DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.9.175 中图分类号：TM912 文献标志码：A

T型变压器式电池组多模式交错均衡控制方案

周志鹏[1]，魏业文[1,2]，郭 亮[2]，张 杰[1]，余炜徐[1]，张思佳[1]
(1.三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443000；2.三峡大学创新创业学院，宜昌 443000)

摘要：为了解决储能电池组中由于制造工艺等因素引起的单体电池电压不一致问题，提出一种具备多种工作模式交错运行能力的均衡控制方案。该方案由T型变压器结构的主动均衡拓扑及相应的多模式交错均衡控制策略构成。均衡方案以电池的端电压作为均衡变量，可在部分单体-单体、单体-整体、单体-单体3种工作模式下交错运行，从而提高了均衡速度。MATLAB/Simulink平台的仿真结果表明，该方案在静置、充电、放电3种工况下，均衡时间相较于传统变压器式均衡电路明显缩短，其中相较于部分单体-单体均衡电路分别缩短了45.2%、38.4%、41.1%，相较于变压器式单体-整体均衡电路分别缩短了37.0%、30.7%、36.1%，相较于变压器式单体-单体均衡电路分别缩短了21.2%、25.8%、32.6%。

关键词：储能系统；T型变压器；主动均衡；多均衡类型；多模式交错均衡

Multi-mode Interleaved Balancing Control Scheme for Battery Packs Based on T-type Transformer

ZHOU Zhipeng[1], WEI Yewen[1,2], GUO Liang[2], ZHANG Jie[1], YU Weixu[1], ZHANG Sijia[1]
(1. College of Electrical Engineering and NEW Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China;
2. College of Innovation and Entrepreneurship, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: To address the issue of single-cell voltage inconsistency in energy storage battery packs caused by manufacturing processes and other factors, a balancing control scheme capable of interleaved operation in multiple working modes is proposed. This scheme consists of a T-type transformer-based active balancing topology and a corresponding multi-mode interleaved balancing control strategy. The balancing scheme uses the terminal voltage of the battery as the balancing variable and can operate in an interleaved manner under three working modes: partial cell-to-cell, cell-to-pack, and cell-to-cell. This improves the balancing speed. Simulation results from MATLAB/Simulink platform show that, under three operating conditions—idle, charging, and discharging—the balancing time is significantly reduced compared to traditional transformer-based balancing circuits. Specifically, compared to the partial cell-to-cell balancing circuit, the balancing time is reduced by 45.2%, 38.4% and 41.1% respectively. Compared to the transformer-based cell-to-pack balancing circuit, it is reduced by 37%, 30.7% and 36.1% respectively. Compared to the transformer-based cell-to-cell balancing circuit, it is reduced by 21.2%, 25.8% and 32.6% respectively.

Keywords: Energy storage system; T-type transformer; active balancing; multi-balancing types; multi-mode interleaved balancing

收稿日期：2024-12-16；**修回日期：**2025-02-15，2025-03-28；
录用日期：2025-04-17；**网络首发日期：**2025-04-30
基金项目：国家自然科学基金面上资助项目(52377191)；国家自然科学基金青年基金资助项目(52107108)
This work is supported by General Program of National Natural Science Foundation of China under the grant 52377191; Youth Program of National Natural Science Foundation of China under the grant 52107108

储能技术在加速实现“双碳”目标中发挥着重要作用，锂离子电池凭借高能量密度、长寿命、无记忆效应和低自放电率等优点，已广泛应用于电力储能领域[1]。然而，锂离子电池多以串联方式使用，受制造差异、温度和老化等因素影响，单体电池之间会出现容量、内阻和自放电率的不一致[2]。在长期使用中，这种不一致性可能导致部分电池发

生过充或过放现象[3]，从而影响系统整体的稳定性和寿命，电池均衡技术正是解决该问题的关键方法之一[4]。当前，电池均衡技术的研究焦点主要在主动均衡技术上。依据均衡策略进行分类，主动均衡技术可细分为单体-整体[5-7]、部分单体-单体[8-10]以及任意单体-单体[11-13]等类型。在储能系统中，变压器因具有电气隔离特性，不仅可提升系统安全性，还能阻断故障传播，因此常用于电池均衡电路[14]。基于变压器的均衡拓扑已被广泛研究，如单体-整体均衡和单体-单体均衡等。然而，这些方法在均衡速度、器件体积和控制复杂度方面仍存在局限[15]。为进一步提高均衡速度并优化电路结构，T 型变压器式均衡技术被提出，并在应对电池组性能差异时展现出更优的能量传输能力[16]。鉴于此，本文将研究重点放在 T 型变压器式均衡技术上。

文献[5]提出了一种变压器式单体-整体均衡电路，通过精准调控单体电池与电池组之间的能量流动实现电池组的均衡状态，该方案尤其擅长对高电压电池进行高效均衡处理，但均衡速度较慢，且储能元件为多绕组变压器，体积较大。文献[11]中提出了一种变压器式单体-单体均衡电路，主要通过最高电压电池与最低电压电池之间的能量传递实现电池组的均衡，但是在均衡过程中，若电压最高与最低的 2 节电池位置相邻较近，则均衡速度相对较快；若它们相隔较远，均衡的速度会相应减缓。文献[13]提出的单体-单体均衡拓扑，相对于文献[11]提升了均衡速度，但其利用多绕组变压器来实现能量的转移，不仅造成了体积的增加，而且使控制电路相对复杂，只适用于电池数量较少的储能系统。

