

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106927

动力锂电池组均衡拓扑研究综述*

巫春玲 刘智轩 程琰清 胡雯博
(长安大学 电子与控制工程学院 西安 710000)

摘要: 首先对动力锂电池组的常见均衡方式进行了对比分析。然后定量分析了基于串联的电池-电池均衡拓扑、基于模块的电池-电池均衡拓扑、基于分层的电池-电池均衡拓扑、基于串联的电池-电池组均衡拓扑、基于模块的电池-电池组均衡拓扑等5种类型均衡拓扑的能量流动。最后以基于模块的电池-电池均衡拓扑为例搭建了8节串联锂电池的仿真模型,实验结果表明经过3.2 s的时间电池组完成了模块内的均衡,经过6.1 s的时间电池组完成了模块间的均衡,经过66.5 s的时间电池组中的8节电池全部均衡完成,荷电状态SOC都达到了100%,验证了基于模块的电池-电池均衡拓扑的均衡速度快且均衡效率高。

关键词: 电池均衡;均衡拓扑;能量流动

中图分类号: TM 911 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

Review of power lithium battery pack equalization topology

Wu Chunling Liu Zhixuan Cheng Yanqing Hu Wenbo

(College of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Firstly, different kinds of power lithium battery pack equalization topologies are compared and analyzed in this paper. Then the energy flow in five cell balancing models is analyzed quantitatively, they are series-based cell-cell, module-based cell-cell, layer-based cell-cell, series-based cell-pack and module-based cell-pack. Finally, according to the topology of module-based cell-cell, the simulation model of eight lithium batteries in series is built. The results show that after 3.2 s, the equalization within the module is completed, after 6.1 s, the equalization among the modules is completed, after 66.5 s, all the eight batteries' balancing in the battery pack are finished, and their SOC are 100%. It is verified that the module-based cell-cell equalization topology has fast balancing speed and high efficiency.

Keywords: battery equalization; equalization topology; energy flow

0 引言

随着社会的高速发展,对能源的需求也在不断增大。蓄电池作为一种清洁、无污染的能源,在智能电网的储能系统和电动汽车领域得到了广泛的应用,单节蓄电池电压较低,需要将多节单体电池串联或并联使用才可以满足不同的电压需求。由于制造工艺、内阻、自放电率、老化和温度的不同,每个电池都有不同的化学反应^[1-2],这会为电池组带来荷电状态(state of charge, SOC)不一致的问题,进而限制电池组的可用容量,影响电池组的使用。此外由于库仑效率高,锂离子电池不像其他类型的电池,如铅酸电池那样可实现“自我均衡”。如果没有适当的管理,锂离子电池失衡将不会随着时间的推移而自行矫正^[3]。因此为了提高电池组的整体性能,通常设计电池管理系统来对电池进行均衡^[4-5]。

本文以锂离子电池作为研究对象,首先对动力锂电池组的各种均衡拓扑进行对比分析,而后对各类型均衡方案的能量流动进行定量分析,最后以基于模块的电池-电池均衡拓扑为例,对其进行建模和仿真分析,以验证其均衡的有效性和快速性。

1 常见均衡方式的对比

电池的均衡方式有很多种,根据均衡电路与主电路是否同时工作,可分为在线均衡和离线均衡;根据均衡过程中对能量的处理方式不同,可分为能量耗散型均衡(被动均衡)和能量转移型均衡(主动均衡);根据均衡电路的工作时间不同,可分为末端均衡和全工作区间均衡。

其中最常见的是按照均衡过程中对能量的处理方式进行分类,即主动均衡和被动均衡^[6]。

收稿日期:2021-06-11

* 基金项目:国家自然科学基金-青年基金项目(61701044)、陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY15-04-02)资助

被动均衡一般在电池两端并联电阻,通过电阻放电的形式将电能转化为热能消耗掉,以电池组内电量最低单体为基准进行均衡。这意味着电池之间没有能量分配^[7-8]。目前被动均衡有两种类型的均衡拓扑,它们分别是固定分流电阻均衡和开关分流电阻均衡。被动平衡在每个电池上并联一个旁路电阻,由电池电压监测芯片控制^[9]。其中固定分流电阻器的优点是简单、成本低,但是它存在诸如持续的能量损失、由于持续发热缩短电池寿命、均衡效率低的缺点;而开关分流电阻器更有效率、简单、可靠、成本低,但是会持续以热能的形式损失能量,而且由于持续发热缩短电

池寿命,通常适用于低功耗应用^[10-12]。

电池主动均衡利用电容或电感的电荷穿梭,将高电荷电池中的电荷转移到低电荷的电池中,通过设计特定的能量变换器,对能量进行重新分配,可分为基于电容、电感等储能元件的均衡和基于 DC-DC 变换器的均衡^[13-16],这些方法的优缺点^[17-21]如表 1 所示。主动均衡技术的主要目标是在一段时间内保持串联电池间电荷的均匀分布^[22],理想情况下均衡过程没有能量损失。与被动均衡方法相比,主动电池均衡技术最大限度地利用了电池中存储的所有能量,并且几乎不会浪费能量,从而使电池的可用容量最大化。

