

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231544

## 基于分层架构的退役电池可重构均衡控制研究

王猛<sup>1,2</sup>, 王琦<sup>1,2</sup>, 李增辉<sup>1,2</sup>, 王庭华<sup>3</sup>, 姚璐勤<sup>1,2</sup>, 孙金磊<sup>4</sup>

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210046; 2. 江苏省综合能源设备及集成国际联合实验室, 江苏 南京 210046; 3. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210009; 4. 南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 利用退役电池构建储能系统, 充分利用其剩余价值, 是解决大量退役电池再利用的重要途径。然而, 经过多次充放电影响, 退役电池不一致性问题较新电池更为突出。在此背景下, 首先, 针对退役电池储能系统提出了分层式可重构均衡拓扑。其次, 基于该拓扑提出了分层式均衡控制策略。考虑组内部和组间两个层次的均衡控制, 组内以 SOC 和端电压为均衡变量, 通过重构实现电池单体状态均衡, 组间以 SOC 为均衡变量, 通过重构保证全电池簇均衡。同时考虑多种运行工况: 静置过程中通过自均衡提高电池组的均衡效率和可用容量, 放电过程中通过拓扑结构变换维持输出电压稳定, 充电过程中考虑能量损耗和充电速度合理优化充电电流, 缩短充电时间, 减少温升, 延长电池使用寿命。最后, 在 Matlab 中验证了所提拓扑与均衡策略在不同工况下的有效性。

**关键词:** 可重构均衡; 分层式拓扑; 多工况; 均衡控制策略; 电压稳定; 多级恒流充电

### Reconfigurable balanced control of retired batteries based on hierarchical architecture

WANG Meng<sup>1,2</sup>, WANG Qi<sup>1,2</sup>, LI Zenghui<sup>1,2</sup>, WANG Tinghua<sup>3</sup>, YAO Luqin<sup>1,2</sup>, SUN Jinlei<sup>4</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. Jiangsu International Joint Laboratory for Comprehensive Energy Equipment and Integration, Nanjing 210046, China; 3. Economic and Technical Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210009, China; 4. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210018, China)

**Abstract:** Using retired batteries to construct a grid energy storage system can make full use of their residual value. This is an important way to solve the problem of reusing a large number of retired batteries. However, because they have been charged and discharged many time, there is an inconsistency problem that is more prominent than that with new batteries. First, a reconfigurable hierarchical balancing topology for retired batteries is proposed. Secondly, a hierarchical balanced control strategy is proposed based on this topology. Two levels of equalization control, i.e. intra- and inter-group are considered. SOC and terminal voltage are used as balancing variables within the group to achieve single cell state equalization through reconfiguration. SOC is used as a balancing variable between groups to ensure whole cell cluster equalization through reconfiguration. It simultaneously considers different operating conditions: balancing efficiency and usable capacity of battery packs is increased by self-equalization in static balancing. The output voltage stability is maintained by topology transformation in the discharging process. Charging current is reasonably optimized considering energy loss and charging speed in the charging process to shorten the charging time, reduce the temperature rise and improve service life. Finally, the effectiveness of the proposed topology and strategy in different operating conditions is verified in Matlab.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007085).

**Key words:** reconfigurable equilibrium; hierarchical topology; variable operating conditions; balancing control strategy; voltage stability; multi-stage constant current charging

## 0 引言

退役电池的容量通常为额定容量的 70%~80%。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52007085); 国网江苏省科技项目资助(SGJSJY00SJJS2260013)

经过筛选后, 退役电池仍具有良好的充放电能力, 可梯次利用于储能系统, 从而促进可再生能源的消纳, 减少电网频率波动, 维持供需平衡, 保证电网安全、稳定、可靠运行。退役电池的梯次利用具有经济和环保的双赢作用, 一方面延长了电池的使用寿命, 降低了动力电池的使用成本, 提高了动力电

池的全生命周期价值, 另一方面减少了电池拆解造成的环境污染, 节约了资源, 保护了环境。然而, 由于制造差异, 电池能量存储不一致, 且在使用过程中由于环境和温度差异等, 会使电池的不一致性呈发散趋势<sup>[1]</sup>。由于“木桶”效应, 最弱的电池单体决定了电池组的可用容量, 使得电池组在使用过程中会发生燃烧、爆炸等安全问题<sup>[2]</sup>。因此, 需要对退役电池进行均衡, 提高电池的一致性, 增加电池组的可用容量, 减少安全隐患。

电池均衡通常分为耗散型和非耗散型。耗散型均衡通过电阻实现能量消耗, 操作简单, 但能量利用率低<sup>[3]</sup>。非耗散型均衡借助电容、电感、变压器、变换器等储能元件实现电荷的定向转移, 从而实现整个电池组的均衡<sup>[4]</sup>。虽然非耗散型均衡效率高, 但是在均衡过程中, 额外充放电通路的存在, 加剧了电池的不一致性, 不适用不平衡度高、鲁棒性要求高的储能系统<sup>[5]</sup>。

与传统的耗散型均衡和非耗散型均衡电路不同, 可重构均衡电路<sup>[6]</sup>越来越被学者关注, 该电路能够灵活地实现电池的串联、并联或旁路, 在保证电池组正常工作的前提下, 通过减少相应的充放电过程来实现电池均衡<sup>[7-8]</sup>, 同时可避免由电池故障引发的系统安全问题。文献[9]对目前常用的可重构均衡拓扑进行了总结, 对各种可重构均衡拓扑进行对比分析。文献[10]设计了一种串联可重构电路, 通过改变电池的连接方式来调整电池的充电时间, 从而实现电池组的均衡。文献[11]设计了三开关管的可重构电路, 通过开关管的配合, 实现电池之间的串联、并联、旁路或混联, 并验证了该拓扑的有效性。文献[12]设计了一种四开关可重构拓扑, 该拓扑有助于实现电池模组的灵活配置, 通过开关切换实现全电池簇均衡, 提高了容量利用率。

上述文献虽然探讨了可重构拓扑在电池均衡方面的应用, 但均是采用单层均衡拓扑结构。随着新能源的发展和利用, 储能系统向着高电压、大容量方向发展<sup>[13]</sup>, 系统中电池组数目不断增加, 单层均衡拓扑结构均衡次数多、速度慢, 故单层均衡拓扑结构不再适用于电池组较多的储能系统<sup>[14]</sup>。为了克服单层均衡拓扑的缺点, 文献[15]提出电池分层式均衡架构, 实现了多个电池模组内以及电池模组间的均衡。文献[16]将变压器法与相邻电感法相结合, 以剩余电量为均衡目标进行均衡控制, 达到了较好的均衡效果。文献[17]中底层均衡采用厄克斩波电路, 顶层均衡采用电感, 同时进行组间均衡和组内均衡, 缩短了电量传递路径, 提高了均衡效率。虽然目前分层式均衡拓扑的研究取得了很大成就, 但

