DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.136 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

串联电池组模块化分层主动均衡方法研究

张旭阳[1]，许 锋[1]，周 华[2]，魏业文[3]
(1.国网浙江省电力有限公司嵊州市供电公司，嵊州 312400；2.国网浙江省电力有限公司诸暨市供电公司，诸暨 311800；3.三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443000)

摘要：为改善串联电池组的一致性差异，提出1种基于电感储能的模块化分层主动均衡方法。首先，结合电感储能均衡精度高的特点，提出新型拓扑结构，通过详细分析其工作原理，对其进行参数设计；其次，基于均衡原理，设计与之相匹配的自适应均衡控制策略；再次，对其拓扑结构成本及均衡性能进行分析，表明了新型拓扑具有结构简单、成本低，且均衡速度快的优势；最后，通过在MATLAB/Simulink中搭建仿真模型，验证了新型均衡方法在不同工况条件下的有效性，并证明了其相较于同类均衡方法在均衡速度方面的先进性。

关键词：串联电池组；主动均衡；电感储能；模块化

Research on Modular Layered Active Equalization Method for Series Battery Pack

ZHANG Xuyang[1], XU Feng[1], ZHOU Hua[2], WEI Yewen[3]
(1. Shengzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shengzhou 312400, China; 2. Zhuji Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhuji 312400, China; 3. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: To improve the consistency difference in series battery pack, a modular layered active equalization method based on inductive energy storage is proposed. First, by combining the characteristics of high equalization accuracy of inductive energy storage, a novel topology is proposed, and its parameters are designed through a detailed analysis of its working principle. Second, based on the equalization principle, an adaptive equalization control strategy is designed to match the proposed topology. Third, the analysis of its topological cost and equalization performance shows that the novel topology has advantages of a simple structure, a low cost and a fast equalization speed. Finally, a simulation model is built in MATLAB/Simulink, the effectiveness of the novel equalization method under different working conditions is verified, and it is found that this method is superior to similar equalization methods in terms of equalization speed.

Keywords: Series battery pack; active equalization; inductive energy storage; modular

锂电池应用于储能系统时，由于单体电压较低且容量有限，需要将多个单体进行相应串并联以组成满足应用要求的电池组。由于同一型号的单体电池间存在不可避免的一致性差异，成组之后将对电池组的能量利用率、循环寿命产生严重影响，并容易导致过充过放危及系统安全[1-2]。为改善电池组的一致性差异，必须引入有效的均衡方法，串联电池组相比于并联电池组更容易受到各单体一致性差异的影响[3]，本文针对串联电池组的均衡展开研究。主动均衡采用电感、电容、变压器等储能器件进行能量转移，相比于被动均衡具有效率高、速度快等特点[4]。主动均衡研究的基础在于拓扑结构的研究[5]，基于不同类型储能器件的均衡拓扑具有不同的特点[6-7]，电感储能拓扑均衡精度高，但电路

收稿日期：2023-08-07；**修回日期**：2023-09-25；**录用日期**：2023-10-06；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目(52107108)
This work is supported by Youth Fund of the National Natural Science Foundation of China under the grant 52107108

结构往往较复杂，需要的元器件较多；电容储能拓扑体积小、易控制，但当均衡对象和电容电压相差不大时，均衡速度显著下降，进而影响均衡精度；变压器储能拓扑均衡效率高、易隔离，然而绕组变压器设计复杂，并且能量转换过程磁心存在尖峰电压，容易对均衡系统造成安全隐患。

随着电子技术的快速发展，电子元器件成本及体积不断降低，基于电感储能的高精度均衡拓扑逐渐成为主动均衡方法的研究热点[5,8]。文献[9]基于电感储能提出 1 种均衡能量可以在单体与单体间、模块与模块间转移的均衡拓扑，所提拓扑均衡功能完善，但开关管数量较多，控制复杂。文献[10]基于单个电感提出 1 种均衡能量可以在任意单体间或任意模块间转移的拓扑，储能器件只需要 1 个电感，但该拓扑相比于文献[9]控制过程更为复杂，每个采样周期内，当均衡对象包含的单体数变化时，需要重新计算控制信号占空比，不利于均衡系统可靠、稳定工作。文献[11-12]基于 1 个电感和 2 个开关管构成均衡子电路设计均衡拓扑，文献[11]可以实现均衡能量在单体和模块间转移，导致均衡电流流过不需要均衡的单体，进而对不需要均衡单体的循环寿命产生影响；文献[12]的均衡能量只能在相邻单体间转移，当电池组单体数量较多时，均衡速度显著下降。当电池组单体数量较多时，为提高均衡速度，也有文献基于分层思想设计均衡拓扑[13-15]，分层均衡拓扑理论上具有更高的均衡速度，但拓扑结构往往较为复杂。文献[13]的拓扑中每个均衡子电路包含 4 个开关管和 1 个电感，同时每个单体还需要额外配置 4 个开关管，不利于均衡系统体积的减小和成本的降低；文献[14]相比于文献[13]均衡子电路更加复杂，每个子电路包含 2 个电感和 4 个开关管，并且文献[14]中的拓扑分层数量较多，导致控制过程复杂，容易出现过均衡。相比于文献[13-14]中的拓扑，文献[15]中的均衡子电路结构简单，只需要 2 个开关管和 1 个电感，但其和文献[14]设计思路一致，分层数量较多，容易出现过均衡。