表 1 不同主动均衡方式的优缺点对比

主动均衡方式	优点	缺点
单开关电容均衡	成本低、均衡效率高,可以应用于低功耗和高功耗应用、不需要闭环控制	均衡速度慢、难以模块化、
双层开关电容均衡	均衡速度快、易于模块化、均衡电流低、适用于高功耗应用	成本高
CUK 变换器均衡	均衡电流低、相比较而言均衡效率高、成本相比较而言低、适用于高功耗应用、开关的电压和电流压力小	难以控制,不易于实现
PWM 控制变换器均衡	适用于高功耗应用、相比较而言成本低、均衡效率高、均衡速度快	难以控制
准谐振变换器均衡	适用于高功耗应用、开关的电压和电流压力小、相比较而言均衡效率高	难以控制,成本高
并联电感均衡	适用于高功耗应用、相比较而言成本低、相比较而言开关的电压和电流压力小	均衡速度慢、复杂、难以模块化
Buck-Boost 变换器均衡	适用于高功耗应用、相比较而言均衡效率高	成本高
多次级绕组变压器均衡	适用于高功耗应用、开关的电流压力小	成本高、均衡速度慢,难以模块化、控制复杂
全桥式变换器均衡	适用于高功耗应用、易于模块化、均衡效率高、均衡速度快、开关的电压和电流压力小	控制复杂、成本高
多重变压器均衡	适用于高功耗应用、均衡速度快	成本高、均衡效率低、
单开关电感均衡	相比较而言成本低、适用于高功耗应用、开关电压压力低	均衡速度慢、
双向多重变压器均衡	适用于高功耗应用、易于模块化	成本高、均衡速度慢、均衡效率低
双向多次级绕组变压器均衡	适用于高功耗应用、相比较而言均衡速度快、开关电流压力低	成本高、均衡效率低、复杂

由于主动均衡不以消耗能量为代价,成为目前研究的主要方向。接下来,根据主动均衡拓扑形式的不同,将各种主动均衡系统统一归纳为 5 大类,即基于串联的电池-电池均衡拓扑、基于模块的电池-电池均衡拓扑、基于分层的电池-电池均衡拓扑、基于串联的电池-电池组均衡拓扑、基于模块的电池-电池组均衡拓扑,然后分别定量分析各种均衡拓扑的能量流动。

2 主动均衡系统的能量流动

2.1 基于串联的电池-电池均衡拓扑

基于串联的电池-电池拓扑^[23]如图 1 所示。

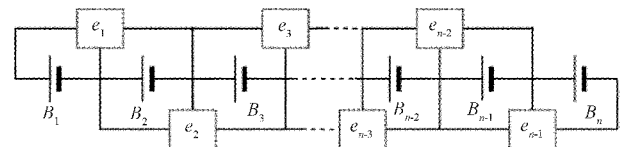


图 1 基于串联的电池-电池充电均衡拓扑

在对具有 n 块串联电池的电池组进行充放电时,当相邻的两块电池的 SOC 不一致时会发生能量转移, $B_i (1 \leq i \leq n)$ 表示电池组中第 i 块电池, $e_i (1 \leq i \leq n)$ 表示电池组中第 i 个均衡器,串联电池组拓扑中电池均衡系统的数学模型

可如下表示。

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \frac{\eta_0(\epsilon_{i-1}(k) - \epsilon_i(k))}{Q}$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, $x_i(k)$ 表示电池 B_i 在 k 时刻的 SOC 值, $\epsilon_i(k)$ 表示 k 时刻流过电池 B_i 的能量, η_0 表示库仑效率(指电池放电容量与循环过程中的充电容量之比), Q 是电池的额定容量。

令 $\epsilon_0(k) = \epsilon_n(k) = 0$, 则 $\epsilon_i(k)$ 可以被表示为:

$$\epsilon_i(k) = (k_i + k'_i)I_i(k)T \quad (2)$$

其中, T 表示控制样本时间周期, k_i 和 k'_i 表示电池 B_i 的电池级电荷转移率, l_c 表示电池级电荷损失率, $I_i(k)$ 表示流过电池 B_i 的均衡电流。

其中, k_i 和 k'_i 按以下条件取值:

$$\begin{cases} x_i(k) > x_i(k+1), k_i = 1, k'_i = 0 \\ x_i(k) = x_i(k+1), k_i = 0, k'_i = 0 \\ x_i(k) < x_i(k+1), k_i = 0, k'_i = -(1-l_c) \end{cases}$$

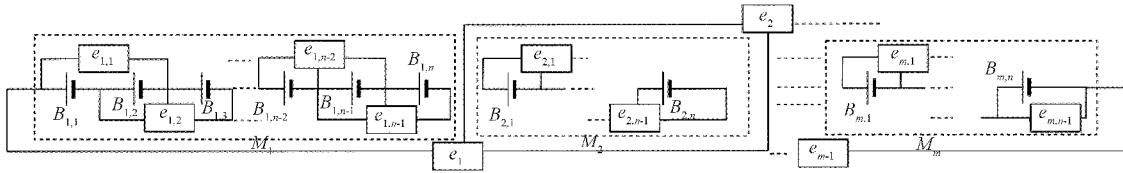


图2 基于模块的电池-电池充电均衡拓扑

电池向第 $i+1$ 块电池传递能量的均衡器。

该均衡拓扑系统的能量转移数学模型可表示为:

$$x_{j,i}(k+1) = x_{j,i}(k) + \frac{\eta_0(\epsilon_{j-1}(k) - \epsilon_j(k) + \epsilon_{j,i-1}(k) - \epsilon_{j,i}(k))}{Q}$$

$$(1 \leq j \leq m, 1 \leq i \leq n) \quad (3)$$

其中, $x_{j,i}(k)$ 表示 $B_{j,i}$ 在 k 时刻的 SOC, $\epsilon_j(k)$ 表示流过模块 M_j 的能量除以 n 后平均到每一块电池上的能量, $\epsilon_{j,i}(k)$ 表示流过电池 $B_{j,i}$ 的能量, η_0 表示库仑效率, Q 是电池的额定容量。