是大部分文献在分层式均衡架构中仍然采用主动均衡拓扑, 少有文献将可重构均衡拓扑应用到分层架构中。

在均衡控制策略方面, 目前的研究主要集中在均衡变量的设置和控制算法的设计。文献[18]以端电压为均衡变量, 采用极值均衡法, 电压最高电池给电压最低电池转移能量, 实现电压“削峰填谷”, 最终实现电压一致。文献[19]以 SOC 为均衡变量, 利用平均值及差值比较法, 确定充、放电电池的均衡电流, 实现精确和快速的均衡控制过程。文献[20]建立了一种模糊控制均衡策略, 以电压为均衡变量, 控制均衡电流, 加快了均衡速度。综上可知, 目前大多数均衡方案均采用单变量均衡策略, 电压和 SOC 作为均衡变量具有不同的优势, 还比较少见两种变量融合的均衡策略。同时上述的均衡控制策略中仅考虑电池状态(电压、SOC)的均衡, 忽略了不同工况对电池不一致性的影响。

综上所述, 本文针对退役电池储能系统提出了一种基于分层式架构的可重构均衡拓扑; 基于该拓扑提出对应的分层均衡控制策略, 组内选取 SOC 和端电压作为均衡变量, 组间均衡选取 SOC 作为均衡变量, 以实现组内和组间均衡; 同时考虑不同运行工况对电池不一致性的影响, 在不同运行工况下选取不同的均衡控制策略, 充分发挥各种策略的优势。最后, 在 Matlab 平台上验证所提均衡策略的有效性。

## 1 分层均衡拓扑及其工作原理

为了实现电池组的有效均衡, 本文设计了如图 1 所示的分层均衡拓扑。通过电力电子开关的通断控制, 即可调整电池单体以及模组间的连接关系, 实现电池单体和模组两个层次的重构。

每个电池单体配有 4 个开关元件, 通过开关的通断控制, 可以轻松实现电池单体之间的串联、并联及其任意组合; 同时可以隔离故障电池, 提高了电池组的容错能力。

每个电池模组配有 4 个开关元件, 该拓扑保留了传统两个开关拓扑的特性, 通过开关的通断控制可以实现任意单体的接入、退出。同时由于增加了两个开关元件, 所提出的拓扑可以进行并联。并联的优点是在电池之间可以进行自均衡, 使电荷从高压电池流向低压电池, 提高了能量利用率。文献[21]所采用的均衡拓扑虽然可以实现电池的并联, 但是并不能隔离并联中的故障电池。而本文的均衡拓扑可以隔离并联中的故障电池, 保证供电的可靠性和安全性。

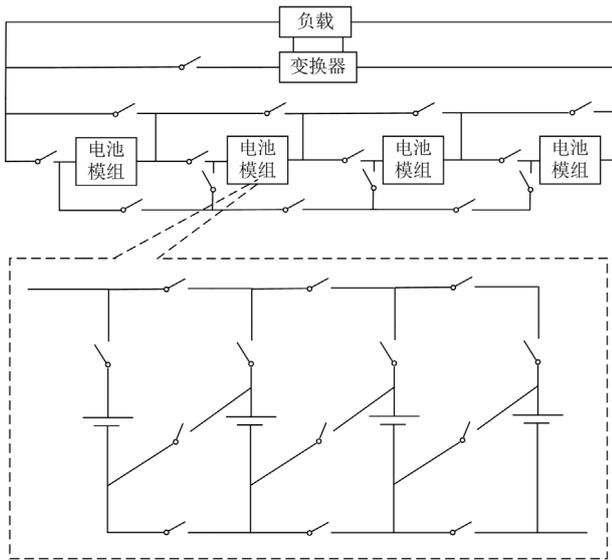


图 1 分层均衡拓扑

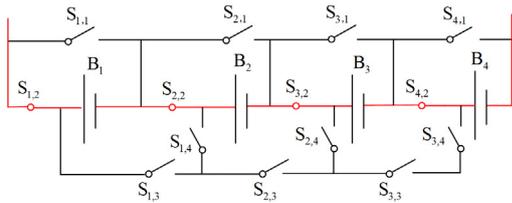
Fig. 1 Hierarchical balanced topology

1.1 顶层拓扑工作原理

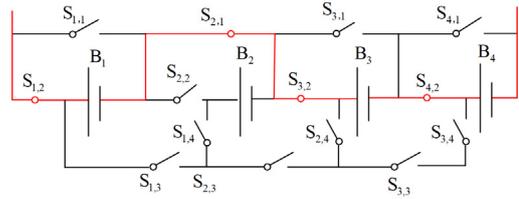
图 2 给出了 4 个电池组的示例性连接,  $B_i$  为电池组,  $i=1,2,3,4$ 。为了防止电池组短路, 开关  $S_{i,1}$  和  $S_{i,2}$  始终保持互斥, 开关  $S_{i,3}$ 、 $S_{i,4}$  和  $S_{i+1,2}$  不能同时闭合。当 4 个电池组串联时, 闭合开关  $S_{i,2}$ , 其他开关断开, 如图 2(a)所示; 当  $B_2$  发生故障时, 闭合开关  $S_{2,1}$ , 断开开关  $S_{2,2}$ , 将电池组  $B_2$  隔离, 其他电池组继续充放电, 如图 2(b)所示; 当 4 个电池组并联时, 闭合开关  $S_{1,2}$ 、 $S_{i,3}$ 、 $S_{i,4}$ 、 $S_{2,1}$ 、 $S_{3,1}$ 、 $S_{4,1}$ , 其他开关断开, 如图 2(c)所示; 当并联电池组中  $B_2$  发生故障时, 断开开关  $S_{1,4}$ , 将电池组  $B_2$  隔离, 其他电池组继续充放电, 如图 2(d)所示。通过合理的开关操作, 可以实现电池组间的任意连接, 当某个电池组故障时, 及时将故障电池组隔离, 其他电池组继续充放电, 如图 2(e)和图 2(f)所示。

1.2 底层拓扑工作原理

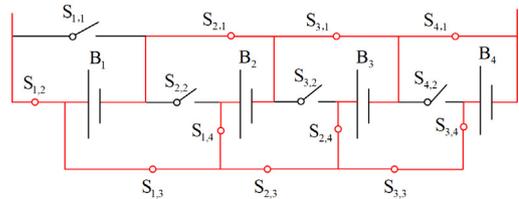
以 4 个电池单体为例, 为了防止电池短路, 开关  $S_{i,3}$ 、 $S_{i,4}$  始终保持互斥, 开关  $S_{i,1}$ 、 $S_{i,2}$ 、 $S_{i,3}$  和  $S_{i+1,1}$  不能同时闭合。通过闭合开关  $S_{i,3}$ , 实现电池串联,



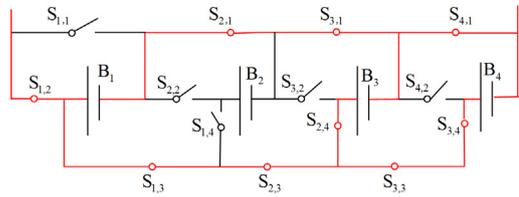
(a)  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  串联



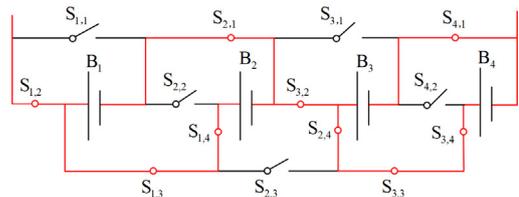
(b)  $B_1$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  串联( $B_2$ 故障被隔离)



