

一种分布式可重构电池组同步控制技术

马海峰¹ 张一童¹ 李文番¹ 王焱雄¹ 王军雄¹
MA Haifeng ZHANG Yitong LI Wenfan WANG Yaoxiong WANG Junxiong

摘要

针对高压电池组普遍采用电芯串联技术存在的安全性、可靠性、维修性等方面的弊端，文章提出了一种分布式可重构高压电池组控制技术。首先，论述了分布式可重构高压电池组微系统组成及工作原理，分布式同步控制技术为该可重构电池组系统稳定、可靠工作的核心；然后，重点从高压电池组系统延时分析、同步控制硬件设计、系统软件流程设计等几方面详细阐述了一种分布式强制同步控制技术；最后，通过对典型试验数据分析，验证了该分布式可重构高压电池组控制技术切实可行，可以解决实际工程问题。该电池组微系统具有灵活性、可靠性、稳定性等优势，故分布式可重构电池组控制技术具有较高研究价值。

关键词

高压电池组；可重构技术；分布式系统；强制同步技术

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.045

0 引言

随着新能源汽车和储能市场的快速发展，作为核心的电池管理技术愈发重要^[1]。对于某些特定应用场景，要求大功率输出，长时间不间断工作，通常采用高压母线方式，需要大量电池单体串并联使用^[2]。串联高压电池组依赖各级电芯正常工作，当中间某电芯出现故障，整个电池组将无法工作，

从而降低了电池组可靠性；由于制造工艺问题，各电芯之间存在内阻、储能容量、放电特性等差异，这无疑增加了电池均衡难度；同时传统单体高压电池体积大，电压高、产品重，为系统维护带来困难^[3]。为克服上述单体式串联高压电池组弊端，本文论述了一种分布式可重构高压电池组设计方法，利用高精度同步控制技术将分布式低压储能单元构建为高压电池组微系统。该分布式储能单元采用模块化、标准化设计，具有低电压、小体积、轻量化、安全性高等特点，从而为系

1. 西北机电工程研究所 陕西咸阳 712099

备配置和策略模板的更新中，应特别注意 IPv6 的地址分配规则与 IPv4 策略之间的匹配问题，避免因地址冲突或规则不一致导致的策略失效。

5 结语

本方案结合企业现网结构与 SDWAN 边缘架构特性，设计出可落地的 IPv6 双栈过渡路径，并在工程实践中完成配置与调优等关键环节，可以进一步验证方案的可行性与稳定性，部署结果表明双栈架构在保障业务连续性的同时具备良好的扩展基础，面向未来网络演进 IPv6-only 将成为重要方向，相关部署经验为后续规模化迁移提供技术支撑与策略参考。

参考文献：

[1] 王殿铭. 支持 IPv4/IPv6 双栈的 5G 通信网络可靠性组网部署分析[J]. 长江信息通信, 2025, 38(9): 189-191.
[2] 顾留锁. 基于等保 2.0 的校园区域边界双栈 IPv4/IPv6 网络

升级策略分析[J]. 集成电路应用, 2025, 42(9): 236-237.
[3] 那刚, 杨静, 胡海旭, 等. 敦煌研究院 IPv6 过渡方案的双栈技术模拟实验[J]. 自动化应用, 2025, 66(10): 287-290.
[4] 艾武. IPv6 和 IPv4 双栈技术在铁路综合视频监控系统的 应用[J]. 中国铁路, 2025(3): 120-125.
[5] 黄琳, 黄劼, 蒋平. 支持 IPv4/IPv6 双栈的 5G 通信网络可靠性组网部署研究[J]. 现代电子技术, 2025, 48(1): 102-106.