令 $\epsilon_0(k) = \epsilon_m(k) = \epsilon_{j,0}(k) = \epsilon_{j,n}(k) = 0$, 则 $\epsilon_j(k)$ 和 $\epsilon_{j,i}(k)$ 可以被表示为:

$$\epsilon_j(k) = (k_j + k'_j) \frac{I_j(k)T}{n} \quad (4)$$

$$\epsilon_{j,i}(k) = (k_{j,i} + k'_{j,i})I_{j,i}(k)T \quad (5)$$

其中, $I_j(k)$ 表示流过模块 M_j 的均衡电流, $I_{j,i}(k)$ 表示流过电池 $B_{j,i}$ 的均衡电流, T 表示控制样本时间周期, $k_{j,i}$ 和 $k'_{j,i}$ 表示电池 $B_{j,i}$ 的电池级电荷转移率, l_c 表示电池级电荷损失率, k_j 和 k'_j 表示模块 M_j 的模块级电荷转移率, l_m 表示模块级电荷损失率。

k_j 和 k'_j 按以下条件取值:

$$\begin{cases} \text{若 } x_j(k) > x_{j-1}(k), \text{ 则 } k_j = 1, k'_j = 0 \\ \text{若 } \bar{x}_j(k) = \bar{x}_{j-1}(k), \text{ 则 } k_j = 0, k'_j = 0 \\ \text{若 } x_j(k) < x_{j-1}(k), \text{ 则 } k_j = 0, k'_j = -(1-l_m) \end{cases}$$

当电池平衡时:

$$I_1(k) = I_2(k) = \dots = I_n(k) = 0$$

当某一时刻电池不平衡时(假设电池组中某一个电池 B_b 的 SOC 低于电池组中其他电池),均衡器 e_b 将会控制使 $I_b(k) > 0$, 为电池 B_b 充电, B_b 的 SOC 会增加, 则有 $x_i(k) < x_i(k+1)$, 会有 $k_i = 0, k'_i = -(1-l_c)$ 。

由式(2)可得, $\epsilon_b = -(1-l_c)I_b(k)T$, 将其代入式(1)可得在经过时间 T , B_b 的 SOC 会增加的量为 $\frac{\eta_0(1-l_c)I_b(k)T}{Q}$ 。

2.2 基于模块的电池-电池均衡拓扑

基于模块的电池-电池均衡拓扑^[21]如图2所示。

在对具有 $m \times n$ 块串联电池的电池组进行充放电时, $B_{j,i} (1 \leq j \leq m, 1 \leq i \leq n)$ 表示第 j 个模型中的第 i 块电池, $M_j (1 \leq j \leq m)$ 表示第 j 个模块, $e_j (1 \leq j \leq m-1)$ 表示从第 j 个模块向第 $j+1$ 个模块传递能量的均衡器, $e_{j,i} (1 \leq j \leq m, 1 \leq i \leq n-1)$ 表示第 j 个模块中从第 i 块

$k_{j,i}$ 和 $k'_{j,i}$ 按以下条件取值:

$$\begin{cases} \text{若 } x_{j,i}(k) > x_{j,i+1}(k), \text{ 则 } k_{j,i} = 1, k'_{j,i} = 0 \\ \text{若 } x_{j,i}(k) = x_{j,i+1}(k), \text{ 则 } k_{j,i} = 0, k'_{j,i} = 0 \\ \text{若 } x_{j,i}(k) < x_{j,i+1}(k), \text{ 则 } k_{j,i} = 0, k'_{j,i} = -(1-l_c) \end{cases}$$

其中, $x_j(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{j,i}(k)$ 。

当电池平衡时,

$$I_1(k) = I_2(k) = \dots = I_m(k) = 0$$

$$I_{j,1}(k) = I_{j,2}(k) = \dots = I_{j,n}(k) = 0$$

当某一时刻电池不平衡时(假设电池组中模块 M_a 中电池的平均 SOC 低于其他模块中电池的平均 SOC, 模块 M_a 中的电池 B_b 的 SOC 低于模块 M_a 中其他电池),均衡器 e_a 会控制使 $I_a(k) > 0$, 向模块 M_a 充电, 会有 $\bar{x}_j(k) < x_{j,i}(k)$, 可得:

$$k_j = 0, k'_j = -(1-l_m)$$

均衡器 $e_{a,b}$ 会控制使 $I_{a,b}(k) > 0$, 向电池 B_b 充电, 会有 $x_{j,i}(k) < x_{j,i+1}(k)$, 可得:

$$k_{j,i} = 0, k'_{j,i} = -(1-l_c)$$

将其代入式(4)和(5)可得:

$$\epsilon_a = \frac{-(1-l_m)I_a(k)T}{n}, \epsilon_{a,b} = -(1-l_c)I_{a,b}(k)T$$

代入式(3)可得经过时间 T , B_b 的 SOC 会增加 $\frac{\eta_0 n(1-l_c)I_{a,b}(k)T + (1-l_m)I_a(k)T}{nQ}$ 。

2.3 基于分层的电池-电池均衡拓扑

基于分层的电池-电池均衡拓扑^[25]如图 3 所示。

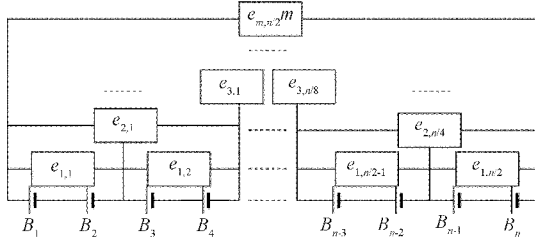


图 3 基于分层的电池-电池充电均衡拓扑

图中, $B_i (1 \leq i \leq n)$ 表示第 i 块电池, $e_{h,j} (1 \leq h \leq \log_2 n, 1 \leq j \leq \frac{n}{2^h})$ 表示第 h 层的第 j 个均衡器。

