

基于 MMC 的电动汽车非等容退役锂电池 能量均衡控制策略

吴青峰^{1,2}, 王策¹, 刘立群¹, 王腾光¹, 薄利明³

(1. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西省 太原市 030024;

2. 先进控制与装备智能化山西省重点实验室(太原科技大学), 山西省 太原市 030024;

3. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西省 太原市 030001)

Energy Balancing Control Strategy for Non-equal Capacity Retired Lithium Batteries in Electric Vehicles Based on MMC

WU Qingfeng^{1,2}, WANG Ce¹, LIU Liqun¹, WANG Tengguang¹, BO Liming³

(1. College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China;

2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Advanced Control and Equipment Intelligence (Taiyuan University of Science and Technology), Taiyuan 030024, Shanxi Province, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, Shanxi Province, China)

ABSTRACT: Due to differences in installation capacity and retirement time, the capacity of retired lithium batteries (RLB) for electric vehicles is difficult to maintain consistently. However, the existing energy balancing schemes based on modular multilevel converters (MMC) cannot balance the energy of non-equal capacity RLB. Therefore, an energy balancing scheme for non-equal capacity RLB of electric vehicles based on high-level high-power MMC is proposed, and the state of charge (SOC) parameter of RLB is used to characterize the energy state of RLB. The impact of capacity differences on SOC balance is analyzed. The active power redistribution modules for the MMC upper and lower bridge arms, phase to phase, and sub module (SM) RLB are designed, which achieves output active power of RLB proportional to its capacity, and eliminates the impact of capacity differences on SOC balancing. An improved three-level SOC balancing control strategy is proposed to achieve SOC balancing of RLB in the MMC upper and lower bridge arms, interphase, and intra SM. The simulation results of Matlab/Simulink and the experimental results of the low-power experimental platform show that the proposed scheme can achieve SOC balance of equal/non-equal capacitance RLB in MMC upper and lower bridge arms, phase to phase, and SM.

KEY WORDS: modular multilevel converter; electric vehicle; non-equal capacity retired lithium batteries; active power distribution; state of charge balancing

摘要: 受安装容量、退役时间差异的影响, 电动汽车退役锂电池(retire lithium battery, RLB)容量难以保持一致。然而, 现有基于模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)的能量均衡方案无法有效均衡非等容 RLB 的能量。因此, 研究一种基于高电平大功率 MMC 的电动汽车非等容 RLB 的能量均衡方案, 并以 RLB 的荷电状态(state of charge, SOC)参数来表征 RLB 的能量状态。分析了 RLB 容量因子对 SOC 均衡产生的影响; 设计了 MMC 上、下桥臂, 相间和子模块(sub-module, SM)内 RLB 的有功功率再分配模块, 实现 RLB 输出有功功率与其容量成正比, 从而消除了容量差异对 SOC 均衡的影响; 提出改进型三级 SOC 均衡控制策略, 实现了 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内 RLB 的 SOC 均衡。Matlab/Simulink 仿真结果和小功率实验平台的实验结果表明, 所提方案能够有效实现 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内等容/非等容 RLB 的 SOC 均衡。

关键词: 模块化多电平变换器; 电动汽车; 非等容退役锂电池; 有功功率分配; 荷电状态均衡

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0106

0 引言

发展以锂电池作为主要动力源, 具有低碳排放特性的电动汽车能有效推动我国“双碳”目标的实现^[1]。电动汽车锂电池的容量会随着使用时间的增加而不断降低, 当电动汽车锂电池容量低于其额定

基金项目: 山西省基础研究计划面上项目(202203021221153); 山西省研究生教育创新项目(2025SJ366)。

Project Supported by General Project of Shanxi Provincial Basic Research Program (202203021221153); Shanxi Province Graduate Education Innovation Project (2025SJ366).

容量的 80% 时需要退役, 这导致近几年电动汽车退役锂电池(retire lithium battery, RLB)的数量急剧增加^[2]。电动汽车锂电池退役后可回收进行梯次利用, 有助于环保和 RLB 的再利用, 促进经济可持续发展^[3-4]。同时, 模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)凭借高等效开关频率、高可靠性及良好的扩展性, 在中高压微电网及大功率领域的应用日益广泛^[5]。将 RLB 与 MMC 配合形成高电平大功率 MMC-RLB 系统, 能实现 RLB 的再利用, 有效提高输出电压, 具有模块化, 易扩容的优点^[6]。同时, 高电平大功率 MMC-RLB 系统可应用于高压直流输电、中高压交直流混合电网、柔性变电站等场合。然而, 因服役周期、工作环境、初始安装容量差异, 导致应用在 MMC 上、下桥臂, 相间和子模块(sub-module, SM)内 RLB 的容量难以维持一致^[7]。若不针对 MMC 系统设计合理的控制方案, RLB 间的能量均衡差会不断扩大, 最终, 降低 RLB 容量使用率。此外, 电动汽车锂电池的能量状态主要由电池的 SOC 参数来表征^[8]。因此, 设计一种 MMC 系统电动汽车非等容 RLB 的 SOC 均衡方案具有迫切的现实需求和较高的研究价值。

为实现 MMC 内储能单元 SOC 均衡, 文献[9]通过将直流环流引入到桥臂电流中, 以达到调节电流目的, 实现不平衡电网系统 MMC-ESS 的相间 SOC 均衡。但该方案未考虑到上、下桥臂间 SOC 均衡。文献[10]在文献[9]的基础上, 利用基频环流注入法实现 MMC 上、下桥臂间 SOC 控制。但基于环流注入的方案存在环流提取和控制复杂的缺点。针对此问题, 文献[11]提出一种“背靠背”MMC 的一体化功率变换器拓扑及其控制方案, 实现了 MMC 的 SOC 均衡。但该方案只适用于作者所提的“背靠背”MMC, 限制了其应用范围。文献[12]设计了一种分层式并行均衡器以均衡 MMC-ESS 的 SOC, 但该方案仍是对 MMC 的结构进行改进, 面临文献[11]同样的困境。文献[13-14]中将 SOC 平均值与 SOC 的差值作为补偿项通过 PI 控制器加到功率控制环, 形成 MMC 三级 SOC 均衡控制器, 以实现 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内锂电池 SOC 均衡。文献[15]引进模型预测控制和虚拟阻抗技术调节锂电池有功功率输出, 实现了 MMC 内锂电池 SOC 快速均衡。文献[16]介绍了一种适用于混合 MMC 的 SOC 均衡方案, 并针对故障情况设计电流分配方案, 最终实现 SOC 均衡。文献[17]中提出一种 SOC 三层均衡策略, 实现了并网微电网内 MMC-ESS 的 SOC 均衡。但文献[9-17]中均假设 MMC 上、

下桥臂, 相间和 SM 内的锂电池容量相等。该假设过于理想化且这些 SOC 均衡方案调节有功功率过程中仅考虑消除初始 SOC 均衡差。但根据 SOC 估算公式可知, RLB 容量参数也会对 RLB 有功功率分配造成影响。因此, 若要实现非等容 RLB 的 SOC 均衡, 在调节有功功率过程中还需要考虑对容量参数对有功功率的影响。

针对目前基于 MMC 的 SOC 均衡策略中均假设锂电池容量相等且控制过程中未考虑容量因子对 SOC 均衡的影响现状, 本文研究了 RLB 容量对 SOC 均衡的影响, 验证了现有基于 MMC 的锂电池 SOC 均衡方案无法实现非等容 RLB 的 SOC 均衡结论。在此基础上, 提出一种基于 MMC 的电动汽车非等容 RLB 的 SOC 均衡控制策略。该方案分析了容量差异对 SOC 均衡的影响; 设计了 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内 RLB 有功功率再分配模块和 SOC 均衡因子, 实现了多种工况下 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内等容/非等容 RLB 的 SOC 均衡。

1 MMC-RLB 系统拓扑

MMC-RLB 的拓扑结构如图 1 所示^[18], 上、下桥臂中每相由 N 个 SM, 桥臂电感 L_m 和桥臂等效电阻 R_m 组成。 u_{ag} 、 u_{bg} 和 u_{cg} 表示电网三相电压, i_{ga} 、 i_{gb} 和 i_{gc} 表示电网三相电流, L_g 表示网侧电感, U_{dc} 为直流母线电压, u_{pa} 、 u_{pb} 和 u_{pc} 表示三相上桥臂电压, u_{na} 、 u_{nb} 和 u_{nc} 表示三相下桥臂电压, i_{pa} 、 i_{pb} 和 i_{pc} 表示三相上桥臂电流, i_{na} 、 i_{nb} 和 i_{nc} 表示三相下桥臂电流。SM 拓扑由半桥电路、DC/DC 电路和 RLB 构成。SM 内 RLB 通过 DC/DC 电路并联至电容两端, T_1 和 T_2 构成半桥子模, u_c 为 SM 电容电压, 而 T_3 和 T_4 构成双向 DC/DC 环节, RLB 侧 DC/DC 变换器的电感为 L_b 。通过对 SM 内 DC/DC 变换器控制可以调节联接在 DC/DC 变换器 RLB 的有功功率, 确保每个 SM 内非等容 RLB 的 SOC 保持均衡

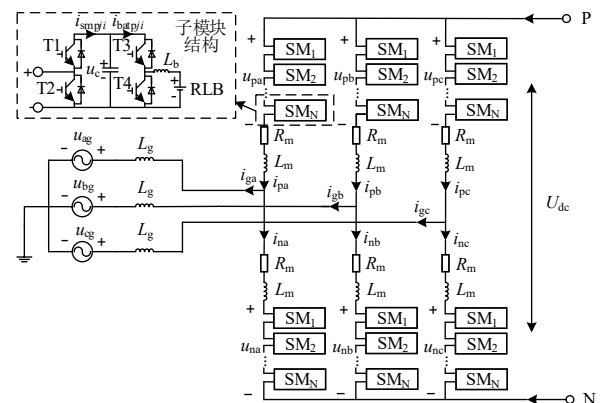


图 1 MMC-RLB 拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of MMC-RLB

状态。交流侧参考电压通过与 MMC 上、下桥臂，相间和 SM 控制模块产生的电压参考值相加，再经过载波移相环节产生 DC/DC 变换器的开关控制信号，从而控制 SM 内 RLB 有功功率输出。

SM 内 $i_{\text{sm}pj}$ 和 $i_{\text{sm}nj}$ 代表上桥臂和下桥臂从 SM 侧流入电容的电流， $i_{\text{bat}pj}$ 和 $i_{\text{bat}nj}$ 则表示上桥臂和下桥臂从电容流出并进入 DC/DC 侧的电流。根据 SM 模型可知，由 SM 侧流入电容的电流 $i_{\text{sm}pj}$ 和 $i_{\text{sm}nj}$ 表示为

$$\begin{cases} i_{\text{sm}pj} = S_{\text{tp}ji} i_{pj} \\ i_{\text{sm}nj} = S_{\text{tn}ji} i_{nj} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $S_{\text{tp}ji}$ 和 $S_{\text{tn}ji}$ 为 SM 开关函数，决定了 SM 在每个时刻是导通还是关断； $i_{\text{sm}pj}$ 和 $i_{\text{sm}nj}$ 代表上桥臂和下桥臂从 SM 侧流入电容的电流； i_{pj} 和 i_{nj} 分别代表 MMC 上、下桥臂电流($j=a, b, c$)。

