_{\text{SOC},G_{\min}}$ 。均衡结构为先串联后并联时,均衡系统控制策略如图 4。

模式 1 若平均荷电状态最高的电池小组 $G_{\max}$ 和平均荷电状态最低的电池小组 $G_{\min}$ 的平均荷电状态差值高于设定值 $\xi_{\text{SOC},1}$,则电池小组间的不均衡度较高。此时,将平均荷电状态最低的电池小组切出电路以加快均衡速度,其他 3 个电池小组并联放电。

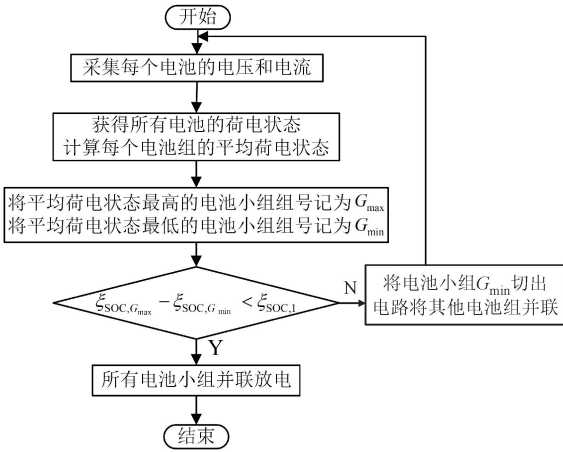


图 4 先串联后并联均衡控制策略

Fig. 4 Series then parallel equalization control strategy

模式 2 若平均荷电状态最高的电池小组 $G_{\max}$ 和平均荷电状态最低的电池小组 $G_{\min}$ 的平均荷电状态差值低于设定值 $\xi_{\text{SOC},1}$,则电池小组间一致性较好。此时,电池组工作在默认状态,4 个电池小组并联放电,由于电池小组之间并联连接,荷电状态较高的电池小组会缓慢向荷电状态较低的电池小组充电,缓慢实现组间均衡。

当电池组处于先串联后并联结构的模式 1 时,电路结构拓扑图如图 5 所示。为便于区分电路中实际工作部分与被切出部分,电路中的通路用黑色加粗实线表示,断路用浅灰色细实线表示。

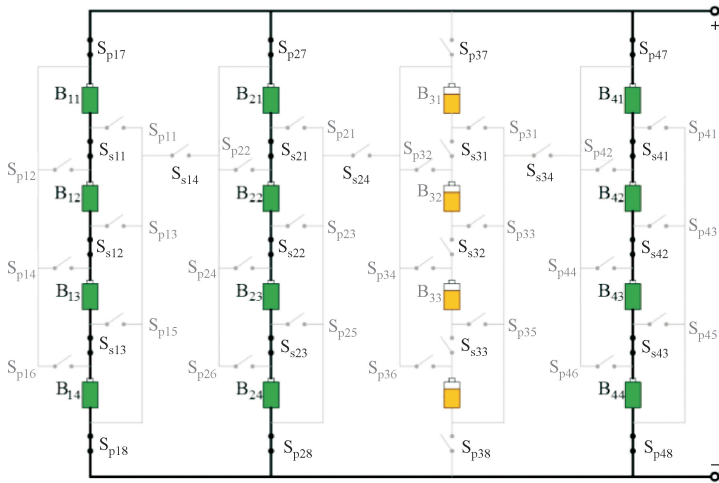


图 5 先串联后并联拓扑图

Fig. 5 Series then parallel topology diagram

假设电池小组 3 的平均荷电状态最低,此时电池小组间不平衡度较高,故需将电池小组 3 切出电路以加快均衡速度。因此,将串联开关 S_{s31} 、 S_{s32} 、 S_{s33} 及并联开关 S_{p37} 和 S_{p38} 断开,使得电池小组 3 切出电路。同时,将串联开关 S_{s11} 、 S_{s12} 、 S_{s13} 闭合,使得电池 B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 和 B_{14} 串联连接构成串联电池小组 1,并通过闭合并联开关 S_{p17} 和 S_{p18} 使得串联电池小组 1 与其他串联电池小组并联。串联电池小组 2 和串联电池小组 4 的连接方式同理。

均衡系统由均衡模式 1 过渡至均衡模式 2 的原理如图 6 所示,绿色虚线框内的电池为工作状态,黄色虚线框内的电池为切出状态, S_i 表示第 i 个串联电池小组。

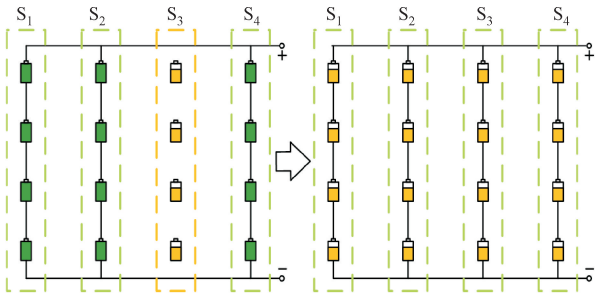


图 6 先串联后并联均衡过程

Fig. 6 Series then parallel equalization process

忽略开关和线路的阻值,对于电池数量为 $n \times n$ 的矩阵型可重构电路,工作在先串联后并联模式 1 时,电池小组 b 因平均荷电状态最低被切出,此时第 x 个串联电池小组的等效电阻为

$$R_{sx} = \sum_{j=1}^n R_{xj} \quad (1)$$

式中: R_{xj} 为第 x 个串联电池小组中第 j 个电池单体的等效电阻。

除第 x 个串联电池小组及被切除的串联电池小组 b 外其他 $n-2$ 个并联支路的并联电阻为

$$R'_{sx} = 1 / \sum_{1 \leq i \leq n, i \neq x, b} (1 / \sum_{j=1}^n R_{ij}) \quad (2)$$