根据上述分析，本文提出了一种 T 型变压器结构的锂离子电池组多模式均衡拓扑，该拓扑能够实现 3 种不同的均衡方式；同时设计了一种与均衡拓扑相对应的多工作模式交错的均衡控制策略，可以根据均衡精度的需要实时切换工作模式，使整个均衡电路始终运行在最佳状态，大大提高均衡速度。

1 均衡拓扑结构及工作原理

1.1 均衡拓扑结构

本文提出的均衡拓扑结构如图 1 所示，其核心构成部分包括 1 个储能电池单元、2 个开关矩阵单元以及 1 个关键的 T 型变压器能量传输单元。图 1 中的开关矩阵单元 1 由开关 S_{n3}～S_{n4} 组成，开关矩阵单元 2 由开关 S_{n1}～S_{n2} 组成，开关 S_{w1} 可实现能量由单体到电池组的传递。在该拓扑架构中，T 型变压器是能量传输单元中唯一的储能元件，通过持续性地吸纳与释放均衡过程中的能量，促使能量在不同均衡对象间的直接转移。在拓扑运行过程中，变压器绕组 W_1 与绕组 W_3 构成反激变换器 1，绕组 W_1 与绕组 W_2 构成反激变换器 2。

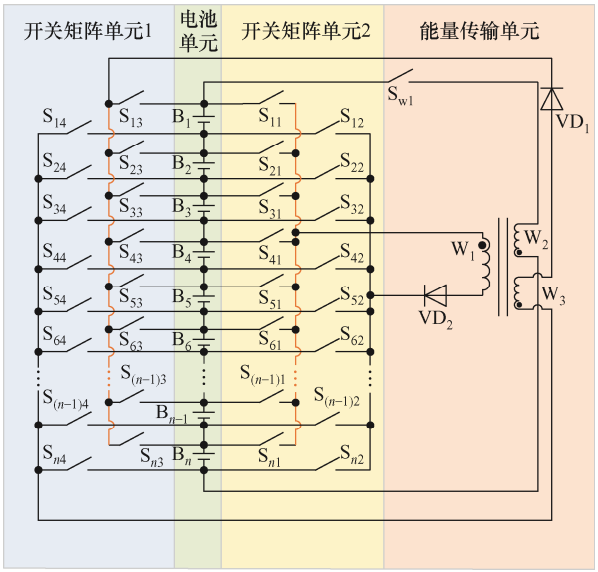


图 1 均衡拓扑结构

Fig. 1 Balanced topological structure

为了避免变压器磁心饱和并确保电路的均衡性能不受影响，该拓扑结构在反激模式和电流断续模式 DCM(discontinuous conduction mode)下运行。在此框架下，电路中的开关组件及 T 型变压器均被视为处于理想工作状态。本文均衡电路具备 3 种独立工作模式，分别命名为：模式 1(单体-单体)，实现最高电压电池向最低电压电池的能量转移；模式 2(单体-整体)，为最高电压电池向电池组回馈能量；

模式 3(部分单体–单体)，特指高电压电池单元向最低电压电池单元的能量传递。

1.2 工作原理分析

以含有 n 节电池 $B_1 \sim B_n$ 的储能模组为例，假定模组中 B_1 电压最高，B_n 电压最低，各模式的工作原理如下。

1.2.1 模式 1 工作原理分析

模式 1 为单体–单体的均衡类型，具体是由 B_1 释放能量给 B_n 吸收，这种模式可以实现任意高、低电压电池之间的能量均衡，具有较快的均衡速度，这是其主要的优势。模式 1 下 W_1 和 W_3 的电流时域特性如图 2 所示，其中 W_1 和 W_3 的均衡电流分别为 i_{w1} 和 i_{w3}。设定控制信号 PWM_1^+ 的最大占空比为 D_1，PWM_1^- 为 PWM_1^+ 的互补信号，T 为开关周期，W_1 与 W_3 之间的匝数比为 n_1。模式 1 的工作原理如图 3 所示，包含 2 个不同阶段。

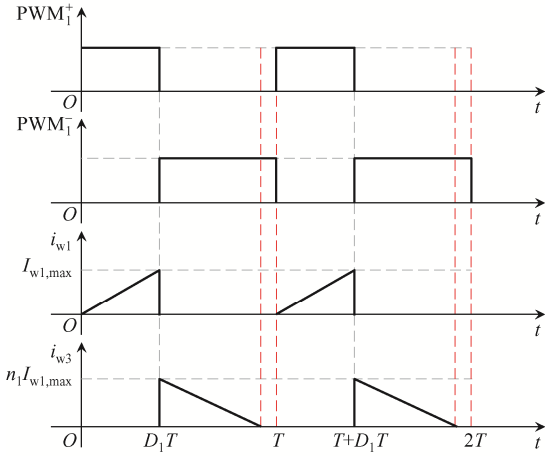


图 2　模式 1 变压器电流时域特性

Fig. 2 Transformer current response curve in mode 1

第一阶段($0 \leqslant t \leqslant D_1T$)：$t=0$ 时，PWM_1^+ 信号触发开关 S_{11} 与 S_{12} 闭合，其余开关则保持断开状态，此时 B_1 开始释放能量至 W_1，使得 i_{w1} 逐渐增大；$t=D_1T$ 时，PWM_1^+ 信号指令 S_{11} 与 S_{12} 断开，i_{w1} 达到其峰值 $I_{w1,max}$，标志着变压器已累积 B_1 释放的能量。此阶段的电流路径为图 3 中的深色虚线。

