

基于LC谐振变换器串联锂电池组控制策略研究

陈威威¹, 吴云亚¹, 陈鹤鸣², 周 斌¹, 刘志鹏¹, 徐苏东¹

¹盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城

²国网南京供电公司, 江苏 南京

收稿日期: 2023年7月1日; 录用日期: 2023年8月30日; 发布日期: 2023年9月6日

摘 要

现今LC谐振变换器中锂电池电压均衡控制策略主要有两种, 分别是直接单对单均衡(DC2C)和直接多对多均衡(MC2MC), 且DC2C控制简单但均衡时间长, MC2MC控制复杂但均衡时间短, 所以针对LC谐振变换器的拓扑结构中串联锂离子电池在不同均衡方式下的均衡速度不一致问题, 文中提出一种改进型控制策略; 该控制策略结合DC2C和MC2MC这两种均衡策略的优点, 使用先单后多的控制策略实现电池电压均衡, 并且采用图论法分析了在改进型控制策略下的拓扑结构运行模态。文中在MATLAB/Simulink电力仿真平台上搭建了仿真模型, 仿真结果表明拓扑在改进型控制策略下的均衡时间为0.191s, 较DC2C的均衡时间0.335 s提升了75.4%, 较MC2MC的0.22 s提升了19%, 改进型控制策略在电路结构中的运行不仅合理有效, 且拥有均衡速度更快, 均衡时间更短的优点。

关键词

LC谐振变换器, 串联锂离子电池, 多对多均衡, 直接单对单均衡, MATLAB/Simulink, 图论法, 改进型控制策略

Research on Control Strategies Based on LC Resonant Converter for Series-Connected Battery Strings

Weiwei Chen¹, Yunya Wu¹, Heming Chen², Bin Zhou¹, Zhipeng Liu¹, Sudong Xu¹

¹School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

²State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing Jiangsu

Received: Jul. 1st, 2023; accepted: Aug. 30th, 2023; published: Sep. 6th, 2023

文章引用: 陈威威, 吴云亚, 陈鹤鸣, 周斌, 刘志鹏, 徐苏东. 基于LC谐振变换器串联锂电池组控制策略研究[J]. 建模与仿真, 2023, 12(5): 4393-4401. DOI: 10.12677/mos.2023.125400

Abstract

There are two voltage equalization control strategies for lithium batteries in LC resonant converters nowadays, namely direct cell-to-cell balancing (DC2C) and direct multicell-to-multicell balancing (MC2MC). And DC2C control is simple but the equalization time is long, while MC2MC control is complex but the equalization time is short. This paper proposes an improved control strategy to address the issue of inconsistent equalization speed of series lithium-ion batteries in the LC resonant equalizer topology under different equalization modes. This control strategy combines the control advantages of DC2C and MC2MC, using a control strategy of first order then multiple to achieve battery voltage balance, and using graph theory to analyze the topology operation mode under the improved control strategy. This article builds a simulation model on the MATLAB/Simulink power simulation platform. The simulation results show that the equilibrium time of the topology under the improved control strategy is 0.191 s, which is 75.4% higher than the equilibrium time of 0.335 s for DC2C, and 19% higher than the 0.22 s for MC2MC. The operation of improved control strategies in circuit structures is not only reasonable and effective, but also has the advantages of faster equalization speed and shorter equalization time.

Keywords

LC Resonant Converter, Series-Connected Lithium-ion Battery, Multicell-to-Multicell Balance, Direct Cell-to-Cell Balance, MATLAB/Simulink, Graph Theory, Improving Control Methods

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锂离子电池由于其高能量比、高能量密度和低自放电率而广泛应用于新能源汽车、航空航天等领域。但是上述应用领域都需要比较高的电压，而锂离子电池单体电压较低，所有为了满足这些应用的续航要求，锂离子电池必须串联连接来减小体积、增加电压。然而，由于制造差异、各电池单体温度分布不均以及自放电率差异等现象，这些现象导致电池单体之间充放电不均衡。如不加以控制致使电池长期处在不均衡的状态下，电池极易发生过充和过放现象而减少锂电池使用寿命，降低锂电池有效荷电容量，严重时会导致锂离子电池爆炸引发安全事故[1]。