式(1)中 $S_{\text{tp}ji}$ 和 $S_{\text{tn}ji}$ 的表达式如下：

$$\begin{cases} S_{\text{tp}ji} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} m \cos(\omega t) + r_{\text{p}ji} \cos(\omega t) \\ S_{\text{tn}ji} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} m \cos(\omega t) - r_{\text{n}ji} \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $r_{\text{p}ji}$ 和 $r_{\text{n}ji}$ 分别代表控制 SM 内 DC/DC 变换器开关的影响因子。 $r_{\text{p}ji}$ 和 $r_{\text{n}ji}$ 通过改变开关函数 $S_{\text{tp}ji}$ 和 $S_{\text{tn}ji}$ 的形状和幅值，可影响 SM 的开关状态，从而实现 SM 输出有功功率的控制。

2 MMC-RLB 功率特性分析

2.1 MMC-RLB 功率特性分析

为实现 SOC 均衡，首先需要对 SOC 进行分析，确定影响 SOC 的关键因子。根据安时积分法^[19-20]得到的 SOC 估算式如下：

$$S(t) = S(0) - \frac{\int i_{bi}}{C_{ei}} \approx S(0) - \frac{\int P_{bi}}{U_{bi} C_{ei}} \quad (3)$$

式中： $S(t)$ 为 RLB 的 SOC 值； $S(0)$ 和 i_{bi} 分别为 RLB 的初始 SOC 值和输出电流； C_{ei} 为 RLB 的容量； U_{bi} 为 RLB 两端的端电压； P_{bi} 为 RLB 的输出有功功率。

分析式(3)可知： $S(0)$ 、 C_{ei} 这两个参数由电池本身特性决定^[21]，而 P_{bi} 参数可以通过电力电子变换器对其值进行控制。因此，如何调节 P_{bi} 值成为均衡 SOC 的关键。接下来将对 MMC 上、下桥臂，相间和 SM 内 RLB 输出的有功功率进行分析，以便推导出有功功率调节守则，实现 MMC 上、下桥臂，相间和 SM 内 RLB 的 SOC 均衡。

由文献[22]可知，MMC 的上、下桥臂电流(i_{pj} 和 i_{nj})表达式为

$$\begin{cases} i_{pj} = i_{\text{cir}j} + \frac{1}{2} i_j \\ i_{nj} = i_{\text{cir}j} - \frac{1}{2} i_j \end{cases} \quad (4)$$

式中： i_j 、 $i_{\text{cir}j}$ 分别代表着网侧电流和桥臂环流。

文献[23]指出，MMC 上、下桥臂中环流的二次谐波分量所占比重较小，分析时过程中可省略。这样，式(4)中 $i_{\text{cir}j}$ 可表示为

$$i_{\text{cir}j} = i_{\text{cir}j_dc} + i_{\text{cir}j_1} \cos(\omega t + \zeta_j) \quad (5)$$

式中： $i_{\text{cir}j_dc}$ 为环流直流分量幅值； $i_{\text{cir}j_1}$ 为环流基频分量幅值； ζ_j 为环流基频分量相角。

结合式(4)(5)，可得到 MMC 上、下桥臂的电流与环流关系的表达式为

$$\begin{cases} i_{pj} = \frac{i_j \cos(\omega t + \delta_j)}{2} + i_{\text{cir}j_dc} + i_{\text{cir}j_1} \cos(\omega t + \zeta_j) \\ i_{nj} = -\frac{i_j \cos(\omega t + \delta_j)}{2} + i_{\text{cir}j_dc} + i_{\text{cir}j_1} \cos(\omega t + \zeta_j) \end{cases} \quad (6)$$

式中： δ_j 为交流侧输出电流相角。

此外，MMC 上、下桥臂电压(u_{pj} 和 u_{nj})表达式为

$$\begin{cases} u_{pj} = \frac{U_{dc}}{2} - \frac{U_{dc}}{2} m \sin(\omega t + \theta_j) \\ u_{nj} = \frac{U_{dc}}{2} + \frac{U_{dc}}{2} m \sin(\omega t + \theta_j) \end{cases} \quad (7)$$

式中： U_{dc} 为直流母线电压； m 为调制比； ω 为交流侧电网角频率； θ_j 为各相电压的初相角，其数值定义为 $\theta_a=0$ ， $\theta_b=-2\pi/3$ ， $\theta_c=2\pi/3$ 。

将式(6)式(7)相乘，可以得到 MMC 上、下桥臂的有功功率(P_{pj} 和 P_{nj})表达式为

$$\begin{cases} P_{pj} = u_{pj} i_{pj} = -\frac{U_{dc} m i_j \sin(\theta_j + \delta_j)}{4} + \frac{U_{dc} i_{\text{cir}j_dc}}{2} - \frac{1}{2} U_{dc} m i_{\text{cir}j_1} \sin(\theta_j + \zeta_j) \\ P_{nj} = u_{nj} i_{nj} = -\frac{U_{dc} m i_j \sin(\theta_j + \delta_j)}{4} + \frac{U_{dc} i_{\text{cir}j_dc}}{2} + \frac{1}{2} U_{dc} m i_{\text{cir}j_1} \sin(\theta_j + \zeta_j) \end{cases} \quad (8)$$

通过对式(8)中 P_{pj} 和 P_{nj} 进行求和计算，即为 MMC 相间桥臂功率 P_j ，对式(8)中 P_{pj} 和 P_{nj} 进行做差，即可得到 MMC 上、下桥臂功率差 ΔP_j 。 P_j 和 ΔP_j 求解公式如下：

$$\begin{cases} P_j = P_{pj} + P_{nj} = -\frac{U_{dc} m i_j \sin(\theta_j + \delta_j)}{2} + U_{dc} i_{\text{cir}j_dc} \\ \Delta P_j = P_{pj} - P_{nj} = -U_{dc} m i_{\text{cir}j_1} \sin(\theta_j + \delta_j) \end{cases} \quad (9)$$

通过式(9)可知，MMC 相间 RLB 输出的有功功

率受直流环流(i_{cir_dc})的影响, MMC 上、下桥臂 RLB 输出的有功功率受 MMC 输出电流(i_{cir_1}), 这意味着通过调节 i_{cir_dc} 可以影响 MMC 相间 RLB 输出的有功功率, 实现 MMC 相间 RLB 的 SOC 均衡; 调节 i_{cir_1} 可以改变 MMC 上、下桥臂 RLB 输出的有功功率值, 进而实现 MMC 上、下桥臂 RLB 的 SOC 均衡。

而对于 MMC 桥臂内 SM 来说, SM 内 RLB 输出有功功率的调节是通过调 DC/DC 变换器实现的。MMC 上、下桥臂内 SM 输出的功率^[24] P_{pji} 和 P_{nji} 可表示为

$$\begin{cases} P_{pji} = \frac{U_{dc}}{8N} (4i_{cir_dc} - m_{ij} \cos \delta_j - \\ \quad 2m_{ij} i_{cir_1} \cos \zeta_j + 2r_{pji} i_{ij} \cos \delta_j + \\ \quad 4r_{pji} i_{cir_1} \cos \zeta_j) \\ P_{nji} = \frac{U_{dc}}{8N} (4i_{cir_dc} - m_{ij} \cos \delta_j + \\ \quad 2m_{ij} i_{cir_1} \cos \zeta_j + 2r_{nji} i_{ij} \cos \delta_j - \\ \quad 4r_{nji} i_{cir_1} \cos \zeta_j) \end{cases} \quad (10)$$

式中: N 代表桥臂内 SM 数量。

式(10)中, 除 r_{pji} 和 r_{nji} 变量外, 其余变量均为定值。因此, 通过调节 r_{pji} 和 r_{nji} 即可对 SM 内 T_1 和 T_2 的开关状态进行调节, 达到调节 SM 内 RLB 的输出有功功率, 实现 SM 内 RLB 的 SOC 均衡目的。

2.2 容量参数对 SOC 均衡影响分析

以 A 相上、下桥臂为例, 分析容量参数对 SOC 均衡影响。将式(8)代入式(3)可得:

$$\begin{cases} S_{pj}(t) = S_{pj}(0) - \frac{\int P_{pj}}{U_{b1} C_{e1}} & (a) \\ S_{nj}(t) = S_{nj}(0) - \frac{\int P_{nj}}{U_{b2} C_{e2}} & (b) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $S_{pj}(t)$ 和 $S_{nj}(t)$ 分别代表上、下桥臂 RLB 的 SOC 值; $S_{pj}(0)$ 和 $S_{nj}(0)$ 则分别为上、下桥臂 RLB 的初始 SOC 值; C_{e1} 和 C_{e2} 为上、下桥臂 RLB 的容量; U_{b1} 和 U_{b2} 为上、下桥臂 RLB 两端的端电压。

假设 A 相上、下桥臂 RLB 的 SOC 均衡(即满足 $S_{pj}=S_{nj}$), 将式(9)代入式(11), 并将式 11(a)和式 11(b)作差, 即可推导出环流的基频分量 i_{cir_1} 为

$$i_{cir_1} = \frac{(C_{e2} - C_{e1})P_{pj}}{C_{e1}U_{dc}m \sin(\theta_j + \delta_j)} = \frac{(C_{e2} - C_{e1})P_{nj}}{C_{e2}U_{dc}m \sin(\theta_j + \delta_j)} \quad (12)$$

RLB 容量参数对 A 相上、下桥臂基波环流(i_{cir_1})及功率差(ΔP_j)的影响分析见附录图 A1。附录图 A1(a)和附录图 A1(b)中, MMC 上、下桥臂 RLB 容量均为 200Ah, 附录图 A1(c)和附录图 A1(d)中

MMC 上、下桥臂 RLB 的容量分别为 150Ah 和 200Ah。当 RLB 容量一致时, 附录图 A1(a)和附录图 A1(b)的 i_{cir_1} 和 ΔP_j 值会变为 0。当 RLB 容量不一致时, 附录图 A1(c)和附录图 A1(d)中 i_{cir_1} 的和 ΔP_j 值均不为 0, 这说明 RLB 容量差异会影响 MMC 上、下桥臂 RLB 的有功功率分配, 进而对 RLB 的 SOC 均衡产生影响, 这也是目前基于 MMC 的 SOC 均衡方案无法实现非等容 RLB 的 SOC 均衡的根本原因。RLB 容量参数对相间和 SM 内 RLB 输出有功功率影响的分析过程和上、下桥臂分析过程类似, 限于篇幅, 在此不再赘述。

3 非等容 MMC-RLB 的 SOC 均衡方案

3.1 容量差异影响消除方案

根据 2.2 节分析可知, 容量差异会对 RLB 输出有功功率产生影响, 进而对 SOC 均衡造成影响。为均衡 MMC 内非等容 RLB 的 SOC, 首先需要消除容量参数对 SOC 均衡的影响。由式(3)可知, 若满足 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内 RLB 的 SOC 均衡, 则 MMC 内 RLB 的 SOC 符合下面条件:

$$S_{b1} - \frac{\int P_{b1}}{U_{b1} C_{e1}} = S_{b2} - \frac{\int P_{b2}}{U_{b2} C_{e2}} \quad (13)$$

式中: S_{b1} 和 S_{b2} 分别为 MMC 内 RLB 的 SOC 值。

在均衡状态时, 满足 $S_{b1}=S_{b2}$ 。根据式(13)可知, 在 RLB 的 C_{ei} 不相等条件下, 若要实现 MMC 内 2 块非等容 RLB 的 SOC 均衡, 应满足下式:

$$\frac{\int P_{b1}}{U_{b1} C_{e1}} = \frac{\int P_{b2}}{U_{b2} C_{e2}} \quad (14)$$

