DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.39 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

应用于串联储能电池的具有电压自动均衡能力的变换器

杨晓光[1,2]，李家宝[1,2]，聂宝鑫[3]，芦宇杰[1,2]，李学彪[1,2]
(1.省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学)，天津 300130；2.河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学)，天津 300130；3.国网北京密云供电公司，北京 101500)

摘要：传统的储能系统通常包含充/放电变换器和均衡器，二者相互独立。为降低系统复杂度和减少器件数量，提出了一种应用于储能系统的变换器。该变换器将电压均衡器集成到充/放电变换器中，无需配置电压测量电路便可实现串联电池之间的自动电压均衡，减少了组件数量，简化了系统结构。所提变换器有2种类型：类型A只包含1个有源开关，1个n绕组电感和n个二极管；类型B使用n个有源开关替代类型A中的n个二极管，以提高电路的效率。类型A和类型B变换器之间的异同，与异步和同步Buck变换器类似，主要对类型B进行了分析并试制了样机。实验结果表明，所提变换器具有良好的电压均衡特性。

关键词：均衡；均衡电路；均衡器；多绕组变压器；多绕组电感

Converter with Automatic Voltage Balancing Capability for Series-connected Energy Storage Cells

YANG Xiaoguang[1,2], LI Jiabao[1,2], NIE Baoxin[3], LU Yujie[1,2], LI Xuebiao[1,2]
(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. State Grid Beijing Miyun Electric Power Supply Company, Beijing 101500, China)

Abstract: Traditional energy storage systems typically include a charging/discharging converter and an equalizer, which are independent of each other. To reduce system complexity and the number of components, a converter for energy storage systems is proposed, which integrates an equalizer into a charge/discharge converter, and achieves automatic voltage balancing between series-connected batteries without the need for voltage measurement circuits, thereby reducing components and simplifying the system. There are two types of proposed converters: type A contains only one active switch, one n-winding inductor and n diodes; type B replaces n diodes in type A with n active switches to improve the efficiency of the circuit. The similarities and differences between type A and type B converter are comparable to those between the asynchronous and the synchronous Buck converter, type B is mainly analyzed and developed a prototype. The experimental results indicate that the proposed converter has good voltage balancing characteristics.

Keywords: Balancing; equalization circuit; equalizer; multi-winding transformer; multi-winding inductor

从各类电压等级较低的小型储能系统[1-2]，到如电动汽车[3]、不间断电源[4]和新能源发电[5-6]等大型储能系统，以锂离子电池为代表的二次电池具有广泛的应用场景。由于储能单体的额定电压较低，因此需要将足够多的储能单体串联，以满足实际系统的电压等级要求。在储能系统反复充/放电过程中，由于储能单体在容量、内阻和自放电率等方面的不一致以及环境温度的差异，串联储能电池单体之间的不均衡程度将逐渐扩大[7]。如果不采取

收稿日期：2024-07-25；**修回日期**：2024-09-16；**录用日期**：2024-09-27；**网络首发日期**：2024-10-14

均衡措施，会导致容量较低的单体反复出现过充/过放的恶性循环现象，这不仅影响这些单体的使用寿命，还会减小整个系统的可用容量，甚至引发火灾或爆炸等危险事故。因此，储能系统中需要配置均衡电路[8]。

均衡技术通常分为被动型和主动型 2 类，前者利用电阻来耗散电池单体中的多余电荷，而后者利用电容、电感和变压器等来实现电池单体之间或电池单体和电池组之间的电荷转移。被动型均衡技术具有低复杂度、低成本和易实施等优势，因而应用广泛。但这一技术的缺点也较为明显，通过耗散电池中的电荷不仅会导致电池组的可用容量减小，还会增加电池组热管理所带来的问题；而且在很多实际应用中，这一技术的均衡效果也难以令用户满意。

较之被动型均衡技术，主动型均衡技术虽然具有效率高和均衡能力强的优势，但其复杂度和成本等方面的相对劣势给其应用推广造成了困难。因此，即使目前已经提出了很多类型的主动均衡技术，但被动均衡技术依然在实际应用中占主导地位。不同的均衡技术在体积、成本、复杂度、均衡速度与效率等方面各有优劣，详细的对比分析可参见文献[9-13]。

一般均衡路径越灵活，均衡速度越快，均衡效果越好。一类均衡技术追求均衡路径灵活性，如文献[14-16]中的方案实现了任意电池单体之间的能量转移，文献[17-19]中的方案实现了任意电池单体与模组之间的能量转移。但这类均衡路径灵活的技术，其电路与控制方法非常复杂。另一类均衡技术不追求均衡路径的灵活性，能量只在相邻的电池单体之间传递，如基于 Buck-Boost 变换器的均衡电路[20-21]和基于开关电容变换器的均衡电路[22-23]，其显著优势是相邻单体之间的均衡电路不仅简单、效率高，并且具有很强的拓展性。然而，随着串联电池数量的增多，均衡路径将变长，用于均衡的能量将消耗在传输路径上，进而导致均衡效率快速降低。

均衡技术通过变压器在储能单体和电池组之间进行能量转移，能够实现电池单体之间的电压自动均衡，且其电路和控制方法简单，易于实施[12,24]。这类技术中最具代表性的是反激式多绕组变压器均衡电路[25]和正激式多绕组变压器均衡电路[26]。

如前所述，尽管主动型均衡技术较之被动均型具有效率高和均衡能力强等优势，但其复杂度和成本等方面的相对劣势限制了其广泛应用。较之其他主动型均衡技术，基于多绕组变压器的均衡技术可实现低复杂度、低成本以及易实施的均衡技术方案。此外，由于变压器的隔离特性，这种均衡技术也具有较高的可靠性，因而具有良好的应用前景。虽然其最大的缺点是扩展性较差，但其可通过模块化技术有效克服这一缺点[27-30]。此外，基于多绕组变压器的均衡电路只包含 1 个磁性元件，而大多数变换器也包含磁性元件，这为磁性元件的复用提供了基础。磁性元件的复用可带来系统的简化。

在储能系统中，均衡电路和充/放电电路通常是相互独立的系统。通过器件的复用将均衡电路集成到充/放电电路中，可以减少器件的数量，降低系统的复杂度、成本，减小系统的体积，且不会对电路的其他性能产生显著影响[29,31-37]。文献[33]通过复用 Buck 电路的电感将基于多绕组变压器的均衡电路与充电电路集成；文献[24,38-39]采用了类似的思路，通过复用充/放电变换器的电感将基于多绕组变压器的均衡电路与充/放电变换器集成；文献[29]将这一技术进行了拓展，通过模块化技术使之能够应用于更多的电池组。