式中: R_{ij} 为第 i 个串联电池小组中第 j 个电池单体的等效电阻。

根据叠加定律,每个串联电池小组通过的电流可分成两部分,即该串联电池小组单独作用时产生的电流 I'_{sx} 与其他电池小组单独作用时在该电池小组产生的电流 I''_{sx}

$$I'_{sx} = \frac{\sum_{j=1}^n U_{xj}}{R_{sx} + R'_{sx}} \quad (3)$$

$$I''_{sx} = - \sum_{1 \leq i \leq n, i \neq x, b} \frac{\sum_{j=1}^n U_{ij} R'_{si}}{(R_{si} + R'_{si}) R_{sx}} \quad (4)$$

则第 x 个串联电池小组的电流 I_{sx} 为

$$I_{sx} = I'_{sx} + I''_{sx} \quad (5)$$

式中: U_{xj} 为第 x 个串联电池小组第 j 个电池的输出电压; U_{ij} 为第 i 个串联电池小组第 j 个电池的输出电压; R_{si} 为第 i 个串联电池小组的等效电阻; R'_{si} 为除第 i 组及被切出电路的第 b 组外其余并联支路的等效电阻。

若 I_{sx} 为正,串联电池小组 x 放电,若 I_{sx} 为负,串联电池小组 x 充电。半个先串联后并联状态周期 T 内的能量损耗为

$$E_{\text{loss}} = \sum_{1 \leq x \leq n, x \neq b} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{S_{x}}^2 R_{S_{x}} dt \approx \sum_{1 \leq x \leq n, x \neq b} I_{S_{x}}^2 R_{S_{x}} \frac{T}{2} \tag{6}$$

同理，当串联电池小组 x 工作在先串联后并联模式 2 时，电池组半个周期内的能量损耗为

$$E'_{\text{loss}} = \sum_{1 \leq x \leq n} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{S_{x}}^2 R_{S_{x}} dt \approx \sum_{1 \leq x \leq n} I_{S_{x}}^2 R_{S_{x}} \frac{T}{2} \tag{7}$$

2.2 先并联后串联结构均衡原理

记荷电状态最高的电池单体序号为 $B_{\max}$ ，其荷电状态为 $\xi_{\text{SOC}, B_{\max}}$ ，荷电状态最低的电池单体序号为 $B_{\min}$ ，其荷电状态为 $\xi_{\text{SOC}, B_{\min}}$ 。系统处于先并联后串联结构时，4 个电池小组的控制原理相同，单个电池小组的工作流程图如图 7 所示。

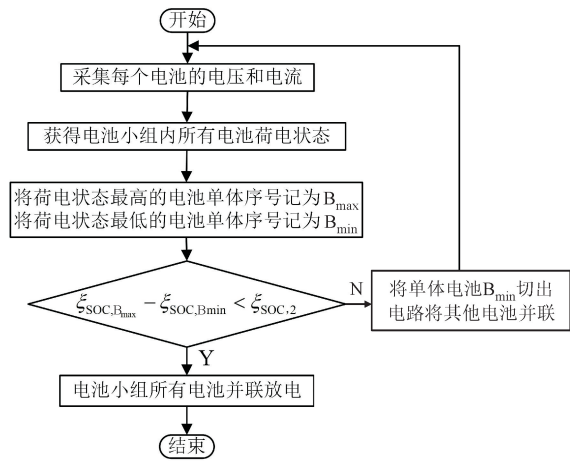


图 7 先并联后串联电池小组均衡控制策略

Fig. 7 Parallel then series equalization control strategy

模式 1 若荷电状态最高的电池单体 $B_{\max}$ 和荷电状态最低的电池单体 $B_{\min}$ 的荷电状态差值高于设定值 $\xi_{\text{SOC},2}$ ，则电池小组内不同电池单体之间的不均衡度较高。此时，将荷电状态最低的电池单体切出电池小组以加快均衡速度，其他 3 个电池单体并联，4 个电池小组之间串联放电。直到电池单体 $B_{\max}$ 和电池单体 $B_{\min}$ 相差低于设定值 $\xi_{\text{SOC},2}$ 时，进入模式 2。

模式 2 若荷电状态最高的电池单体 $B_{\max}$ 和荷电状态最低的电池单体 $B_{\min}$ 的荷电状态差值低于设定值 $\xi_{\text{SOC},2}$ ，则电池小组内不同电池单体之间的一致性较好。此时，电池小组内 4 个电池单体并联，荷电状态较高的电池单体会缓慢向荷电状态较低的电池单体充电，缓慢实现组内均衡。4 个电池小组之间串联放电。

当电池组处于先并联后串联结构的模式 1 时，电路结构拓扑图如图 8 所示。为便于区分电路中实际工作部分与被切出部分，电路中的通路用黑色加粗实线表示，断路用浅灰色细实线表示。