基于上述分析，本文结合电感储能均衡精度高的特点，提出 1 种基于电感储能的串联电池组模块化分层主动均衡方法。所提新型拓扑模块间均衡仅需 1 个电感，开关阵列单元采用 MOS 管与二极管反接的方式，相比于主流拓扑中使用 2 个 MOS 管反接组成的开关阵列单元，其控制简单且对控制信号具有较高的容错性，并且减少了 MOS 管的使用数量。所提模块化分层主动均衡方法相比于同类均衡方法具有均衡速度快、拓扑结构简单、成本低的优势。

1　拓扑结构及均衡原理

1.1　拓扑结构

基于电感储能的串联电池组模块化分层均衡拓扑结构如图 1 所示。串联电池组包含 $3n$ 节单体，其中每 3 节单体组成 1 个电池模块。开关阵列与储能器件可分为模块内与模块间 2 部分，每一模块内包含 4 个 MOS 管和 2 个电感；n 个模块间包含 $2n$ 个 MOS 管、1 个电感和 $2n$ 个二极管。

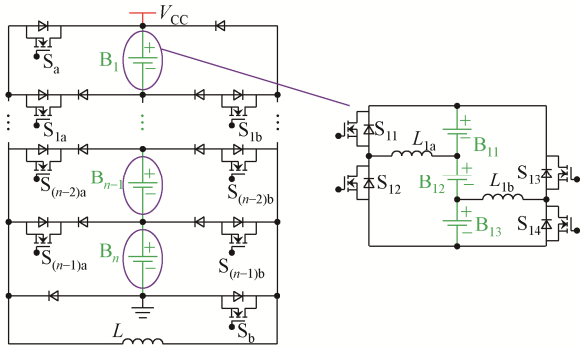


图 1　均衡拓扑

Fig. 1 Equalization topology

1.2　均衡工作原理

以 9 单体构成的串联电池组为例，均衡过程分为模块内和模块间均衡，模块内均衡可实现任意单体的充放电均衡，模块间均衡可实现任意模块的充放电均衡。

以模块 B_1 为例分析模块内均衡过程。若单体 B_{11} 需要放电均衡，则 1 个开关周期的均衡过程分为 2 个阶段。第一阶段：单体 B_{11} 放电，初始时刻 L_{1a} 电流为零，导通 S_{11}，单体 B_{11} 对电感 L_{1a} 充电，充电电流逐渐增加，达到期望值时，断开 S_{11}，第

一阶段结束；第二阶段：电感 L_{1a} 对单体 B_{12}、B_{13} 充电，此过程无需控制任何开关管，L_{1a} 通过 S_{12} 的续流二极管对 B_{12}、B_{13} 充电，L_{1a} 电流逐渐降低至 0，第二阶段结束。2 个阶段的均衡电流分别如图 2 中的回路 i 和回路 ii 所示。

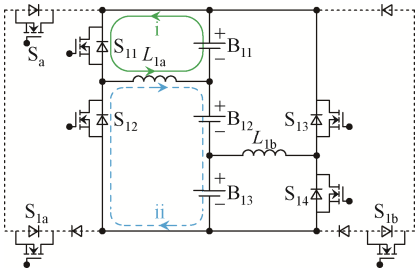


图 2 B_{11} 放电均衡原理

Fig. 2 Discharge equalization principle for B_{11}

若单体 B_{11} 需要充电均衡，则 1 个开关周期的均衡过程同样分为 2 个阶段。第一阶段：导通 S_{12}，B_{12}、B_{13} 为电感 L_{1a} 充电；第二阶段：断开 S_{12}，电感 L_{1a} 为 B_{11} 充电。单体 B_{13} 的均衡原理与 B_{11} 均衡原理一致，此处不再赘述。

若单体 B_{12} 需要放电均衡，则 1 个开关周期的均衡过程分为 2 个阶段。第一阶段：B_{11}、B_{12} 向 L_{1b} 充电，B_{12}、B_{13} 向 L_{1a} 充电，初始时刻 L_{1a}、L_{1b} 电流为 0，使 S_{12}、S_{13} 导通，L_{1a}、L_{1b} 电流逐渐增加，达到期望值时，断开 S_{12}、S_{13}，第一阶段结束；第二阶段：L_{1a} 通过 S_{11} 的续流二极管对 B_{11} 充电，L_{1b} 通过 S_{14} 的续流二极管对 B_{13} 充电，L_{1a}、L_{1b} 电流逐渐降至 0。2 个阶段的均衡电流路径分别如图 3 中的回路 i、回路 ii 和回路 iii、回路 iv 所示。