第二阶段($D_1T < t \leqslant T$)：依据图 3 中浅色虚线所指示的电流路径，在 $t=D_1T$ 时，S_{11} 与 S_{12} 断开，与此同时，PWM_1^- 信号向 S_{n3} 与 S_{n4} 发送高电平指令，促使它们进入闭合状态，其余开关仍维持断开状态。此时，变压器在上一阶段积聚的能量将经由 W_3，通过 S_{n3} 与 S_{n4} 释放至 B_n，此时 W_3 的电流为最大值 $n_1 I_{w1,max}$。当 i_{w3} 递减至 0 时，变压器内部蓄积的能量已全部传递至 B_n，此时变压器磁心复位，B_1 至 B_n 的能量传输过程结束。

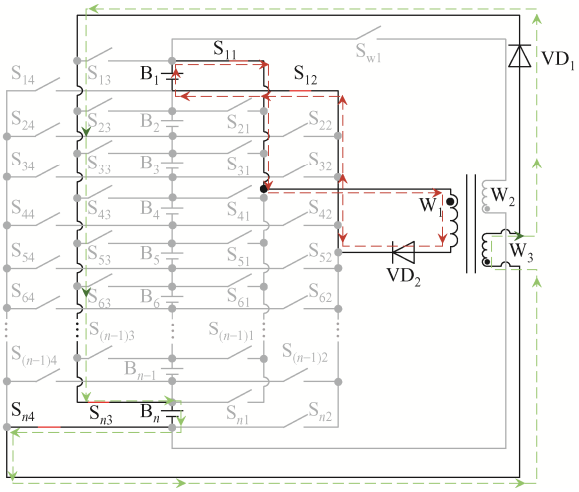


图 3　模式 1 工作原理

Fig. 3 Principle diagram of mode 1

1.2.2 模式 2 工作原理分析

模式 2 属于单体–整体均衡类型，可以实现储能模组内最高电压的迅速降低。图 4 展示了 W_1 及 W_2 的电流波形特征，W_1 的均衡电流为 i'_{w1}，W_2 的均衡电流为 i_{w2}。假设控制信号 PWM_2^+ 的最大占空比为 D_2，PWM_2^- 为 PWM_2^+ 的互补信号，W_1、W_2 的匝数比为 n_2。模式 2 的工作原理如图 5 所示，包含

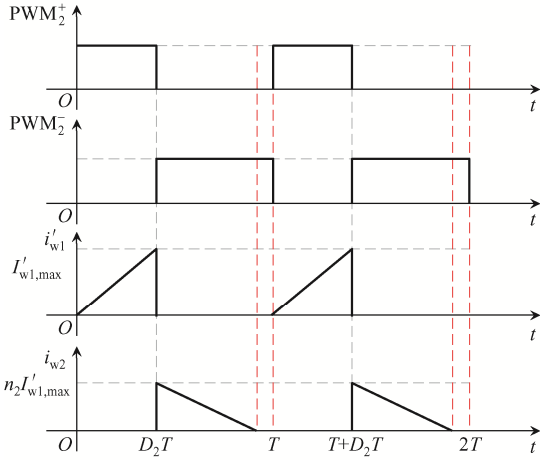


图 4　模式 2 变压器电流时域特性

Fig. 4 Transformer current response curve in mode 2

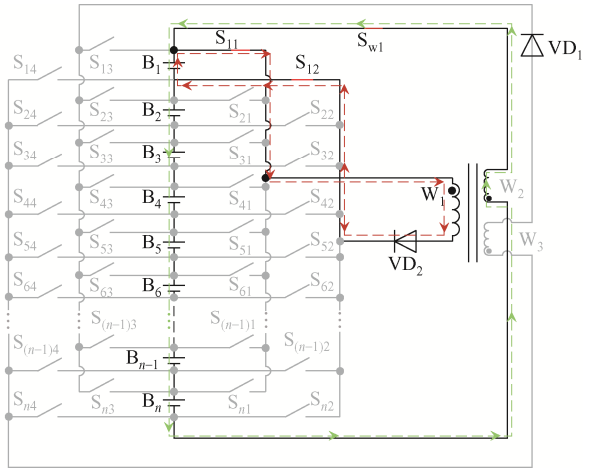


图 5 工作模式 2 工作原理

Fig. 5 Principle diagram of mode 2

2 个不同阶段。

第一阶段($0 \leqslant t \leqslant D_2T$)：根据图 5 中深色虚线所示的电流通路，当 $t=0$ 时，PWM_2^+ 控制 S_{11} 和 S_{12} 闭合，其他开关维持断开状态，在此阶段，B_1 经由 S_{11} 与 S_{12} 向 W_1 传递能量，使得 i'_{w1} 以线性方式持续上升；当时间推进至 $t=D_2T$ 时，PWM_2^+ 信号指令 S_{11} 与 S_{12} 断开，当 i'_{w1} 达到其峰值 $I'_{w1,max}$ 时，标志着变压器已完全接收并蓄积了来自 B_1 释放的能量。

第二阶段($D_2T < t \leqslant T$)：当 $t=D_2T$ 时，参照图 5 中浅色虚线所示的电流通路，第一阶段中处于闭合状态的开关全部断开，与此同时，PWM_2^- 信号指令开关 S_{w1} 进入闭合状态。此时，W_2 获得最大均衡电流 $n_2I'_{w1,max}$，变压器内累积的能量则通过 S_{w1} 向电池组释放；当 i_{w2} 减小至 0 时，表示变压器中累积的所有能量已完全转移至电池组，并且此时变压器磁心已复位，至此，能量由 B_1 至电池组的传输过程结束。