以电池小组 1 为例分析系统均衡原理。由于此时电池小组 1 内的不均衡度较高，需要将荷电状态最低的电池单体 B_{12} 切出电路以加快均衡速度。因此，将并联开关 S_{p12} 和 S_{p13} 断开，并联开关 S_{p11} 、 S_{p14} 、 S_{p15} 和 S_{p16} 闭合，使得电池单体 B_{12} 切出电路，电池 B_{11} 、 B_{13} 和 B_{14} 并联连接构成并联电池小组 1，并通过闭合开关 S_{s14} 使得并联电池小组 1 与其他并联电池小组串联。并联电池小组 2、3、4 分别通过开关将 B_{23} 、 B_{31} 和 B_{44} 切出，其开关控制原理与并联电池小组 1 类似。

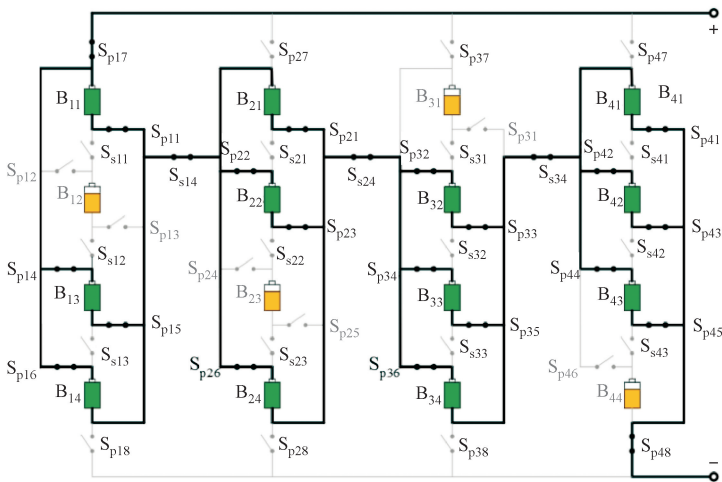


图 8 先并联后串联拓扑图

Fig. 8 Parallel then series topology diagram

均衡系统由均衡模式 1 过渡至均衡模式 2 的原理如图 9 所示，绿色虚线框内为处于工作状态的电

池， P_i 表示第 i 个并联电池小组。
忽略开关的阻值，对于电池数量为 $n \times n$ 的矩阵

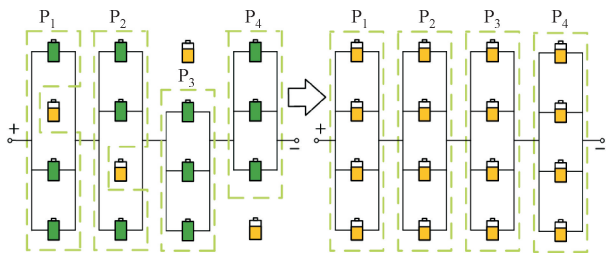


图 9 先并联后串联的均衡过程

Fig. 9 Parallel then series equalization process

型可重构电路,工作在先并联后串联状态模式 1 时,未达到均衡的电池小组中荷电状态最低的电池被切出,假设第 x 个电池小组的第 b_x 个电池因荷电状态最低被切出,此时第 x 个并联电池小组的等效阻值为

$$R_{p_{xy}} = R_{xy} \quad (8)$$

式中: R_{xy} 为第 x 个并联电池小组中第 y 个电池单体的等效电阻。

第 x 个并联电池小组除了第 y 个电池及被切出电路的第 b_x 个电池外的其他 $n-2$ 个工作电池的并联电阻为

$$R'_{p_{xy}} = 1 / \sum_{i \leq j \leq n, j \neq y, b_x} \frac{1}{R_{xj}} \quad (9)$$

式中: R_{xj} 为第 x 个并联电池小组中第 j 个电池单体的等效电阻。

根据叠加定律,每个电池通过的电流可分成两部分,即该电池单独作用时产生的电流 $I'_{p_{xy}}$ 与并联小组内其他电池单独作用时在该电池回路产生的电流和 $I''_{p_{xy}}$,分别为

$$I'_{p_{xy}} = \frac{U_{xy}}{R_{p_{xy}} + R'_{p_{xy}}} \quad (10)$$

$$I''_{p_{xy}} = - \sum_{1 \leq j \leq n, j \neq y, b_x} \frac{U_{xj}}{(R_{p_{xj}} + R'_{p_{xj}}) R_{p_{xy}}} \quad (11)$$

则通过第 x 个并联电池小组第 y 个电池的电流 $I_{p_{xy}}$ 为

$$I_{p_{xy}} = I'_{p_{xy}} + I''_{p_{xy}} \quad (12)$$

式中: U_{xy} 为第 x 个并联电池小组第 y 个电池的输出电压; U_{xj} 为第 x 个并联电池小组第 j 个电池的输出电压; $R_{p_{xj}}$ 为第 x 个并联电池小组中第 j 个电池的等效电阻; $R'_{p_{xj}}$ 为并联电池小组 x 中除第 j 个电池及被切出电路的第 b_x 个电池外其余并联支路的等效电阻。

若 $I_{p_{xy}}$ 为正,则此时电池组在放电,若 $I_{p_{xy}}$ 为负,则此时电池组在充电。半个先并联后串联状态周期 T 内的能量损耗为

$$E_{\text{loss}} = \sum_{x=1}^n \sum_{1 \leq y \leq n, y \neq b_x} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{p_{xy}}^2 R_{p_{xy}} dt \approx \sum_{x=1}^n \sum_{1 \leq y \leq n, y \neq b_x} I_{p_{xy}}^2 R_{p_{xy}} \frac{T}{2} \quad (13)$$

同理,当电池组工作在先并联后串联模式 2 时,电池组半个周期内的能量损耗为

$$E'_{\text{loss}} = \sum_{x=1}^n \sum_{1 \leq y \leq n} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{p_{xy}}^2 R_{p_{xy}} dt \approx \sum_{x=1}^n \sum_{1 \leq y \leq n} I_{p_{xy}}^2 R_{p_{xy}} \frac{T}{2} \quad (14)$$