若单体 B_{12} 需要充电均衡，则 1 个开关周期的均衡过程分为 2 个阶段。第一阶段：导通 S_{11} 和 S_{14}，B_{11} 向 L_{1a} 充电，同时 B_{13} 向 L_{1b} 充电；第二阶段：

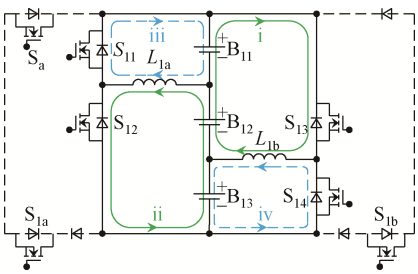


图 3 B_{12} 放电均衡原理

Fig. 3 Discharge equalization principle for B_{12}

断开 S_{11} 和 S_{14}，L_{1a} 通过 S_{12} 的续流二极管对 B_{12}、B_{13} 充电，L_{1b} 通过 S_{13} 的续流二极管对 B_{11}、B_{12} 充电。

模块间均衡可以将均衡能量直接由高电量模块转移至低电量模块。假设串联电池组包含 3 个模块，模块 B_1 电量最高，B_2 电量最低，1 个开关周期的均衡过程同样分为 2 个阶段。第一阶段：B_1 向电感 L 充电，初始时刻 L 电流为 0，使 S_a、S_{1b} 导通，B_1 为 L 充电，L 电流逐渐增加，达到期望值时，断开 S_a、S_{1b}，第一段结束；第二阶段：L 为 B_2 充电，断开 S_a、S_{1b} 的同时使 S_{1b}、S_{2a} 导通，L 为 B_2 充电，L 电流逐渐下降，电流下降为 0 时第二阶段结束。

文章所提模块化主动均衡方法的优势在于：①通过模块化设计，缓解了当单体数量较多，同时具有最高电量单体或最低电量单体数不为 1 时，不能准确判别均衡对象的问题；可实现模块内和模块间的分层均衡，均衡速度快；②相比于同类型拓扑[13-15]，开关管及电感的总数量较少，拓扑结构简单、成本低；③均衡能量在模块内转移时，均衡过程第二阶段不需控制任何开关管；在模块间转移时，只需控制 2 个开关管，模块内及模块间控制信号设计简单。

2 均衡参数分析与设计

针对模块间均衡和模块内均衡进行相关参数的分析与设计。首先，以模块 B_1 的模块内均衡为例，对模块内均衡进行参数设计。假设模块 B_1 内单体 B_{11}、B_{12} 和 B_{13} 的电压分别为 V_{11}、V_{12} 和 V_{13}，二极管导通压降为 V_D，MOS 管控制信号周期为 T，频率为 f。

若 B_{11} 电压最高，均衡第一阶段，S_{11} 导通，流过电感 L_{1a} 的电流线性上升，B_{11} 为 L_{1a} 充电，电感 L_{1a} 储能。设 B_{11} 放电过程对应的控制信号占空比为 D_1，电感电流 $i_{L_{1a},\mathrm{dis1}}$ 为

$$i_{L_{1a},\mathrm{dis1}}=\frac{V_{11}}{L_{1a}}t \tag{1}$$

1 个控制信号周期内电感的最大电流 $I_{L_{1a},\max 1}$ 为

$$I_{L_{1a},\max 1}=\frac{V_{11}}{L_{1a}}D_1T \tag{2}$$

根据最大均衡电流与选定的开关频率可得电感 L_{1a} 的取值为

$$L_{1a}=\frac{V_{11}}{I_{L_{1a},\max 1}f}D_1 \tag{3}$$

均衡第二阶段，断开 S_{11}，L_{1a} 通过续流二极管为 B_{12}、B_{13} 充电，设 $t=T_1$ 时电感电流降为 0，此阶段电感电流为

$$\begin{aligned} i_{L_{1a},\mathrm{dis}1}&=\frac{V_{11}}{L_{1a}}D_1T-\frac{V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}{L_{1a}}(t-D_1T)\\ &D_1T\leqslant t\leqslant T_1 \end{aligned} \tag{4}$$

为保证 1 个控制信号周期内电感能够复位，需要满足 $T_1<T$，即

$$\frac{V_{11}}{L_{1a}}D_1T-\frac{V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}{L_{1a}}(T-D_1T)<0 \tag{5}$$

进一步推导可得

$$D_1<\frac{V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}{V_{11}+V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}} \tag{6}$$