为了克服上述的不足，串联锂离子电池组需要配备均衡电路来保证锂电池在电路运行时的安全。锂电池均衡器大体分为被动均衡和主动均衡[2]。被动均衡也叫耗散均衡，主要采用开关控制电阻来消耗锂电池多余的能量，将能量以热能形式散发以此实现能量转移[3]，这种方法易于实现且成本低廉，同时可以防止电池的过充电，但是会导致均衡器过热，出现散热问题。主动均衡也叫非耗散均衡，采用电容或电感等储能元件将能量从强能量电池传输到弱能量电池，实现能量的转移[4]，也是当前研究热点。而 LC 谐振变换器具有结构简单，传输路径少等特点，应用广泛，但均衡策略不同会导致均衡速度也不同，LC 谐振变换器均衡策略大致分为五种：相邻电池到电池(AC2C) [5]、直接电池到电池(DC2C) [6]、电池组到电池(P2C) [7]、电池到电池组(C2P) [8] [9]以及多电池到多电池(MC2MC) [10]。但是随着电池数量的增多，上述的均衡策略导致均衡时间、均衡路径不断增加，能量损耗变大，文献[10]提出的 MC2MC 均衡方法

也无法从根本上解决问题。

本文结合 DC2C 和 MC2MC 均衡策略的优点, 提出一种改进型控制策略, 在基于矩阵式开关的 LC 谐振均衡器中实现了其均衡速度的提升, 均衡时间的减少, 有效提高了 LC 谐振电路的均衡效率, 减少了均衡路径。

2. 均衡电路基本结构

图 1 是基于矩阵式开关的 LC 谐振串联锂电池组均衡拓扑。该变换器均衡拓扑内部特征主要由以下几个模块组成, 分别是 LC 谐振变换器、四列矩阵式开关模块、均衡母线、串联电池组。

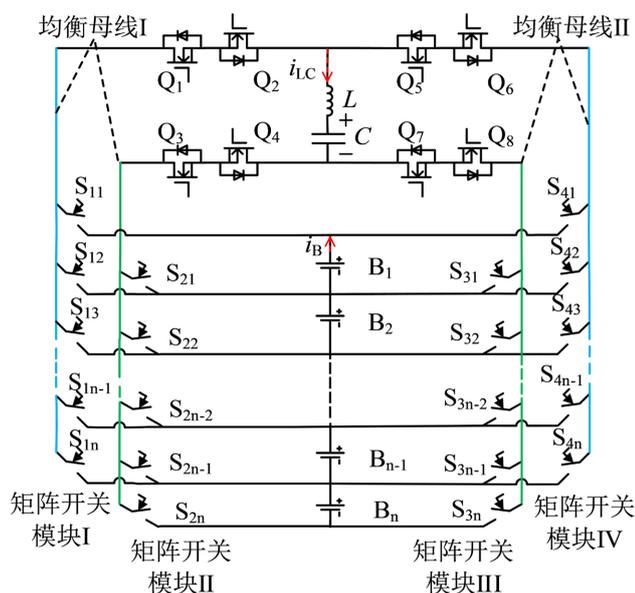


Figure 1. Circuit equalization topology

图 1. 电路均衡拓扑

LC 谐振变换模块通过均衡母线 I 和均衡母线 II 来连接矩阵开关模块, 同时 LC 谐振变换器模块包含四组双向开关管和 LC 谐振单元, 每组双向开关管由两个源极对接的 MOS 管组成, 其中每组双向开关管分别连接在一个桥臂上, 桥臂中点处串联有电感 L 和电容 C; LC 谐振变换器可以实现能量从强能量电池转移到弱能量电池。