对于电池管理系统，常采用电压与荷电状态 SOC(state of charge)作为均衡目标。较之电压均衡，在能够实现准确 SOC 估计的前提下，基于 SOC 的均衡更能实现对电池组容量的充分利用。然而，电池的 SOC 无法直接测量，只能在电池的使用过程中实时估算，因此估算的准确程度将直接影响最终的均衡效果。尽管目前已经提出了多种估算方法，但是受环境温度、自放电率和电池内阻等因素的影响，准确估计 SOC 比较困难，这限制了 SOC 均衡的实际应用。在实际应用中，由于电压的测量较为方便，且电压可以提供清晰的电池充/放电安全边界，避免过度充/放电，因此基于电压的均衡技术

被广泛应用。有关电压均衡与 SOC 均衡更为详细的分析可参见文献[9,13,40,41]。

本文提出了一种应用于串联储能电池系统的变换器，该变换器将均衡电路集成到充/放电电路中，无需配置电池单体的电压测量电路便可实现串联电池单体之间的电压自动均衡。较之同类技术，该变换器电路具有所用器件少、系统的复杂度低以及成本低的优势。

1　电路与工作原理

本文提出的具有电压自动均衡能力的变换器如图 1 所示，该变换器包含 2 个类型：类型 A 与类型 B。类型 A 变换器如图 1(a)所示，其中，S_0 为有源开关，B_i 为第 i 个电池单体，i=1, 2,…, n，n 为串联电池单体的数量。每一个电池单体 B_i 与一个二极管 D_i 以及一个 n 绕组的第 i 个绕组电感 L_i 相连接。为了便于分析，本文假设每个绕组的匝数完全相同，每个绕组所对应的 L_i 均等于励磁电感 L_m。类型 B 变换器如图 1(b)所示，其与类型 A 变换器的主要区别是将图 1(a)中的 D_i 都换成有源开关 S_i。

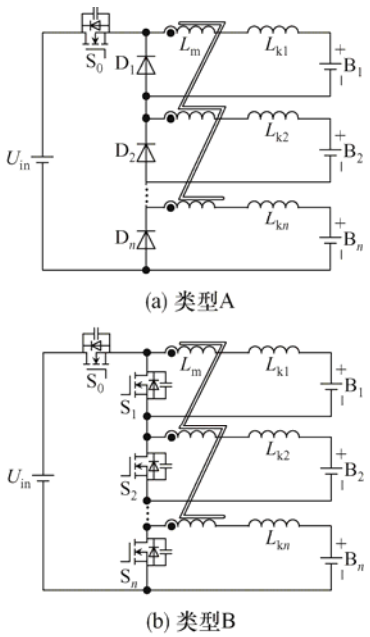


图 1　具有电压自动均衡能力的变换器

Fig. 1 Converter with automatic voltage balancing capability

本文所提出的变换器采用了多绕组耦合电感，这一技术的缺点是扩展性较差。当串联电池单体数量增多时，多绕组电感的制作复杂度、成本和体积将显著增加。如前所述，基于多绕组变压器均衡技术扩展性较差的缺点可以通过模块化技术有效克服[27-30]；同理，本文提出的技术方案也可通过模块化技术来克服。

类型 A 变换器控制简单，但效率较低，且只能对电池充电，是单向变换器；而类型 B 变换器控制略微复杂，但效率高，可实现能量的双向传输。类型A变换器与类型B变换器的关系类似于异步和同步 Buck。类型 B 变换器的分析与实现比类型 A 变换器复杂，因此本文主要对类型B变换器进行研究。

图 1(b)中的电路在充电过程中，S_0 超前于 S_i 开通；而在放电过程中 S_0 滞后于 S_i 开通。由于充电过程与放电过程的分析类似，因此本文主要分析充电过程。此外，本文只对电流连续模式进行分析。

图2给出了类型B变换器对电池充电过程的关键波形，与图 2 对应的工作模态如图 3 所示。其中模态 1 和模态 2(t_0-t_1 和 t_1-t_2)流过电池单体的电流 $i_{B_i}(t)$ 均相同，与电池单体电压无关；而在模态 3、模态 4 和模态 5(t_2-t_3、t_3-t_4 和 t_4-t_0)中 $i_{B_i}(t)$ 受其端电压的影响，电压越大，电流越小。同理，模态 1 和模态 2(t_0-t_1 和 t_1-t_2)的均衡电流 $\Delta i_{B_i}(t)$ 均等于 0；而在模态 3、模态 4 和模态 5(t_2-t_3、t_3-t_4 和 t_4-t_0)中 $\Delta i_{B_i}(t)$ 不同。图中：D 为 S_0 的占空比；T_s 为变换器的开