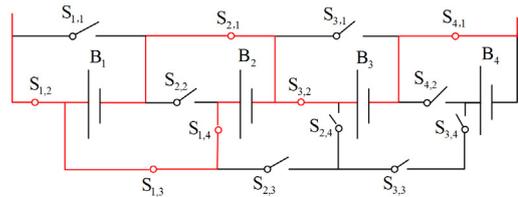
(c)  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  并联



(d)  $B_1$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  串联( $B_2$ 故障被隔离)



(e)  $B_1//B_2$ 、 $B_3//B_4$  串联



(f)  $B_1//B_2$ 、 $B_3$  串联( $B_4$ 故障被隔离)

图 2 顶层拓扑工作原理

Fig. 2 Working principle of top level balanced topology

如图 3(a)所示; 当某个电池故障时, 开关  $S_{i,4}$  提供了备份电流路径, 将故障电池隔离, 如图 3(b)所示。通过闭合开关  $S_{i,1}$ 、 $S_{i,2}$ 、 $S_{i,4}$  实现电池并联, 如图 3(c)所示; 对于并联中的故障电池, 开关  $S_{i,1}$  可以保证在故障扩散前及时切断, 如图 3(d)所示。同时, 该拓扑可以实现任意电池的串并联, 并及时将故障电池隔离, 如图 3(e)和图 3(f)所示。

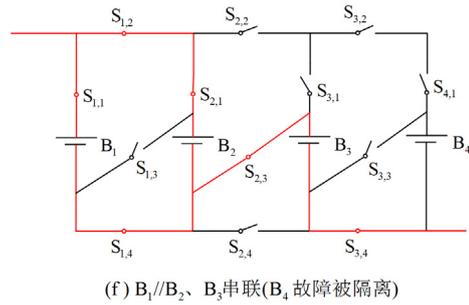
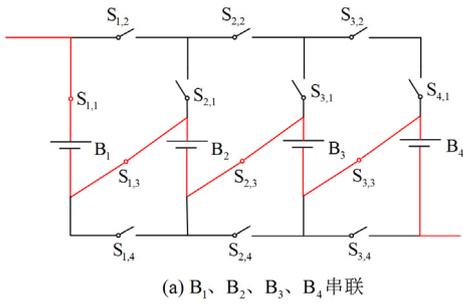
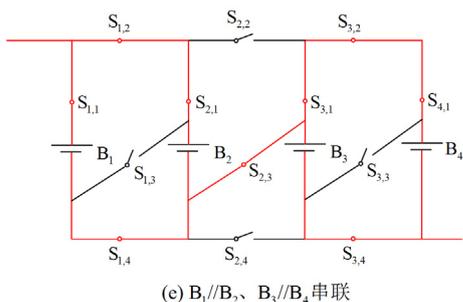
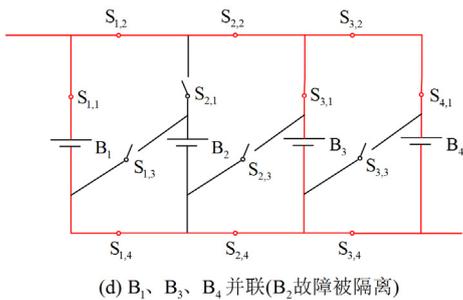
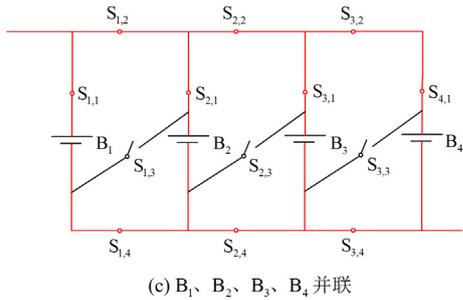
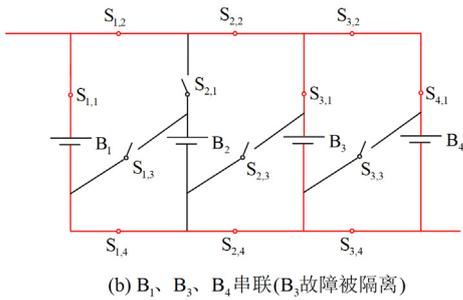


图 3 底层拓扑工作原理

Fig. 3 Working principle of underlying level balanced topology



## 2 均衡控制策略设计

### 2.1 基于 SOC-电压分段的组内均衡控制

均衡变量的选择是制定控制策略的关键环节。目前, 电池均衡所采用的均衡变量主要有开路电压 (open circuit voltage, OCV)、端电压、剩余容量和 SOC<sup>[22]</sup>。通过文献[22]可知, 采用单变量的均衡控制可能无法达到满意的均衡效果, 因此, 考虑采用多变量混合的均衡控制。如图 4 所示, 在  $20\% < SOC < 80\%$  时, 考虑到 OCV 的变化较小, 仅通过电压一致性并不能有效消除电池的不一致性, 因此将 SOC 作为均衡变量。当  $SOC < 20\%$  和  $SOC > 80\%$  时, OCV 变化剧烈, 若仅以 SOC 作为均衡变量可能导致电池处于过充或过放状态, 不利于安全稳定运行, 因此将 OCV 作为均衡变量。

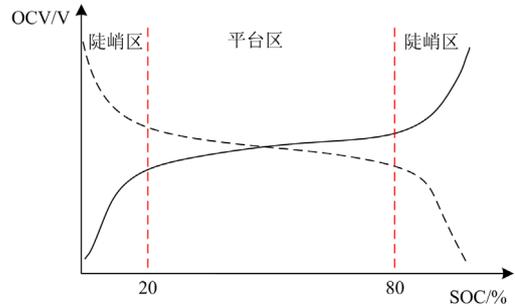


图 4 OCV-SOC 曲线

Fig. 4 OCV-SOC curve

组内均衡控制策略流程如图 5 所示。首先对单体电压进行检测, 并估算 SOC; 其次, 判断单体 SOC(电压)与组内平均 SOC(电压)的差值是否大于动作阈值, 设置组内的动作阈值为 0.5%; 若满足均衡开启条件, 判断电池 SOC 的范围, 若 SOC 位于  $20\% \sim 80\%$  之间, 则以 SOC 为均衡变量, 否则, 以电压为均衡变量; 根据各电池的 SOC 值或电压值控制相应开关的通断, 若电池 SOC 或电压的差值小于阈值, 则均衡结束, 否则, 继续执行组内均衡。