四列矩阵开关模块分别是矩阵开关模块 I、矩阵开关模块 II、矩阵开关模块 III 和矩阵开关模块 IV。这四列开关模块都由继电器组成, 且每列开关模块同一时刻只有一个开关可以导通。

均衡母线 I 和均衡母线 II 在均衡拓扑中用于连接强能量电池和弱能量电池, 在均衡电路中形成能量流动回路实现能量均衡。

3. 改进型控制策略的电路工作原理分析

3.1. 改进型控制策略工作模态分析

以图 1 为例, $B(i = 1, 2, \dots, n)$ 是拓扑内串联的电池, 假设 B_1 和 B_2 是充电较多的电池单体, 所以 B_1 和 B_2 为强能量电池组; B_{n-1} 、 B_n 是充电较少的电池单体, 所以 B_{n-1} 和 B_n 为弱能量电池组, 并且其他电池单元电压相等, 此时均衡电路有四个工作模态。DC2C 均衡时充、放电模态如图 2 所示: 首先

开关管 Q1~Q4 利用 ZCS 导通，开关管 Q5~Q8 保持关断，电池单体 B1 通过 Q1~Q4 与 LC 谐振变换器并联连接，在 B1、L 和 C 之间形成谐振回路，电容器 C 和电感器 L 由 B1 充电；然后开关管 Q5~Q8 以 ZCS 导通，开关管 Q1~Q4 关断，电容器 C 给 B2 充电，至此完成一次充、放电循环。电路工作在 DC2C 状态时，继电器开关 S11、S21、S42 和 S32 同时导通，直至 B1 和 B2 电池电压均衡。MC2MC 的充、放电模式如图 3 所示，开关管 Q1~Q8 导通与关断和 DC2C 基本相同，但是继电器开关选择不同，MC2MC 均衡时 S11、S22、S4n-1 和 S3n 同时导通，直至强能量电池组和弱能量电池组电压均衡。