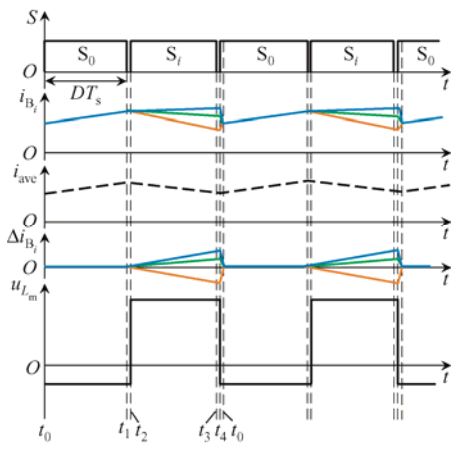


图 2　关键波形

Fig. 2 Key waveforms

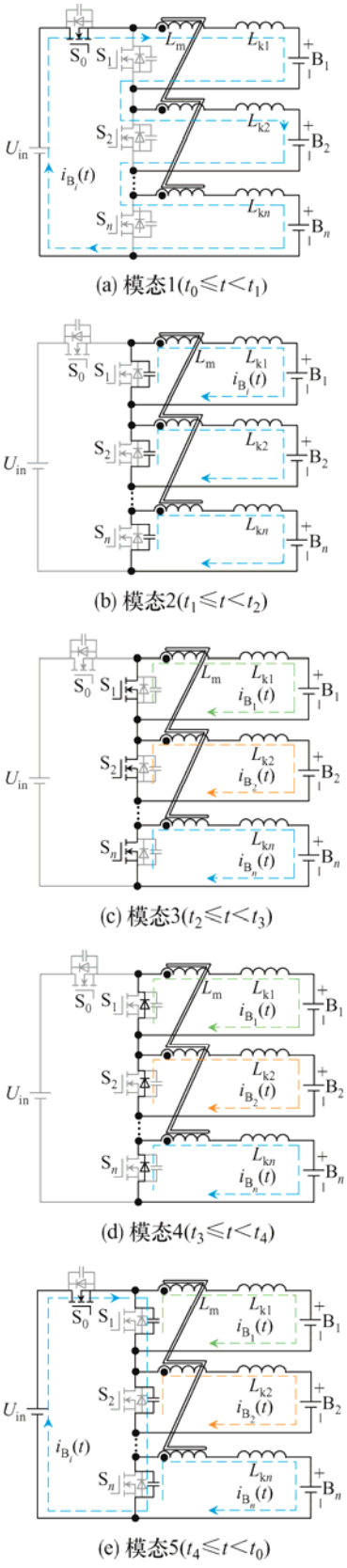


图 3 充电过程的工作模态

Fig. 3 Working modes of the charging process

关周期；$u_{L_m}(t)$为砺磁电感两端的电压；$i_{B_i}(t)$为流过第 i 个电池单体 B_i的电流；$i_{ave}(t)$为$i_{B_i}(t)$的平均值，其表达式为

$$i_{ave}(t)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}i_{B_i}(t) \tag{1}$$

流过B_i的电流与$i_{ave}(t)$的差值用均衡电流$\Delta i_{B_i}(t)$表示，即

$$\Delta i_{B_i}(t)=i_{B_i}(t)-i_{ave}(t) \tag{2}$$

当电池组各个单体的电压处于均衡状态时，$\Delta i_{B_i}(t)=0$，即 $i_{ave}(t)=i_{B_i}(t)$。

模态 1($t_0 \leqslant t < t_1$)：S_1~S_n处于关断状态，S_0处于开通状态。流过电感的电流线性增加，流过 B_i的电流 $i_{B_i}(t)$可表示为

$$i_{B_i}(t)=i_{B_i}(t_0)+\frac{U_{in}-\sum_{j=1}^{n}U_{B_j}}{n^2L_m+\sum_{j=1}^{n}L_{kj}}(t-t_0) \tag{3}$$

式中：U_{in}为输入端电压；U_{B_j}为第 j 个电池单体的电压；L_{kj}为第 j 个绕组的漏感。每个绕组所对应的L_i的电压可表示为

$$U_{L_m,1}=-\frac{nL_m\left(U_{in}-\sum_{j=1}^{n}U_{B_j}\right)}{n^2L_m+\sum_{j=1}^{n}L_{kj}} \tag{4}$$

模态 2($t_1 \leqslant t < t_2$)：在 t_1时刻 S_0关断，用 C_i表示 S_i的寄生电容与其他杂散电容之和。L_i处于续流状态，对 C_i放电；电容两端电压下降到 0 后充电，直至 S_i的体二极管 D_i导通，这一过程所需时间 Δt为

$$\Delta t=\frac{C_i(U_{L_m,1}+U_{B_i}+U_{D_i})}{i_{B_i}(t_1)} \tag{5}$$

D_i导通后可以实现 S_i的零电压开通 ZVS(zero voltage switching)，因此死区时间 t_d应大于Δt。由于这一阶段的持续时间极短，故可忽略$i_{B_i}(t)$在此阶段的变化。

模态 3($t_2 \leqslant t < t_3$)：在 t_2时刻 S_1~S_n开通，由于各个绕组之间相互耦合，流入各个电池单体的能量将重新分配，电压低的电池单体将流过更大的电

流，这一阶段的等效电路如图 4 所示。

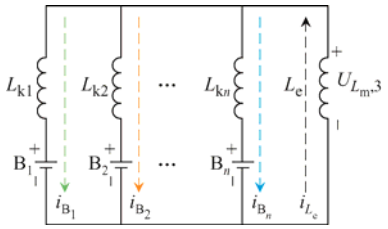


图 4　模态 3 的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of mode 3

将 L_i 两端的电压表示为 $U_{L_m,3}$，则 $i_{B_i}(t)$ 可表示为

$$i_{B_i}(t)=i_{B_i}(t_2)+\frac{U_{L_m,3}-U_{B_i}}{L_{ki}}(t-t_2) \tag{6}$$

流过电感 L_e 的电流为

$$i_{L_e}(t)=ni_{B_i}(t_2)-\frac{U_{L_m,3}}{L_m}(t-t_2) \tag{7}$$

根据基尔霍夫电流定律可得

$$i_{L_e}(t)=\sum_{j=1}^{n}i_{B_j}(t) \tag{8}$$

将式(6)与式(7)代入式(8)可得

$$U_{L_m,3}=\frac{\sum_{j=1}^{n}(U_{B_j}L_m/L_{kj})}{1+\sum_{j=1}^{n}(L_m/L_{kj})} \tag{9}$$

由于 $L_m \gg L_{kj}$，由式(9)可知，当各个电池单体电压相等时，$U_{L_m,3}$ 近似等于各个电池单体的电压。

模态 4($t_3 \leqslant t < t_4$)：在 t_3 时刻关断 S_1~S_n，经过 t_d，在 t_4 时刻开通 S_0。

模态 5($t_4 \leqslant t < t_0$)：S_0 开通之后，经过短暂的过渡状态，流过各个绕组的电流在 t_0 时刻达到一致。

因为模态 2、模态 4 和模态 5 的持续时间较短，所以可忽略其对能量传输的影响。由图 1~图 3 可知，类型 A 变换器没有模态 2、模态 4 与模态 5，只有模态 1 和模态 3。

2　稳态特性分析

2.1　输入输出特性

忽略模态 2、模态 4 与模态 5 对能量传输的影响，根据伏秒平衡可得

$$\left(U_{in}-\sum_{j=1}^{n}U_{B_j}\right)DT_s=\sum_{j=1}^{n}U_{B_j}(1-D)T_s \tag{10}$$