1.2.3 模式 3 工作原理分析

模式 3 为部分单体-单体均衡类型，即部分较高电压电池单元释放能量给 B_n 吸收，该工作模式能有效提升电池组中最低电压电池的电压水平。W_1 与 W_3 的电流时域特性如图 6 所示，W_1 和 W_3 的均衡电流分别为 i''_{w1} 与 i'_{w3}。假设控制信号 PWM_3^+ 的最大占空比为 D_3，则 PWM_3^- 为 PWM_3^+ 的互补信号。模式 3 的原理如图 7 所示，包含 2 个不同阶段。

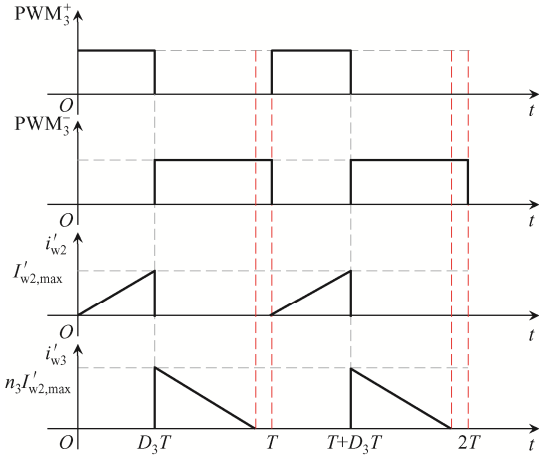


图 6 模式 3 变压器电流时域特性

Fig. 6 Transformer current response curve in mode 3

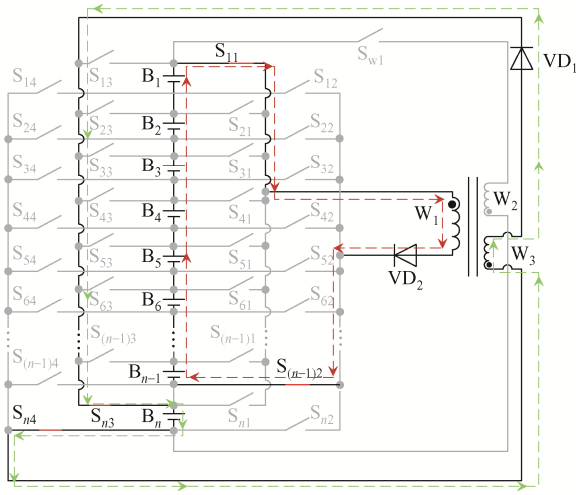


图 7 工作模式 3 工作原理

Fig. 7 Principle diagram of mode 3

第一阶段($0 \leqslant t \leqslant D_3T$)：根据图 7 中深色虚线所示的电流通路，当 $t=0$ 时，PWM_3^+ 控制与 B_1 和 B_{n-1} 相关的 S_{11} 和 $S_{(n-1)2}$，使其闭合，其他开关断开，与此同时，B_1 及 B_{n-1} 经由 S_{11} 和 $S_{(n-1)2}$ 向 W_1 输送能量，使得 i''_{w1} 线性递增；至 $t=D_3T$ 时，PWM_3^+ 信号控制 S_{11} 与 $S_{(n-1)2}$ 断开，此时 i''_{w1} 达到其峰值 $I''_{w1,max}$，表明变压器已蓄积部分较高电压电池单元释放的能量。

第二阶段($D_3T < t \leqslant T$)：根据图 7 中浅色虚线所示的电流通路，当 $t=D_3T$ 时，PWM_3^- 控制开关 S_{n3} 和 S_{n4} 闭合，此时 W_3 获取了由变压器传递的最大均衡电流 $I''_{w1,max}/n_1$，随后，变压器内积聚的能量

通过S_{n3}与S_{n4}被释放至B_n；i'_{w3}减小至 0 时，表明变压器已向B_n完成能量传输，此时磁心复位，标志着部分高压电池至B_n的能量直接迁移过程结束。

2　多模式交错均衡控制策略

为充分发掘各模式的优势并规避其短板，本文创新性地提出了一种多模式交错均衡控制策略。此策略赋予了电路依据均衡精度实际需求灵活转换工作模式的能力，进而有效加速了电池组均衡进程的高效推进。考虑到电池的端电压相较于其荷电状态值更易实现实时监测，并且不会对均衡效果产生不利影响，因此决定采用电池的端电压作为实施均衡控制的主要依据。在第 1 节所述 3 种工作模式中，模式 1 是为了最快减小极差，对充放电均衡的安全具有意义；模式 2 可以将最高电压电池的能量均分到各节电池，对电池组寿命具有重要意义；模式 3 可以快速提高最低电池的电量。因此，在电池组内部引入了 3 个电压差作为均衡电路工作模式判别的基准：最高电压U_{max}与最低电压U_{min}之差ΔU_1、最高电压U_{max}与平均电压U_{ave}之差ΔU_2、平均电压U_{ave}与最低电压U_{min}之差ΔU_3。均衡电路的启动与否由阈值α、β和γ判定，通过分别比较ΔU_1与α、ΔU_2与β以及ΔU_3与γ的大小来确定均衡电路工作在哪种模式。