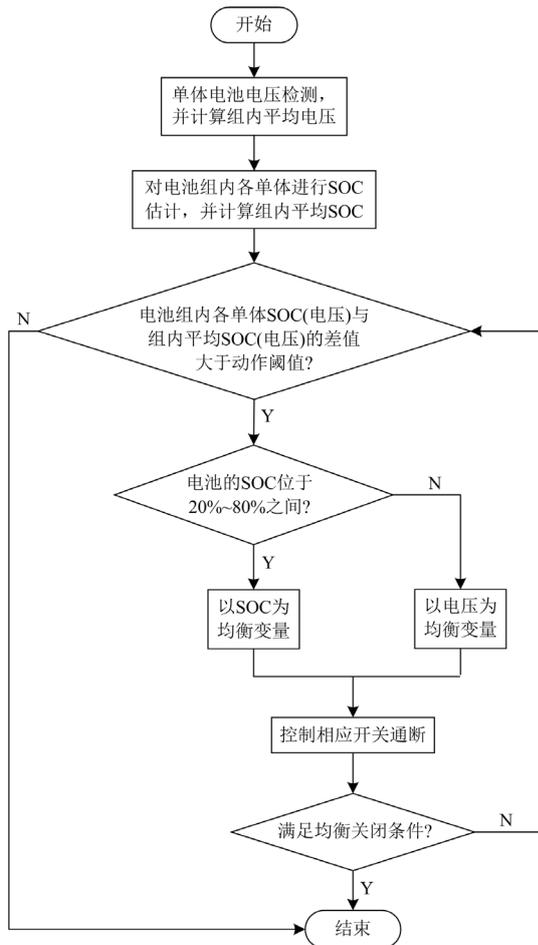


图5 组内均衡控制策略流程图

Fig. 5 Flow chart of intra-group equalization control strategy

### 2.2 多工况运行的组间均衡控制

SOC 能直接反映电池的电量, 从本质上讲, 电量均衡最理想的目标就是使所有电池组的 SOC 保持一致<sup>[23]</sup>。因此, 电池模组之间采用基于 SOC 的均衡控制策略, 从根本上改善电量的不一致性。

储能系统有 3 种运行工况, 即静置、放电和充电。在不同的运行工况下, 储能系统有不同的工作目标。单层均衡拓扑结构中往往仅考虑电池状态(电压、SOC)的均衡, 忽略了不同工况对电池不一致性的影响。采用分层均衡拓扑, 克服了单层均衡拓扑的缺点, 在实现电池组均衡的基础上, 可同时兼顾不同运行模式下的工作目标。

在供电过程中, 通常要求储能系统以恒压水平向负载供电, 允许电压在一定范围内发生微小变化。供电过程中, 通过底层拓扑变换, 实现电池单体均衡, 减小电池组内电池单体的不一致性, 通过顶层拓扑变换, 提高电池组的一致性, 同时实现供电电压的稳定, 本文提出的放电均衡控制策略流程如图 6 所示。

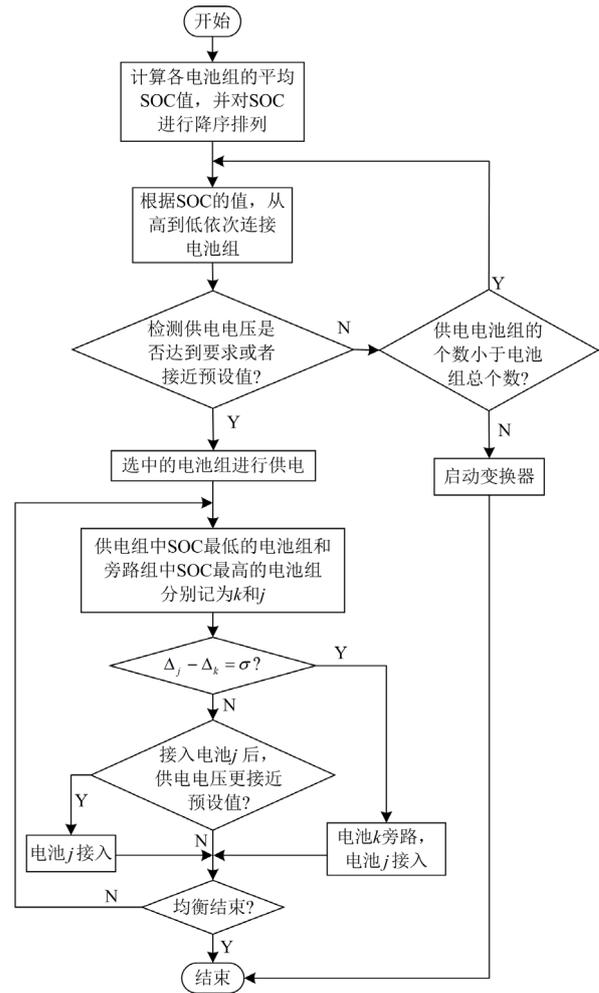


图6 放电均衡控制策略流程图

Fig. 6 Flow chart of discharge equalization control strategy

首先, 计算各组的平均 SOC 值, 并对 SOC 进行降序排列; 其次, 为了维持电压的稳定, 根据 SOC 值, 从高到低依次进行连接, 直至电压接近预设电压, 如果所有电池组都连接后还不能满足供电电压需求, 则启动变换器。放电一段时间后, 检测旁路电池组中 SOC 最高的电池组, 其 SOC 记为  $\Delta_j$ , 供电电池组中 SOC 最低的电池组, 其 SOC 记为  $\Delta_k$ 。

$$\Delta_j - \Delta_k = \sigma \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为判断电池是否连接的动作阈值, 设置  $\sigma=1\%$ 。若 SOC 的差值满足式(1), 用电池组  $j$  代替电池组  $k$  进行供电; 如果不满足式(1), 假设连接电池组  $j$  使电压更接近设定电压, 则将电池组  $j$  连接进行供电。供电电池组中 SOC 较高的电池组持续放电, SOC 较低的电池组被旁路电池组中 SOC 较高的电池组不断替换, 随着电池组的不断放电, 电池组的 SOC 一致性显著提高, 同时使供电电压保持在设定的范围内。

在充电过程中, 当电池组间 SOC 差异较大时, 对电池组充电会加剧电量的不一致性, 增加电池组故障的风险, 因此, 充电过程中先对电池组进行静置均衡, 然后再进行充电。充电开始时, 由于内部锂离子浓度较大, 允许以大电流充电; 随着充电过程的进行, 锂离子浓度不断减小, 电池组可接受电流逐渐降低<sup>[24]</sup>。因此, 在充电过程要合理地控制充电电流, 增加电池使用寿命。

能量损失是引起温度升高的主要原因<sup>[25]</sup>。充电过程中, 往往希望能够在较短时间内充入较多的能量, 充电时间越长, 能量损失越多。因此, 本文考虑充电时间和能量损失两个因素构建目标方程  $J$  来优化充电电流。

$$W_{\text{SOC}(i),I} = k(i)I + g(i) \quad (2)$$

$$J = \alpha Mt + (1 - \alpha)W_{\text{SOC}(i),I} \quad (3)$$

式中:  $W_{\text{SOC}(i),I}$  为电流  $I$  在第  $i$  个 SOC 内的损耗, 例如 SOC(2) 代表 SOC 变化范围为 0.1~0.2;  $k(i)$ 、 $g(i)$  为该时段内所对应的方程系数, 具体取值可参考文献<sup>[24]</sup>;  $\alpha$  为权重系数;  $M$  为度量常数, 本文取 0.707;  $t$  为充电时间。对目标方程  $J$  求导, 令其等于 0, 即可得到最优值, 如表 1 所示。

表 1 各 SOC 段内的优化电流

SOC( $i$ )	充电电流(C)	SOC( $i$ )	充电电流(C)
0~0.1	1.00	0.5~0.6	0.55
0.1~0.2	1.00	0.6~0.7	0.55
0.2~0.3	0.61	0.7~0.8	0.40
0.3~0.4	0.58	0.8~0.9	0.20
0.4~0.5	0.57	0.9~1.0	0.20