该均衡拓扑系统的能量转移数学模型可表示为:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \frac{\eta_0 \sum_{h=1}^{\log_2 n} (-1)^{\frac{j}{2^h}} \epsilon_{h,j} (k)}{Q} \quad (6)$$

其中, $x_i(k)$ 表示电池 B_i 在 k 时刻的 SOC, $\epsilon_{h,j} (1 \leq h \leq \log_2 n, 1 \leq j \leq \frac{n}{2^h})$ 是流过均衡器 $e_{h,j}$ 所对应的电池组的能量除以电池数量后平均到每一块电池上的能量。

令 $\epsilon_{h,0} = \epsilon_{h,\frac{n}{2^h}+1} = 0$, 则 $\epsilon_{h,j}$ 可以被表示为:

$$\epsilon_{h,j} (k) = (k_{h,j} + k'_{h,j}) \frac{I_{h,j} (k)}{2^{h-1}} T \quad (7)$$

其中, $I_{h,j} (k)$ 表示流过均衡器 $e_{h,j}$ 的均衡电流, T 表示控制样本时间周期。此拓扑图中 $I_{h,1} (k) = I_{h,2} (k) = \dots = I_{h,\frac{n}{2^h}} (k)$ 。 $k_{h,j}$ 和 $k'_{h,j}$ 表示均衡器 $e_{h,j}$ 所对应的电池组的层级电荷转移率, l_h 表示第 h 层的层级电荷损失率, $G_{h,j}$ 表示均衡器 $e_{h,j}$ 所对应的电池组中在均衡器左侧的电池(如图 3 所示), $G_{h,j}$ 表示均衡器 $e_{h,j}$ 所对应的电池组中在均衡器右侧的电池。

$G_{h,j}$ 和 $G_{h,j}^+$ 按以下条件取值:

$$G_{h,j} = \{(j-1)2^h + 1, (j-1)2^h + 2, \dots, (j-1)2^h + 2^{h-1}\}$$

$$G_{h,j}^+ = \{(2j-1)2^{h-1} + 1, (2j-1)2^{h-1} + 2, \dots, (2j-1)2^{h-1} + 2^{h-1}\}$$

$k_{h,j}$ 和 $k'_{h,j}$ 按以下条件取值:

$$\begin{cases} \sum_{g \in G_{h,j}} x_g(k) > \sum_{g \in G_{h,j}^+} x_g(k), k_{h,j} = 1, k'_{h,j} = 0 \\ \sum_{g \in G_{h,j}} x_g(k) = \sum_{g \in G_{h,j}^+} x_g(k), k_{h,j} = 0, k'_{h,j} = 0 \\ \sum_{g \in G_{h,j}} x_g(k) < \sum_{g \in G_{h,j}^+} x_g(k), k_{h,j} = 0, k'_{h,j} = -(1-l_h) \end{cases}$$

本文以 8 节电池为例解释此拓扑图, 当 $n = 8$ 时, 有

3 层均衡器。当电池 B_5 的 SOC 低于其它电池的 SOC, 而且其它电池的 SOC 一样时, 代入式 (7) 得: $k_{1,3} = 0, k'_{1,3} = -(1-l_h), k_{2,2} = 0, k'_{2,2} = -(1-l_h), k_{3,1} = 1, k'_{3,1} = 0$, 从而得出 $\epsilon_{1,3}$ 为负值, $\epsilon_{2,2}$ 为负值, $\epsilon_{3,1}$ 为正值, 代入式 (6) 可得 $e_{3,1}$ 从 B_1, B_2, B_3, B_4 中获取能量为 B_5, B_6, B_7, B_8 提供能量, $e_{2,2}$ 从 B_7, B_8 中获取能量为 B_5, B_6 提供能量, $e_{1,3}$ 从 B_6 中获取能量为 B_5 提供能量。

2.4 基于串联的电池-电池组均衡拓扑

基于串联的电池-电池组均衡拓扑^[26]如图 4 所示。

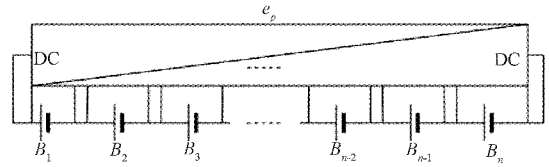


图 4 基于串联的电池-电池充电均衡拓扑

图中, $B_i (1 \leq i \leq n)$ 表示第 i 块电池, e_p 表示电池组的 DC-DC 变换器, 对于由 n 块串联电池组成的电池组, 串联电池组拓扑中电池均衡系统的模型可通过以下等式确定:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \frac{\eta_0 \epsilon_{i,p} (k)}{Q} \quad (8)$$

其中, $x_i(k)$ 表示电池 B_i 在 k 时刻的 SOC, $\epsilon_{i,p} (k)$ 表示在 k 时刻当电池 B_i 的 SOC 偏低(偏高)时, 电池组传递到这个电池上的能量(这个电池传递到电池组上的能量)。

$$\epsilon_{i,p} (k) = (k_{i,p} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i (k) + k'_{i,p} I_i (k)) T \quad (9)$$

其中, $I_i (k)$ 是流过电池 B_i 的均衡电流, T 表示控制样本时间周期, l_p 是电池级电荷损失率, $k_{i,p}$ 和 $k'_{i,p}$ 表示电池 B_i 的电池级电荷转移率。

$k_{i,p}$ 和 $k'_{i,p}$ 按以下条件取值:

$$\begin{cases} x(k) > \bar{x}(k), k_{i,p} = 0, k'_{i,p} = 1-l_p \\ \bar{x}(k) = x_i(k), k_{i,p} = 0, k'_{i,p} = 0 \\ x(k) < x_i(k), k_{i,p} = -1, k'_{i,p} = 0 \end{cases}$$