式(6)可作为占空比 D_1 的设计依据。

若 B_{11} 电压最低，均衡第一阶段导通 S_{12}，B_{12} 和 B_{13} 为 L_{1a} 充电，对应的控制信号占空比为 D_2；均衡第二阶段断开 S_{12}，L_{1a} 为 B_{11} 充电，在 $t=T_2$ 时电感电流降至 0。则其充电均衡 1 个控制信号周期内，电感电流 $i_{L_{1a},\mathrm{ch}1}$ 的表达式为

$$i_{L_{1a},\mathrm{ch}1}=\begin{cases}\dfrac{V_{12}+V_{13}}{L_{1a}}t & 0\leqslant t\leqslant D_2T\\ \dfrac{V_{12}+V_{13}}{L_{1a}}D_2T-\dfrac{V_{11}+V_{\mathrm{D}}}{L_{1a}}(t-D_2T) & D_2T\leqslant t\leqslant T_2\\ 0 & T_2\leqslant t\leqslant T\end{cases} \tag{7}$$

同理可得，占空比 D_2 的设计依据为

$$D_2<\frac{V_{11}+V_{\mathrm{D}}}{V_{11}+V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}} \tag{8}$$

若 B_{12} 电压最高，设均衡第一阶段电感充电过程对应的控制信号占空比为 D_3，则与式(4)同理可得

$$\begin{cases}D_3<\dfrac{V_{11}+V_{\mathrm{D}}}{V_{11}+V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}\\ D_3<\dfrac{V_{13}+V_{\mathrm{D}}}{V_{11}+V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}\end{cases} \tag{9}$$

若 B_{12} 电压最低，均衡第一阶段对应的控制信号占空比设为 D_4，则 D_4 需要满足

$$\begin{cases}D_4<\dfrac{V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}{V_{11}+V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}\\ D_4<\dfrac{V_{11}+V_{12}+V_{\mathrm{D}}}{V_{11}+V_{12}+V_{13}+V_{\mathrm{D}}}\end{cases} \tag{10}$$

单体 B_{13} 参数计算过程与 B_{11} 一致，此处不再重新推导。至此，模块内均衡参数分析完成。模块间参数设计过程同样基于电感进行能量转移，参数设计过程与模块内相同，此处不再重复。上述参数分析过程要以设定的最大均衡电流为基础，设置开关频率和电感等参数，综合考虑均衡速度和均衡电流对电池组的影响，均衡电流越大，均衡过程对电池的老化影响也越大，基于均衡电流小于 1C 但尽量接近于 1C 的原则对电感、开关频率和占空比联合设计。

3　均衡控制策略设计

新型模块化均衡拓扑可以实现模块内任意单体的充放电均衡及任意模块的充放电均衡，设 φ_1 为模块间均衡阈值，φ_2 为模块内均衡阈值。电池模块 SOC(state of charge)定义为模块内各单体 SOC 的平均值，模块间均衡以各模块间 SOC 极差作为均衡指标；模块内均衡以各单体 SOC 与电池模块 SOC 的差值作为均衡指标。每个采样周期内的控制策略如图 4 所示。

每个采样周期开始时刻，判别电池模块最高电量 $\mathrm{SOC}_{\max}$ 与最低电量 $\mathrm{SOC}_{\min}$，以及各模块内单体最高电量 $\mathrm{SOC}_{\max,m}$、单体最低电量 $\mathrm{SOC}_{\min,m}$ 和单体电量平均值 $\mathrm{SOC}_{\mathrm{ave},m}$，其中，$m$ 表示模块序号。若 $\mathrm{SOC}_{\max,m}$、$\mathrm{SOC}_{\mathrm{ave},m}$、$\mathrm{SOC}_{\min,m}$ 满足模块内均衡启动条件，则进行模块内均衡，模块间不均衡；若 $\mathrm{SOC}_{\max,m}$、$\mathrm{SOC}_{\mathrm{ave},m}$、$\mathrm{SOC}_{\min,m}$ 不满足模块内均衡启

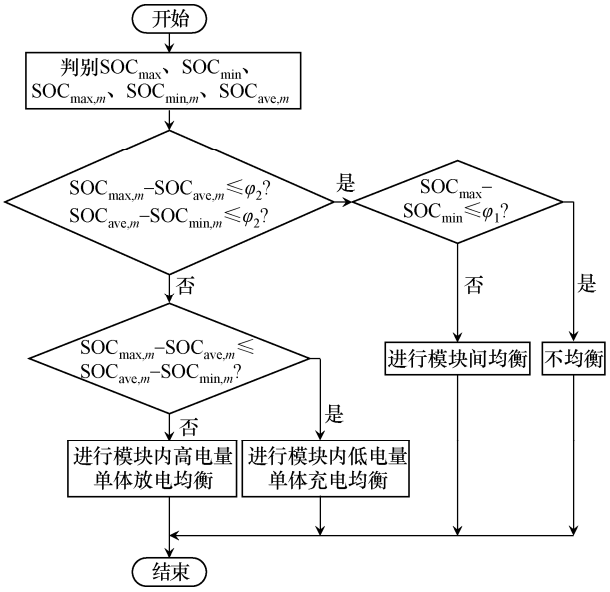


图 4 均衡控制策略流程

Fig. 4 Flow chart of equalization control strategy

动条件，SOC_{max}、SOC_{min} 满足模块间均衡启动条件，则进行模块间均衡。否则，不均衡。当最高电量或最低电量电池模块数量不为 1 时，选择序号最小的最高电量电池模块和序号最大的最低电量电池模块均衡。