为了更好地提高电池组的可用容量, 延长电池组的使用寿命, 本文提出的充电均衡控制策略如图 7 所示。充电均衡中采用极差法与相邻差值法结合的混合均衡策略, 利用相邻差值法控制简单且均衡速度快的优点改善相邻电池小组间的一致性, 又可以使某个 SOC 最大或者最小的电池组实现较快均衡, 以减小整个电池组极差。首先, 计算每个电池组的平均 SOC, 并求出平均 SOC 最大值与最小值之间的极差  $\Delta$  和相邻电池组的最大差值  $\Delta_m$ ; 其次, 判断  $\Delta$  和  $\Delta_m$  是否大于动作阈值, 若  $\Delta > 1\%$  且  $\Delta_m > 0.5\%$ , 则相邻电池组间进行能量转移, 若  $\Delta > 1\%$  且  $\Delta_m \leq 0.5\%$ , 则平均 SOC 最高的电池组向平均 SOC 最低的电池组转移能量, 若  $\Delta \leq 1\%$ , 则组间均衡结束; 最后, 当均均衡结束后, 计算所有电池组的 SOC 平均值, 判断 SOC 的范围, 选择合适的电流进行充电。

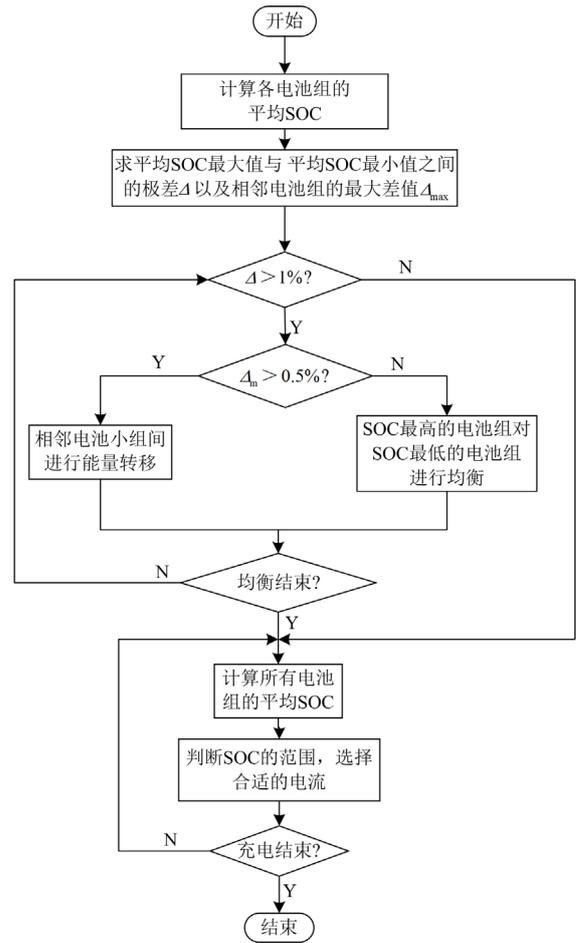


图 7 充电均衡控制策略流程图

Fig. 7 Flow chart of charging equalization control strategy

### 3 仿真结果分析

为了验证所提均衡拓扑及均衡策略的有效性, 本文在 Matlab 中对 4 个电池组分别在不同运行工况下进行均衡实验, 即静置均衡、充电均衡和放电均衡, 每个电池组包含 4 个电池单体。所选用的锂离子电池的额定容量为 5.4 Ah。

#### 3.1 静置均衡

在静置均衡实验中, 电池 SOC 的变化情况如表 2 所示。

由表 2 可知, 初始状态下, 电池单体间 SOC 的极差为 37%, 电池单体间 SOC 差距较大。由于“木桶效应”, 电池组的可用容量为 45.79 Ah。在本文所采用的均衡拓扑以及均衡控制策略, 电池单体间 SOC 的极差缩小到 0.7%, 电池组的可用容量提高到 60.99 Ah, 将电池组的可用容量提升了 33.21%。

为了验证分层式架构相比于单层架构的优势, 进行了单层均衡实验来进行对比。当只采用底层拓扑时, 均衡电路的结构为单层架构。在单层均衡拓

扑中同样采用 16 个电池单体, 初始 SOC 设置不变。单层均衡过程中电池 SOC 的变化情况如表 3 所示。单层均衡与分层均衡对比结果如表 4 所示。

表 2 静置均衡 SOC 实验数据

Table 2 Experimental data of static equalization SOC

电池序号	初始 SOC/%	均衡后 SOC/%	电池序号	初始 SOC/%	均衡后 SOC/%
1	90	71.2	9	70	71.3
2	87	71.2	10	67	71.3
3	85	70.8	11	65	70.9
4	83	70.85	12	63	70.95
5	80	71.1	13	60	71
6	77	71.1	14	57	71
7	75	70.7	15	55	70.6
8	73	70.75	16	53	70.65

表 3 单层静置均衡 SOC 实验数据

Table 3 Experimental data of static equalization SOC in single layer

电池序号	初始 SOC/%	均衡后 SOC/%	电池序号	初始 SOC/%	均衡后 SOC/%
1	90	71	9	70	71
2	87	70.5	10	67	70.6
3	85	70	11	65	70
4	83	69.5	12	63	70.5
5	80	70.5	13	60	71
6	77	70	14	57	70.5
7	75	69	15	55	70
8	73	69.5	16	53	70.5

表 4 单层均衡与分层均衡对比表

Table 4 Comparison between single-layer and double-layer equalization

	分层均衡	单层均衡	性能提升
均衡时间	1385 s	2193 s	36.84%
能量转移效率	91.78%	80.54%	13.96%
可用容量	60.99 Ah	59.61 Ah	2.32%

通过上述对比可知, 单层均衡拓扑在 2193 s 时完成均衡, 而本文的分层均衡拓扑在 1385 s 时完成均衡, 均衡速度提高了 36.84%。为了表征能量损耗, 引入能量转移效率  $\eta$ 。能量转移效率为整个均衡过程中所有 SOC 增加的电池单体所得到的电量之和与所有 SOC 减少的电池单体所失去的电量之和的比值。在分层均衡拓扑中  $\eta = 91.78%$ , 在单层均衡拓扑中  $\eta = 80.54%$ , 可知分层式均衡在能量损耗方面均优于单层均衡拓扑均衡, 能量利用率提高了 13.96%。同时在分层均衡架构中由于能量利用率高, 电池可用能量较高, 均衡完成后电池间的 SOC

差值就越小, 从而电池组的可用容量就越高。

为了验证可重构均衡拓扑在分层架构中的优势, 本文与文献[26]和文献[27]中的分层式均衡拓扑进行了分析对比, 分析结果如表 5 所示。文献[26]采用了被动均衡和反激变换器结合的分层均衡拓扑, 由于底层采用被动均衡, 能量损耗较大, 因此能量转移率和容量提升率较小。而文献[27]采用了 Buck-Boost 与飞度电容的分层主动均衡, 但由于均衡过程中储能元件先充电再放电, 均衡时间较长, 同时储能元件的能量损耗使能量转移率下降了 20.49%, 因此电池组的容量提升率较小。相比之下, 可重构均衡拓扑在分层架构中具有更好的性能, 能够更有效地提升能量利用率和电池组的可用容量。

表 5 本文分层均衡与已有分层均衡对比表

Table 5 Comparison between this paper and existing hierarchical equalization

	本文分层均衡	文献[26]分层均衡	文献[27]分层均衡
均衡时间/s	1385	1440	3200
能量转移效率/%	91.78	18.2	76.17
容量提升率/%	33.21	3.7	6.9