由式(10)可得

$$\sum_{j=1}^{n}U_{B_j}=U_{in}D \tag{11}$$

式(11)表明，所提出的电路在充电状态的电压增益与 Buck 电路的电压增益一致。

由于类型 A 变换器没有模态 2、模态 4 与模态 5，而式(11)的推导过程忽略了这 3 个模态，因此式(11)所给出的输入输出特性也适用于类型 A 变换器。

2.2　均衡特性

由式(1)、式(2)与式(8)可得处于模态 3 时均衡电流的表达式为

$$\Delta i_{B_i}(t)=i_{B_i}(t)-i_{L_e}(t)/n \tag{12}$$

将式(6)与式(7)代入式(12)可得

$$\Delta i_{B_i}(t)=\frac{U_{L_m,3}L_{ki}+nL_m(U_{L_m,3}-U_{B_i})}{nL_mL_{ki}}\times(t-t_2) \tag{13}$$

由于 $nL_m \gg L_{ki}$，可得

$$\Delta i_{B_i}(t)=\frac{U_{L_m,3}-U_{B_i}}{L_{ki}}\times(t-t_2) \tag{14}$$

由式(14)可得，1 个周期内均衡电流的平均值也可表示为

$$\Delta I_{B_i}=\frac{U_{L_m,3}-U_{B_i}}{2L_{ki}}\times(1-D)^2T_s \tag{15}$$

依据式(9)和式(15)，并考虑到 $L_m \gg L_{ki}$，可得

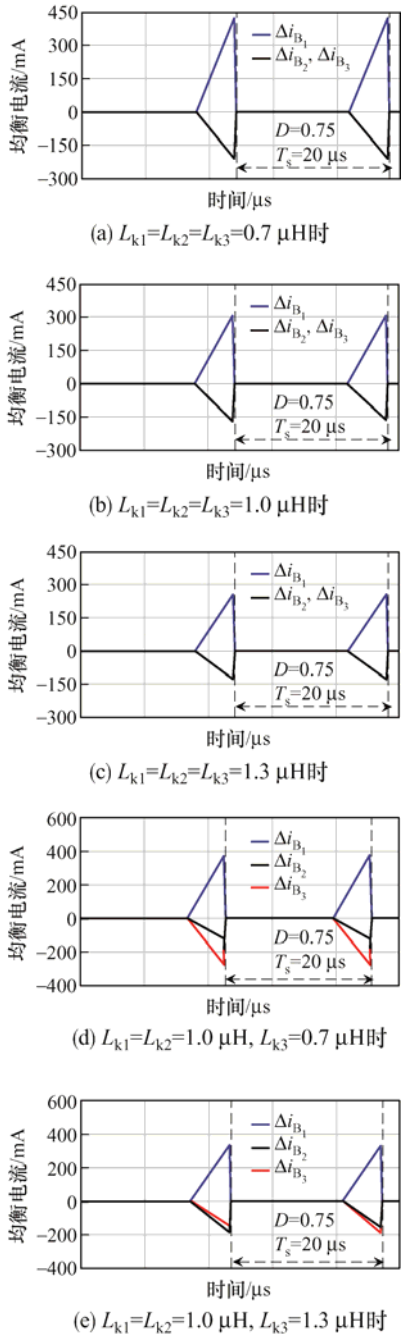
$$\Delta I_{B_i}=\left(\sum_{j=1}^{n}\frac{U_{B_j}-U_{B_i}}{L_{kj}}\right)\times(1-D)^2T_s\Big/2\sum_{j=1}^{n}\frac{L_{ki}}{L_{kj}} \tag{16}$$

由式(16)可知：①漏感的不一致会影响均衡电流的大小，但是只要单体电压不一致，所提出的电路就会自动产生均衡电流；②电池单体电压均衡的速度依赖于均衡电流的大小，而均衡电流的大小依赖于电池单体电压之间的差异，当所有电池单体的电压相同时，均衡电流为 0，与充电电流无关；③ D 越大均衡电流越小；④由于 $f_s=1/T_s$，故通过调节开关频率 f_s 可以控制均衡电流的大小。

由上述分析可知，类型 B 变换器的均衡特性主要由模态 3 决定，因此式(16)给出的均衡特性也适

用于类型 A。

为了进一步分析漏感对均衡电流的影响，本文进行了仿真研究。仿真参数设置为 U_{in}=15 V，L_m=13 μH，T_s=20 μs，D=0.75，U_{B_1}=3.8 V，U_{B_2}=U_{B_3}=3.9 V。不同漏感设置条件对均衡电流的影响结果如图 5 所示，图中电流的正值表示流入电池的均衡电流。由图 5 可知：①均衡电流只出现在续流阶段，这一结果与图 2 相符；②漏感越大，均衡电流越小，与式(16)相符；③漏感的不一致会影响均衡电流的大小，图中 30%的漏感变化已经对均衡电流的峰值产生了明显的影响。



(a) L_{k1}=L_{k2}=L_{k3}=0.7 μH时

(b) L_{k1}=L_{k2}=L_{k3}=1.0 μH时

(c) L_{k1}=L_{k2}=L_{k3}=1.3 μH时

(d) L_{k1}=L_{k2}=1.0 μH, L_{k3}=0.7 μH时

(e) L_{k1}=L_{k2}=1.0 μH, L_{k3}=1.3 μH时

图 5 不同漏感设置条件对均衡电流的影响结果

Fig. 5 Results of different leakage inductance setting on balancing current

3 实验验证

为验证均衡电路的工作原理并测试电路特性，本文制作了类型 B 的实验样机，测试内容如下：

(1)在不同条件下测试充电电流波形，以验证图 2 中的关键波形和所提电路具有的电压自动均衡特性；

(2)测试电路的输入输出特性，以验证式(11)所给电路的电压增益；

(3)测试电路的电压均衡效果。

3.1 实验平台与参数设计

为了简化实验过程，本文选取 3 个型号均为 NCR21700T 的三元锂离子电池进行实验验证，样机器件和参数见表 1，实验平台实物如图 6 所示。

表 1 样机的器件和参数

Tab. 1 Components and parameters for the prototype

器件	型号/参数
开关 S_0~S_3	STP220N6F7
输出电容 C_0/μF	66
励磁电感 L_m/μH	12.2
开关频率 f_s/kHz	50~250