4 均衡方法先进性分析

本节针对拓扑结构先进性进行研究，包括拓扑成本分析和能量转移方式、均衡速度等均衡性能分析。将新型均衡拓扑与目前常见的不同类型和相同类型的主流拓扑进行成本对比。拓扑中元器件的单价基于文献[2, 16]设置：MOSFET(M)为 0.32 $，整流二极管(D)为 0.03 $，绕组(W)为 0.20 $，变压器磁心(T)为 0.50 $，电感($L$)为 0.25 $，电容($C$)为 0.25 $。各拓扑具体器件数量及成本分析计算结果见表 1，平均成本对比如图 5 所示，表 1 中单体数量指的是对应文献中各自均衡原理部分电池组所包含的单体数，平均成本指的是“成本与单体数量的比值”，“-”代表新型拓扑成本相比于对应文献拓扑成本是减小的。

由表 1 和图 5 可知，新型拓扑成本整体低于目前主流的电容型拓扑、电感电容 LC(inductor-capacitor)型拓扑、变压器型拓扑和电感型拓扑。

表 1 均衡拓扑成本计算结果

Tab. 1 Calculation results of costs of different equalization topologies

拓扑类型	单体数量	器件数量						成本/$	平均成本/$	平均成本对比
		M	D	W	T	L	C			
电容型[17]	5	16	0	0	0	0	6	6.62	1.324	−35.46%
电容型[18]	4	16	0	0	0	0	1	5.37	1.343	−36.35%
LC 型[1]	4	10	7	0	0	1	1	3.91	0.978	−12.59%
LC 型[19]	12	8	24	0	0	7	28	12.03	1.003	−14.77%
变压器型[6]	4	12	0	2	1	2	3	5.99	1.498	−42.94%
变压器型[20]	4	11	12	4	2	0	1	5.93	1.483	−42.36%
电感型[2]	8	20	16	0	0	1	0	7.13	0.891	−4.13%
电感型[9]	6	26	0	0	0	5	0	9.57	1.595	−46.43%
电感型[10]	4	20	0	0	0	1	0	6.65	1.663	−48.60%
新型拓扑	9	18	6	0	0	7	0	7.69	0.854	—

其中，文献[2]中的电感型拓扑成本与本文新型拓扑接近，主要原因在于其拓扑减少了开关管的使用，但文献[2]不能实现模块化的分层均衡。总体而言，新型拓扑相比于目前主流不同类型的均衡拓扑具有较为显著的成本优势。

均衡性能主要包括均衡速度、均衡效率、均衡能量转移方式及控制信号设计的复杂度等。由于不同文献中的实验对象和实验场景不同，且控制信号的设计均具有一定的冗余度，因此较难从定量的角度分析均衡性能，本节从定性的角度对均衡性能的对比展开分析。均衡速度主要和均衡能量转移方式、均衡电流流经的回路中包含的元器件数量有

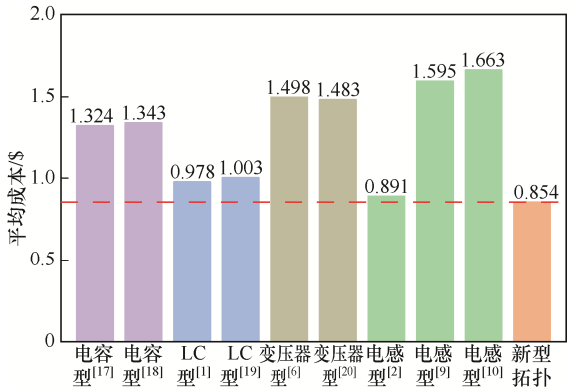


图 5　均衡拓扑平均成本对比

Fig. 5 Comparison of average cost among different equalization topologies

关。均衡效率主要和均衡电流流经的回路中包含的元器件数量有关。均衡过程的任意时刻，均衡能量转移方式可分为单体对单体、单体对模块、模块对模块、多单体对多单体。其中，任意时刻均衡能量只能在单体和模块间转移对应的均衡速度最慢，均衡能量在多单体和多单体间转移对应的均衡速度最快。控制信号设计的复杂度主要指控制信号占空比计算的复杂度和均衡路径切换过程对控制信号精度的要求。