其中, $\bar{x}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(k)$ 。

假设电池组中的电池 B_b 的 SOC 低于电池组的平均 SOC, 代入式 (9) 可得:

$$k_{b,p} = 0, k'_{b,p} = 1-l_p$$

$$\text{则 } \epsilon_{b,p} (k) = (1-l_p) I_b (k) T$$

代入式 (8) 得 B_b 的 SOC 会增加的量为 $\frac{\eta_0 (1-l_p) I_b (k) T}{Q}$ 。

电池组的均衡器 e_p 会将能量从整个电池组向电池 B_b 传递, 直到电池组所有电池的 SOC 一致。

2.5 基于模块的电池-电池组均衡拓扑

基于模块的电池-电池组均衡拓扑图^[27], 如图 5 所示。

电池组中分为 m 个模块, 每个模块有 n 块电池。图 5 中 $B_{j,i} (1 \leq j \leq m, 1 \leq i \leq n)$ 表示第 j 个模块中的第 i 块

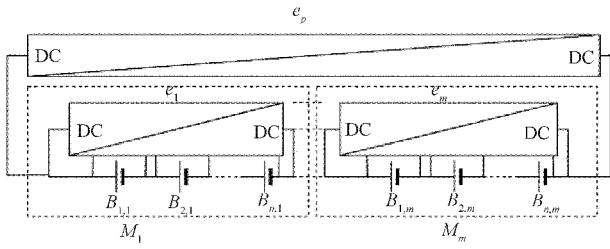


图5 基于模块的电池-电池组充电均衡拓扑

电池。\$M_j(1 \le j \le m)\$ 表示第 \$j\$ 个模块，\$e_j(1 \le j \le m)\$ 表示第 \$j\$ 个模块的 DC-DC 变换器，\$e_p\$ 表示电池组的 DC-DC 变换器，这种方式的优点是降低了能量损耗。均衡系统可以用以下模型进行表示：

$$x_{j,i}(k+1) = x_{j,i}(k) + \frac{\eta_0(\epsilon_j(k) + \epsilon_{j,i}(k))}{Q} \quad (10)$$

$$(1 \le j \le m, 1 \le i \le n)$$

其中，\$x_{j,i}(k)\$ 表示电池 \$B_{j,i}\$ 在 \$k\$ 时刻的 SOC，\$\epsilon_j(k)\$ 表示在 \$k\$ 时刻电池组中模块 \$M_j\$ 中电池的平均 SOC 偏低(偏高)时，电池组传递到这个模块的能量除以 \$n\$ 后平均到每一块电池上的能量(这个模块中每一块电池传递到电池组上的能量)，\$\epsilon_{j,i}(k)\$ 表示在 \$k\$ 时刻电池 \$B_{j,i}\$ 的 SOC 偏低(偏高)时，模块 \$M_j\$ 中电池组传递到这个电池的能量(这个电池传递到电池组上的能量)。

$$\epsilon_j(k) = \left(k_j \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_j(k) + k'_j I_j(k) \right) T \quad (11)$$

$$\epsilon_{j,i}(k) = \left(k_{j,i} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{j,i}(k) + k'_{j,i} I_{j,i}(k) \right) T \quad (12)$$

\$I_j(k)\$ 表示流过模块 \$M_j\$ 的均衡电流，\$I_{j,i}(k)\$ 表示流过电池 \$B_{j,i}\$ 的均衡电流，\$T\$ 表示控制样本时间周期，\$k_{j,i}\$ 和 \$k'_{j,i}\$ 表示电池 \$B_{j,i}\$ 的电池级电荷转移率，\$l_{cp}\$ 表示电池级电荷损失率，\$k_j\$ 和 \$k'_j\$ 表示模块 \$M_j\$ 的模块级电荷转移率，\$l_{mp}\$ 表示模块级电荷损失率。

其中，\$k_j\$ 和 \$k'_j, k_{j,i}\$ 和 \$k'_{j,i}\$ 分别按以下条件取值：

$$\begin{cases} x(k) > \bar{x}_j(k), k_j = 0, k'_j = 1 - l_{mp} \\ \bar{x}(k) = \bar{x}_j(k), k_j = 0, k'_j = 0 \\ x(k) < \bar{x}_j(k), k_j = -1, k'_j = 0 \\ \bar{x}_j(k) > x_{j,i}(k), k_{j,i} = 0, k'_{j,i} = 1 - l_{cp} \\ x_j(k) = x_{j,i}(k), k_{j,i} = 0, k'_{j,i} = 0 \\ \bar{x}_j(k) < x_{j,i}(k), k_{j,i} = -1, k'_{j,i} = 0 \end{cases}$$

$$\text{其中, } \bar{x}_j(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{j,i}(k)$$

$$\bar{x}(k) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{x}_j(k)$$

假设电池组中模块 \$M_a\$ 中电池的平均 SOC 低于其它模块中电池的平均 SOC，模块 \$M_a\$ 中的电池 \$B_a\$ 的 SOC 低于模块 \$M_a\$ 中的其他电池的 SOC。代入式(11)和(12)可得：

$$k_a = 0, k'_a = 1 - l_{mp}$$

$$k_{a,b} = 0, k'_{a,b} = 1 - l_{cp}$$

则有：

$$\epsilon_a(k) = \frac{(1 - l_{mp}) I_a(k) T}{n}$$

$$\epsilon_{a,b}(k) = (1 - l_{cp}) I_{a,b}(k) T$$

代入式(10)可得模块 \$M_a\$ 中的电池 \$B_b\$ 的 SOC 增加量为：

$$\frac{\eta_0(1 - l_{mp}) I_a(k) T}{nQ} + \frac{\eta_0(1 - l_{cp}) I_{a,b}(k) T}{Q}$$