由式(14)可知, 只有满足非等容 RLB 输出有功功率和其容量成正比关系, 非等容 RLB 的 SOC 才能逐步聚拢。

以 A 相和 B 相为例, 根据式(9), 若要使 A 相和 B 相 RLB 输出的有功功率比等于容量比, 则 A 相和 B 相 RLB 输出有功功率应满足:

$$\begin{aligned} \frac{P_a}{P_b} &= \frac{C_{ea}}{C_{eb}} = \\ &= \frac{-m_{ia} \sin(\theta_a + \delta_a) + 2i_{cira_dc}}{-m_{ib} \sin(\theta_b + \delta_b) + 2i_{cibr_dc}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: P_a 和 P_b 分别代表 A 相和 B 相 RLB 输出的有功功率; C_{ea} 和 C_{eb} 则表示 A 相和 B 相 RLB 的总容量; i_a 和 i_b 代表 A 相和 B 相网侧电流; δ_a 和 δ_b 为 A 相和 B 相交流侧输出电流相角; i_{cira_dc} 和 i_{cibr_dc} 为 A 相和 B 相直流环流。

以 A 相上、下桥臂为例分析, 结合式(8), 若要使 A 相上、下桥臂 RLB 输出的有功功率比等于容量比, 则 A 相上、下桥臂 RLB 输出有功功率应满足:

$$\frac{P_{pa}}{P_{na}} = \frac{C_{epa}}{C_{epa}} = \frac{-mi_a \sin(\theta_a + \delta_a) + 2i_{cira_dc} - 2mi_{cira_1} \sin(\theta_a + \zeta_a)}{-mi_a \sin(\theta_a + \delta_a) + 2i_{cira_dc} + 2mi_{cira_1} \sin(\theta_a + \zeta_a)} \quad (16)$$

式中: P_{pa} 和 P_{pb} 分别表示 A 相上、下桥臂 RLB 输出的有功功率; C_{epa} 和 C_{epb} 则表示 A 相上、下桥臂 RLB 的总容量; ζ_a 为 A 相的环流基频分量相角; i_{cira_1} 为 A 相上、下桥臂基波环流。

以 A 相上桥臂为例分析。结合式(10)可知, 若要使 A 相上桥臂 2 个 SM 的 RLB 输出有功功率比等于容量比, 应满足:

$$\frac{P_{pa1}}{P_{pa2}} = \frac{C_{epa1}}{C_{epa2}} = \frac{4i_{cira_dc} - mi_a \cos \delta_a - 2mi_{cira_1} \cos \zeta_a + 2r_{pa1} i_g \cos \delta_a + 4r_{pa1} i_{cira_1} \cos \zeta_a}{4i_{cira_dc} - mi_a \cos \delta_a - 2mi_{cira_1} \cos \zeta_a + 2r_{pa2} i_g \cos \delta_a + 4r_{pa2} i_{cira_1} \cos \zeta_a} \quad (17)$$

式中: P_{pa1} 和 P_{pa2} 分别表示 A 相上桥臂 SM1 和 SM2 的 RLB 输出有功功率; C_{epa1} 和 C_{epa2} 则表示 A 相上桥臂 SM1 和 SM2 的 RLB 的容量, r_{pa1} 和 r_{pa2} 分别代表 A 相上桥臂 SM1 和 SM2 开关函数的影响因子。

根据式(15)(16)(17)可知, 通过控制 i_{cirj_dc} 变量可改变 MMC 每相 RLB 输出的有功功率, 可实现 MMC 相间 RLB 输出有功功率比等于容量比。通过控制桥臂环流基波分量基波环流 i_{cirj_1} 改变 MMC 上、下桥臂 RLB 输出的有功功率, 可实现 MMC 每一相内上、下桥臂 RLB 输出有功功率比等于容量比。通过控制 SM 的内 T_1 和 T_2 的开关频率可调节 SM 内 RLB 输出的有功功率, 实现多 SM 内 RLB 输出有功功率比等于容量比。

综上可知: 实现非等容 RLB 的 SOC 均衡的关键在于有功功率的调节, 基于此, 提出了有功功率再分配模块(如图 2)。利用 SM 内 RLB 的电压测量值(U_{bkj})及其反馈的开关状态 r_{kji} , 通过 PWM 技术生成调制参考信号 s_i 。随后, 将此调制信号 s_i 与 SM 的有功功率输出进行乘法运算, 再经过积分处理, 并除以 RLB 端电压及其容量值, 进而得到的 SM 模拟功率值 P_{batkj} , P_{batkj} 再减去 SM 有功功率的平均值并应用 PI 控制器进行调整。接着, 将 PI 控制器输出信号与单向桥臂电流产生的开关信号相乘, 计算出针对 SM 内非等容 RLB 的特定开关参数值系数 $r_{kji}(k=p, n)$ 。通过 PWM 产生 SM 内的 T_1 和 T_2 开关控制信号。通过此流程确保了 SM 内各非等容 RLB 输出的有功功率能够和其容量成正比, 从而消除 RLB 容量差异对 SOC 均衡的影响。

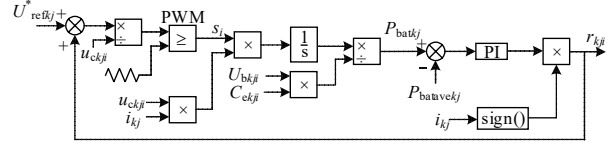


图 2 SM 有功功率再分配模块

Fig. 2 Active power redistribution module of SM

由于 MMC 相间和上、下桥臂内非等容 RLB 有功功率调节方式与 SM 内非等容 RLB 有功功率调节方式不同, 因此, MMC 相间和上、下桥臂内有有功功率再分配模块与图 2 不同。MMC 相间非等容 RLB 有功功率再分配表达式如下:

$$P_{jref} = \frac{C_{ej}}{C_e} P_{ref} \quad (18)$$

式中: P_{ref} 为交流侧总功率; C_{ej} 为各相 RLB 容量; C_e 为 RLB 总容量

在所提 MMC 相间非等容 RLB 有功功率分配方案中, 修正后的相间非等容 RLB 有功功率的参考值等于有功功率的参考值与相间 RLB 的容量比的乘积。再将修正后的相间非等容 RLB 有功功率的参考值与相间非等容 RLB 输出有功功率作差, 在经过 PI 控制器, 就可实现 MMC 相间非等容 RLB 输出有功功率与容量成正比的目标。

MMC 上、下桥臂内非等容 RLB 有功功率修正过程与相间 RLB 有功功率修正过程类似, 其表达式如下:

$$\begin{cases} P_{pjref} = \frac{C_{epj}}{C_{ej}} P_{jref} \\ P_{njref} = \frac{C_{enj}}{C_{ej}} P_{jref} \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_{jref} 为各相 RLB 功率; P_{pjref} 和 P_{njref} 分别代表各相上、下桥臂 RLB 功率; C_{epj} 和 C_{enj} 表示各相上、下桥臂的 RLB 的容量。

3.2 MMC 相间非等容 RLB 的 SOC 均衡控制

所提 MMC 相间非等容 RLB 的 SOC 均衡控制框图如图 3 所示, 主要由 SOC 均衡模块和 MMC 相间有功功率再分配模块构成。MMC 相间有功功率再分配模块负责消除容量对 SOC 影响, SOC 均衡模块负责均衡 SOC。首先, 将 MMC 内所有 RLB 的 SOC 平均值(S_{ave})与各相所有 SM 内 RLB 的 SOC 平均值(S_{jave})作差, 经过 PI 控制器得到各相环流直流分量的指令值。随后, 将此指令值与实际环流直流分量进行作差, 将该差值通过 PI 控制器得到控制信号(g_{jdc})。将控制信号 g_{jdc} 与相间有功功率再分配模块得到的信号进行相加, 输出用于相间均衡的调制波信号 u_{cirj}^* 。经过此过程, 若 A 相的 RLB 的 SOC 值低于 SOC 平均值(S_{ave}), 则相应地增加 A 相桥臂

的控制效果进行验证。仿真中采用仿真参数见附录表 A1。

仿真中设置的 N 个 SM 内 RLB 的容量值如见附录表 A2。表 2 中, A_p 和 A_n 分别代表 A 相的上、下桥臂, B_p 、 B_n 分别代表 B 相的上、下桥臂、 C_p 和 C_n 分别代表 C 相的上、下桥臂。

4.1 现有方案仿真验证

附录图 B1 为将文献[13]中提出的基于 MMC 的锂电池 SOC 均衡方案应用到非等容 RLB 的仿真波形, 仿真中设置的 SM 内 RLB 容量见附录表 A2。MMC 相间 RLB 的初始 SOC 分别为 30.03%、30.00% 和 29.97%。MMC 上、下桥臂 RLB 初始 SOC 分别为 30.04%至 30.02%。SM 内 RLB 的 SOC 初始值分别为 30.10%至 29.92%。从附录图 B1(a)、附录图 B1(c)和附录图 B1(e)可以看出, 受 RLB 容量差异的影响, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内的 RLB 的 SOC 差值并没有逐渐缩小。此外, 附录图 B1(b)、附录图 B1(d)和附录图 B1(f)说明 RLB 容量差异会对现有基于 MMC 的 SOC 均衡方案的上、下桥臂, 相间和 SM 内非等容 RLB 输出有功功率分配效果产生影响, 造成现有基于 MMC 的 SOC 均衡方案失效。

4.2 等容 RLB 采用所提方案的仿真验证

附录图 B2 展示了等容 RLB 采用所提方案放电过程仿真波形。MMC 内 RLB 的容量均为 200Ah。从附录图 B2(a)、附录图 B2(c)和附录图 B2(e)可以看出, 等容 RLB 采用所提方案后, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内等容 RLB 的 SOC 差值逐渐缩小。在 $t=0.8s$ 左右, 相间 RLB 的 SOC 最大差值由 0.02% 逐渐缩小至无限接近于 0.00011%, 上、下桥臂间等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.12%逐渐缩小至 0.00021%, SM 内等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.2% 逐渐缩小至 0.00019%。该结果表明, 所提出的 SOC 均衡方案在 RLB 容量相等情况下能够有效地均衡 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内 RLB 的 SOC。此外, 附录图 B2(b)、附录图 B2(d)和附录图 B2(f)展示了 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内 RLB 输出的有功功率值。有功功率仿真结果证明, 在 RLB 等容情况下, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内 RLB 输出的有功功率处于均分状态。该结果和传统基于 MMC 的等容锂电池 SOC 均衡方案的锂电池有功功率状态保持一致。

4.3 非等容 RLB 采用所提方案的仿真验证

附录图 B3 展示了非等容 RLB 采用所提方案放电过程仿真波形。仿真中 SM 的 RLB 容量见附录表 A2。从附录图 B3 可以看出, 在所提方案调节下,

MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内非等容 RLB 的 SOC 逐渐趋于重合。MMC 相间非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.22%逐渐缩小至 0.00017%; MMC 上、下桥臂间非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.12%逐渐缩小至 0.00025%; SM 内非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.2%逐渐缩小至 0.00011%, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内非等容 RLB 的 SOC 均达到了均衡状态。值得注意的是, 和附录图 B2(b)、附录图 B2(d)和附录图 B2(f)不同, MMC 相间(附录图 B3(b))、上、下桥臂(附录图 B3(d))和 SM 内(附录图 B3(f))RLB 输出的稳态有功功率值有功功率非均分, 而是和 RLB 容量值成正比, 该结果和理论分析一致, 也是实现 MMC 内非等容 RLB 均衡的关键。