【作者简介】

卢健壕（1988—），男，广东深圳人，硕士，中级工程师，研究方向：网络技术。
柯义民（1990—），男，广东深圳人，本科，中级工程师，研究方向：网络技术。
吴迪（1982—），女，广东深圳人，本科，中级工程师，研究方向：网络技术。

（收稿日期：2025-12-02 修回日期：2026-03-12）

统设计提供了更高灵活性,方便构建任意目标电压电池组,在某些空间受限应用环境分布式布局可以提高空间利用率^[4]。系统采用分布式设计,储能单元之间需要通过控制总线、功率母线互联,电池组动态重构技术需要储能单元之间协同工作,协同工作要求系统具备同步控制机制^[5]。基于以上分析,本文将重点讨论一种高精度分布式同步控制技术,并通过试验验证基于该技术的分布式电池组动态可重构可行性。

1 分布式可重构电池组系统组成及工作原理

1.1 系统组成

本文所述分布式可重构电池组微系统由系统控制器(简称:控制器)、若干智能功率箱(简称:功率箱)、互联电缆及控制软件等组成。分布式可重构电池组系统拓扑如图1所示,控制器通过互联电缆与功率箱连接,构成串联线型拓扑结构^[6]。控制器运行电池组重构策略,统一能量调度,发送重构指令;功率箱主要包含电池包及智能BMS管理单元^[7],负责响应重构指令完成电池组重构任务。

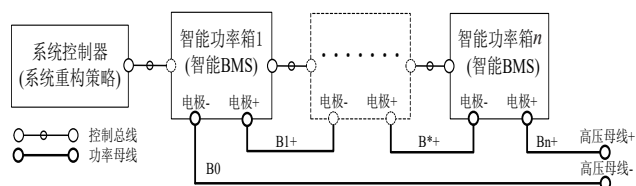


图1 分布式可重构电池组系统拓扑图

1.2 电池组动态重构工作原理

本文所述电池组动态重构采用多串一并模式,为阐述基本原理,将功率箱原理表示为电池包加开关模组的简化电路,电池组动态重构架构如图2所示。

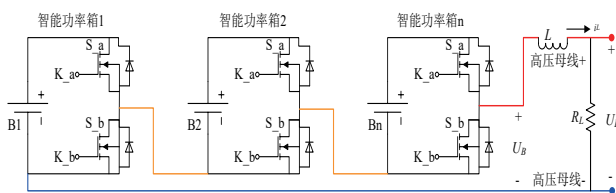


图2 电池组动态重构架构图

图2中,每个功率箱内部都集成两个IGBT开关,当 S_a 闭合、 S_b 断开,该功率箱电池包投入电池组构件;当 S_a 断开、 S_b 闭合,该功率箱电池包旁路切出,作为备用功率单元。电感 L 为滤波电感, R_L 为测试负载, U_L 为电池组工作电压, U_L 额定值为所有投入功率箱电池包电压之和。假设电池组重构需要将 $B1$ 切出同时 $B2$ 投入,对于分布式系统,各功率箱无法通过同一处理器统一控制,此时如何使得不同控制箱内部信号 K_a 、 K_b 同步协作尤为重要。本文给出一种简单、可行的分布式同步控制方法,且通过试验测试,结果分析可以满足特定场景使用需求。

2 分析与设计

2.1 系统控制延时分析

系统由控制器加若干功率箱组成,控制器发送同步控制指令,各功率箱同步协作,接收相关指令并控制IGBT驱动电路,IGBT执行开关动作,然后反馈执行结果,最终实现闭环控制任务。通过分析,得出同步控制系统延时如图3所示,不同工作阶段构成。