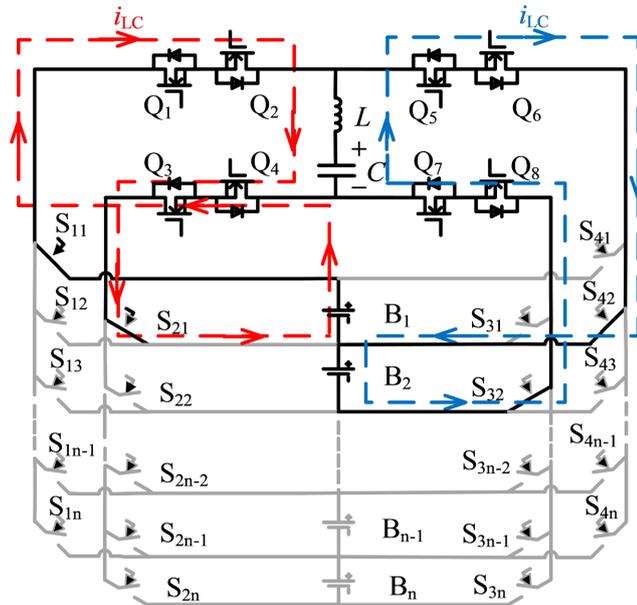


Figure 2. DC2C balanced mode

图 2. DC2C 均衡模式

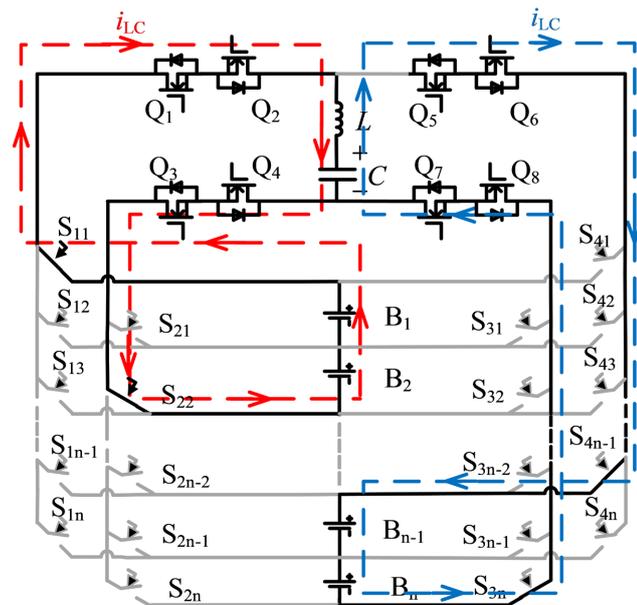


Figure 3. MC2MC balanced mode

图 3. MC2MC 均衡模式

图 4 给出了 DC2C 和 MC2MC 均衡时主要波形，在开关管导通关断的一个周期内，电容电压 U_C 经历一次充放电；电感电流 i_{LC} 有两次峰值，进行两次能量传递，同时 MC2MC 均衡时 U_C 幅值变大导致均衡电流 i_{LC} 同时增加。

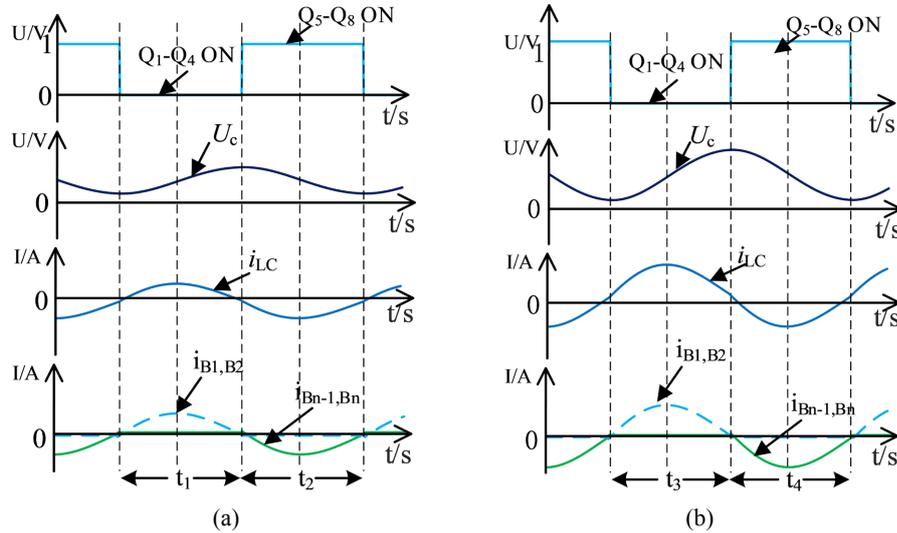


Figure 4. Key waveforms of equalizer operation. (a) Working waveform of DC2C; (b) Working waveform of MC2MC
图 4. 均衡状态时关键波形。(a) DC2C 工作波形；(b) MC2MC 工作波形

3.2. 基于图论的均衡结构分析

采用图论法[11][12][13]对文中 LC 谐振变换器均衡电路建模时，将放电电池用 VM 表示，充电电池用 VN 表示，双向开关管用简易开关代替，矩阵式继电器开关默认为闭合状态，能量流动方向用箭头表示，并忽略能量流动路径中内阻的影响，将开关管和 LC 谐振变换器内部电阻等效为电阻 R，图论模型如图 5 所示。特别是当开关频率与谐振频率相同时，LC 谐振变换器工作在零电流状态，即开关频率：

$$f = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) \tag{1}$$

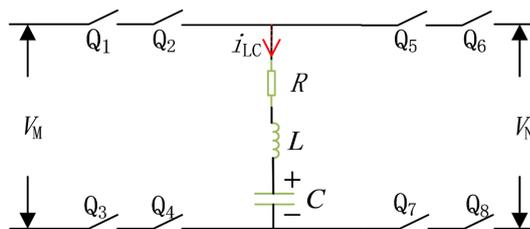


Figure 5. Graph theory model of LC resonant equalization topology
图 5. LC 谐振均衡拓扑的图论模型