文献[17]基于开关电容设计了混合均衡路径用以提高均衡速度，均衡能量可以在单体和单体间、单体和模块间转移，均衡速度快，但其均衡回路流经的续流二极管较多，不利于均衡效率的提高；同时，均衡初期开关电容充放电速度较快，而均衡末期开关电容充放电速度显著降低，对开关管控制信号的精度要求较高。文献[1]基于单电感单电容设计主动均衡方法，均衡回路流经的二极管较多，不利于均衡效率的提高，但其均衡能量可以在单体和模块、模块和模块间转移，均衡速度快。文献[20]基于变压器设计主动均衡方法，当进行低电量单体充电均衡时，为降低变压器一次侧尖峰电压，需要设计吸收电路，吸收电路对均衡效率产生不利影响。文献[9-10]同样基于电感进行能量转移，文献[9]中拓扑虽然均衡能量转移方式多样、均衡速度快，但其能量转移过程均衡电流流经的二极管及开关管较多，不利于均衡效率的提高和控制信号的简化；文献[10]中，均衡能量可以在任意单体和任意数量单体构成的电池模块间转移，均衡能量转移方式多样，均衡效率高、速度快，但其采用背对背的开关管构成开关阵列，对控制信号的精度要求较高。

新型均衡方法与前述方法相比，任意时刻均衡能量可以在多单体和多单体间转移，或在模块间转移，具有较为显著的速度优势；同时，均衡电流流经的二极管数量较少，均衡效率高；另外，新型均衡方法主要进行模块间和模块内的双层均衡，相比于多层均衡，开关管的切换及占空比的设计更为简单。新型均衡方法与常见均衡方法性能对比见表 2，其中 E 表示优秀，G 表示良好，M 表示中等，S 表示偏差，P 表示较差。总体而言，新型均衡方法在保证均衡效率及控制信号设计简单的同时，具有较为显著的速度优势。

表 2　所提均衡方法与常见均衡方法的对比

Tab. 2 Comparison of proposed equalization method with common equalization methods

均衡方法	均衡效率	均衡速度	能量转移方式	控制信号设计复杂度
开关电容型[17]	M	G	G	M
电感电容型[1]	M	G	M	E
变压器型[20]	S	G	M	G
电感型[9]	S	G	G	S
电感型[10]	G	G	G	S
新型方法	G	E	E	G

5　新型均衡方法有效性及先进性验证

基于图 1 的拓扑，在 MATLAB/Simulink 中搭建包含 9 单体的仿真模型，对新型均衡方法有效性及先进性进行验证。

5.1　有效性验证

为验证新型均衡方法在电池组不同充放电状态的均衡效果，引入图 6 所示的工况模拟电池组充放电过程。图 6 为依据联合国欧洲经济委员会 ECE(Economic Commission for Europe)汽车法规工况进行适当比例缩小以适合实验对象的工况，文中

也称为 ECE 工况，单个周期为 200 s，电流小于 0 表示电池放电，大于 0 表示充电。此工况包含了电池组充电、放电和搁置状态。模型中，为和实际器件参数更吻合，设计电池额定容量为 2.6 A·h，额定电压为 3.7 V，二极管导通压降 0.5 V，其余模型参数见表 3。均衡阈值设计的原则是均衡结束后能有较为显著、直观的均衡效果。结合第 2 节均衡参数分析，电感、开关频率和占空比相互耦合，不能单独设计，需要联合设计。电感、开关频率和占空比设计的原则为：①电感参数尽量和实际标准件参数一致；②1 个开关周期内，均衡电流尽可能的大，但电感必须能够复位；③综合考虑均衡速度和均衡电流对电池组的影响，均衡电流越大，均衡过程对电池的老化影响也越大，基于均衡电流小于 1C 但尽量接近于 1C 的原则对电感、开关频率和占空比联合设计。

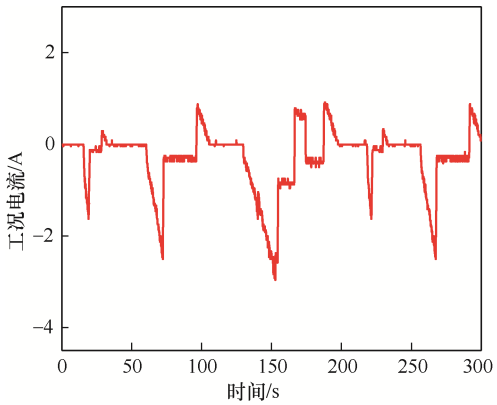


图 6 模型输入 ECE 工况

Fig. 6 Model input under ECE conditions

表 3 有效性仿真模型参数

Tab. 3 Parameters of effectiveness simulation model

参数类型	数值
电感/μH	模块内:100；模块间:200
均衡阈值/%	模块内 φ_2:0.25；模块间 φ_1:0.5
开关频率/kHz	10
控制信号占空比/%	模块内:33,66；模块间:50

基于图 6 工况和表 3 参数，设置均衡前单体 SOC 为 57.2%、55.8%、55.0%、56.8%、56.3%、58.4%、60.0%、57.9%、59.3%，初始 SOC 极差为 5.0%，满足均衡电路启动条件，均衡电路工作。仿真过程所有单体 SOC 变化曲线如图 7 所示，各单体 SOC 趋于一致，到达 317.8 s 时均衡结束，之后 SOC 极差始终维持在 1.0%以下。由此可知，本文所提出的模块化分层主动均衡方法可以有效改善串联电池组各单体的一致性差异。