改进矩阵型可重构均衡系统的原理可概况如下:

(1)当电池组连接方式为“先串联后并联”时,系统实现电池小组之间的均衡;

(2)当电池组连接方式为“先并联后串联”时,系统实现同一电池小组内各电池单体之间的均衡;

(3)当电池组不均衡度较高时,系统处于均衡模式 1,将荷电状态最低的电池或电池小组切出电路以加快均衡速度,其他电池继续放电;

(4)当电池组不均衡度较低时,系统处于均衡模式 2,各并联电池或并联电池组通过电压差进行均衡。

3 仿真实验

为验证本文提出的矩阵型可重构均衡策略的可行性,在 MATLAB/Simulink 平台搭建结构同图 3 所示的仿真模型。设置仿真步长 0.1 s,可控开关切换周期为 1 s,均衡拓扑初始状态为“先并联后串联”,设定当最高荷电状态与最低荷电状态差值小于 1% 认为电池组达到均衡 ($\xi_{\text{SOC},0} = \xi_{\text{SOC},1} = \xi_{\text{SOC},2} = 1\%$),为了便于观察系统到达均衡的时间,令电池组在达到均衡后停止工作。

仿真验证采用的电池为比克 H18650CIL 三元锂电池,其相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真验证所用电池相关参数

Table 1 Parameters of the batteries used in the experiment

参数	数值	参数	数值
标称容量/(A · h)	2.4	标称电压/V	3.60
最大充电电流/A	2.4	充电电压/V	4.20 ± 0.03
最大放电电流/A	7.2	放电终止电压/V	2.75 ± 0.03
内阻/mΩ	≤ 35	能量密度/(W · h · kg ⁻¹)	184

选取 16 个上述型号的电池构成 4 × 4 的电池组,电池组中第 i 个电池小组中的第 j 个电池单体编

号记为 ij 。在 50% ~ 70% 范围内生成 16 个随机数作为初始状态下电池 11 到电池 44 的荷电状态 ξ_{soc}^0 。16 个仿真验证采用的试验电池初始荷电状态值如表 2 所示。负载设定为 10 Ω 的纯电阻负载。

表 2 16 个试验电池的初始 SOC

Table 2 Initial SOC of the 16 test batteries			
电池编号	$\xi_{\text{soc}}^0/\%$	$\bar{\xi}_{\text{soc}}^0/\%$	极差
11	66	66.5	7
12	62		
13	69		
14	69		
21	65	62.5	12
22	57		
23	69		
24	59		
31	52	56.5	14
32	55		
33	53		
34	66		
41	68	60.5	16
42	60		
43	62		
44	52		

注: $\bar{\xi}_{\text{soc}}^0$ 为初始荷电状态 ξ_{soc}^0 的平均值。

3.1 仿真分析

忽略开关的导通损耗与开关损耗,整个系统均衡过程如图 10 所示。

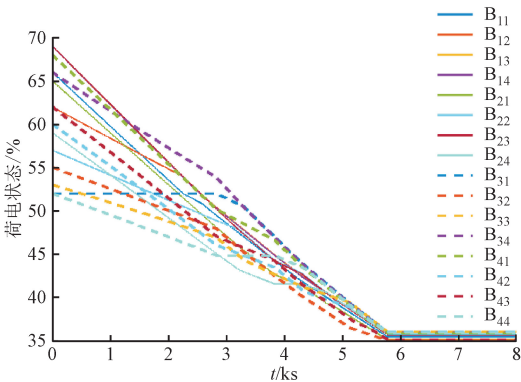


图 10 均衡过程中各电池荷电状态

Fig. 10 SOC of each battery during balancing process

初始状态下系统内荷电状态极差为 17%,通过开关矩阵控制电池组在先串联后并联拓扑和先并联后串联拓扑中不断循环,并根据组内荷电状态差值

大小判断是否隔离荷电状态最低的电池、根据组间平均荷电状态差值大小判断是否隔离平均荷电状态最低的串联电池小组。均衡过程中荷电状态较高的电池优先放电,各个电池的荷电状态不断趋近,经过 5 774 s 均衡之后,系统组内荷电状态极差小于 1%,此时认为系统已达到均衡。

由表 1 可得,4 个电池小组的初始平均荷电状态由小到大排列为电池小组 3、电池小组 4、电池小组 2、电池小组 1。均衡过程中,各电池小组平均荷电状态变化如图 11 所示。

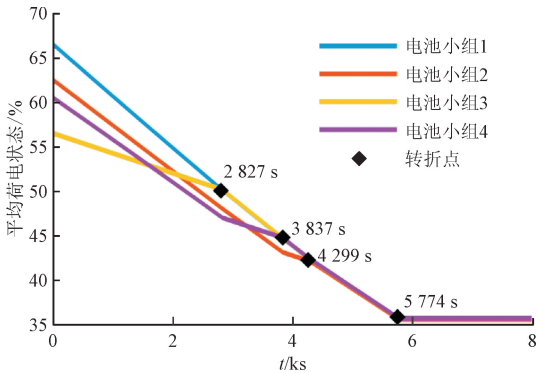


图 11 均衡过程中各串联电池小组平均荷电状态

Fig. 11 SOC of each series-connected battery group during balancing process

观察图 11 中曲线斜率可知,在整个均衡过程中,电池小组的平均荷电状态会以两种不同的速率减小,称之为小组快速放电状态和小组慢速放电状态。根据原理分析,造成这两种放电速率差别的原因是:在电池小组平均荷电状态差别较大且系统处于先串联后并联工作状态时,为加快系统均衡速度,平均荷电状态最小的电池小组会被隔离,这个被隔离的电池小组在其平均荷电状态值通过均衡达到各组平均荷电状态最高值的时间段内不工作,因此放电速度较慢。图 11 中电池小组之间的均衡过程可分为以下 4 个阶段。