R 表示 LC 谐振变换器的等效电阻，其可以表示为：

$$R = R_{LC} + 4R_{ON} \tag{2}$$

其中 R_{LC} 是电感器 L 和电容器 C 的总电阻， R_{ON} 是 1 个双向开关管的导通电阻。基于基尔霍夫电压定律，

在一个周期内 V_M 放电时, 电容电压 U_C 和谐振电流 i_{LC} 满足:

$$V_M = U_C + L \cdot \frac{di_{LC}}{dt} + R \cdot i_{LC} \quad (3)$$

所以电感电流 i_{LC} 和电容电压 U_C 之间的关系可以表示为:

$$i_{LC} = C \cdot \frac{dU_C}{dt} \quad (4)$$

其中 C 是电容器的电容值; 根据式(3)和式(4), 前半个周期期间的正弦电流可以由下式给出:

$$i_{LC}(t) = A \cdot \sin(\beta \cdot t + B) \cdot e^{\alpha t} \quad (5)$$

当

$$\alpha = -\frac{R}{2L} \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (7)$$

根据式(7)可得谐振频率 f_0 :

$$f_0 = \frac{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}{2\pi} \quad (8)$$

在 $t=0$ 且 $i_{LC}(0)=0$ 的情况下, 式(5)可推导为 $B=0$ 。结合式(3)和式(5), 电容电压 U_C 可以表示为:

$$U_C(t) = V_M - A \cdot \beta \cdot L \cdot \cos(\beta \cdot t) \cdot e^{\alpha t} - \frac{A \cdot R}{2} \cdot \sin(\beta \cdot t) \cdot e^{\alpha t} \quad (9)$$

在 $t=0$ 和 $t=2\pi/\beta$ 时, 一个周期内电容电压 U_C 满足:

$$U_C(0) + U_C\left(\frac{2\pi}{\beta}\right) = V_M + V_N \quad (10)$$

结合式(9)和式(10), 常数 A 可以推导为:

$$A = \frac{V_M - V_N}{\beta \cdot L \cdot \left(1 - e^{\frac{\alpha}{\beta} \pi}\right)} \quad (11)$$

对于 A 和 B , 式(5)和式(9)分别改为:

$$i_{LC}(t) = \frac{2(V_M - V_N)}{\pi \cdot R} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \cdot t\right) \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \quad (12)$$

$$U_C(t) = V_M - 2\sqrt{\frac{L}{C} - \frac{R^2}{4}} \cdot \frac{V_M - V_N}{\pi \cdot R} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \cdot t\right) \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} - \frac{V_M - V_N}{\pi} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \cdot t\right) \cdot e^{-\frac{R}{2L}t} \quad (13)$$

由上述公式可以看出在一个开关周期内电感电流和电容电压都呈现出正弦波, 但不同的是电感电流在强能量电池组电压等于弱能量电池组电压时为 0, 而电容电压在均衡开始前为 0, 均衡一旦开始电容电压就会有一个最小值, 不再为 0, 直至均衡结束。这是均衡拓扑中的四节电池对四节电池均衡模态分析, 类似组合还有五对五、八对八等, 但是不同的组合其工作过程类似, 故不再赘述。

4. LC 谐振电路控制策略

图 6 显示了均衡器模型的改进型控制策略流程图。相较于 DC2C 均衡策略，改进型控制策略选择其优点组合相邻电池单体均衡，减少了能量路径，增加均衡速度；较于 MC2MC 均衡策略，改进型控制策略选择其任意组合相邻电池单体的优势，增加均衡过程中的电压差，致使均衡电路中均衡电流增加，减少均衡时间，提升均衡速度。