4.4 非等容 RLB 充电过程仿真验证

附录图 B4 为非等容 RLB 采用所提方案充电过程仿真波形, 仿真中 SM 内 RLB 容量设置和工况 4.3 一致。从附录图 B4(a)、附录图 B4(c)和附录图 B4(e)可以看出, 在充电过程中, MMC 相间非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.22%逐渐缩小至 0.00027%; MMC 上、下桥臂间非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.12%逐渐缩小至 0.00016%; SM 内非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.2%逐渐缩小至 0.00025%。此外, 和附录图 B3(b)、附录图 B3(d)和附录图 B3(e)类似, 充电过程中 MMC 相间(附录图 B4(b))、上、下桥臂(附录图 B4(d))和 SM 内(附录图 B4(f))非等容 RLB 输出的稳态有功功率值和 RLB 容量值成正比。值得注意的是, 由于 RLB 处于充电状态, 因此, 附录图 B4(b)、附录图 B4(d)和附录图 B4(f)中的有功功率均为负值。

4.5 非等容 RLB 充放电转换仿真验证

采用所提方案时非等容 RLB 充放电转换过程见附录图 B5, 仿真中 SM 内 RLB 容量设置和工况 4.3 一致。在 $t=1.0s$ 时, MMC 内非等容 RLB 从充电状态转换为放电状态, 非等容 RLB 输出有功功率值由负值转换成正值。从附录图 B5(a)、附录图 B5(c)和附录图 B5(e)可以看出, 所设计的方案能实现 MMC 内非等容 RLB 充放电转换过程中的 SOC 均衡。此外, 附录图 B5(b)、附录图 B5(d)和附录图 B5(f)说明非等容 RLB 充放电过程中, 实现 SOC 均衡后, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内非等容 RLB 输出的有功功率要和其容量值成正比, 附录图 B5 表明采用所提方案可以完成 MMC 内非等容 RLB 充放电转换过程中 SOC 均衡。

4.6 所提方案在负荷波动工况仿真验证

所提方案在负荷发生波动时的仿真波形如附

录图 B6。在 $t=1.0\text{s}$ 时切除负载, 以模拟负荷波动。仿真中 SM 内 RLB 容量和初始 SOC 设置和工况 4.3 一致。在所提方案的控制下, MMC 相间(附录图 B6(a))非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.22% 逐渐缩小至 0.00021%; 上、下桥臂间(附录图 B6(c))非等容 RLB 的 SOC 最大差值由 0.12% 逐渐缩小至 0.00033%; SM 内(附录图 B6(e))RLB 的 SOC 最大差值由 0.2% 逐渐缩小至 0.00019%, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内非等容 RLB 的 SOC 逐步均衡。由于在 $t=1.0\text{s}$ 时切除了负荷, 因此, 附录图 B6(b)、附录图 B6(d)和附录图 B6(f)RLB 输出的有功功率减小, 附录图 B6(a)、附录图 B6(c)和附录图 B6(f)中 SOC 下降的速度降低, 但稳态时各 RLB 输出有功功率仍然和其容量值保持正比关系。附录图 B6 表明, 所提方案能够在负荷波动的情况下自动调节 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内非等容 RLB 输出的有功功率, 实现负荷波动下的 SOC 均衡。

4.7 所提方案即插即用工况仿真验证

MMC 的优点之一是具有良好的即插即用特性。为验证所提方案在 SM 即插即用工况下的有效性, 进行了仿真验证(如附录图 B7)。在 $t=0.3\text{s}$ 前, A 相上桥臂 SM10 停机, 在 $t=0.3\text{s}$ 时投入运行。仿真中 SM 内 RLB 容量和初始 SOC 设置和工况 4.3 一致。从附录图 B7(e)和附录图 B7(f)可以看出, 由于 SM10 在 $t=0.3\text{s}$ 前停机, 其 SOC 值保持不变, 输出的有功功率为 0。在 $t=0.3\text{s}$ 时, SM10 投入运行, SM10 内 RLB 开始输出有功功率。在所提方案的控制下, SM10 内 RLB 的 SOC 值逐渐向其他 SM 内 RLB 的 SOC 靠拢, 其输出的有功功率在 SOC 均衡后和容量成正比。此外, 受 SM10 投入的影响, MMC 相间(附录图 B7(a)和附录图 B7(b))和上、下桥臂间(附录图 B7(c)和附录图 A7(d))的 SOC 和有功功率也发生了波动, 但经过一段时间的调节, 最终波形趋于稳定。附录图 B7 说明, 所提方案在 SM 即插即用工况下仍然能维持良好的 SOC 均衡效果。

5 实验验证

为了进一步验证所提方案的工程实用性, 搭建了小功率 MMC-RLB 实验平台对所提方案进行实验验证。由于实验条件的限制, 只对仿真工况 4.2 和 4.3 进行了实验验证。实验参数见附录表 A1。

5.1 等容 RLB 采用所提方案的实验验证

附录图 C1 为等容 RLB 采用所提方案采集到的实验波形, 在 $t=t_1$ 时刻切入负荷 2。实验中 MMC 内 RLB 的容量均为 200Ah。附录图 C1 实验结果和

附录图 B2 仿真结果类似, 说明采用所提方案能减小 MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内等容 RLB 的 SOC 均衡差, 随着时间的推移, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内等容 RLB 的 SOC 最终均衡。由于采用 RLB 组容量一致, 因此, 附录图 C1(b)、附录图 C1(d)和附录图 C1(f)RLB 输出的有功功率波形均分, 这点与理论分析和仿真结果保持一致。在 $t=t_1$ 时刻加重负荷后, RLB 输出的有功功率值增加, 但仍不影响 SOC 均衡效果。

5.2 非等容 RLB 采用所提方案的实验验证

当 MMC 内 RLB 的容量不一致采用所提方案得到的结果见附录图 C2, 在 $t=t_1$ 时刻加重系统负荷。和理论分析及附录图 B3 仿真结果一致, 采用所提方案后, MMC 上、下桥臂, 相间和 SM 内非等容 RLB 的 SOC 在整个过程中始终处于趋近的状态, 调节结束后 SOC 实现均衡。在 SOC 均衡后, 附录图 C2(b)、附录图 C2 (d)和附录图 C2 (f) RLB 输出的有功功率波形和其容量成正比, 负荷增加导致其输出有功功率的增加。附录图 C2 结果进一步验证了所提方案的正确性。

6 结论

本文对 MMC 进行了数学建模, 分析 MMC 内 RLB 输出有功功率特性及 RLB 容量差异对 SOC 的影响。在此基础上, 设计了 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内非等容 RLB 的 SOC 均衡控制策略。与现有基于 MMC 的 SOC 控制策略对比结果及多种工况下的仿真和实验结果验证了所提方案的正确性及先进性。具体结论如下:

1) MMC 内 RLB 的容量差异会对 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内 RLB 输出有功功率造成影响, 进而导致现有基于 MMC 的 SOC 均衡方案失效。

2) 通过在 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内非等容 RLB 控制模块内引入有功功率分配模块, 能够对 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内非等容 RLB 输出的有功功率进行校正, 消除容量差异对 SOC 均衡的影响。在此基础上, 通过将 SOC 均衡因子引入 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 控制环节, 能进一步对 MMC 内非等容 RLB 输出的有功功率进行调节, 消除初始 SOC 均衡差, 实现 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内非等容 RLB 的 SOC 均衡。

结果表明, 和现有方案相比, 所提方案能够实现 MMC 上、下桥臂, 相间及 SM 内非等容 RLB 充放电过程中的 SOC 均衡, 并且对 RLB 容量一致、负荷波动、即插即用、充放电转换工况也具有良好

的适应性。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 宋晓通, 吕倩楠, 孙艺, 等. 基于电价引导的电动汽车与综合能源系统交互策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3744-3754.
SONG Xiaotong, LV Qiannan, SUN Yi, et al. Interactive strategy of electric vehicles and integrated energy system based on electricity price guidance[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3744-3754(in Chinese).
- [2] HUANG Yanhui, LIU Fei, ZHUANG Yizhan, et al. Bidirectional Three-Port converter for modular multilevel converter-based retired battery energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(9): 11148-11163.
- [3] 李建林, 修晓青, 刘道坦, 等. 计及政策激励的退役动力电池储能系统梯次应用研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2562-2568.
LI Jianlin, XIU Xiaoqing, LIU Dao, et al. Research on second use of retired electric vehicle battery energy storage system considering policy incentive[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2562-2568(in Chinese).
- [4] 吴青峰, 褚晓林, 刘立群, 等. 基于 VDCG 的直流微电网退役锂电池 SOC 均衡方案[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 14-23.
WU Qingfeng, CHU Xiaolin, LIU Liqun, et al. SOC balancing scheme for lithium batteries in a DC microgrid based on VDCG[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(15): 14-23(in Chinese).
- [5] 周烽源, 秦亮, 杨诗琦, 等. 模块化多电平变流器电容电压均衡策略研究进展[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 322-337.
ZHOU Yiyuan, QIN Liang, YANG Shiqi, et al. Research progress of capacitor voltage balancing strategies for modular multilevel converters[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 322-337(in Chinese).
- [6] 魏辰阳, 汤广福, 吴奕霖, 等. 高压大容量直流变压器拓扑研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6940-6958.
WEI Chenyang, TANG Guangfu, WU Yilin, et al. Overview and prospect of topology research on high voltage and large capacity DC transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6940-6958(in Chinese).
- [7] 吴青峰, 褚晓林, 刘立群, 等. 基于 VSG 的微电网非等容锂电池 SOC 均衡方案[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 5142-5150.
WU Qingfeng, CHU Xiaolin, LIU Liqun, et al. SOC balancing scheme of non-equal capacity lithium battery in microgrid based on VSG[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5142-5150(in Chinese).
- [8] 李建林, 李雅欣, 吕超, 等. 退役动力电池梯次利用关键技术及现状分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 172-183.
LI Jianlin, LI Yaxin, LV Chao, et al. Key technology and research status of cascaded utilization in decommissioned power battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 172-183(in Chinese).
- [9] 王帅, 荆龙, 吴学智, 等. 基于直流环流注入的 MMC 储能系统相间功率均衡控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2862-2869.
WANG Shuai, JING Long, WU Xuezhi, et al. Interphase power equalization control strategy for MMC energy storage system based on DC circulating current injection[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2862-2869(in Chinese).
- [10] 郭龙, 梁晖, 张维戈. 基于模块化多电平变流器的电池储能系统荷电状态均衡控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2688-2694.
GUO Long, LIANG Hui, ZHANG Weige. State-of-Charge balancing control strategy for battery energy storage system based on modular multi-level converter[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2688-2694(in Chinese).
- [11] 银泽一, 王广柱, 程振兴. 基于模块化多电平变换器的插电式混合动力电动汽车系统充电控制策略[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1316-1326.
YIN Zeyi, WANG Guangzhu, CHENG Zhenxing. Charge control strategy of plug-in hybrid electric vehicle system based on modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1316-1326(in Chinese).
- [12] 刘红锐, 张彬, 刘威, 等. 一种大规模链式电池储能系统分层式并行均衡器[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 91-98.
LIU Hongrui, ZHANG Bin, LIU Wei, et al. Hierarchical parallel equalizer for large-scale chain battery energy storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(6): 91-98(in Chinese).
- [13] 程从智, 徐晨, 戴珂, 等. MMC-BESS 电池荷电状态三级均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 100-108.
CHENG Congzhi, XU Chen, DAI Ke, et al. Three-level balancing control for battery state-of-charge based on MMC-BESS[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 100-108(in Chinese).
- [14] 汪晋安, 许建中. 分布式储能型 MMC 电池荷电状态均衡优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 44-50.
WANG Jin'an, XU Jianzhong. SOC balancing optimal control strategy amongst batteries in MMC-DES[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 44-50(in Chinese).
- [15] 马文忠, 孙伟, 王玉生, 等. 基于 MMC 的分布式储能系统及其快速 SOC 均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 1-11.
MA Wenzhong, SUN Wei, WANG Yusheng, et al. Distributed energy storage system based on MMC and rapid SOC balancing control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 1-11(in Chinese).
- [16] CHEN Qiang, LI Rui, CAI Xu. Analysis and fault control of hybrid modular multilevel converter with integrated battery energy storage system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 64-78.
- [17] LUO Hui, XU Chen, DAI Ke, et al. Balance control of SOC for MMC-BESS with power fluctuation suppression, PCC voltage regulation, and harmonic mitigation in grid-connected wind farm[J]. IEEE Access, 2022, 10: 117732-117744.
- [18] 韩雪, 贺荣栋, 凌志斌. 部分接入电池储能系统的模块化多电平换流器控制方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 100-108.
HAN Xue, HE Rongdong, LING Zhibin. Control method of modular multilevel converter with partly integrated battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 100-108(in Chinese).
- [19] 卢志刚, 苗泽裕, 蔡瑶. 考虑时变线阻的多储能 SOC 稳定均衡控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 127-137.
LU Zhigang, MIAO Zeyu, CAI Yao. Stable equilibrium control strategy for Multi-energy storage SOC considering time-varying linear resistance[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 127-137(in Chinese).
- [20] CAO Yuan, ABU QAHOUC J A. Hierarchical SOC balancing controller for battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9386-9397.
- [21] WU Qingfeng, GUAN Ruizhi, SUN Xiaofeng, et al. SoC balancing strategy for multiple energy storage units with different capacities in islanded microgrids based on droop control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4):