模块 \$M_a\$ 中其余电池的 SOC 都增加了 $\frac{\eta_0(1 - l_{mp}) I_a(k) T}{nQ}$ 。

均衡器会将电池组中其他模块的能量传递到模块 \$M_a\$，将模块 \$M_a\$ 中其他电池的能量传递到电池 \$B_b\$，直到电池组中所有电池的 SOC 都相同。

3 主动均衡拓扑仿真实验

3.1 模型建立

本文对基于模块的电池-电池拓扑进行建模，使用电感作为均衡器，对电池组进行充电均衡模拟，电池选用额定容量为 6 Ah，额定电压为 4.2 V 的锂电池。

模块内均衡模型如图 6 所示。

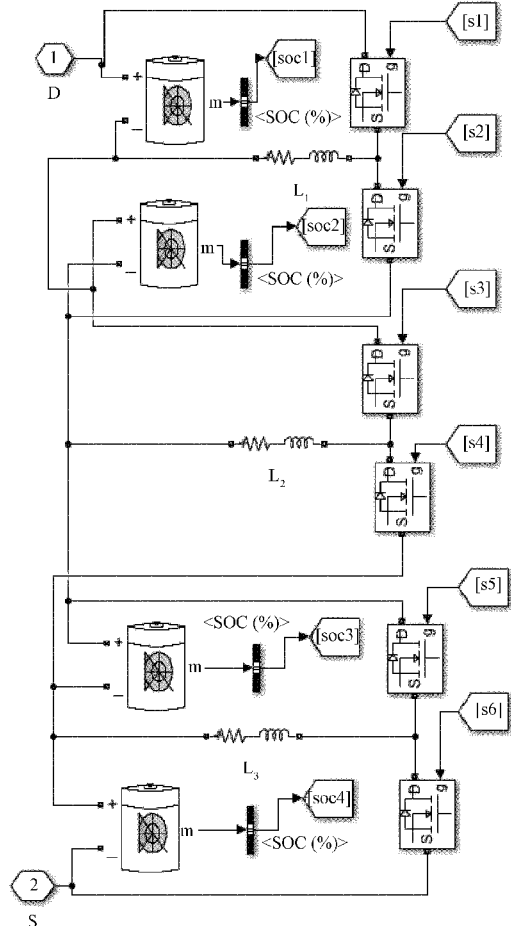


图6 模块内电池均衡模型

电池组共 8 块电池,每 4 节构成一个模块,共两个模块。各电池的初始 SOC 如下: Battery1 为 99.99%、Battery2 为 99.98%、Battery3 为 99.97%、Battery4 为 99.96%、Battery5 为 99.95%、Battery6 为 99.94%、Battery7 为 99.93%、Battery8 为 99.92%。

具体逻辑为:通过比较相邻两节单体电池 SOC 值的大小,使能量从 SOC 高的电池转移到 SOC 低的电池。当模块内电池均衡完成后,开始进行模块间电池组的均衡。在电池组均衡的同时,12 V 的外部电源会对整个电池组充电,直到所有电池的 SOC 都达到 100%。模块间均衡模型如图 7 所示。

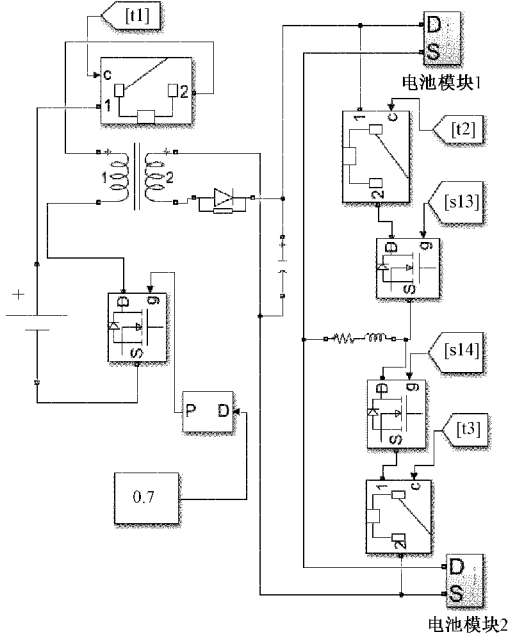


图 7 模块间电池均衡模型图

3.2 仿真结果及分析

1) 模块内均衡及结果分析

利用电感进行模块内的均衡,图 8 所示为均衡时流过模块 1 内各个电池的电流。

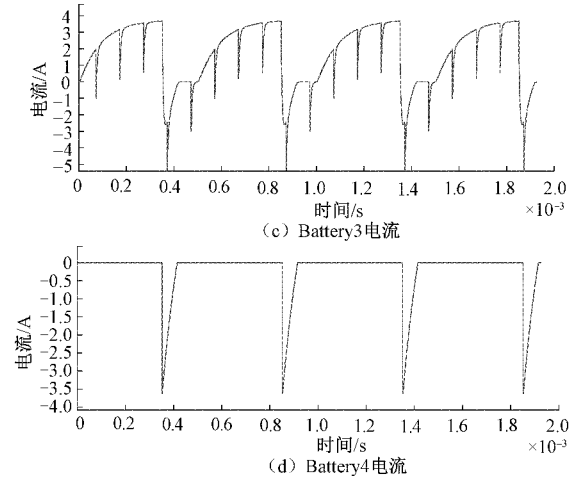
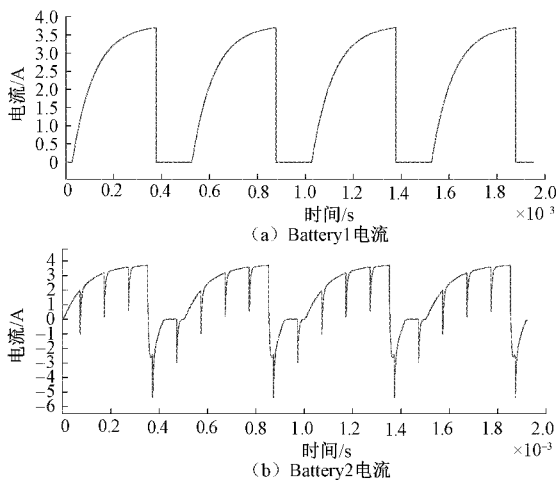