改进型控制策略具体实施过程如下所示：首先判断串联锂电池电压是否处在安全范围，处在安全范围内则进入下一步，否则发出警告并结束运行；其次选出相邻两节电池单体均衡，判断其压差是否大于 0.01 V ，当压差大于 0.01 V 时导通对应 MOSFET 和继电器开关，均衡结束后重新选择下一组电池单体继续判断压差直至全部对应组别均衡结束；然后选出相邻四节电池单体组合继续重复之前操作完成组间均衡，以此类推，最后判断全部电池单体中的最大压差小于 0.01 V 时结束运行，反之则继续运行直至最大压差小于 0.01 V 。

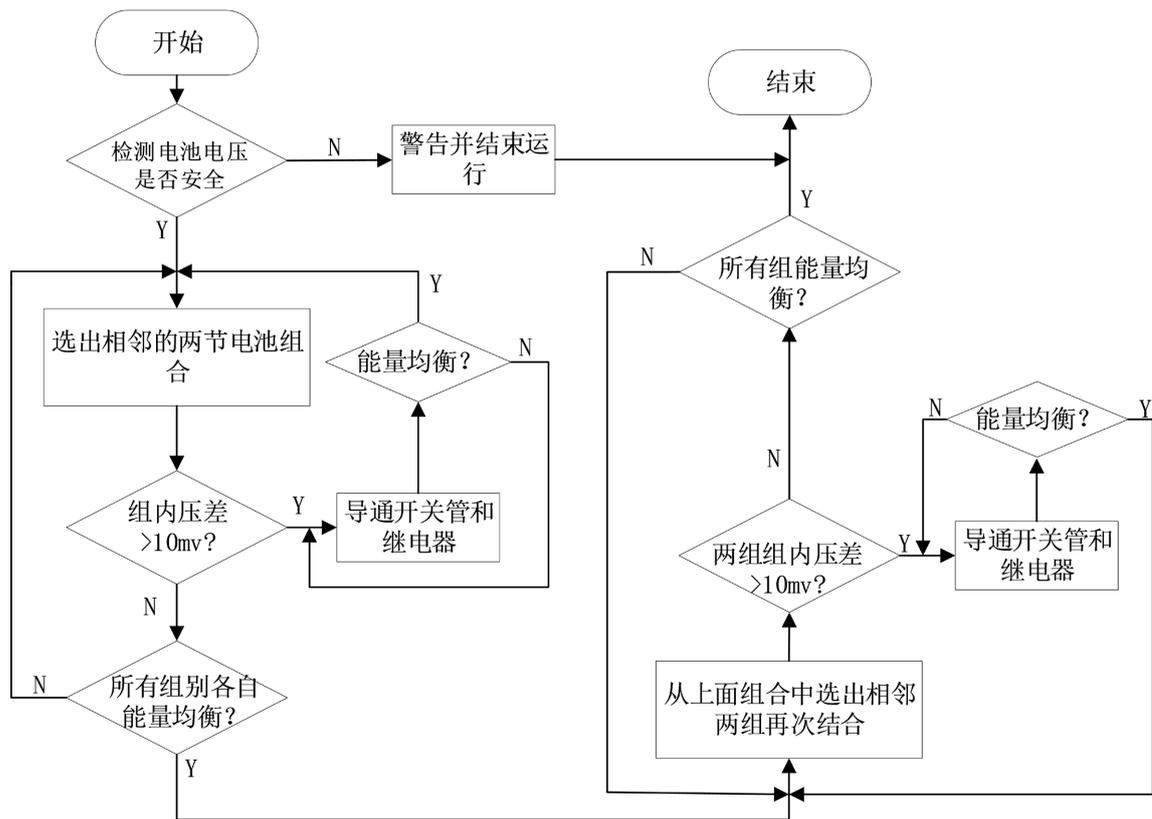


Figure 6. Improved control strategy flowchart

图 6. 改进型控制策略流程图

5. 仿真结果

根据图 6 的改进型控制策略流程图，使用 MATLAB/Simulink 软件搭建 8 节串联电池仿真模型，并与 DC2C 和 MC2MC 两种控制策略进行对比，验证改进型控制策略的优越性。仿真过程中，以 0.05 F 电容代替锂电池，设置 8 节串联池初始电压 4.07 V 、 3.94 V 、 3.77 V 、 3.72 V 、 3.68 V 、 3.56 V 、 3.38 V 、 3.02 V ，图 7 是三种控制方式下的 8 节电池均衡的仿真结果。