均衡电路的具体工作过程如下。

首先，需找出储能模组中的U_{max}和U_{min}，并计算U_{ave}；接着，计算ΔU_1、ΔU_2与ΔU_3；然后，将 1 个周期内 3 种模式均衡时间初始化为$T_1=T_2=T_3=0$；最后，分别判断ΔU_1与α、ΔU_2与β及ΔU_3与γ的大小。当$\Delta U_1>\alpha$时，即最高电压电池与最低电压电池需进行均衡调控，此时电路工作在模式 1 的时间$T_1=1$；当$\Delta U_2>\beta$时，即最高电压电池需要进行均衡调控，此时电路工作在模式 2 的时间$T_2=1$；当$\Delta U_3>\gamma$时，即储能模组中的最低电压电池需要进行均衡调控，此时电路工作在模式 3 的时间$T_3=1$。假如在 1 个周期内，3 种工作模式都符合开启条件，则采用交错的方式运行，先后顺序为模式 1 优先，模式 2 其次，模式 3 最后，直到 3 种模式都不满足开启条件时，均衡结束。具体的均衡控制策略如图 8 所示。

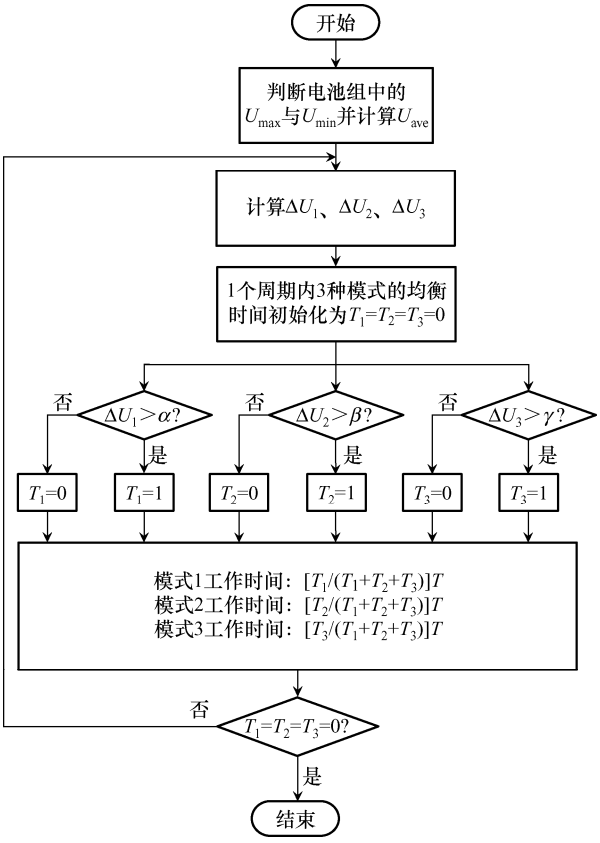


图 8　多模式混合均衡控制策略流程

Fig. 8 Flow chart of multi-mode hybrid balancing control strategy

在 3 个阈值中，α决定模式 1 的开启条件，是根据业界锂离子电池不一致性的开启条件设定的，模式 1 的均衡速度较快，故α应偏大，为 0.010 V；β决定是否进行模式 2 的均衡，当$\Delta U_2>\beta$时，进行模式 2 的均衡，故其值应较α稍小，为 0.008 V；γ决定是否进行模式 3 的均衡，当$\Delta U_3>\gamma$时，进行模式 3 的均衡，由于电压传感器的采样精度一般是 0.005 V，故其值应在 0.005 V 上下浮动。经过分析及验证可知，当α、β、γ分别为 0.010、0.008、0.005 V 时效果最佳，故以此为 3 个阈值的取值。

3　均衡参数设计

均衡参数的设置较为复杂，涉及占空比、电感、

变压器匝比等多个关键因素。考虑到锂离子电池在充放电过程中的电流限制，需先明确均衡电路所能承受的最大电流负载能力，这对保障电路的稳定运行具有重要意义。随后，基于此电流逐步推导出电路的其他参数。本文以模式 1 为例，阐述其参数计算的具体流程。

本文对模式 1 下的占空比进行分析。该模式下，T 型变压器的 W_1 和 W_3 构成 1 个反激变换器(理想状态下)，W_1 与 W_3 分别为一次侧绕组和二次侧绕组，U_D 为每个开关管的导通压降。当 $0<t\leqslant D_1T$ 时，高电压电池放电给 W_1，使其吸收能量，此时 i_{w1}、i_{w3} 分别为

$$\begin{cases} i_{w1}=\dfrac{U_{w1}-2U_D}{L_{w1}}t \\ i_{w3}=0 \end{cases} \qquad 0<t\leqslant D_1T \tag{1}$$

式中：U_{w1} 为 W_1 在模式 1 下的电压；L_{w1} 为 W_1 的励磁电感。当 $t=D_1T$ 时，W_1 的电流会达到其最大值 $I_{w1,max}$，具体为

$$I_{w1,max}=\frac{(U_{w1}-2U_D)D_1T}{L_{w1}} \tag{2}$$

$$f=\frac{1}{T} \tag{3}$$

当 $D_1T<t\leqslant T$ 时，变压器通过 W_3 释放能量，此时 i_{w1}、i_{w3} 分别为

$$\begin{cases} i_{w1}=0 \\ i_{w3}=n_1I_{w1,max}-\dfrac{U_{w3}-2U_D}{L_{w3}}(t-D_1T) \end{cases} \qquad D_1<t\leqslant T \tag{4}$$