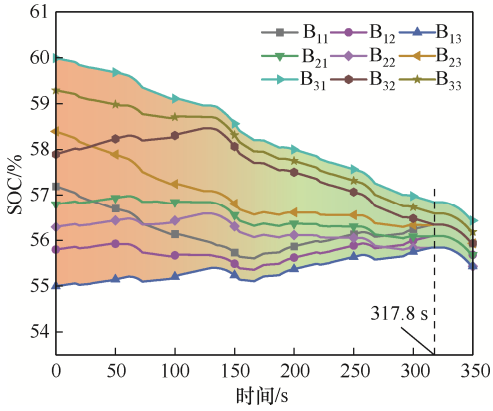


图 7 均衡过程 SOC 变化曲线

Fig. 7 SOC curves during equalization process

5.2 先进性验证

本文基于电感储能设计的新型模块化主动均衡方法，显著优势在于均衡速度。本节通过将新型主动均衡方法与其他类型、同类型均衡方法对比，验证其在均衡速度方面的优越性。基于第 4 节的分析，综合考虑目前主流均衡方法特点，本节选取文献[1]中设计的电感电容型方法和文献[10]中设计的电感型方法作为对比对象。

5.2.1 仿真模型参数设计

为客观比较不同均衡方法的均衡速度差异，各均衡方法仿真模型参数设计尽可能一致，比如各单体初始 SOC、开关频率、均衡阈值等参数。而各均衡方法电感电容及占空比的设计，在满足各自均衡原理要求的前提下，依据 5.1 节电感、开关频率和占空比设计的原则设计。各均衡方法仿真模型的具体参数设计见表 4。需要说明的是，新型均衡方法单体间阈值 0.25%和模块间阈值 0.50%对应了所有单体极差阈值为 1.00%。

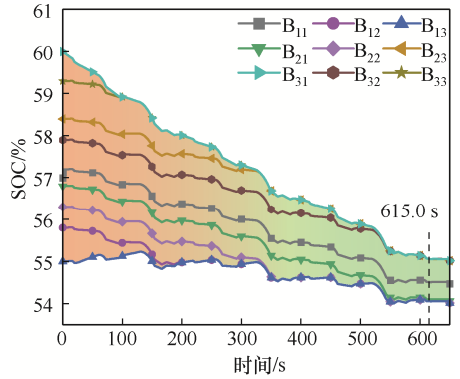
5.2.2 先进性验证

依据表 4 中的模型参数，同样引入 5.1 节中图 6 所示 ECE 工况模拟电池组充放电过程，在 MATLAB/Simulink 中搭建相应拓扑的仿真模型，对文献[1]和文献[10]的均衡方法进行仿真，均衡过程单体 SOC 变化曲线如图 8 所示。

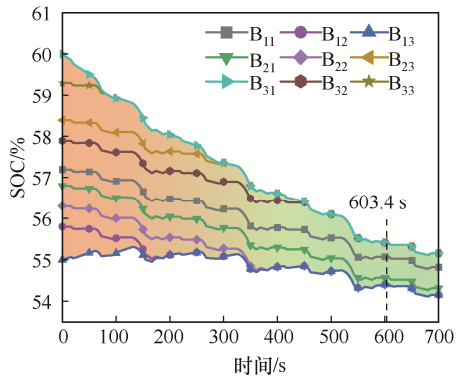
表 4　先进性对比仿真模型参数

Tab. 4 Parameters of simulation model for advanced comparative verification

参数类型	文献[1]	文献[10]
电感/μH	47.00	45.94
电容/μF	33	—
均衡阈值 φ/%	单体间:1.00	单体间:1.00
开关频率/kHz	10	10
控制信号占空比/%	放电均衡:60 充电均衡:20,50	50



(a) 文献[1]



(b) 文献[10]

图 8　文献[1]和文献[10]均衡方法均衡前后各单体 SOC 变化

Fig. 8 Changes in SOC of each cell before and after equalization using methods proposed in Refs. [1] and [10]

由图 7 和图 8 可知，初始阶段各单体 SOC 相同，极差均为 5.0%，满足各均衡电路的启动条件，均衡电路启动；在各均衡电路达到均衡停止条件时，极差均缩小至 1.0%时均衡结束。本文所提的模块化分层主动均衡方法均衡时间为 317.8 s，文献[1]所提电感电容型均衡方法均衡时间为 615.0 s，文献[10]所提电感型均衡方法均衡时间为 603.4 s。新型均衡方法相比于文献[1]与文献[10]的均衡方法，均衡速度分别提高了 48.33%和 47.33%。综上所述，文章所提的模块化分层主动均衡方法和目前主流均衡方法相比，在均衡速度方面具有显著优势。