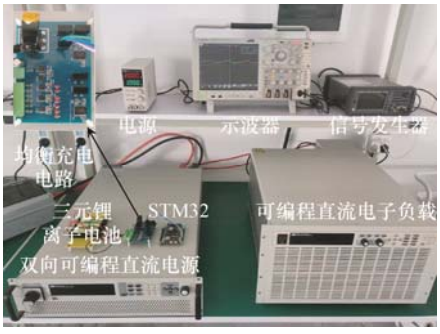


图 6 实验平台实物图

Fig. 6 Physical photograph of experimental platform

虽然所提出的类型 B 变换器有 n+1 个有源开关，但只需提供 1 对互补的脉冲宽度调制 PWM

(pulse width modulation)控制信号，如图 7 所示。由于本文所提变换器无需配置电池单体的电压测量电路便可实现串联电池单体之间均压自动均衡，因此只需对模组的电压进行检测。

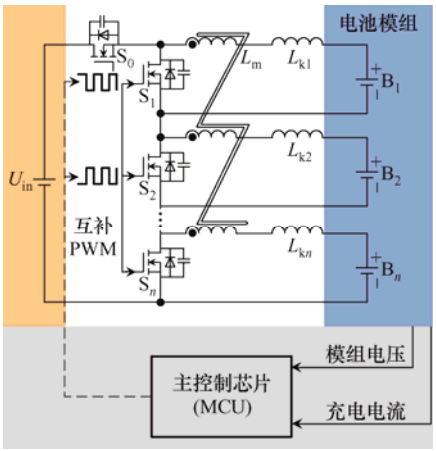


图 7　变换器控制框图

Fig. 7 Control block diagram of the converter

3.2　充电电流波形与均衡电流

分别在电池单体电压不均衡条件和均衡条件下对所提电路进行测试，测试过程中的 U_{in} 和各个电池单体的电压见表 2。

表 2　输入电压和电池单体的电压

Tab. 2 Input voltage and voltage of battery cells

	U_{in}/V	U_{B_1}/V	U_{B_2}/V	U_{B_3}/V
实验 1	19.95	3.886	3.886	3.784
实验 2	19.95	3.886	3.886	3.910
实验 3	19.95	3.890	3.890	3.890

实验 1~3 的充电电流波形如图 8 所示。实验 1 中，电池电压不均衡，$U_{B_1}=U_{B_2}>U_{B_3}$，在续流阶段，流过 3 个电池单体的电流平均值分别为 I_{ave1}=I_{ave2}=1.56 A、I_{ave3}=1.67 A；实验 2 中，电池电压也不均衡，$U_{B_1}=U_{B_2}<U_{B_3}$，在续流阶段，I_{ave1}=I_{ave2}=1.46 A、I_{ave3}=1.42 A；实验 3 中，电池电压均衡，$U_{B_1}=U_{B_2}=U_{B_3}$，在续流阶段，I_{ave1}=I_{ave2}=I_{ave3}=1.43 A。

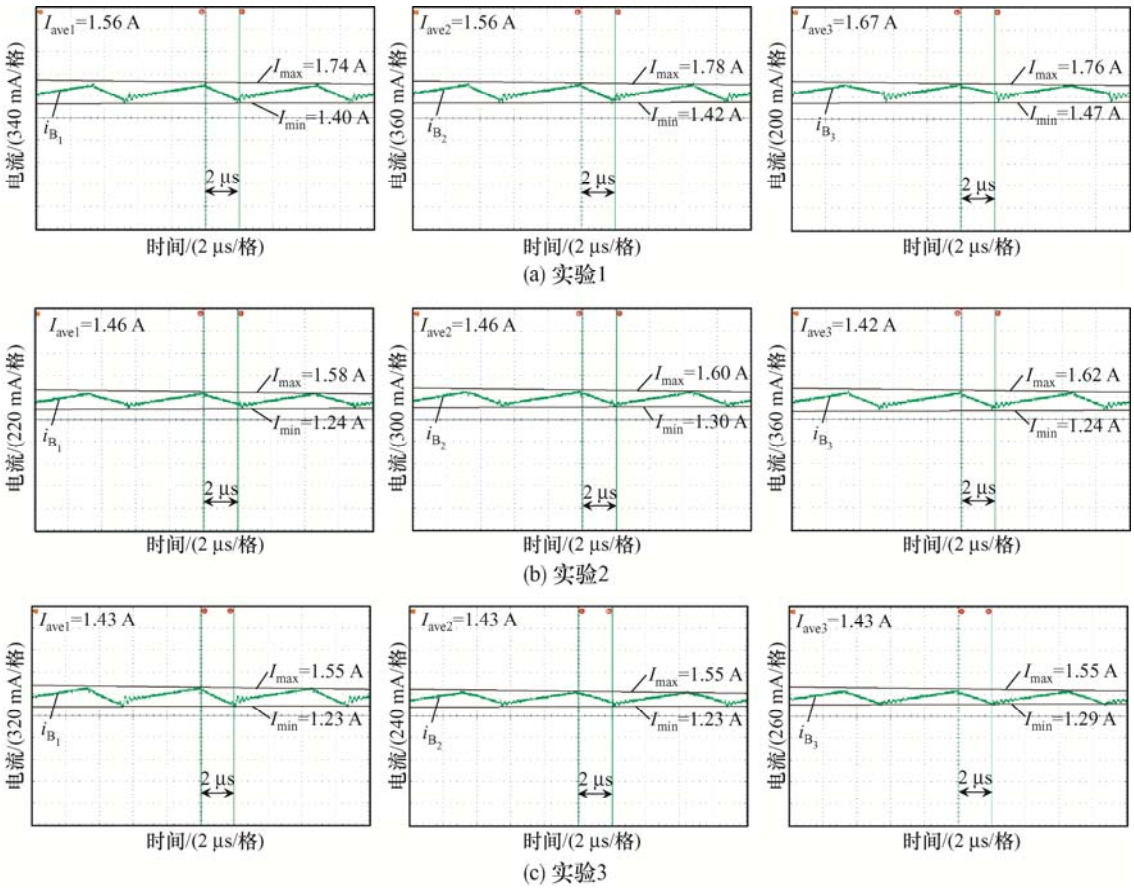


图 8　充电电流实验波形

Fig. 8 Charging current experimental waveforms

由图 2 和图 3 可知，在模态 1，流经各个电池单体的电流相等，由于模态 2、模态 4 与模态 5 对能量传输的影响可忽略，则整个周期内均衡电流的平均值等于续流阶段均衡电流的平均值乘以(1−D)，则 ΔI_{B_i} 可表示为

$$\Delta I_{B_i}=[I_{ave}-(I_{ave1}+I_{ave2}+I_{ave3})/3]\times(1-D) \tag{17}$$

由图 8 与式(17)可得实验 1~3 中的均衡电流，测试结果见表 3。

表 3 均衡电流测试结果

Tab. 3 Balancing current test results

mA

	ΔI_{B_1}	ΔI_{B_2}	ΔI_{B_3}
实验 1	−11	−11	22
实验 2	4	4	−8
实验 3	0	0	0

根据表 2、图 8 和表 3 可以得出结论：①电池单体的电压越低，在续流阶段对其充电的电流越大，从而各个电池单体的电压最终趋于均衡；②均衡电流的大小依赖于电池单体电压之间的差异，当所有电池单体的电压相同时，均衡电流为 0，与充电电流无关。实验结果符合式(16)得出的结论。