式中：U_{w3} 为 W_3 在模式 1 下的电压；L_{w3} 为 W_3 的电感。

为防止均衡电路在工作过程中出现磁心饱和，电路始终工作在 DCM 下，因此当 $t=T$ 时，i_{w3} 应小于 0。结合式(1)~式(4)可得

$$i_{w3}=n_1\frac{U_{w1}-2U_D}{L_{w1}}D_1T-\frac{U_{w3}-2U_D}{L_{w3}}(1-D_1)T<0 \tag{5}$$

已知 L_{w1} 与 L_{w3} 之间的关系为

$$L_{w1}=n_1^2L_{w3} \tag{6}$$

根据式(4)和式(5)可得 D_1 为

$$D_1<1\Big/\left[\frac{U_{w1}-2U_D}{n_1(U_{w3}-2U_D)}+1\right] \tag{7}$$

以上是模式 1 的参数计算过程，以此为例，可推导出 D_2 和 D_3 的计算公式分别为

$$D_2<1\Big/\left[\frac{U'_{w1}-2U_D}{n_2(U_{w2}-3U_D)}+1\right] \tag{8}$$

$$D_3<1\Big/\left[\frac{U''_{w1}-2U_D}{n_1(U'_{w3}-2U_D)}+1\right] \tag{9}$$

式中：U'_{w1} 与 U_{w2} 分别为 W_1 和 W_2 在模式 2 下的电压；U''_{w1} 与 U'_{w3} 分别为 W_1 和 W_3 在模式 3 下的电压。根据式(2)和式(3)可以得出 L_{w1}，以此类推，可以得出 L_{w2} 和 L_{w3} 分别为

$$L_{w1}=\frac{(U_{w1}-2U_D)D_1}{I_{w1,max}f} \tag{10}$$

$$L_{w2}=\frac{L_{w1}}{n_2^2} \tag{11}$$

$$L_{w3}=\frac{L_{w1}}{n_1^2} \tag{12}$$

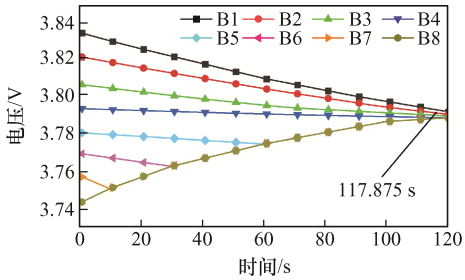
由于过高的反激电压可能会带来器件耐压要求提高、电磁干扰增强、变压器绕组绝缘要求提高造成的设计难度和成本增加等不利因素，因此考虑到均衡电流大小、能量传输效率及电路体积等因素，本文最终选取变压器绕组匝比为 1:2:1。

4 仿真分析

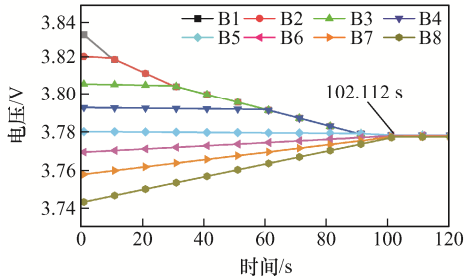
为证明所提多模式均衡拓扑及控制策略的优势，本文构建了多种仿真电路模型，包括变压器式部分单体-单体均衡拓扑[8]、单体-整体均衡拓扑[5]、单体-单体均衡拓扑[14]，以及本文提出的新型拓扑结构的 8 节锂离子电池模型。通过对比分析，评估这些模型在均衡速度上的表现。为了防止在能量传输过程中变压器磁心饱和，整个电路始终工作在 DCM 下，并选取电池的端电压作为均衡变量。具

体的参数设置为：电池的额定电压为3.7 V，容量为3.6 A·h；均衡电路的开关频率设为10 kHz，其中均衡电路 3 个工作模式的 α、β、γ 分别为 0.010、0.008、0.005 V；根据式(7)~式(9)可以得出各个工作模式下的 D_1、D_2、D_3 分别为 0.5、0.8、0.1；变压器各个绕组的 L_{w1}、L_{w2} 和 L_{w3} 分别为 96、384 和 96 μH；变压器的变比为 1:2:1；B_1~B_8 的初始电压分别为 3.835、3.822、3.807、3.794、3.781、3.770、3.758、3.743 V。

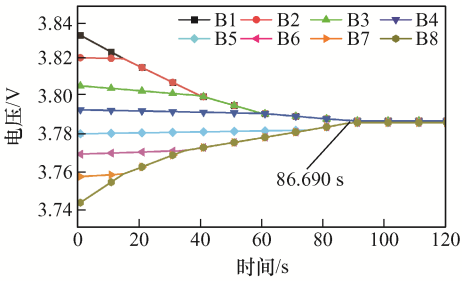
均衡时间的长短也是衡量均衡效果的标准之一。为验证所提多模式均衡拓扑在均衡速度上的优势，本文将变压器式部分单体-单体均衡拓扑、变压器式单体-整体均衡拓扑、变压器式单体-单体均衡拓扑及本文方案分别在静置、充电及放电 3 种不同工况下进行仿真实验，所得仿真结果如图 9~图 11 所示。由图可知：静置工况下，4 种均衡拓扑的均衡时间依次为 117.875、102.112、86.690 及 68.327 s，对比结果显示，本文方案的均衡时间相较于部分单体-单体、单体-整体、单体-单体均衡拓扑分别缩短了 42.0%、33.1%和 21.2%；充电工况下，4 者的均衡时间分别为 111.234、98.973、92.381 和 68.546 s，本文方案的均衡时间相对于