### 3.2 充电均衡

在充电均衡实验中, 设置 16 个电池单体的初始 SOC 分别为: 59.9%、57%、55%、53%、57.8%、54.8%、52.8%、50.7%、56%、53%、51%、49.1%、54.8%、51.8%、49.8%、48.2%。根据本文提出的充电均衡控制策略对电池组进行充电, 电池组的充电电流和 SOC 变化曲线分别如图 8 和图 9 所示, 并分别与 0.2C 和 0.5C 恒流充电进行比较, 充电过程中 SOC 变化曲线分别如图 10 和图 11 所示, 对比结果如表 6 所示。

从图 9 可以看出, 初始时刻进行组内均衡, 在 16 min 时, 组内均衡结束。此后, 电池组 1 放电, 电池组 3 和电池组 4 充电, 电池组 1 对电池组 3 和电池组 4 进行组间自均衡, 直到 30 min 组间自均衡

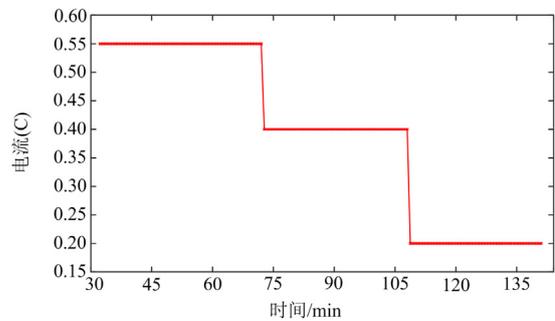


图 8 充电电流

Fig. 8 Charging current

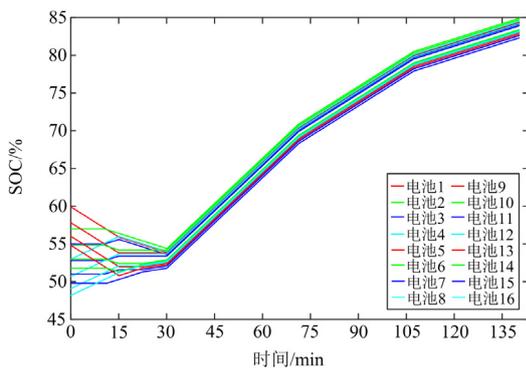


图 9 充电均衡时的 SOC 变化曲线

Fig. 9 SOC variation curve during charging equalization

结束。之后对电池充电, 电池组的 SOC 在 50%~70% 之间, 此时充电电流为 0.55C, SOC 上升迅速。在 71 min 时, 电池组的 SOC 略大于 70%, 充电电流有所减小, 变为 0.4C, SOC 上升速度有所减慢, 直至 110 min, 电池 SOC 接近 80%。由于电池 SOC 较大, 充电电流会进一步减小, 变为 0.2C, SOC 缓慢上升。

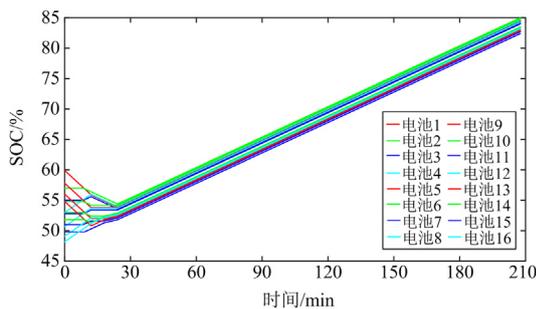


图 10 恒流充电(0.2C)

Fig. 10 Constant current charging (0.2C)

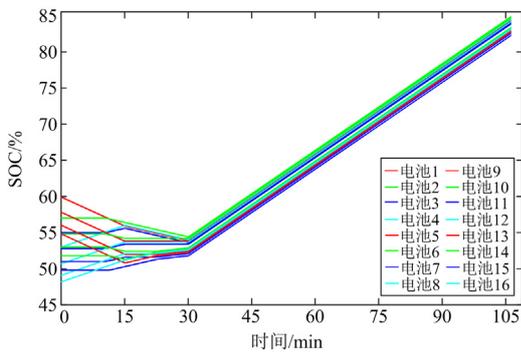


图 11 恒流充电(0.5C)

Fig. 11 Constant current charging (0.5C)

由表 6 可知, 本文提出的充电方法与 0.2C 恒流充电方式相比, 充电时间减少了 75 min, 即充电时

间缩短了 35%, 可用容量增加了 0.7%。与 0.5C 恒流充电方式相比, 虽然 0.5C 恒流充电缩短了充电时间, 但是随着充电的进行, 本文方法中的充电电流逐渐减小, 故在达到相同容量时, 减少了电池内部的极化现象, 温度降低了 0.9 °C, 延长了电池的整体寿命, 增加了电池的循环次数。

表 6 充电均衡实验数据对比

Table 6 Comparison of charge equalization experimental data

充电方式	多级恒	恒流充电	
	流充电	0.2C	0.5C
充电时间/min	135	210	100
充电截止时可用容量/Ah	71.71	71.01	71.71
温升/°C	0.5	0.4	1.4

### 3.3 放电均衡

在放电均衡过程中, 设置 16 个电池单体的初始 SOC 分别为 84%、81%、79%、77%、80%、77%、75%、73%、70%、67%、65%、63%、60%、57%、55%、53%, 初始电压分别为 7、7、6.8、6.8、7、6.8、6.8、6.8、6.8、6.6、6.6、6.6、6.6、6.5、6.5、6.5 V。设供电电压为 81 V, 为了实现供电电压的稳定以及电池组的一致性, 根据本文提出的均衡策略进行仿真, 电池组的供电电压和 SOC 变化曲线分别如图 12 和图 13 所示。

如图 13 所示, 在初始时刻进行组内均衡, 使组内电池趋近一致。组间均衡时, 电池组 1—3 的 SOC 较高, 并且满足供电电压的需求, 因此电池组 1—3 一起供电, 电池组 4 被旁路, 此时的供电电压约为 81.6 V, 接近预设电压。在约 1200 s 时, 电池组 3 的 SOC 低于电池组 4, 电池组 3 被断开, 电池组 4 接入进行放电, 此时供电电压约为 81.3 V。此后电池组 3 和电池组 4 交替接入进行放电, 电池组 1 和电池组 2 持续放电, 电池组逐渐趋于一致, 并且电压基本稳定在 81 V。在 3400 s 时, 电池组 2 被旁路, 其余电池组继续放电, 虽然电压会有一定跃变, 但