3.3 输入输出特性

用 3 个 4.7 μF 的电容 C_1、C_2 和 C_3 分别替代图 1(b)中的电池 B_1、B_2 和 B_3。固定 D=0.70，给定不同输入电压 U_{in}，分别测试 3 个电容的电压 U_{C_1}、U_{C_2} 和 U_{C_3}。输出电压(等于 $U_{C_1}+U_{C_2}+U_{C_3}$)与输入电压的测试结果及依据式(11)的计算结果如图 9 所示。由图 9 可见，测试结果与计算结果相吻合，即所提电路的电压增益与 Buck 电路一致。

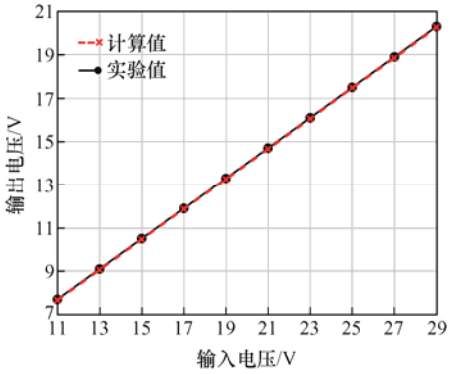


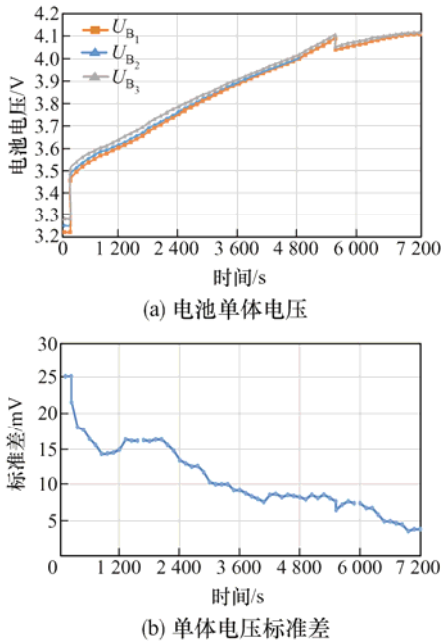
图 9 输入输出特性

Fig. 9 Input-output Characteristics

3.4 电路的均衡特性

本文采用 2 种实验方案对均衡特性进行了测试。

实验方案 1：充电前，3 个电池的初始电压分别为 U_{B_1}=3.220 V、U_{B_2}=3.250 V 和 U_{B_3}=3.282 V。在 f_s=100 kHz 下，采用 1 A-12.3 V 的恒流−恒压 CC-CV(constant current-constant voltage)充电方案，充电过程如图 10 所示。均衡前，电池端电压的极差为 62.0 mV，标准差为 25.3 mV；经过 7 200 s 的充电后，3 个电池的端电压分别为 U_{B_1}=4.105 V、U_{B_2}=4.109 V 和 U_{B_3}=4.114 V，电压标准差缩小到了 3.6 mV。



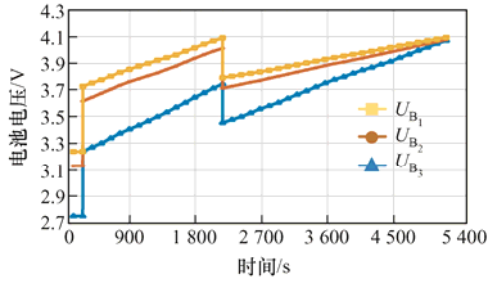
(a) 电池单体电压

(b) 单体电压标准差

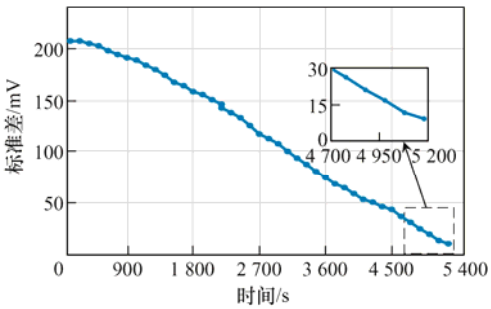
图 10 1 A-12.3 V CC-CV 充电过程

Fig. 10 1 A-12.3 V CC-CV charging process

实验方案 2：充电前，3 个电池的初始电压分别为 U_{B_1}=3.234 V，U_{B_2}=3.121 V 和 U_{B_3}=2.735 V。在 f_s=100 kHz 下，采用 4.8 A-1.6 A 的 CC-CV 充电方案，充电过程如图 11 所示。均衡前，电池端电压的极差为 499.0 mV，标准差为 213.6 mV；经过 5 200 s 的充电后，3 个电池的端电压分别为 U_{B_1}=4.109 V、U_{B_2}=4.092 V 和 U_{B_3}=4.083 V，电压标准差缩小到了 10.6 mV。



(a) 电池单体电压



(b) 单体电压标准差

图 11　4.8 A-1.6 A CC-CC 充电过程

Fig. 11 4.8 A-1.6 A CC-CC charging process

3.5　电路效率

在 U_{in}=15 V 时，对变换器的效率进行测试，结果如图 12 所示。充电功率为 13.5W 时，样机的效率达到最大值 94.7%。

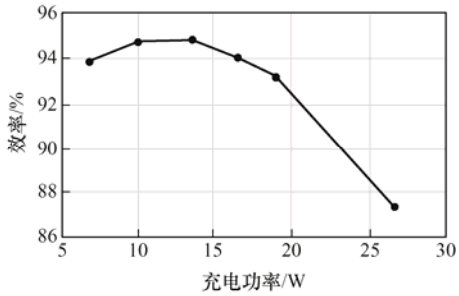


图 12　变换器效率测试结果

Fig. 12 Efficiency test results of the converter

3.6　对比分析

表 4 给出了本文提出的集成电路与传统均衡技术的对比。但仅列出了所用器件的类型和数量以及电路的成本，未对比其他性能，原因为：①通过器件的复用将均衡电路集成到充电/放电电路中，可实现系统的简化，且不对电路的其他性能产生显著影响[24,29,31-39]；②表中用于集成的基本电路的性能研究在很多文献中均可找到。