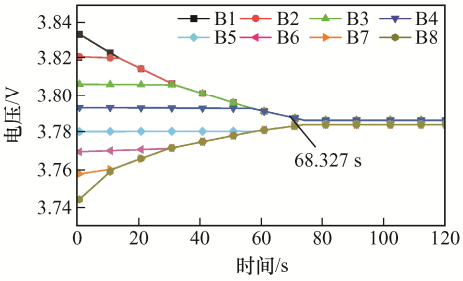
(a) 部分单体-单体均衡拓扑



(b) 单体-整体均衡拓扑



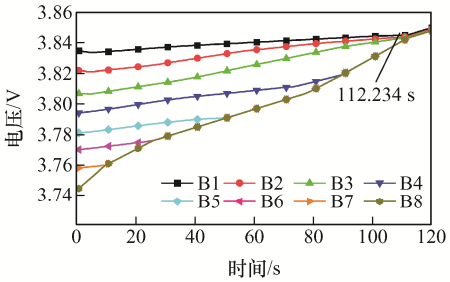
(c) 单体-单体均衡拓扑



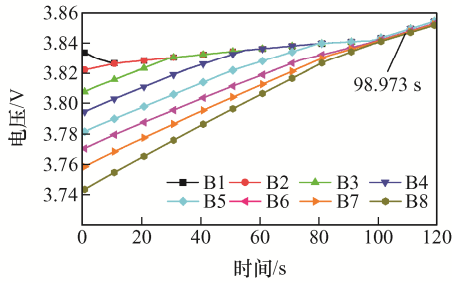
(d) 本文方案

图 9　静置工况均衡速度仿真曲线

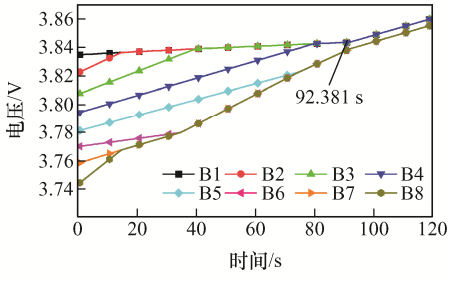
Fig. 9 Simulation curves of balancing speed under standby conditions



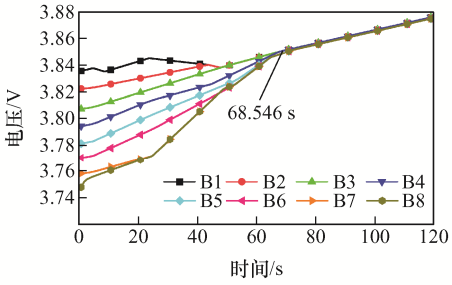
(a) 部分单体-单体均衡拓扑



(b) 单体-整体均衡拓扑



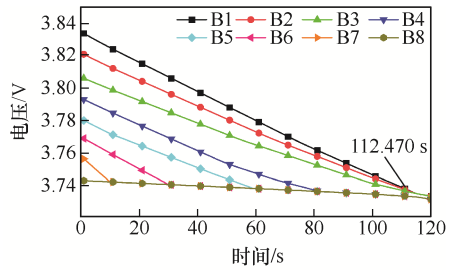
(c) 单体-单体均衡拓扑



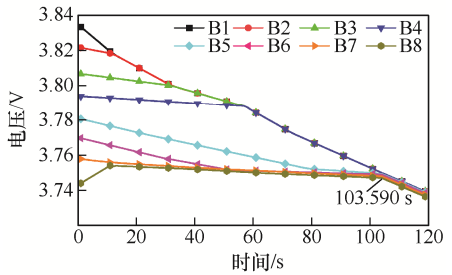
(d) 本文方案

图 10 充电工况均衡速度仿真曲线

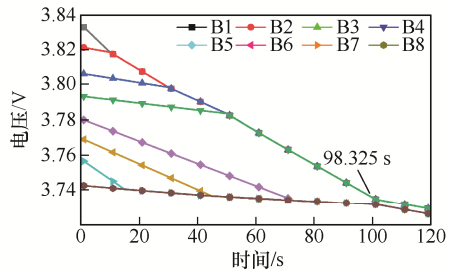
Fig. 10 Simulation curves of balancing speed under charging conditions



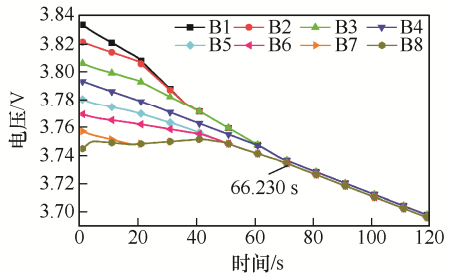
(a) 部分单体-单体均衡拓扑



(b) 单体-整体均衡拓扑



(c) 单体-单体均衡拓扑



(d) 本文方案

图 11 放电工况均衡速度仿真曲线

Fig. 11 Simulation curves of balancing speed under discharging conditions

部分单体-单体、单体-整体、单体-单体均衡拓扑分别缩短了 38.4%、30.7%、25.8%；放电工况下，4 者的均衡时间分别为 112.470、103.590、98.325 和 66.230 s，本文方案的均衡时间相对于部分单体-单体，单体-整体、单体-单体均衡拓扑分别缩短了 41.1%、36.1%、32.6%，具体结果见表 1。

表 1 8 节电池均衡仿真数据对比

Tab. 1 Comparison of simulation data for 8-cell battery balancing

单位：s

拓扑类型	静置工况达到均衡时间	充电工况达到均衡时间	放电工况达到均衡时间
部分单体-单体	117.875	112.234	112.470
单体-整体	102.112	98.973	103.590
单体-单体	86.690	92.381	98.325
本文方案	68.327	68.546	66.230