6　结语

为降低单体一致性差异对串联电池组能量利用率及安全性的影响，提出 1 种基于电感储能的模块化分层主动均衡方法，其具有结构简单、成本低且均衡速度快的特点。通过与不同类型拓扑的对比分析，验证了新型均衡方法拓扑结构较为显著的成本优势及均衡性能优势；通过在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型，证明了新型均衡方法和同类型均衡方法相比在均衡速度上的优势。总体而言，新型均衡方法可以显著改善串联电池组的一致性差异，进而提高其能量利用率及循环寿命，适用于配电网电池储能系统的均衡。未来的研究主要集中在将温度考虑进均衡指标，同时保证电池组各单体温度及 SOC 的一致性。

参考文献：

[1] Guo Xiangwei, Wu Qi, Xing Cheng, et al. An active equalization method based on an inductor and a capacitor for series battery pack [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 4040-4052.

[2] Guo Xiangwei, Wu Qi, Xing Cheng, et al. An active equalization method for series-parallel battery pack based on an inductor [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107157.

[3] 刘俊, 阚加荣, 彭思敏, 等. 基于移相策略的半桥型锂电池均衡器[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 286-294.
Liu Jun, Kan Jiarong, Peng Simin, etal. Half-bridge lithium-ion battery equalizer based on phase-shift strategy [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 286-294. (in Chinese)

[4] 蔡瑞佳, 马运东, 王鹏飞, 等. 基于双向半桥 CLLLC 谐振变换器的锂电池均衡电路[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4868-4882.
Cai Ruijia, Ma Yundong, Wang Pengfei, etal. Lithium-ion battery equalization circuit based on bidirectional half-bridge CLLLC resonant converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4868-

4882. (in Chinese)

[5] Ghaeminezhad N, Ouyang Quan, Hu Xiaosong, et al. Active cell equalization topologies analysis for battery packs: A systematic review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9119-9135.

[6] 马春艳, 王庆龙, 张迪, 等. 基于 SOC 的串联连接锂电池能量均衡控制研究[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 216-223.
Ma Chunyan, Wang Qinglong, Zhang Di, et al. Energy balance control of series-connected lithium batteries based on SOC [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 216-223. (in Chinese)

[7] Lee S, Noh G, Ha J I. Reconfigurable power circuits to series or parallel for energy-balanced multicell battery pack [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 3641-3651.

[8] 郭向伟, 王晨, 钱伟, 等. 电池储能系统均衡方法研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4204-4225.
Guo Xiangwei, Wang Chen, Qian Wei, etal. A review of equalization methods for battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225. (in Chinese)

[9] Wang Shaochen, Yang Shiyan, Yang Wei, et al. A new kind of balancing circuit with multiple equalization modes for serially connected battery pack [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2142- 2150.

[10] Chen Yang, Liu Xiaofang, Shen Teng, et al. An any-cell (s)-to-cell(s) equalization method with a single magnetic component for lithium-ion battery pack [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 102071.

[11] 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.

[12] Al-Smadi M K, Abu Qahouq J A. Evaluation of current-mode controller for active battery cells balancing with peak efficiency operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(2): 1610-1621.

[13] 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: 104321.

[14] Lei Xu, He Jianping, Fan Linqian, et al. Active equalization strategy for lithium-ion battery packs based on multilayer dual interleaved inductor circuits in electric vehicles [J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022(1): 8653547.

[15] Peng Faxiang, Wang Haoyu, Yu Liang. Analysis and design considerations of efficiency enhanced hierarchical battery equalizer based on bipolar CCM Buck-Boost units [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 4053-4063.

[16] Shang Yunlong, Zhang Qi, Cui Naxin, et al. Multicell-to-multicell equalizers based on matrix and half-bridge LC converters for series-connected battery strings [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1755-1766.

[17] Zhang Xiaobing, Zhou Guohua, Liu Shuyi. Switched-capacitor equalizers using hybrid balancing paths for series-connected energy storage cells [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 63: 107112.

[18] La P H, Choi S J. Direct cell-to-cell equalizer for series battery string using switch-matrix single-capacitor equalizer and optimal pairing algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 8625-8639.

[19] Uno M, Cheng Dexiao, Onodera S, et al. Bidirectional Buck-Boost converter using cascaded energy storage modules based on cell voltage equalizers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 1249-1261.

[20] Guo Xiangwei, Geng Jiahao, Liu Zhen, et al. A flyback converter-based hybrid balancing method for series-connected battery pack in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(7): 6626-6635.



张旭阳

作者简介：

张旭阳(1980—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统管理。E-mail：1195796065@qq.com。

许锋(1986—)，男，本科，高级工程师。研究方向：配电网全过程管理与新能源设计。E-mail：568379255@qq.com。

周华(1979—)，女，本科，工程师。研究方向：智能配电网建设与分布式光伏建设。E-mail：2283977179@qq.com。

魏业文(1987—)，男，通信作者，博士，讲师。研究方向：新能源并网与消纳。E-mail：weiyewen8@126.com。

(责任编辑：孙美菊)