此外，本文所提出的类型 A 变换器与类型 B 变换器的关系，与异步和同步 Buck 变换器类似，因此所选的进行对比的技术只有 1 个有源开关，且对比文献中的技术均具有无需电压测量即可实现电压自动均衡的特性。

表 4　提出的集成电路与传统均衡技术的比较

Tab. 4 Comparison between the proposed integrated topology and traditional equalization technologies

电路	变换器	有源开关	磁器件 (磁心，绕组)	二极管	电容	成本(n=3)
多倍压电路	Boost 变换器[42]	1	1(1,1)	2n	n	2.80
	正-反激谐振逆变器[43]	1	1(1,2)	2n	n+1	3.20
多堆叠 Buck-Boost 变换器电路	Sepic 变换器[44]	1	n+1(n+1,n+1)	n	n	5.65
多绕组变压器电路	Buck 变换器[33]	1	1(1,n+1)	n+1	0	2.50
	Boost 变换器[24]	1	1(1,n+1)	n+1	0	2.50
本文	类型 A 变换器	1	1(1,n)	n	0	2.15
	类型 B 变换器	n+1	1(1,n)	0	0	2.30

均衡电路体积的评估基于元件的数量和单个元件的体积。一般均衡电路使用的磁性元件越多，其体积越大。表 4 中只有文献[44]包含 n+1 个磁性元件，因而其体积最大，而其他技术均只包含 1 个磁性元件，因而体积近似。

本文对电路成本的对比分析采用了文献[32-33,45-48]中的方法，电路总成本的评估只考虑每个器件的单位成本和器件数量。器件的单位成本($)来源于文献[43]，分别为 MOSFET(0.20 $)、MOSFET 驱动 IC(0.80 $)、二极管(0.150 $)、电容(0.20 $)、绕组(0.20 $)、磁心(0.90 $)。表 4 中给出

了 n=3 时各类技术的成本对比，由表可知，文献[33]和[24]所提出的电路与本文电路类型 A 变换器所采用的器件类型和个数最为接近。文献[33]和[24]均是基于多绕组变压器，不同之处在于前者采用了 Buck 变换器，而后者采用了 Boost 变换器。本文所提出的电路中的磁性器件包含 1 个磁心和 n 个绕组，而文献[33]和[24]中的磁心器件均包含 1 个磁心和 n+1 个绕组，多了 1 个绕组，同时文献[33]和[24]的电路比本文所提出的电路多了 1 个二极管。

4 结论

本文提出了一种应用于储能系统的变换器，该变换器将电压均衡器集成到充/放电变换器中，减少了组件数量、简化了系统。所提出的变换器无需电压测量，即具有电压自动均衡的能力。

所提出的类型 A 和类型 B 变换器的异同，与异步和同步 Buck 变换器类似。类型 A 与类型 B 变换器的输入输出特性相同，均衡特性也相同。类型 A 变换器成本低、控制简单、可靠性高，但效率较低，只能对电池充电，是单向变换器；类型 B 变换器的效率高，可实现双向能量传输，但其成本高，且控制也略微复杂。

多绕组电感漏感的不一致会影响均衡电流的大小，但是只要单体电压不一致，所提出的变换器就会自动产生均衡电流。通过调节变换器的开关频率和占空比可控制均衡电流的大小。

本文只对 3 个串联锂离子电池的储能系统进行了实验验证，后续将对所提变换器的扩展性进行研究。

参考文献：

[1] Analog Devices. LT1505 datasheet and product info [EB/OL]. [2024-04-30]. https://www.analog.com/en/products/lt1505.html.

[2] Texas Instruments. BQ25790 Buck-Boost Battery Charge Controller with USB-C PD OTG and Dual Input Selector [EB/OL]. (2020). [2024-04-30]. https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25790.pdf.

[3] Xiong Rui, Zhang Yongzhi, Wang Ju, et al. Lithium-ion battery health prognosis based on a real battery management system used in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4110-4121.

[4] Aamir M, Ahmed Kalwar K, Mekhilef S. Review: Uninterruptible power supply (UPS) system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 58: 1395-1410.

[5] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 1-18.
Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18. (in Chinese)

[6] 程昱明, 孟高军, 贾鹏, 等. 用于平抑风电功率波动的混合储能容量优化配置方法[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 251-261
Cheng Yuming, Meng Gaojun, Jia Peng, et al. Optimal hybrid energy storage capacity configuration method for mitigating fluctuations of wind power [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 251-261. (in Chinese)

[7] 刘威, 吕佳, 孙小毛, 等. 一致性和连接方式对 SOFC 电堆性能影响的实验研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 278-288.
Liu Wei, Lv Jia, Sun Xiaomao, et al. Experiment on effect of cell uniformity and connection mode on performance of SOFC stack [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 278-288. (in Chinese)

[8] Han Weiji, Zou Changfu, Zhou Chen, et al. Estimation of cell SOC evolution and system performance in module-based battery charge equalization systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4717-4728.

[9] Izadi Y, Beiranvand R. A comprehensive review of battery and supercapacitor cells voltage-equalizer circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38 (12): 15671-15692.

[10] Qu Fan, Luo Quanming, Liang Huan, et al. Systematic overview of active battery equalization structures: Mathematical modeling and performance evaluation [J]. IEEE

Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 1685-1703.

[11] 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.

[12] 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): 5294-5310.
Cai Minyi, Zhang E, Lin Jing, et al. Review on balancing topology of lithium-ion battery pack [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5294-5310. (in Chinese)

[13] 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, et al. A review of equalization methods for battery energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4204-4225. (in Chinese)

[14] Shang Yunlong, Cui Naxin, Zhang Chenghui. An optimized any-cell-to-any-cell equalizer based on coupled half-bridge converters for series-connected battery strings [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8831-8841.

[15] 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.

[16] 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, et al. 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)

[17] Wei Zhengqi, Peng Faxiang, Wang Haoyu. An LCC-based string-to-cell battery equalizer with simplified constant current control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1816-1827.