5 结论

针对储能系统中单体电池电压不均衡的难题，本研究提出了一种新型的锂离子电池组多模式均衡控制方案，基于 T 型变压器设计，该方案具备以下特点。

(1)均衡拓扑可支持单体-整体、单体-单体以及部分单体-单体 3 种工作模式；通过一个 T 型变压器同时实现能量的存储与转移。相较于传统的多绕组变压器，本文所提方案不仅有效缩小了体积，还简化了拓扑结构，提高了系统的控制便捷性。

(2)针对均衡拓扑设计了相对应的多工作模式交错均衡控制策略，可以使拓扑电路根据工作

过程中均衡精度的需要动态调整，并实时切换不同的工作模式，确保电路始终处于最优运行状态，从而实现储能电池组快速且高效的均衡过程。

对储能电池组在静置、充电及放电这 3 种不同工况下的性能表现进行了深入的仿真研究，并将结果与其他单一模式下的仿真效果进行了对比分析。研究结果表明，本文方案在均衡速度方面展现出了显著的优越性。

参考文献：

[1] 张旭阳, 许锋, 周华, 等. 串联电池组模块化分层主动均衡方法研究[J]. 电源学报, 2026, 24(2): 136-144.
Zhang Xuyang, Xu Feng, Zhou Hua, et al. Research on modular layered active equalization method for series battery pack [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(2): 136-144. (in Chinese)

[2] 李艳波, 马海涛, 程绍峰, 等. 结合 Cuk 电路与单电感电路的电池均衡分层研究[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 199-206.
Li Yanbo, Ma Haitao, Cheng Shaofeng, et al. Balanced stratification of batteries combining Cuk circuit and single-inductor circuit [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 199-206. (in Chinese)

[3] 郑征, 王肖帅, 李斌, 等. 基于三绕组变压器的锂电池组自适应交错控制均衡方案[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(4): 1131-1140.
Zheng Zheng, Wang Xiaoshuai, Li Bin, et al. Adaptive interleaved control equalization for lithium-ion battery packs based on three-winding transformers [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(4): 1131-1140. (in Chinese)

[4] Tyrpekl M, Zavrel M, Kindl V. Comparison of active and passive battery balancing [C]// 2022 20th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME). Pilsen, Czech Republic, 2022: 1-6.

[5] Lin Changhua, Lee Y L. Design and verification of active balancing circuit for battery management system based on a bidirectional converter [C]// 2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia). Jeju Island, Korea, Republic of, 2023: 3086-3091.

[6] Zeng Jing, Zou Runmin, Liu Fulin. A fusion method of series-connected batteries state-of-health estimation and balancing strategy applied to multi-cell-to-multi-cell equalizer [C]// 2022 4th International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). Beijing, China, 2023: 1862-1867.

[7] Qi Xueqing, Li Zhikang, Qin Haojun, et al. Multi-port energy router-based battery pack active balance control system [C]// IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Brussels, Belgium, 2022: 1-6.

[8] Abareshi M, Sadeghi E, Naghibzadeh Y, et al. A fast active cell balancing strategy for lithium-ion battery packs [C]// 2023 IEEE 14th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). Montreal, QC, Canada, 2023: 1-5.

[9] Liu Guangjun, Ma Liyang, Wang Yutao, et al. Hierarchical equalization scheme for retired lithium-ion battery packs based on inductor-flyback transformer [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 100: 113505.

[10] Selvaraj V, Vairavasundaram I. Flyback converter employed non-dissipative cell equalization in electric vehicle lithium-ion batteries [J]. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, 2023, 5: 100278.

[11] Liu Xiaofei, Pang Hui, Geng Yuanfei. Dual-layer inductor active equalization control for series-connected lithium-ion batteries based on SOC estimation [J]. Electronics, 2022, 11(8): 1169.

[12] 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.

[13] Ye Yuanmao, Cheng K W E. Modeling and analysis of series-parallel switched-capacitor voltage equalizer for

battery/supercapacitor strings [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 977-983.

[14] Yu Yanqi, Saasaa R, Ali Khan A, et al. A series resonant energy storage cell voltage balancing circuit [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 3151-3161.

[15] Ouyang Quan, Chen Jian, Zheng Jian, et al. SOC estimation-based quasi-sliding mode control for cell balancing in lithium-ion battery packs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3427-3436.

[16] Ye Yuanmao, Lin Jingxiong, Li Zhenpeng, et al. Double-tiered cell balancing system with switched-capacitor and switched-inductor [J]. IEEE Access, 2019, 7: 183356-183364.



周志鹏

作者简介：

周志鹏(2001—)，男，硕士研究生。研究方向：锂电池均衡技术。E-mail：2408476165@qq.com。

魏业文(1987—)，男，博士，讲师。研究方向：新能源并网和消纳电网无功补偿。E-mail：weiyewen8@126.com。

郭亮(1987—)，男，通信作者，博士，实验师。研究方向：电力系统自动化。E-mail：guoliang2344@163.com。

张杰(1998—)女，硕士研究生。研究方向：退役锂电池均衡技术。E-mail：lee_nin chilema@163.com。

余炜徐(2001—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源微电网。E-mail：ywx5811@163.com。

张思佳(1999—)，女，硕士研究生。研究方向：光伏故障检测。E-mail：2624409636@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)



公益广告来源：重庆市人民政府网