- 1932-1941.
- [22] 李子欣, 徐飞, 赵成勇, 等. 面向高压直流输电的电流源型主动换相换流器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1053-1069.
- LI Zixin, XU Fei, ZHAO Chengyong, et al. Research review of current-source type actively commutated converter for high voltage direct current transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1053-1068(in Chinese).
- [23] MA Zhan, GAO Feng, GU Xin, et al. Multilayer SOH equalization scheme for MMC battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13514-13527.
- [24] 潘尧, 吴光尧, 孙孝峰, 等. 基于 MMC-BESS 的子模块电池功率极限值分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 427-438.
- PAN Yao, WU Guangyao, SUN Xiaofeng, et al. Analysis of power limits for submodule batteries based on MMC-BESS[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 427-438(in Chinese).
- [25] 陶海波, 杨晓峰, 李泽杰, 等. 电能路由器中基于 MMC 的超级电容储能系统及其改进 SOC 均衡控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3970-3978.
- TAO Haibo, YANG Xiaofeng, LI Zejie, et al. A modified SOC equalization control strategy of MMC based super capacitor energy storage system in electrical energy router application[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3970-3978(in Chinese).
- [26] ZHI Na, MING Xu, DING Youguo, et al. Power-loop-free virtual DC machine control with differential compensation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 413-422.



吴青峰

在线出版日期: 2025-04-01。

收稿日期: 2025-01-22。

作者简介:

吴青峰(1987), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源并网及控制技术、储能系统状态参数估算及均衡技术等方面, E-mail: 827211907@qq.com;

王策(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为储能系统状态参数状态估计及均衡技术, E-mail: 1574589541@qq.com;

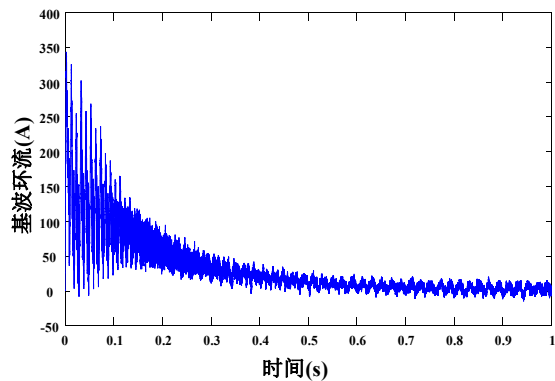
刘立群(1976), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能电网运行与控制、新能源并网与控制技术等;

王腾光(1989), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子控制技术;

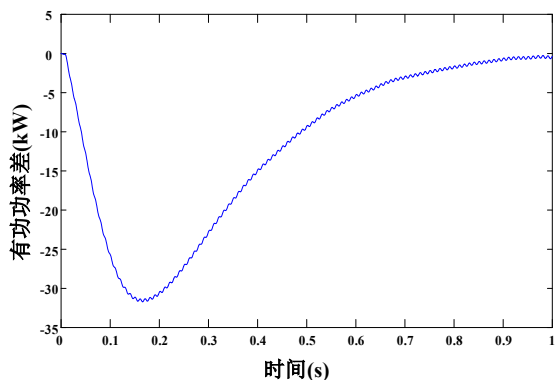
薄利明(1989), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、新能源并网与控制。

(责任编辑 宋钰龙)

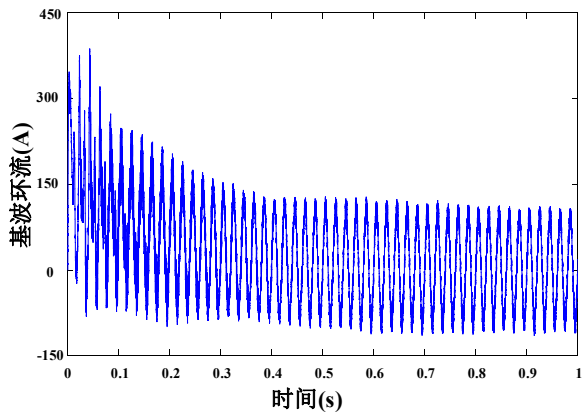
附录 A



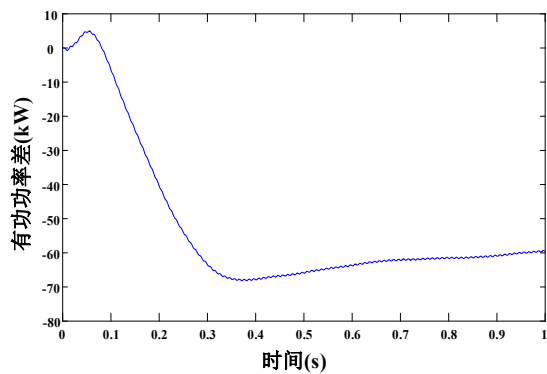
(a) RLB 等容时的基波环流值



(b) RLB 等容时的 MMC 上、下桥臂有功功率差(ΔP_j)



(c) RLB 非等容时的基波环流值



(d) RLB 非等容时的 MMC 上、下桥臂有功功率差(ΔP_j)

图 A1 容量参数对 RLB 有功功率影响分析

Fig. A1 Analysis of the impact of capacity parameters on RLB active power

表 A1 仿真和实验参数

Table A1 Simulation and experimental parameters

参数	符号	仿真值	实验值
桥臂内 SM 数目	N	10	4
交流侧电压/KV	u_s	10	0.15
直流侧电压/KV	U_{dc}	20	0.42
SM 电容/mF	C	4	0.16
桥臂电感/mH	L_m	5	1.2
桥臂电阻/ Ω	R_m	0.01	0.005
DC/DC 电感/mH	L_b	1	0.6
电容额定电压/kV	u_c	2	0.38
交流频率/Hz	f_s	50	50
开关频率/HZ	f	2000	1000

表 A2 SM 容量表

Table A2 Submodule Capacity Table

RLB 容量/Ah	A _p	A _n	B _p	B _n	C _p	C _n
SM1 容量/Ah	125	135	135	145	145	155
SM2 容量/Ah	130	140	140	150	150	160
SM3 容量/Ah	135	145	145	155	155	165
SM4 容量/Ah	140	150	150	160	160	170
SM5 容量/Ah	145	155	155	165	165	175
SM6 容量/Ah	150	160	160	170	170	180
SM7 容量/Ah	155	165	165	175	175	185
SM8 容量/Ah	160	170	170	180	180	190
SM9 容量/Ah	165	175	175	185	185	195
SM10 容量/Ah	170	180	180	190	190	200

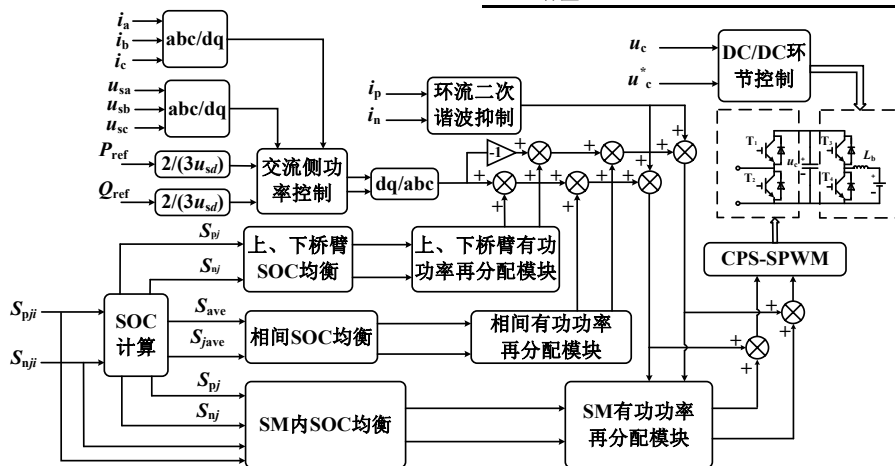
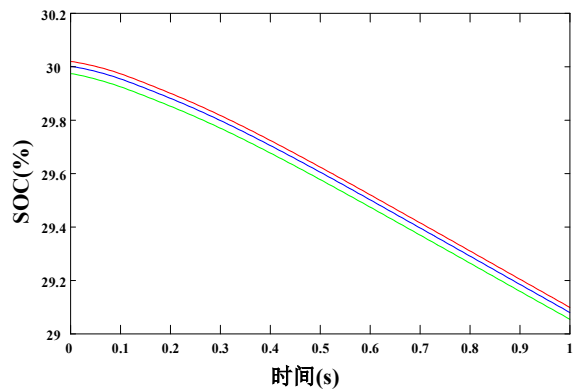


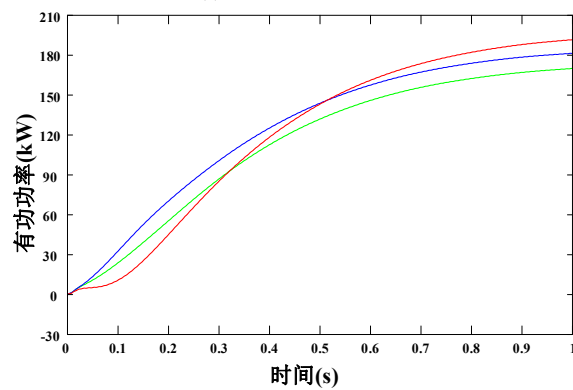
图 A2 MMC 内非等容 RLB 的 SOC 均衡总体控制框图

Fig. A2 Overall control block diagram of SOC balancing for non-equal capacity RLB in MMC