[18] Uno M, Sugaya R, Sasama Y. Selective module-to-cell equalizer with internal AC heating capability for automotive lithium-ion batteries at subzero temperatures [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(5): 5430-5440.

[19] 郭向伟, 耿佳豪, 刘震, 等. 基于反激变换器的双目标直接均衡方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(6): 1269-1278.
Guo Xiangwei, Geng Jiahao, Liu Zhen, et al. The dual-objective direct balancing method based on flyback converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(6): 1269-1278. (in Chinese)

[20] Phung T H, Collet A, Crebier J C. An optimized topology for next-to-next balancing of series-connected lithium-ion cells [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4603-4613.

[21] Lee Y S, Cheng G T. Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1213-1224.

[22] Shang Yunlong, Zhang Qi, Cui Naxin, et al. A cell-to-cell equalizer based on three-resonant-state switched-capacitor converters for series-connected battery strings [J]. Energies, 2017, 10(2): 206.

[23] Kim M Y, Kim C H, Kim J H, et al. A chain structure of switched capacitor for improved cell balancing speed of lithium-ion batteries [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3989-3999.

[24] Mai Ruikun, Xu Bin, Yan Zhaotian, et al. A compact-size multi-winding transformer-based discharge equalizer for electric two-wheelers and three-wheelers vehicles power battery [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(5): 4889-4897.

[25] Einhorn M, Roessler W, Fleig J. Improved performance of serially connected Li-ion batteries with active cell balancing in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(6): 2448-2457.

[26] Shang Yunlong, Xia Bing, Zhang Chenghui, et al. An automatic battery equalizer based on forward and flyback conversion for series-connected battery strings [C]// 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Tampa, FL, USA, 2017: 3218-3222.

[27] Lim C S, Lee K J, Ku N J, et al. A modularized equalization method based on magnetizing energy for a

series-connected lithium-ion battery string [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1791-1799.

[28] Shang Yunlong, Xia Bing, Zhang Chenghui, et al. A modularization method for battery equalizers using multiwinding transformers [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 8710-8722.

[29] Liu Lizhou, Chen Kefan, Xu Yefei, et al. Modular equalization system based on double-layer voltage multipliers for series-connected ultra-capacitors string [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(4): 3280-3289.

[30] 吴冬春, 朱飞, 唐佳维. 基于多绕组变压器与倍压整流器级联的电池均衡充电器研究[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 244-252.
Wu Dongchun, Zhu Fei, Tang Jiawei. Research on equalizing charger based on multi-winding transformer and cascaded double-voltage rectifiers [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 244-252. (in Chinese)

[31] Yang Xiaoguang, Zhao Xiaobing, Liu Jietao. Integrated bidirectional converter with voltage equalizer for energy storage system [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2023, 51(12): 5823-5839.

[32] Yang Xiaoguang, Qi Yakang, Liu Jietao, et al. Bidirectional converter integrating voltage equalizer based on symmetrical voltage multiplier by sharing a magnetic component for series-connected cells [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1074-1087.

[33] Liu Lizhou, Xu Bin, Yan Zhaotian, et al. A low-cost multiwinding transformer balancing topology for retired series-connected battery string [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 4931-4936.

[34] Yang Xiaoguang, Wang Dexin, Jia Zhe, et al. An equalization charger based on phase-shift full-bridge converter with an n-stage current rectifier [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(5): 1793-1805.

[35] Yang Xiaoguang, Jia Zhe, Wang Dexin, et al. An integrated equalization charger for series-connected energy storage cells [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(7): 2548-2565.

[36] Tashakor N, Farjah E, Ghanbari T. A bidirectional battery charger with modular integrated charge equalization circuit [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2133-2145.

[37] Noh G, Lee J, Ha J I. Design and analysis of single-inductor power converter for both battery balancing and voltage regulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(3): 2874-2884.

[38] Xu Bin, Yan Zhaotian, Xiong Liang, et al. A double-switch single-transformer integrated equalizer for the recycled power battery string of automatic guided vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2596-2606.

[39] Liu Lizhou, Yan Zhaotian, Xu Bin, et al. A single-magnetic bidirectional integrated equalizer using multi-winding transformer and voltage multiplier for hybrid energy storage system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6): 7318-7327.

[40] Einhorn M, Conte F V, Kral C, et al. A method for online capacity estimation of lithium ion battery cells using the state of charge and the transferred charge [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 736-741.

[41] 钱广俊, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 锂离子电池系统均衡策略研究进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(24): 145-162.
Qian Guangjun, Han Xuebing, Lu Languang, et al. Advances in lithium-ion battery system equalization strategy research [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 145-162. (in Chinese)

[42] Uno M, Tanaka K. Single-switch multioutput charger using voltage multiplier for series-connected lithium-ion battery/supercapacitor equalization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3227-3239.

[43] Uno M, Kukita A. Single-switch single-transformer cell voltage equalizer based on forward-flyback resonant inverter and voltage multiplier for series-connected energy storage cells [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4232-4247.

[44] Uno M, Tanaka K. Single-switch cell voltage equalizer using multistacked Buck-Boost converters operating in discontinuous conduction mode for series-connected energy storage cells [J]. IEEE Transactions on Vehicular Tech-

nology, 2011, 60(8): 3635-3645.

[45] Imtiaz A M, Khan F H. “Time shared flyback converter” based regenerative cell balancing technique for series connected Li-ion battery strings [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(12): 5960-5975.

[46] Wei Zhengqi, Wang Haoyu, Lu Yiqing, et al. Bidirectional constant current string-to-cell battery equalizer based on L2C3 resonant topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 666-677.

[47] Qi Xianbin, Wang Yi, Fang Mingzhu, et al. A family of integrated cascade multiport converters for centralized equalization systems: Derivation, analysis, and verification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 7398-7415.

[48] Wang Xue, Wen Huiqing, Chu Guanying, et al. Performance quantization and comparative assessment of voltage equalizers in mismatched photovoltaic differential power processing systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(1): 1656-1675.



杨晓光

作者简介：

杨晓光(1971—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电源及其磁技术。E-mail：xgyang@hebut.edu.cn。

李家宝(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电源新技术。E-mail：2332628764@qq.com。

聂宝鑫(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：电源新技术。E-mail：18845613121@163.com。

芦宇杰(2001—)，男，硕士研究生。研究方向：电源新技术。E-mail：2119428514@qq.com。

李学彪(2001—)，男，硕士研究生。研究方向：电源新技术。E-mail：940058928@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)



公益广告来源：中国文明网