(1)0~2 827 s。初始时刻电池小组 3 的平均荷电状态最小,因此电池小组 3 以较慢的速率放电而其他 3 个电池小组以较快速率放电。

(2)2 827~3 837 s。电池小组 3 的平均荷电状态超过电池小组 1 成为平均荷电状态最高的小组,此后平均荷电状态最低的电池小组 4 工作在小组慢速放电状态。

(3)3 837~4 299 s。电池小组 4 的平均荷电状态成为 4 个小组中的最高,切换电池小组 2 工作在小组慢速放电。

(4)4 299~5 774 s。4 个电池小组的平均荷电状态的极差小于设定阈值 $\xi_{SOC,1}$,此后 4 个电池小组均工作在小组快速放电状态,直至平均荷电状态的极差再次高于阈值。

以有代表性的电池小组 4 为例,分析均衡过程中 1 个小组内的各电池的工作情况。均衡过程中电池小组 4 中各电池荷电状态如图 12 所示。

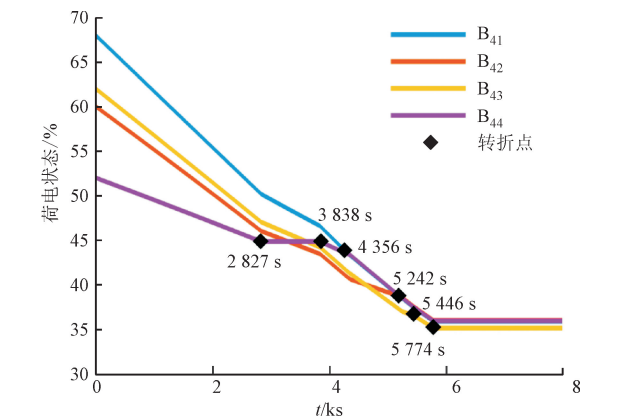


图 12 均衡过程中串联小组 4 中各电池荷电状态
Fig. 12 SOC of each battery in the series-connected group 4 during balancing process

由图 12 中各电池荷电状态曲线斜率可知,在整个均衡过程中,小组内各电池存在 3 种工作状态,分别称为单体快速放电状态、单体慢速放电状态和单体不放电状态。单体快速放电状态的电池对应的工作过程是:无论系统工作在先串联后并联还是先并联后串联状态,该电池均为正常工作,即全周期放电。单体慢速放电状态的电池对应的工作过程是:该电池所在的小组在先串联后并联状态时因平均荷电状态最低而被隔离或在先并联后串联状态时因该电池荷电状态过低而被隔离,即半周期放电。单体不放电状态的电池对应的工作过程是:该电池所在的小组在先串联后并联状态时被隔离且在先并联后串联状态时该电池也被隔离。图 12 中的电池小组 4 的均衡过程可分为 6 个阶段。

(1)0~2 827 s。初始时刻电池小组 4 平均荷电状态并非最低,因此处于小组快速放电状态。小组内荷电状态最低的电池 B_{44} 处于单体慢速放电状态,在先串联后并联时放电而在先并后串时被隔离不工作,其他 3 个电池处于单体快速放电状态。

(2)2 827~3 838 s。因为电池小组 4 变为小组慢速放电阶段,电池 B_{44} 处于单体不放电状态。其余 3 个电池处于单体慢速放电状态,在先串联后并

时被隔离不工作,在先并联后串联时正常工作。

(3)3 838~4 356 s。电池小组 4 恢复到快速放电状态,各电池工作情况与第 1 阶段类似。

(4)4 356~5 242 s。此时电池小组 4 组内电池 B_{42} 因荷电状态最低变为单体慢速放电状态。

(5)5 242~5 446 s。此时电池小组 4 组内电池 B_{43} 因荷电状态最低变为单体慢速放电状态。

(6)5 446~5 774 s。电池小组 4 的荷电状态极差降到 1% 以内,认为电池小组 4 达到组内均衡。4 个电池均工作在单体快速放电状态。直到整个系统所有电池达到均衡。