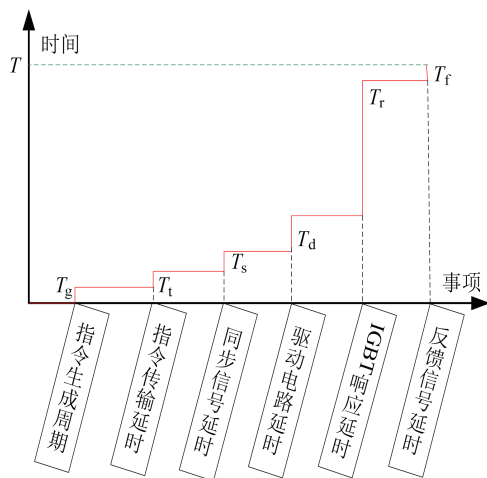


图3 同步控制系统延时分段图

系统控制周期为 T ,包含控制策略运行延时 T_g 、控制指令传输延时 T_t 、同步信号延时 T_s 、驱动电路延时 T_d 、IGBT响应延时 T_r 、反馈信号延时 T_f 等。其中反馈信号延时 T_f 用于控制结果闭环反馈,与控制同步性无关,可以不考虑;控制策略由控制器运行,策略决策延时 T_g 由DSP处理器运算性能决定,与功率箱同步控制无关。从控制策略运算开始到IGBT开关动作结束并反馈结果,功率箱a与功率箱b的一个完整控制周期 T ,分别可以表示为:

$$T_a = T_g + T_{at} + T_{as} + T_{ad} + T_{ar} \quad (1)$$

$$T_b = T_g + T_{bt} + T_{bs} + T_{bd} + T_{br} \quad (2)$$

由公式(1)~(2)得出两箱体同步控制偏差为:

$$T_a - T_b = (T_{at} - T_{bt}) + (T_{as} - T_{bs}) + (T_{ad} - T_{bd}) + (T_{ar} - T_{br}) \quad (3)$$

其中,IGBT响应延时偏差由半导体加工工艺及制造误差决定,对于特定器件,偏差一定。本文重点针对指令传输延时偏差、同步信号延时偏差及驱动电路延时偏差进行优化设计,从而完成分布式系统同步控制任务。

2.2 控制电路设计

2.2.1 系统设计

系统控制器与智能功率箱之间通过CAN总线进行命令/数据交互^[8],控制同步依赖硬件同步信号实现,功率箱控制电源由控制器提供,系统控制电路与功率电路物理隔离以确保控制系统可靠稳定运行。分布式同步控制系统设计如图4所示。