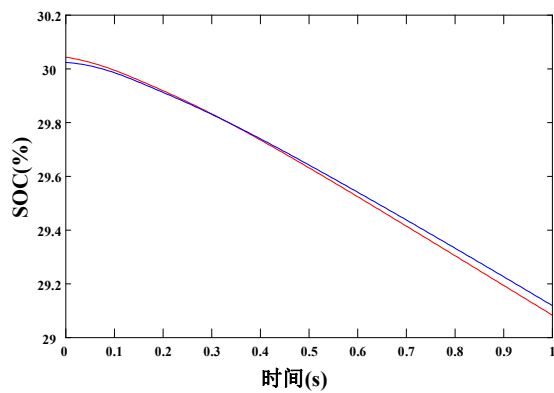
附录 B



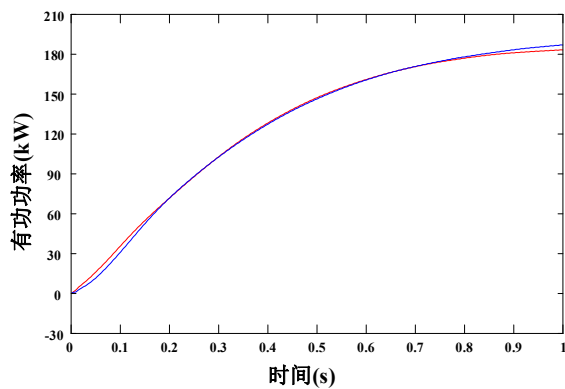
(a) 相间 RLB 的 SOC



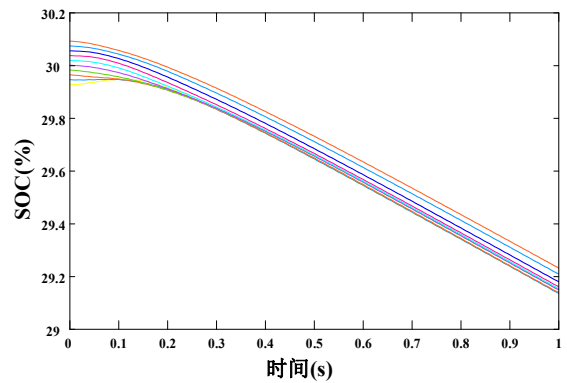
(b) 相间 RLB 输出有功功率



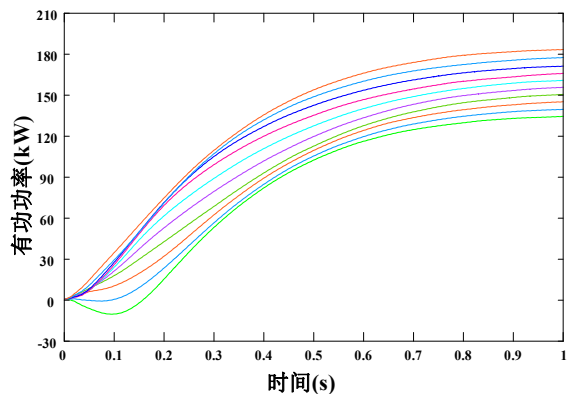
(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率

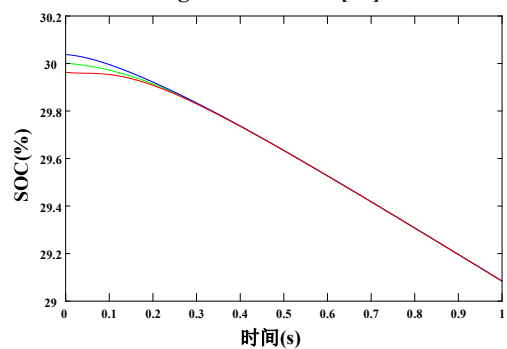


(e) SM 内 RLB 的 SOC

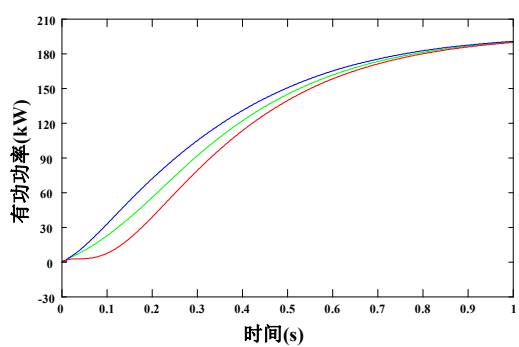


(f) SM 内 RLB 输出有功功率

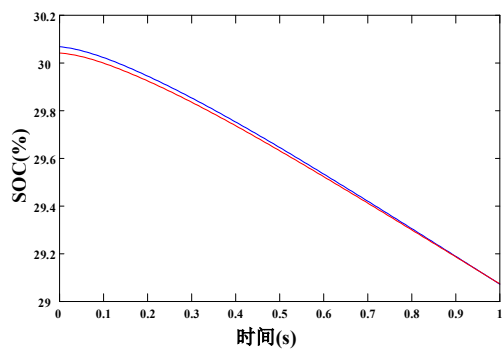
图 B1 非等容 RLB 采用文献[13]方案仿真波形
Fig. B1 Simulation waveforms of non-equal capacity RLB using the scheme in [13]



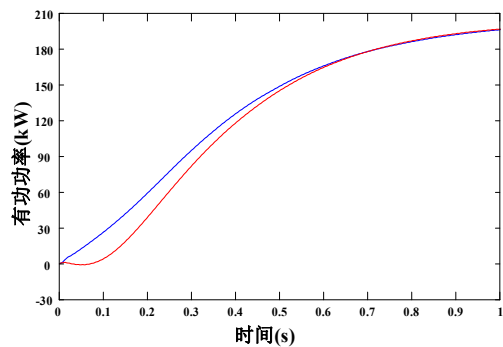
(a) 相间 RLB 的 SOC



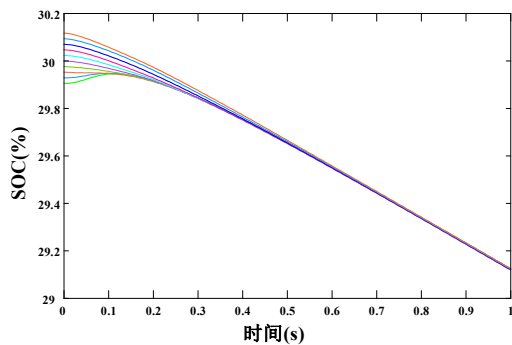
(b) 相间 RLB 输出有功功率



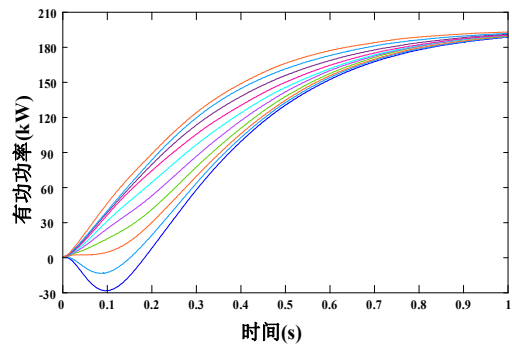
(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



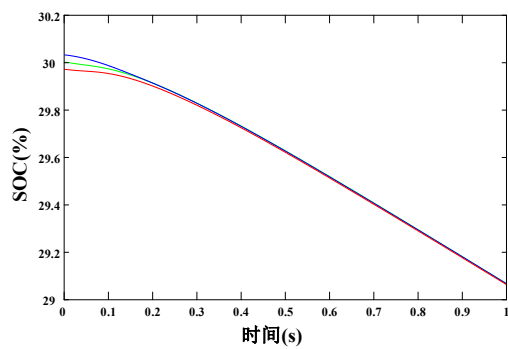
(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率



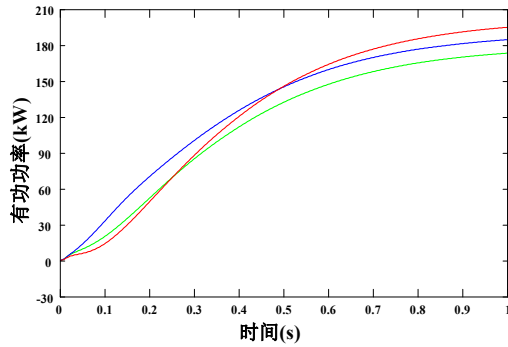
(e) SM 内 RLB 的 SOC



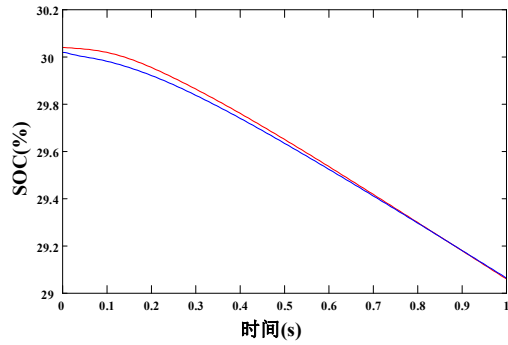
(f) SM 内 RLB 输出有功功率



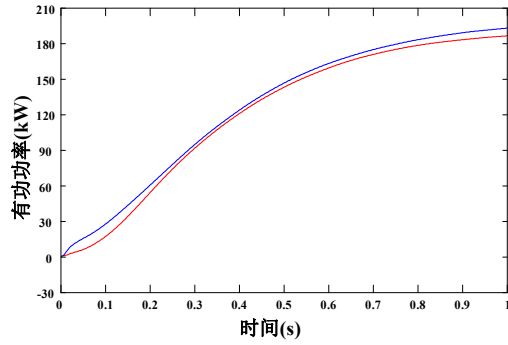
(a) 相间 RLB 的 SOC



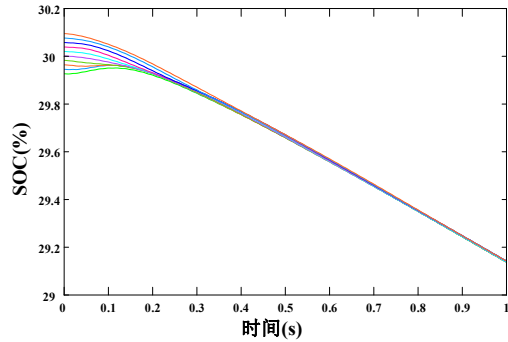
(b) 相间 RLB 输出有功功率



(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率



(e) SM 内 RLB 的 SOC

图 B2 等容 RLB 采用所提方案的仿真波形

Fig. B2 Simulation waveforms of equal capacity RLB using the proposed scheme

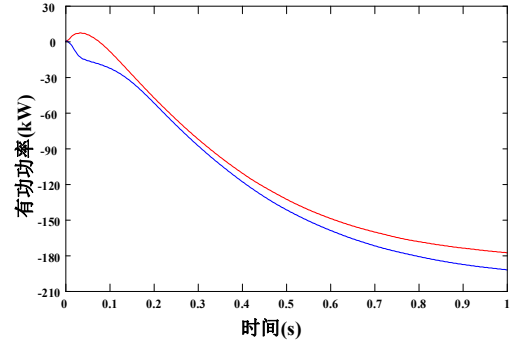
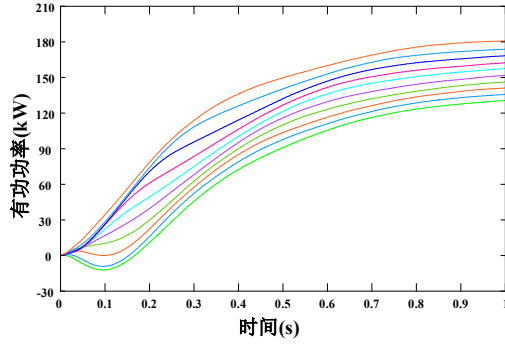


图 B3 非等容 RLB 采用所提方案的仿真波形
Fig. B3 Simulation waveforms of non-equal capacity RLB using the proposed scheme