以电池 B_{44} 为例,分析均衡过程中电池单体的状态变化, B_{44} 的荷电状态、电流和电压曲线如图 13 所示。

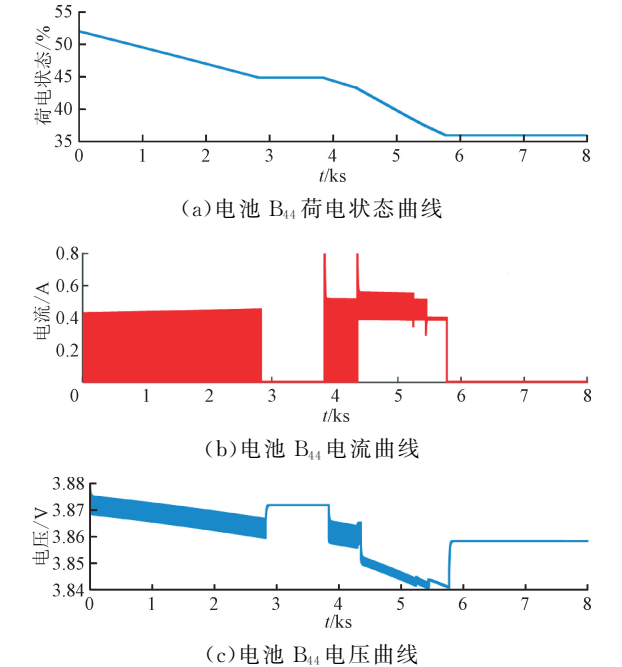


图 13 电池 B_{44} 单体均衡过程
Fig. 13 Balancing process of battery cell B_{44}

电池 B_{44} 在均衡过程中的工作状态可分为 5 个阶段。

(1)0~2 827 s。初始时刻电池小组 4 处于小组快速放电状态,电池 B_{44} 是该组内荷电状态最低电池,因此电池 B_{44} 处于单体慢速放电状态,只在半个周期放电。

(2)2 827~3 838 s。电池小组 4 处于小组慢速放电状态,电池 B_{44} 是该组内荷电状态最低电池,因此电池 B_{44} 处于单体不放电状态。

(3)3 838~4 357 s。 B_{44} 的工作状态与第 1 阶段类似。在 4 301 s B_{44} 输出电压升高是因为此刻先串

联后并联拓扑由均衡模式 1 切换到均衡模式 2,工作的电池小组由 3 个增加到 4 个,每个电池小组分配的电流降低,消耗在电池内阻的压降变小。

(4)4 357~5 446 s。电池小组 4 处于小组快速放电状态,电池 B₄₄不是该组内荷电状态最低电池,因此电池 B₄₄处于单体快速放电状态。电压和电流波形在 5 242 s 发生变换是因为此刻荷电状态最低的 B₄₃被切出,该组内平均电压升高。

(5)5 446~5 774 s。电池小组 4 的荷电状态极差降到 1%以内,认为电池小组 4 达到组内均衡。因此电池 B₄₄的电流和电压波动减小。

3.2 均衡速度对比

在负载功率 P 为 10、20 和 40 W 时,分别使用改进的矩阵型可重构均衡策略与原均衡策略的均衡速度对比如图 14 所示。

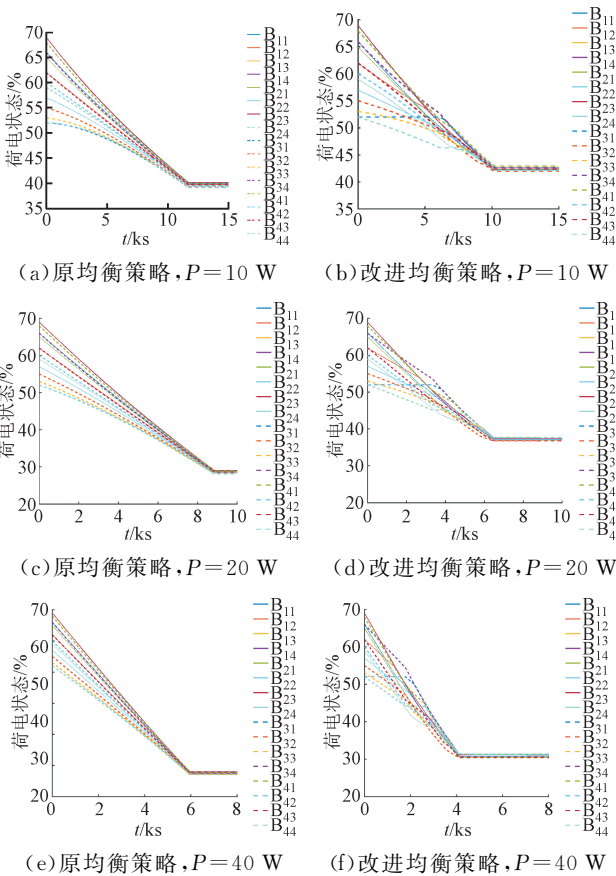


图 14 改进矩阵型可重构均衡策略与原均衡策略均衡速度对比

Fig. 14 Comparison of the speed of the improved matrix-type reconfigurable equalization strategy and the original strategy for equalization

当负载为恒定 10 W 时:使用原均衡策略对电池组进行均衡,共耗时 11 707 s;使用改进均衡策略

对电池组进行均衡,共耗时 10 172 s。改进均衡策略相对于原均衡策略节约 1 535 s,均衡速度提升 13.1%。

当负载为恒定 20 W 时:使用原均衡策略对电池组进行均衡,共耗时 8 866 s;使用改进均衡策略对电池组进行均衡,共耗时 6 462 s。改进均衡策略相对于原均衡策略节约 2 404 s,均衡速度提升 27.1%。

当负载为恒定 40 W 时:使用原均衡策略对电池组进行均衡,共耗时 5 959 s;使用改进均衡策略对电池组进行均衡,共耗时 4 105 s。改进均衡策略相对于原均衡策略节约 1 854 s,均衡速度提升 30.1%。

综上可见,随着负载功率增加,本文所提出的改进均衡策略对均衡速度的提升越来越高。

3 种不同负载功率下,原均衡策略与改进后均衡策略的均衡速度对比如表 3 所示。

表 3 改进均衡策略与原均衡策略的均衡速度对比
Table 3 Speed comparison between the improved strategy and the original strategy

负载 功率/W	原均衡策略 耗时/s	改进均衡 策略耗时/s	提升率/%
10	11 707	10 172	13.1
20	8 866	6 462	27.1
40	5 959	4 105	30.1