图 8 模块 1 中各个电池的电流

图 8(a)中流过 Battery1 电流为正,说明 Battery1 处于放电状态, Battery1 将能量传递给电感 L_1 ; 图 8(b)中流过 Battery2 的电流有正有负,说明 Battery2 既充电又放电, Battery2 从电感 L_1 中获取能量的同时,又将能量传递给电感 L_2 ; 图 8(c)中流过 Battery3 的电流有正有负,说明 Battery3 既充电又放电, Battery3 从电感 L_2 中获取能量的同时,又将能量传递给电感 L_3 ; 图 8(d)中流过 Battery4 电流为负,说明 Battery4 处于充电状态, Battery4 从电感 L_3 中获取能量。

两个模块的模块内均衡情况如图 9 所示。

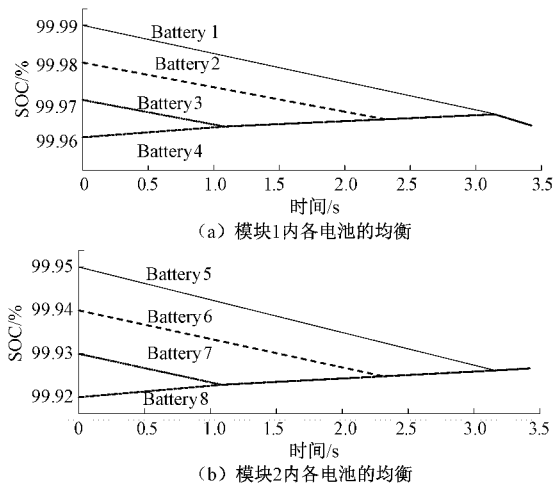


图 9 模块内均衡

由图 9 可以看出,用了 3.2 s 的时间就完成了模块内均衡。经过模块内均衡后,模块 1 内的电池的 SOC 为 99.966%,模块 2 内的电池的 SOC 为 99.926%,均衡效果显著。

2) 模块间均衡及结果分析

为了防止充电电压过大,12 V 的外部电源通过反激式变压器转换为 4 V 左右的电压为电池组进行充电, Battery1 的电压如图 10 所示。

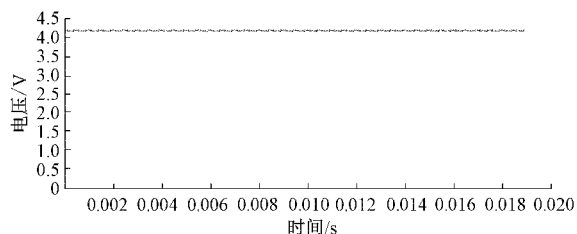
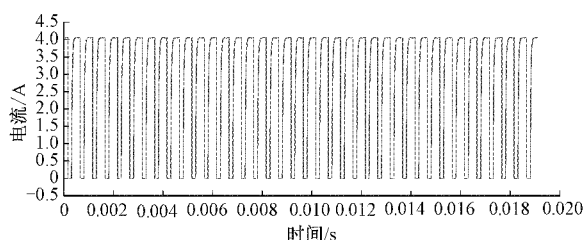


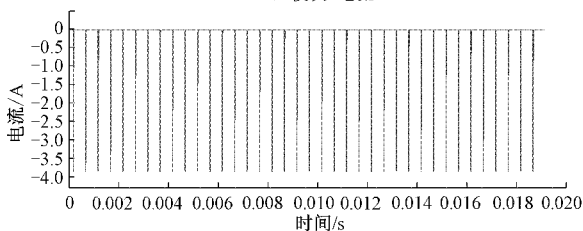
图 10 Battery1 的充电电压

由于模型中电池除了初始 SOC 不同,其余各项参数都一致,所以其余 7 个电池的充电电压都和 Battery1 几乎一致。

当两个模块完成模块内均衡后开始进行模块间均衡,模块间均衡时 2 个模块的电流如图 11 所示。



(a) 模块1电流



(b) 模块2电流

图 11 各个模块的电流

图 11(a)中流过模块 1 的电流为正,说明模块 1 处于放电状态,模块 1 将能量传递到电感;图 11(b)中流过模块 2 的电流为负,说明模块 2 处于充电状态,模块 2 从电感中获取能量。当模块 1 和模块 2 中电池的 SOC 一致时,模块间均衡结束。

电池组一边进行均衡一边进行充电,直到所有电池充满电,如图 12 所示。

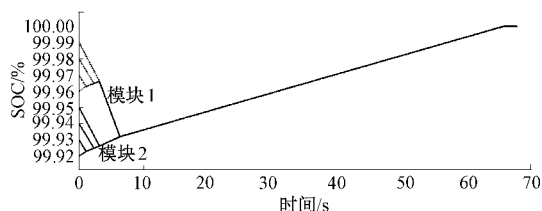


图 12 电池均衡和充电图

可以看到用了 6.1 s 的时间完成模块间均衡,均衡后电池的 SOC 为 99.932%,用了 66.5 s 的时间完成充电。在电池均衡时, SOC 高的电池减少的能量大于 SOC 低的