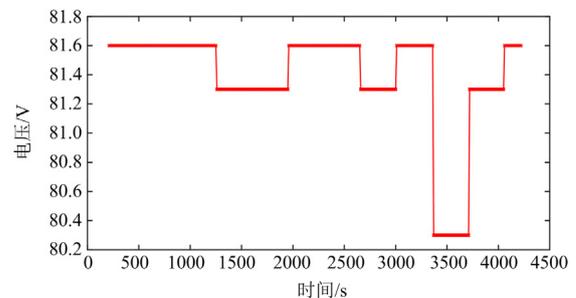


图 12 供电电压

Fig. 12 Supply voltage

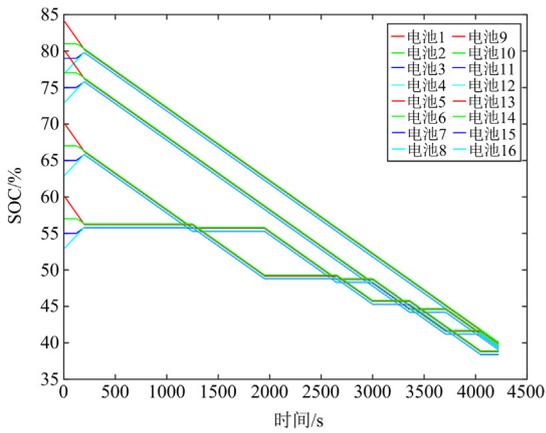


图 13 放电均衡时的 SOC 变化曲线

Fig. 13 SOC variation curve during discharge equalization

仍接近预设值。如图 12 所示，整个放电过程中，最大的输出电压波动为 1.3 V，电池组的 SOC 差异度由 31% 降到 1.7%。随着放电的进行，电池组 SOC 一致性显著提高，同时电压保持在设定的范围内。

传统最值放电均衡即让 SOC 最高的电池组进行放电。如图 14 所示，在 300~700 s，仅电池组 1 放电，由图 15 可知，此时供电电压约为 27.6 V；在 700 s 时，电池组 2 的 SOC 达到设定条件，在 700~2100 s，电池组 2 连接供电，供电电压约为 55 V；在

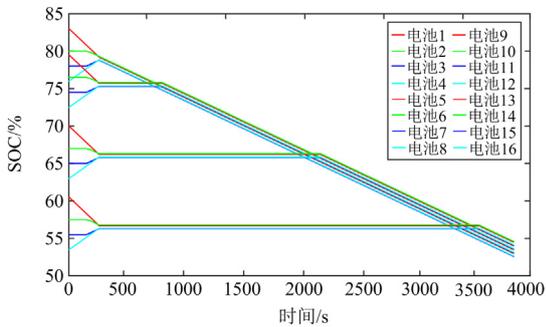


图 14 传统最值放电均衡

Fig. 14 Conventional max/min discharge equalization

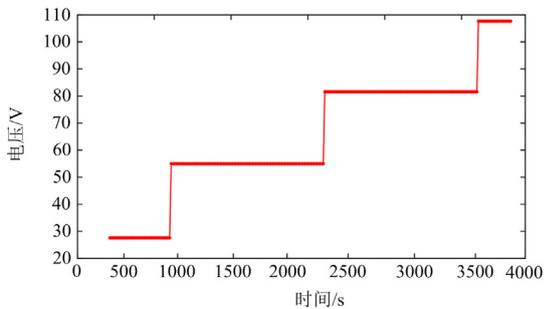


图 15 传统最值供电电压

Fig. 15 Conventional max/min supply voltage

2100 s 时，电池组 3 接入进行放电，供电电压为 81.6 V；直到 3500 s 时电池组达到均衡，所有电池组一块放电，此时供电电压约为 107.7 V。通过上述分析可知，传统最值均衡仅仅考虑了 SOC 的均衡，并未考虑电压的变化，电压变化较大。而本文所提出的均衡控制策略充分考虑了电压随 SOC 的变化，能够更好地在实现稳压的同时降低电池组的不一致性。

### 3.4 经济性分析

通过实时改变电池网络拓扑，配合合适的控制策略，可以使储能系统运行在多种工况条件下。但储能系统还需要兼顾构建成本，相比于新电池储能系统，退役电池降低了储能系统的配置成本，在容量保持率一定的情况下，也有较高的经济效益。以某 10 MW/25 MWh 储能示范工程为案例，对退役电池储能系统和新电池储能系统的成本进行对比，对比结果如表 7 所示。考虑退役电池和新电池储能系统充放电深度均为 80%，每天一充一放；项目周期为 21 年，期间新电池储能系统置换电池一次，退役电池储能系统置换电池两次。购买退役电池重组储能电池系统，有效降低了储能系统初始投资成本，但系统的分选重组成本和运输成本增加。退役电池的一致性以及容量保持率较新电池低，随着充放电次数的增加，系统的运维成本增加。但从总成本来看，退役电池储能系统的总成本仍然较低，总成本降低量高达 9.44%。因此，退役电池在一定程度上解决了储能系统成本高的问题。

容量保持率对系统的年运营利润有显著影响。在考虑和不考虑梯次利用两种情况下，系统年运营利润随容量保持率的变化规律如图 16 所示。在容量保持率一定的情况下，退役电池有效降低了储能系统的成本，系统年运营利润大大提高。随着容量保持率在 70%~80% 范围内逐渐增加，系统年运营利润不断减少，且利润差距在不断减小。因此，退役电池在一定程度上解决了新电池储能系统投资成本回收周期长的问题，提高了储能系统的经济效益。

## 4 结论

本文针对退役电池储能系统提出了分层式可重构均衡拓扑，给出了其工作原理。基于该拓扑，提出了分层均衡控制策略。同时考虑了不同运行工况对电池一致性的影响，以 4 个电池组为例，分别进行了静置、充电和放电工况下的仿真分析。结果表明，所采用的分层均衡拓扑在均衡速度、均衡效率、可用容量方面均优于单层均衡拓扑，使电池组的能量利用率提高了 13.96%，可用容量提升了 33.21%；所提出的均衡策略在放电过程中能够维持输出电压

表 7 退役/新电池储能系统成本对比

Table 7 Comparison of the cost of retired/new energy storage systems

购买成本	退役电池		新电池	
	单价 500 元/kWh	1250 万元	单价 1100 元/kWh	2750 万元
分选重组成本	单位容量分选成本 37 元/kWh	495.778 万元	0	0
	单位容量重组成本 150 元/kWh			
	分选设备成本 8 万元			
	重组设备成本 10 万元			
	筛选保留率 90%			
运输成本	单位容量运输成本 27.7 元/kWh	69.25 万元	0	0
运维成本	单位功率运维价格 20 元/kW	320.673 万元	单位功率运维价格 20 元/kW	291.133 万元
	单位容量运维价格 1.01 元/kWh		单位容量运维价格 0.18 元/kWh	
更替成本	退役电池寿命 7 年	1624.25 万元	退役电池寿命 10.5 年	1767.451 万元
回收残值	残值率 0.5%	240.748 万元	残值率 5%	803.985 万元
总成本	5137.48 万元		5622.87 万元	

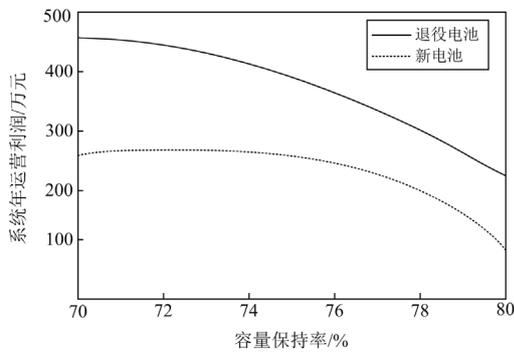


图 16 退役/新电池储能系统运营利润对比

Fig. 16 Comparison of operating profit of retired/new energy storage systems

的稳定, 在充电过程中能够合理优化充电电流, 使充电时间缩短了 35%, 温升降低了 0.9 °C, 延长了电池的使用寿命。同时构建退役电池储能系统的总成本相比于新电池储能降低了 9.44%。尽管通过仿真验证了本文所提理论和方法的有效性, 后续还需进一步考察该方案在实际储能系统中的适用性, 并继续探索其他分层均衡拓扑的可行性。

### 参考文献

- [1] WU Tiezhou, QI Yibo, LIAO Li, et al. Research on equalization strategy of lithium-ion batteries based on fuzzy logic control[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40(8): 102722-102731.
- [2] 范家钰. 电动汽车的电池管理系统 SOC 估计算法及均衡策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.  
FAN Jiayu. Research on SOC estimation algorithm and equalization strategy for battery management system of electric vehicles[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [3] WANG Yaxiong, ZHONG Hao, LI Jianwei, et al. Adaptive estimation-based hierarchical model predictive control

methodology for battery active equalization topologies: part I-balancing strategy[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45(7): 103235-103249.