3.3 考虑开关导通损耗均衡效果对比

在以往的研究中,未考虑开关阻抗造成的电压以及功率损耗,在实际应用时若考虑均衡方案的效率,可控开关的损耗不可忽略。由于两种均衡策略的开关频率很低,故在此只考虑导通损耗,不考虑开关损耗。导通电阻(R_s)分别为 0.01 Ω 和 0.1 Ω 下改进矩阵型可重构均衡策略与原均衡策略的均衡效果仿真对比如图 15 所示(设定负载为 20 W 恒功率负载)。

如图 15(a)、(b)所示,开关导通电阻 R_s 为 0.01 Ω 时,原均衡策略的各荷电状态曲线先是轻微发散,然后收敛,最后在 15 754 s 达到均衡,此时系统的平均荷电状态为 4.02%,最低荷电状态为 3.50%;改进均衡策略的均衡过程中各荷电状态曲线呈现不断趋近的趋势,系统经过 8 208 s 达到均衡。图 15(a)在均衡末尾各荷电状态曲线收敛速度加快的原因是:根据仿真分析选用的三元锂电池特性,其荷电状态低于 10%时曲线的斜率较大,即较小的荷电状态

变化会造成较大的输出电压变化,因此根据电池电压差进行均衡的原均衡策略的均衡速度加快。

如图 15(c) 所示,在 R_s 为 $0.1\ \Omega$ 时,原均衡策略的均衡过程中各电池的荷电状态不断发散,各电池小组组内荷电状态极差最大为 47.83% 。当出现首个完全放电到荷电状态为 0 的电池时,各电池小组组内电池最高荷电状态为 27.50% 。即使多个电池已完全放电,整体也未达到均衡状态。证明在开关导通损耗较大的情况下,原均衡策略无法正确地均衡电池组。

如图 15(d) 所示,在 R_s 为 $0.1\ \Omega$ 时,改进均衡策略的均衡过程中各荷电状态曲线同样呈现不断趋近的趋势,受开关电阻的影响,均衡电路效率有所下降,最终于 $16\ 344\ \text{s}$ 达到均衡状态。此时,系统的平均荷电状态为 3.51% ,最低荷电状态为 3.15% 。改进矩阵型可重构均衡策略在均衡的末尾阶段通过荷电状态差造成的电压差加速了均衡过程。

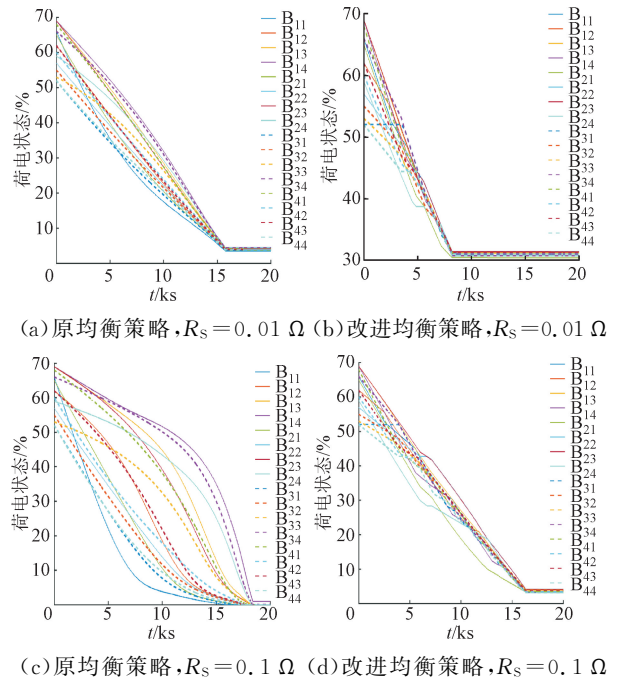


图 15 改进矩阵型可重构均衡策略与原均衡策略均衡效率对比

Fig. 15 Comparison of the equalization efficiency of the improved matrix-type reconfigurable equalization strategy and the original strategy

4 结 论

本文提出了一种只通过开关电路完成锂离子电池组均衡的改进矩阵型可重构均衡策略,该均衡策略以荷电状态一致为目标,通过对电池单体荷电状态进行计算,根据电池小组及组内电池单体的荷电

状态极差确定均衡模式。采用“先串联后并联”结构实现电池小组间的均衡,采用“先并联后串联”结构实现同一电池小组内各电池单体间的均衡。使用 MATLAB/Simulink 进行仿真并与原矩阵型可重构均衡策略进行对比,仿真结果显示本文提出的改进均衡策略相比原矩阵型可重构均衡策略具有更快的均衡速度,且弥补了原矩阵型可重构均衡策略在考虑开关导通损耗的情况下,均衡效果会随导通电阻 R_s 增大而变差甚至无法均衡电池组的缺陷,在导通电阻 R_s 较大时仍能有效均衡电池组,并提升了均衡效率。

参考文献:

[1] 于仲安,熊莹燕. 串联锂电池分层式主动均衡研究 [J]. 电源技术, 2022, 46(5): 528-531.
YU Zhongan, XIONG Yingyan. Research on hierarchical active equalization of series lithium batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(5): 528-531.

[2] JIA Chenyu, TIAN Yukai, SHI Yuanhao, et al. State of health prediction of lithium-ion batteries based on bidirectional gated recurrent unit and transformer [J]. Energy, 2023, 285: 129401.