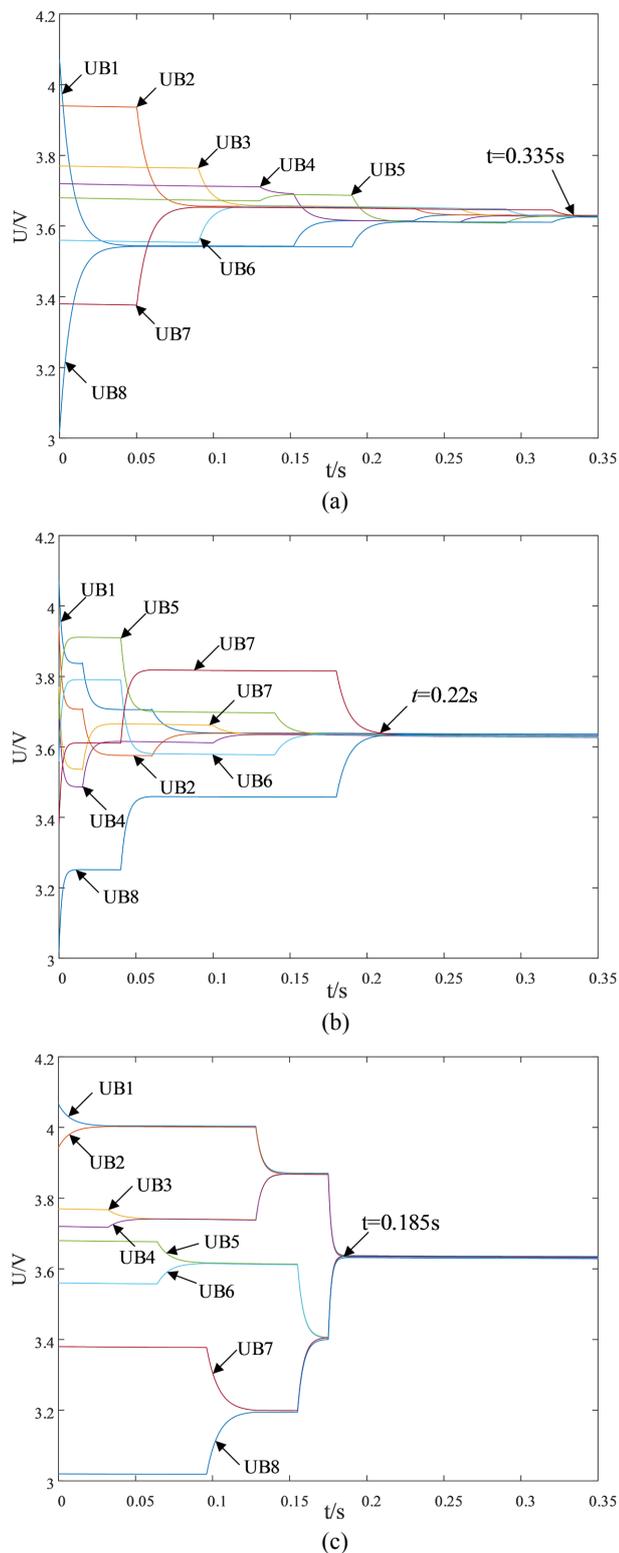


Figure 7. Energy balance of 8 batteries under three control modes. (a) Results of DC2C equilibrium; (b) Results of MC2MC equilibrium; (c) Results of improved control strategies equilibrium