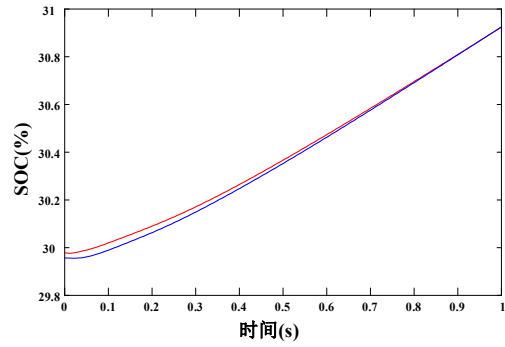
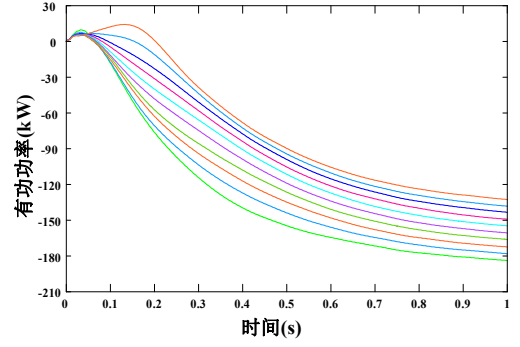
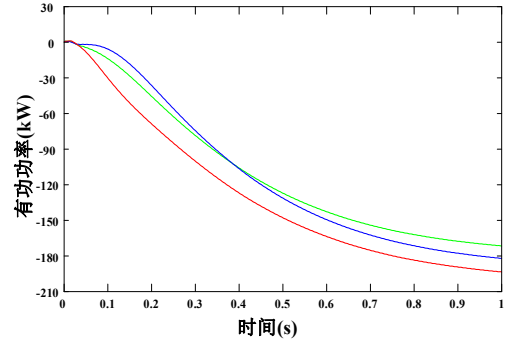
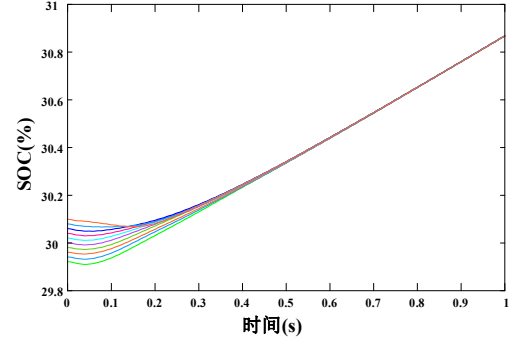
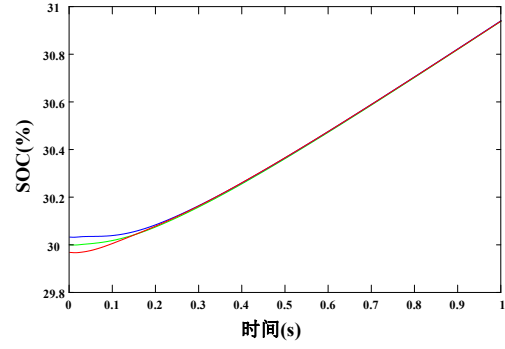
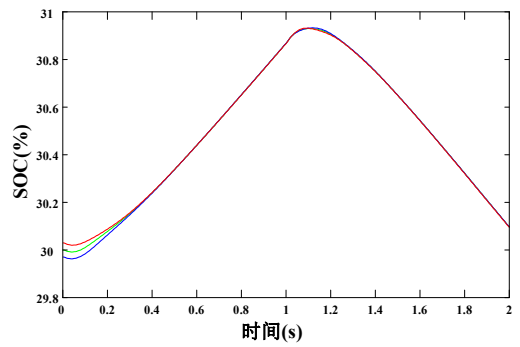
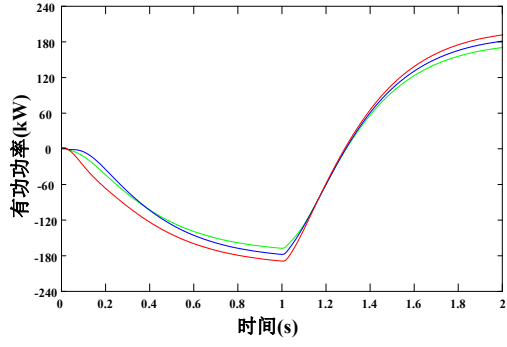
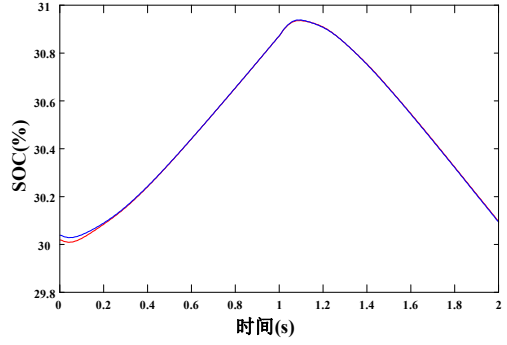


图 B4 非等容 RLB 采用所提方案的充电过程
Fig. B4 Charging process of the non-equal capacity RLB using the proposed scheme

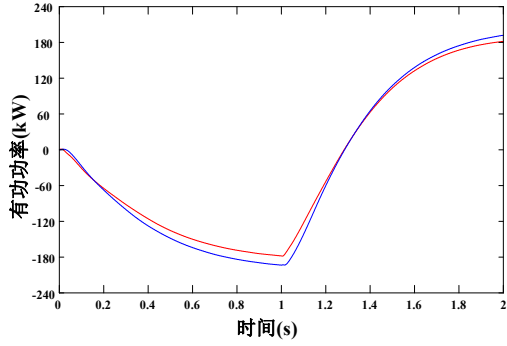




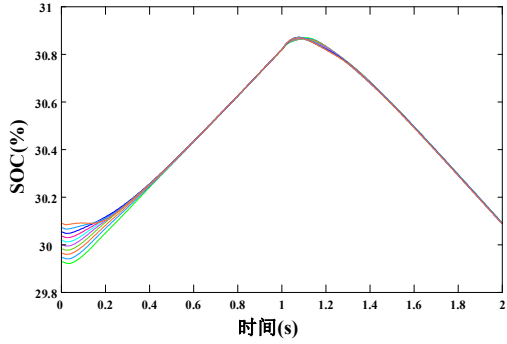
(b) 相间 RLB 输出有功功率



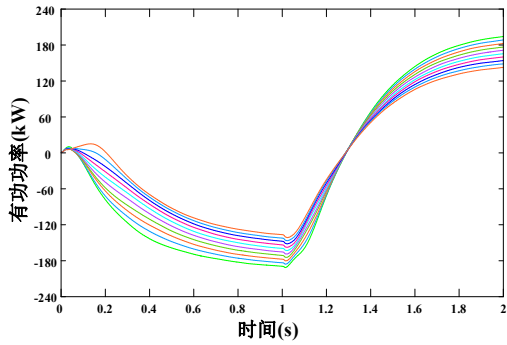
(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率

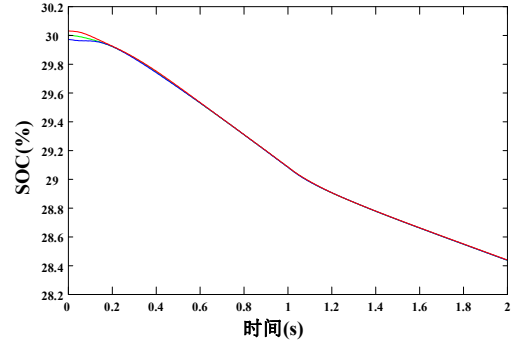


(e) SM 内 RLB 的 SOC

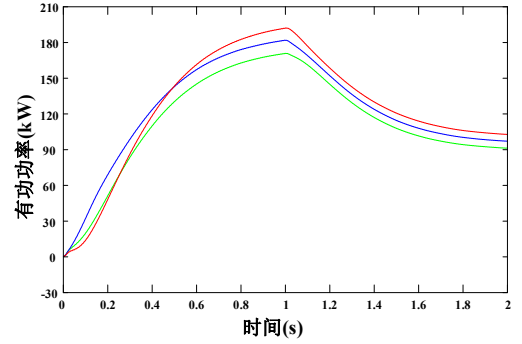


(f) SM 内 RLB 输出有功功率

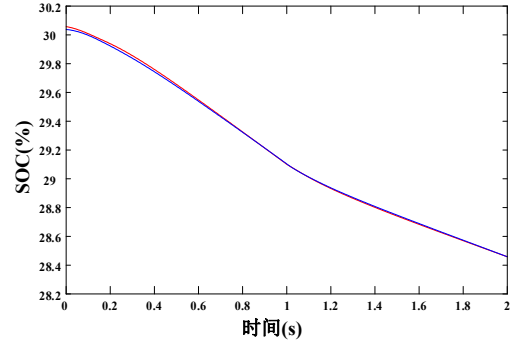
图 B5 非等容 RLB 采用所提方案充放电转换过程
Fig. B5 Non-equal capacity RLB adopts the proposed scheme for charge discharge conversion process



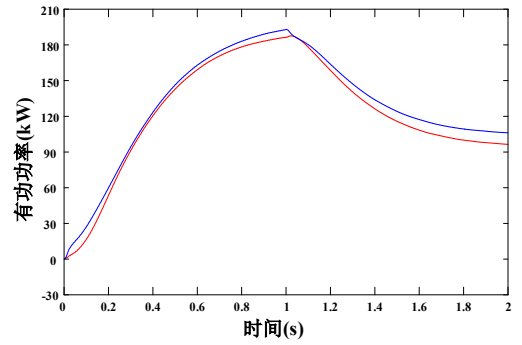
(a) 相间 RLB 的 SOC



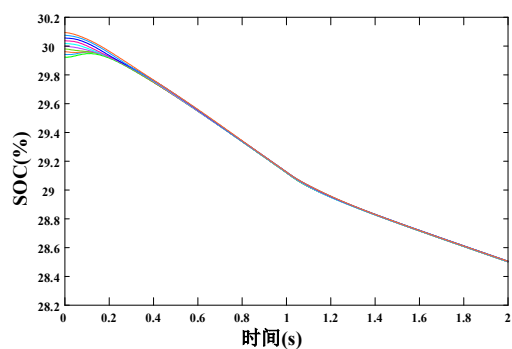
(b) 相间 RLB 输出有功功率



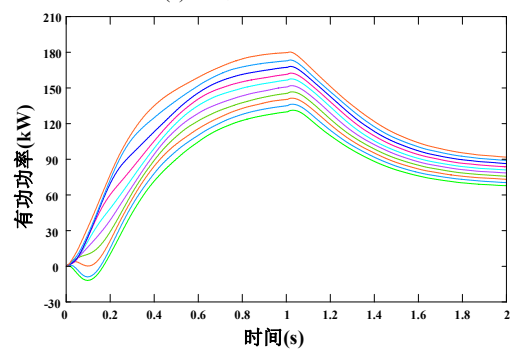
(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率