[3] ZHOU Long, LAI Xin, LI Bin, et al. State estimation models of lithium-ion batteries for battery management system: status, challenges, and future trends [J]. Batteries, 2023, 9(2): 131.

[4] 胡卫丰,彭思敏,胥峥,等. 考虑电池不一致的串联型电池系统多约束动态功率预测 [J]. 机车电传动, 2022(3): 82-88.
HU Weifeng, PENG Simin, XU Zheng, et al. Multi-constrained dynamic power estimation of battery system in series connection considering cell inconsistency [J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(3): 82-88.

[5] 高欣,王若谷,高文菁,等. 基于运行数据的储能电站电池组一致性评估方法 [J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 2937-2945.
GAO Xin, WANG Ruogu, GAO Wenjing, et al. Consistency evaluation method of battery pack in energy storage power station based on running data [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(9): 2937-2945.

[6] TIAN Jiaqiang, LIU Xinghua, CHEN Chaobo, et al. Feature fusion-based inconsistency evaluation for battery pack: improved Gaussian mixture model [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(1): 446-458.

[7] YANG Chaofan, WANG Xueyuan, FANG Qiaohua,

- et al. An online SOC and capacity estimation method for aged lithium-ion battery pack considering cell inconsistency [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 29: 101250.
- [8] 王柯永. 电动汽车锂电池热管理系统综述 [J]. *新型工业化*, 2022, 12(8): 18-21.
- WANG Keyong. Overview of thermal management systems for electric vehicle lithium-ion batteries [J]. *The Journal of New Industrialization*, 2022, 12(8): 18-21.
- [9] 施锐, 张新燕, 刘莎莎, 等. 基于 SOC 均衡的分布式电池储能系统协同控制策略 [J]. *太阳能学报*, 2023, 44(9): 546-552.
- SHI Rui, ZHANG Xinyan, LIU Shasha, et al. Co-control strategy of distributed battery energy storage system based on SOC equalization [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 546-552.
- [10] 赵莹莹, 赵慧勇. 电动汽车电池系统主动均衡控制策略 [J]. *拖拉机与农用运输车*, 2023, 50(3): 29-35.
- ZHAO Yingying, ZHAO Huiyong. Electric car battery system active equalization control strategy [J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2023, 50(3): 29-35.
- [11] FAN Tiane, LIU Songming, YANG Hao, et al. A fast active balancing strategy based on model predictive control for lithium-ion battery packs [J]. *Energy*, 2023, 279: 128028.
- [12] 郑征, 王肖帅, 李斌, 等. 基于三绕组变压器的电池组新型均衡拓扑 [J]. *太阳能学报*, 2023, 44(9): 518-526.
- ZHENG Zheng, WANG Xiaoshuai, LI Bin, et al. New equalization topology for battery packs based on three-winding transformer [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 518-526.
- [13] XU Shujuan, SUN Zhenbao. Research on balance control strategy of lithium-ion battery energy storage system [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2022, 17: 1145-1150.
- [14] SHANG Yunlong, CUI Naxin, DUAN Bin, et al. Analysis and optimization of star-structured switched-capacitor equalizers for series-connected battery strings [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(11): 9631-9646.
- [15] 李小龙, 徐顺刚, 许建平, 等. 一种单电感双向电池均衡电路 [J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(4): 90-97.
- LI Xiaolong, XU Shungang, XU Jianping, et al. Single-inductor bidirectional battery equalizer [J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(4): 90-97.
- [16] FAN Shaogui, DUAN Jiandong, SUN Li, et al. A fast modularized multiwinding transformer balancing topology for series-connected super capacitors [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(4): 3255-3268.
- [17] 王津, 王文斌. 基于 DC/DC 双向变换器的多电池主动均衡技术 [J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(10): 40-45.
- WANG Jin, WANG Wenbin. Multi-cell active equalization technology based on DC/DC bidirectional converter [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(10): 40-45.
- [18] FAN Yuanliang, WANG Yule, ZHOU Gang, et al. A novel circuit for reducing equalizing currents in reconfigurable battery packs [C]//2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1-5.
- [19] CI Song, LIN Ni, WU Dalei. Reconfigurable battery techniques and systems: a survey [J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 1175-1189.
- [20] DING Xiaofeng, ZHANG Donghuai. A novel active equalization topology for series-connected lithium-ion battery packs [C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 2753-2758.
- [21] KIM H, SHIN K G. DESA: dependable, efficient, scalable architecture for management of large-scale batteries [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(2): 406-417.
- [22] SHAN Zhifei, DAI Shuailong, WEI Yewen, et al. Analysis and design of multilayer multiphase interleaved converter for battery pack equalization based on graph theory [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(4): 2580-2593.
- [23] WANG Xiaoqian, DUAN Bin, SHANG Yunlong, et al. Fast equalization for lithium ion battery packs based on reconfigurable battery structure [C]//2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2020: 1149-1154.
- [24] 明远山, 胡慧慧, 刘凯旋等. 孤岛模式下直流微网中储能单元 SOC 均衡控制策略 [J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 57-64.
- MING Yuanshan, HU Huihui, LIU Kaixuan, et al. Research on SOC balance control strategy of energy storage unit in DC microgrid in island mode [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(4): 57-64.
- [25] 李凌峰, 宫明辉, 乌江. 采用多模模型的锂离子电池荷电状态联合估计算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(1): 78-85.
- LI Lingfeng, GONG Minghui, WU Jiang. Joint estimation algorithm for state of charge of li-ion battery with multi-mode model [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(1): 78-85.

(编辑 刘杨 陶晴)