图 7. 8 节电池在三种控制模式下能量均衡。(a) DC2C 均衡结果；(b) MC2MC 均衡结果；(c) 改进型控制策略均衡结果

分析图 7 可得 DC2C 均衡时间为 0.335 s, MC2MC 均衡时间为 0.22 s, 改进型控制策略均衡时间为 0.185 s, 均衡速度较 DC2C 提升了 75.4%, 较 MC2MC 提升了 19%; 仿真结果分析可得改进型控制策略具有均衡速度快、均衡时间短的优点。

6. 结束语

本文在 LC 谐振变换器电路均衡拓扑的基础上提出了改进型控制策略。该改进型控制策略不仅具有控制简单的优点, 还可实现均衡速度的提升, 均衡时间在 DC2C 和 MC2MC 的基础上分别提升了 75.4% 和 19%。通过第 3 部分提出的一种改进型控制策略流程图在第 4 部分以 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建的 8 节电池仿真模型, 实验结果表明改进型控制策略合理有效以及改进型控制策略在均衡速度上的优越性。文中提到的改进型控制策略可以兼顾 DC2C 和 MC2MC 的控制优势, 将其结合提升均衡速度、减少均衡时间, 具有一定应用价值。

参考文献

- [1] 许拯瑞. “双碳目标”下传统化石能源与新能源发展趋势[J]. 石化技术, 2022, 29(9): 188-190.
- [2] Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanes-Montero, M.I. and Guerrero-Martinez, M.A. (2014) Battery Equalization Active Methods. *Journal of Power Sources*, **246**, 934-949. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.08.026>
- [3] Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanes-Montero, M.I. and Guerrero-Martinez, M.A. (2015) A Novel Active Battery Equalization Control with On-Line Unhealthy Cell Detection and Cell Change Decision. *Journal of Power Sources*, **299**, 356-370. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.09.005>
- [4] McCurlie, L., Preindl, M. and Emadi, A. (2017) Fast Model Predictive Control for Redistributive Lithium-Ion Battery Balancing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**, 1350-1357. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2611488>
- [5] Pascual, C. and Krein, P.T. (1997) Switched Capacitor System for Automatic Series Battery Equalization. *IEEE Appl. Power Electron. Conf*, **15**, 848-854.
- [6] Chen, Y., Liu, X., Cui, Y., Zou, J. and Yang, S. (2016) A Multiwinding Transformer Cell-to-Cell Active Equalization Method for Lithium-Ion Batteries with Reduced Number of Driving Circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **31**, 4916-4929. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2482500>
- [7] Arias, M., Sebastián, J., Hernando, M., Viscarret, U. and Gil, I. (2015) Practical Application of the Wave-Trap Concept in Battery-Cell Equalizers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **30**, 5616-5631. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2373435>
- [8] Imtiaz, A.M. and Khan, F.H. (2013) Time Shared Flyback Converter' Based Regenerative Cell Balancing Technique for Series Connected Li-Ion Battery Strings. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 5960-5975. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2257861>
- [9] McCurlie, L., Preindl, M. and Emadi, A. (2017) Fast Model Predictive Control for Redistributive Lithium-Ion Battery Balancing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **64**, 1350-1357. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2611488>
- [10] Shang, Y., et al. (2019) Multi-Cell-to-Multi-Cell Equalizers Based on Matrix and Half-Bridge LC Converters for Series-Connected Battery Strings. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **2**, 1755-1766. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2893167>
- [11] Chen, Y., Liu, X., Fathy, H.K., et al. (2018) A Graph-Theoretic Framework for Analyzing the Speeds and Efficiencies of Battery Pack Equalization Circuits. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **98**, 85-99. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.039>
- [12] 许亚娟. 基于图论的分层均衡拓扑及其控制方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [13] 文楚强. 基于准谐振开关电容的电动汽车锂电池组均衡系统研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2020.