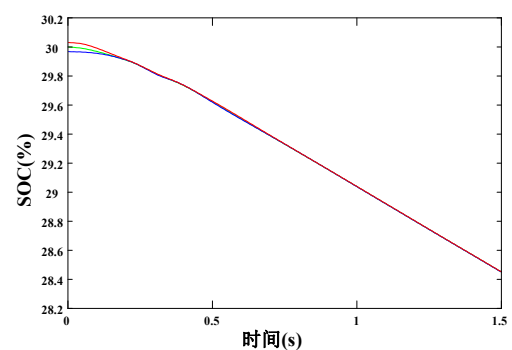


(e) SM 内 RLB 的 SOC

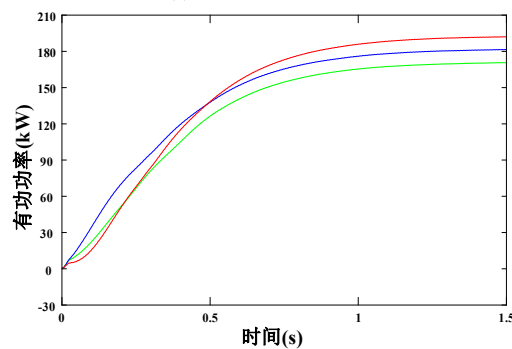


(f) SM 内 RLB 输出有功功率

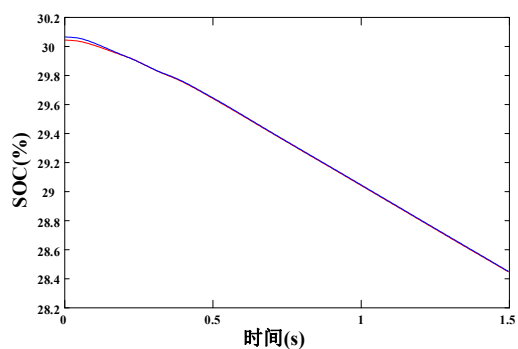
图 B6 非等容 RLB 在负荷波动时仿真波形
Fig. B6 Simulation waveforms of non-equal RLB during load fluctuations



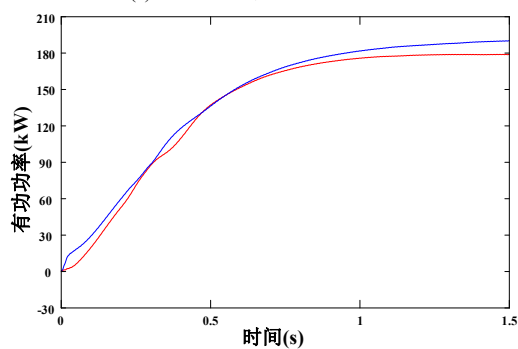
(a) 相间 RLB 的 SOC



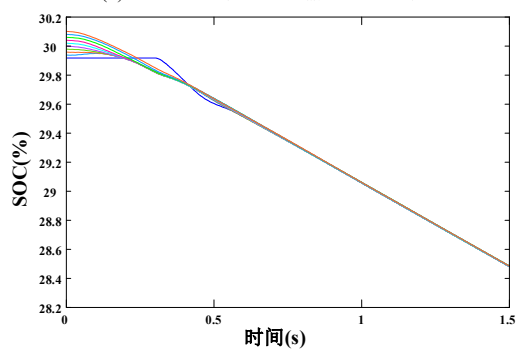
(b) 相间 RLB 输出有功功率



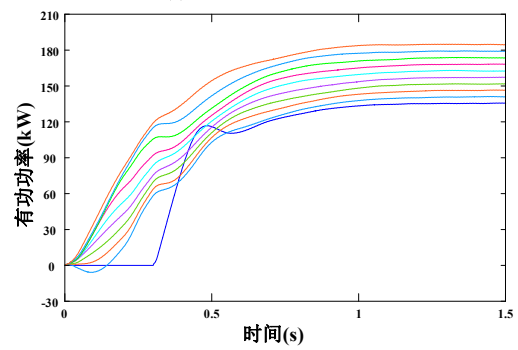
(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率

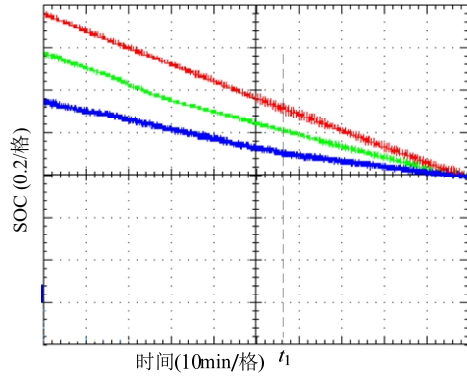


(e) SM 内 RLB 的 SOC

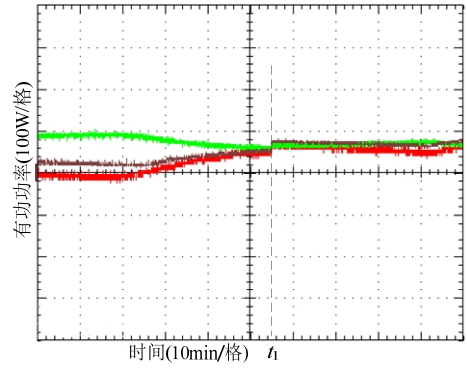


(f) SM 内 RLB 输出有功功率

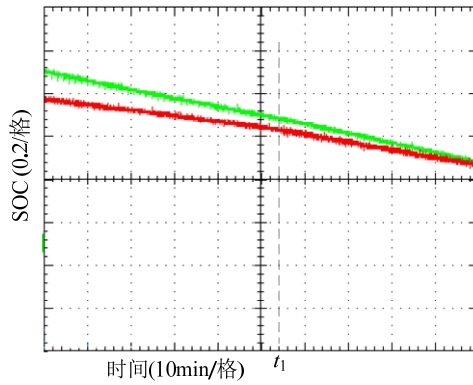
图 B7 所提方案即插即用仿真波形
Fig. B7 Plug-and-play process of the proposed scheme
附录 C



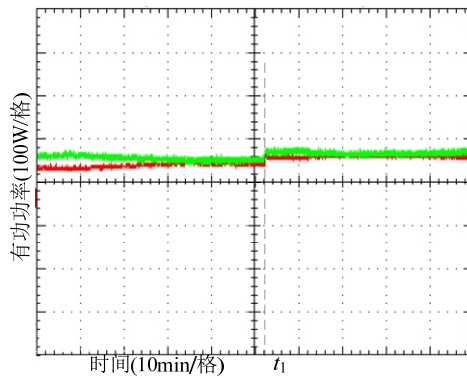
(a) 相间 RLB 的 SOC



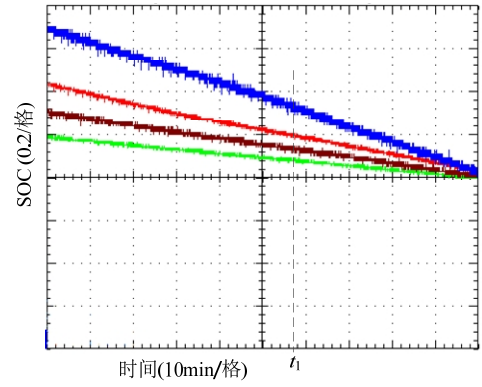
(b) 相间 RLB 输出有功功率



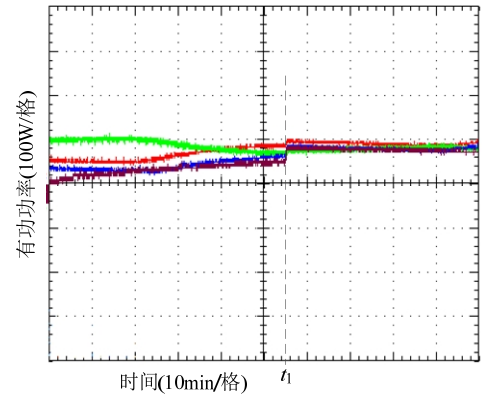
(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率

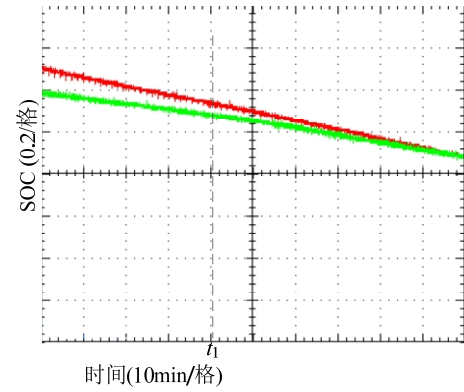


(e) SM 内 RLB 的 SOC

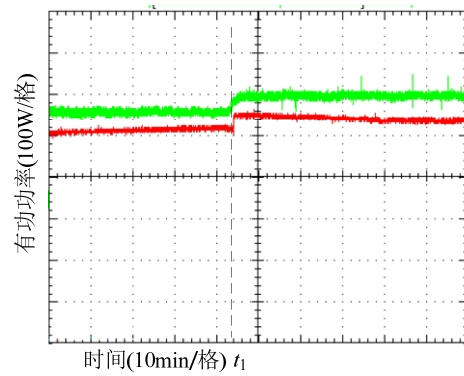


(f) SM 内 RLB 输出有功功率

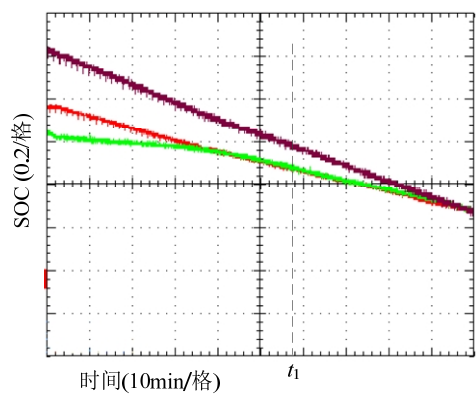
图 C1 等容 RLB 采用所提方案的实验波形
Fig. C1 Experimental waveforms of equal capacity RLB using the proposed scheme



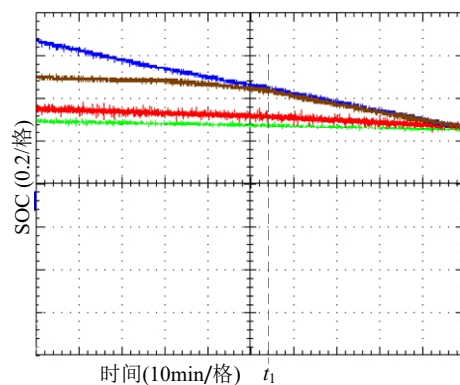
(a) 相间 RLB 的 SOC



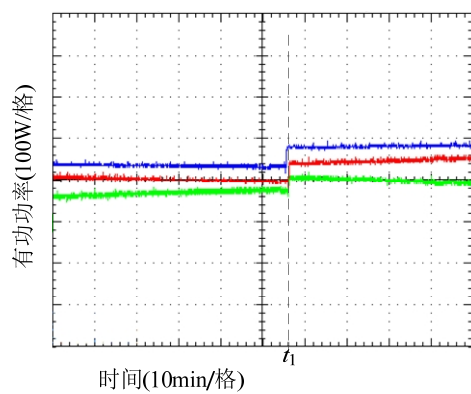
(b) 相间 RLB 输出有功功率



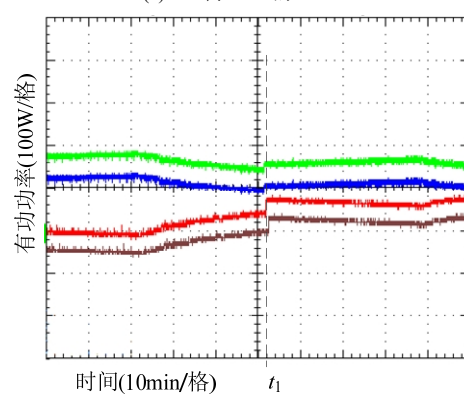
(c) 上、下桥臂间 RLB 的 SOC



(e) SM 内 RLB 的 SOC



(d) 上、下桥臂间 RLB 输出有功功率



(f) SM 内 RLB 输出有功功率

图 C2 非等容 RLB 采用所提方案的实验波形
Fig. C2 Experimental waveforms of non-equal capacity RLB using the proposed scheme