- [4] CUI Haoyong, WEI Zhongbao, HE Hongwen, et al. Novel reconfigurable topology-enabled hierarchical equalization of lithium-ion battery for maximum capacity utilization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 396-406.
- [5] 吴文进, 郭海婷, 苏建徽, 等. 基于自适应模糊 PID 算法的锂电池组双层均衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 111-117.  
WU Wenjin, GUO Haiting, SU Jianhui, et al. Dual-layer equalization control of lithium batteries based on an adaptive fuzzy PID algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 111-117.
- [6] 牛志远, 王怀铷, 金阳, 等. 不同倍率下磷酸铁锂电池模组过充热失控特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 167-174.  
NIU Zhiyuan, WANG Huairu, JIN Yang, et al. Overcharging and runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules at different rates[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 167-174.
- [7] 岳家辉, 夏向阳, 吕崇耿, 等. 计及健康特征信息量的锂离子电池健康状态与剩余寿命预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 74-87.  
YUE Jiahui, XIA Xiangyang, LÜ Chonggeng, et al. Research on the prediction of state of health and remaining useful life of lithium-ion batteries considering the amount of health factors information[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 74-87.
- [8] ZHANG Hao, TONG Xiangqian, ZHANG Linlin, et al. Fast state-of-charge balancing control strategies for battery energy storage systems to maximize capacity utilization[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57(7): 106269-106281.
- [9] LIAO Li, LI Hongguang, LI Houjia, et al. Research on equalization scheme of lithium-ion battery packs based on consistency control strategy[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73: 10913-10927.

- [10] 杜海明, 范明杰, 景志勇, 等. 基于退役电池梯次利用的分组开关均衡研究[J]. 电源技术, 2024, 48(1): 113-119. DU Haiming, FAN Mingjie, JING Zhiyong, et al. Research on packet switch equalization based on echelon utilization of retired batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(1): 113-119.
- [11] WANG Biao, QIN Feifei, ZHAO Xiaobo, et al. Equalization of series connected lithium-ion batteries based on back propagation neural network and fuzzy logic control[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(6): 4812-4826.
- [12] JI Feng, LIAO Li, WU Tiezhou, et al. Self-reconfiguration batteries with stable voltage during the full cycle without the DC-DC converter[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 28(2): 101213-101221.
- [13] 程从智, 徐晨, 戴珂, 等. MMC-BESS 电池荷电状态三级均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 100-108. CHENG Congzhi, XU Chen, DAI Ke, et al. Three-level balancing control for battery state-of-charge based on MMC-BESS[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 100-108.
- [14] 寇发荣, 王甜甜, 王思俊, 等. 基于 ABC-RFEKF 算法的锂电池 SOC 估计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 163-171. KOU Farong, WANG Tiantian, WANG Sijun, et al. Lithium battery SOC estimation based on an ABC-RFEKF algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 163-171.
- [15] 李建林, 李雅欣, 黄碧斌, 等. 退役动力电池一致性评估及均衡策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 1-7. LI Jianlin, LI Yaxin, HUANG Bibin, et al. Research on consistency evaluation and control strategy of a retired power battery[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 1-7.
- [16] 刘建飞. 融合单体电压和 SOC 不一致性的磷酸铁锂电池组高效均衡策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021. LIU Jianfei. Efficient equalization strategies for LiFePO<sub>4</sub> battery pack with fusion of voltage and SOC inconsistency[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [17] 徐元中, 郭纯, 吴铁洲, 等. 基于 Buck-Boost 的锂电池双层均衡方法研究[J]. 电源技术, 2024, 48(1): 120-125. XU Yuanzhong, GUO Chun, WU Tiezhou, et al. Research on a Buck-Boost double-layer equalization method for lithium battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(1): 120-125.
- [18] 张朝龙, 赵筛筛, 何怡刚. 基于集成经验模态分解与集成机器学习的锂离子电池剩余使用寿命预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 177-187. ZHANG Chaolong, ZHAO Shaishai, HE Yigang. Remaining useful life prediction method for lithium-ion batteries based on ensemble empirical mode decomposition and ensemble machine learning[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 177-187.
- [19] 冀宵玉, 傅春明, 王新刚, 等. 微电网中多储能电池组电压-SOC 分段均衡控制策略研究[J]. 电工技术, 2023(24): 31-34, 39. JI Xiaoyu, FU Chunming, WANG Xingang, et al. Study on voltage-SOC segmented equalizing control strategy for multiple stacks of energy storage batteries in microgrid[J]. Electric Engineering, 2023(24): 31-34, 39.
- [20] LIAO Li, CHEN Heng. Research on two-stage equalization strategy based on fuzzy logic control for lithium-ion battery packs[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50(6): 104321-104332.
- [21] DIRIAEON R, NICODEMO N, VERANI A, et al. A novel methodology to study and compare active energy-balance architectures with dynamic equalization for second-life battery applications[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 73(PA): 108772-108782.
- [22] WU Tiezhou, WANG Yi, ZHANG Jin. Research on multi-layer fast equalization strategy of Li-ion battery based on adaptive neural fuzzy inference system[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 67(9): 107574-107589.
- [23] WANG Yaxiong, ZHONG Hao, LI Jianwei, et al. Adaptive estimation-based hierarchical model predictive control methodology for battery active equalization topologies: part II-qualizer control[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 45(1): 102958-102969.
- [24] ZHANG Hao, TONG Xiangqian, ZHANG Linlin, et al. Fast state-of-charge balancing control strategies for battery energy storage systems to maximize capacity utilization[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57(7): 106269-106281.
- [25] YUN Zhonghua, QIN Wenhui, SHI Weipeng, et al. Research on active state of charge balance of battery pack based on two controllable flyback converters[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57(7): 106183-106195.
- [26] 张同鑫. 基于分层式架构的动力锂电池均衡技术研究与设计[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019. ZHANG Tongxin. Research and design on hierarchical balancing architecture for power lithium-ion batteries[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [27] 吴良恕. 动力锂电池组多层主动均衡系统及策略研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020. WU Liangshu. Research on multilayer active equalisation system and strategy of power lithium battery[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2024-05-08

作者简介:

王 猛(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电化学储能电池的均衡管理与故障诊断; E-mail: 1720958501@qq.com

王 琦(1975—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为综合能源建模及优化控制、电力系统无功电压分析与控制、高效储能技术及其应用、电力电子技术及其在电力系统中的应用等. E-mail: wangqi@njnu.edu.cn

(编辑 周金梅)