电池增加的能量,这是因为在均衡过程中,能量无法达到 100% 利用,所以有一部分被损耗掉了。本文模型能够较好的实现电池组的均衡,均衡速度较快,在均衡电池的同时能够为电池组充电。

4 结 论

论文首先综述了各种不同类型的主动和被动均衡方式,对不同均衡方式的优缺点进行了对比分析。然后将主动均衡拓扑划分为基于串联的电池-电池拓扑、基于模块的电池-电池拓扑、基于分层的电池-电池组拓扑、基于串联的电池-电池组拓扑、基于模块的电池-电池组拓扑等 5 大类,定量地分析了 5 类均衡拓扑系统的能量流动。最后,为验证均衡拓扑的有效性,以基于模块的电池-电池均衡拓扑为例,搭建了均衡系统模型,并进行了均衡仿真。实验结果表明,经过 3.2 s 电池组完成了模块内的均衡,经过 6.1 s 电池组完成了模块间的均衡,经过 66.5 s 电池组中的 8 节电池的 SOC 都达到了 100%,且没有出现过充现象,均衡速度快,效率高,验证了基于模块的电池-电池均衡拓扑的有效性。尽管本方案已得到初步验证,但仍需完善,如进一步缩短均衡时间以及提高系统工作效率等方面需要继续深入研究。

参考文献

- [1] 浦金欢,程思. 车用锂离子动力电池均衡技术综述[J]. 上海汽车, 2019(5): 4-9.
- [2] 刘征宇,武银行,李鹏飞,等. 基于 Cuk 斩波电路的电池组均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 233-241.
- [3] 刘征宇,许亚娟,余超,等. 基于 Buck-Boost 电路的分层均衡方案[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 87-94.
- [4] 裴莹,王友仁,刘泽元,等. 电池组均衡技术研究现状[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 21-24,49.
- [5] 梁嘉羿,王友仁,黄薛,等. 蓄电池能量均衡技术研究综述[J]. 机械制造与自动化, 2018, 47(3): 26-30.
- [6] 蔡敏怡,张娥,林靖,等. 串联锂离子电池组均衡拓扑综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5294-5311.
- [7] HAN W, ZHANG L. Battery cell reconfiguration to expedite charge equalization in series-connected battery systems[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(1): 22-28.
- [8] UR REHMAN M M, EVZELMAN M, HATHAWAY K, et al. Modular approach for continuous cell-level balancing to improve performance of large battery packs [C]. 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014: 4327-4334.

- [9] OUYANG D, HE Y, CHEN M, et al. Experimental study on the thermal behaviors of lithium-ion batteries under discharge and overcharge conditions[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 132(1): 65-75.
- [10] RAHIMI-EICHI H, OJHA U, BARONTI F, et al. Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 4-16.
- [11] NGUYEN T T N, YOO H G, ORUGANTI S K, et al. Neuro-fuzzy controller for battery equalisation in serially connected lithium battery pack[J]. IET power electronics, 2015, 8(3): 458-466.
- [12] 刘传. 基于主被动均衡策略的电动汽车电池管理系统[D]. 大庆:东北石油大学, 2018.
- [13] QI J, LU D D. A preventive approach for solving battery imbalance issue by using a bidirectional multiple-input cuk converter working in DCVM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 7780-7789.
- [14] 巫春玲, 程琰清, 刘智轩, 等. 一种改进的储能锂电池主动均衡拓扑研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 32-37.
- [15] 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.
- [16] LI Y, XU J, MEI X, et al. A unitized multiwinding transformer-based equalization method for series-connected battery strings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11981-11989.
- [17] OBMARIBA Z B, ZHANG L, SUN D. Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles[J]. IEEE Access, 2019, 7: 129335-129352.
- [18] 韩江洪, 王龙飞, 刘征宇, 等. 基于剩余容量的锂离子电池组均衡策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1047-1052.
- [19] SCHNELL J, CUNTER T, KNOCHÉ C, et al. All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries-paving the way to large-scale production[J]. Power Sources, 2018, 382: 160-175.
- [20] GAO Y, JIANG J, ZHANG C, et al. Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses[J]. Power Sources, 2017, 356: 103-114.
- [21] ABADA S, MARLAIR G, LECOCQ A, et al. Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review[J]. Power Sources, 2016, 306: 178-192.
- [22] LARSSON F, MELLANDER B E. Abuse by external heating, overcharge and short circuiting of commercial lithium-ion battery cells [J]. Journal of The Electrochemical Society, 2014, 161(10): A1611-A1617.
- [23] CHEN H, ZHANG L, HAN Y. System-theoretic analysis of a class of battery equalization systems: Mathematical modeling and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 64(4): 1445-1457.
- [24] OUYANG Q, HAN W, ZOU C, et al. Cell balancing control for lithium-ion battery packs: A hierarchical optimal approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5065-5075.
- [25] CHEN F, YUAN J, ZHENG C, et al. A state-of-charge based active ev battery balancing method[C]. Proceedings of 2018 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automation(ICEEA2018), 2018: 78-81.
- [26] OUYANG Q, WANG Z, LIU K, et al. Optimal charging control for lithium-ion battery packs: A distributed average tracking approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3430-3438.
- [27] LEE S, LEE K, CHOI Y, et al. Modularized design of active charge equalizer for li-ion battery pack[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 8697-8706.

作者简介

巫春玲, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为储能锂电池管理系统研究。

E-mail: wuchl@chd.edu.cn