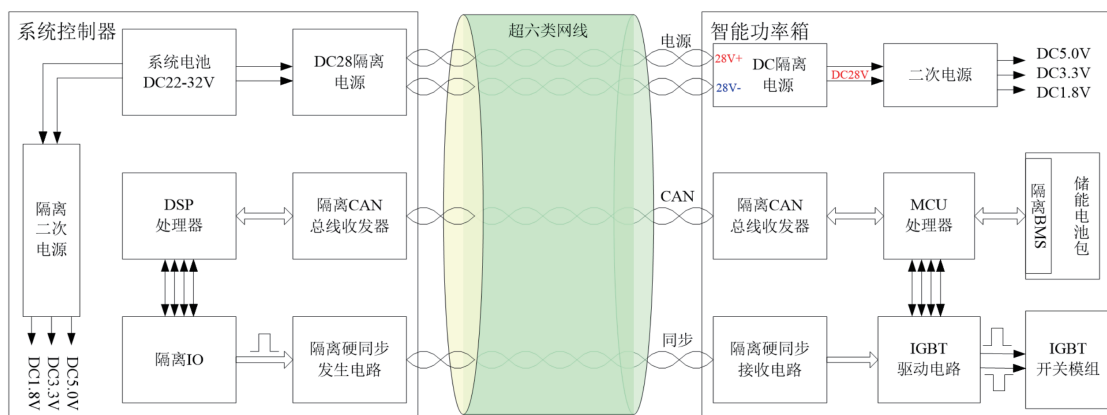


图4 分布式同步控制系统设计图

2.2.2 同步控制设计

系统同步网络使用总线传输技术设计，采用一发多收总线拓展模式，同步接口电气特性遵循RS485规范^[9]，系统同步控制原理示意如图5所示。

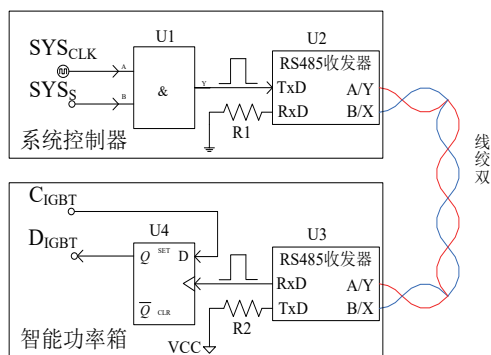


图5 系统同步控制原理示意图

SYS_{CLK} 为系统总线同步时钟，由控制器内部定时器生成，频率1 KHz。在每个CAN总线周期 $1/SYS_{CLK}$ 时间内，控制器完成一次针对各功率箱的访问/控制任务。在T1第一个总线周期，控制器发送控制命令给相应功率箱，功率箱a、功率箱b收到指令后即刻生成 C_{IGBTa} 、 C_{IGBTb} 信号，并反馈当前状态；在T2第二个总线周期，控制器输出一个同步脉冲信号 SYS_S ，正向脉冲宽度1 ms开启与门U1，此时 SYS_{CLK} 信号由收发器U2发出；各功率箱通过收发器U3接收 SYS_{CLK} 同步信号，该同步信号使能D触发器U4的 C_{IGBT} 输入信号，最终功率箱a、功率箱b的触发器输出IGBT同步控制信号 D_{IGBTa} 、 D_{IGBTb} 。整个同步控制需要两个总线周期完成。

2.2.3 驱动电路设计

智能功率箱开关模组选用深圳青铜剑技术TZ450U12M1S300型半桥IGBT模块，其关键工作参数 V_{CES} 耐压1 200 V， $V_{CE(SAT)}$ 典型值1.65 V， I_C 最大值450 A， $I_{C(RM)}$ 最大值900 A，满足最大输出功率要求。依据模块驱动端栅极-发射极阈值电压 $V_{GE(th)}$ 典型值5.9 V，栅极漏电流 I_{GES} 最大值0.5 μ A，设计驱动电路原理示意如图6所示。

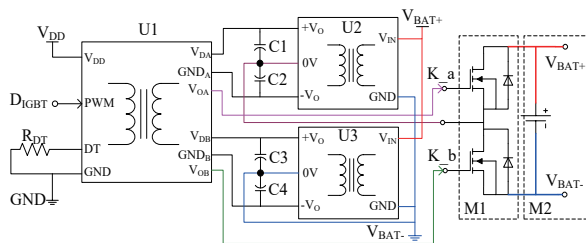


图6 驱动电路原理示意图

图6中M1为IGBT模块，M2为功率电池包，其余为简化驱动电路。其中驱动芯片U1选用AD公司ADuM4221-1型隔离式半桥门级驱动器，自带死区配置电路，最大驱动电流4 A，适用于电源变换、IGBT/MOSFET驱动及逆变器应用。隔离电源U2、U3选用广州金升阳QAW02型IGBT驱动器专用DC/DC模块，具有直流18~36 V宽输入电压、稳定直流+15/-9 V双路输出、输出过压及短路保护等特性。电阻RDT用于死区时间配置，按照公式 $DT(ns) \approx 5 \times RDT(k\Omega)$ 计算确定合适参数。同步控制信号 D_{IGBT} 经过驱动芯片U1，产生两路反向且包含死区保护的IGBT驱动信号 K_a 、 K_b ，为确保IGBT良好关断状态采用负电压驱动^[10]。

2.3 系统控制软件流程设计

电池组动态重构同步控制软件包含两部分，分别部署在系统控制器DSP处理器及智能功率箱MCU控制器中，两者协作共同完成电池组重构任务。系统控制软件负责用户配置参数解析、系统状态监控、性能评估及电池组重构优化等；智能功率软件负责电池包BMS管理及SOC估算、CAN总线信息上报及命令解析、IGBT同步控制等。电池组动态重构同步控制软件设计流程如图7所示。

3 验证测试

为了验证上述分布式电池组动态重构同步控制技术，展开了相关测试试验。验证测试系统主要由系统控制器及若干智能功率箱组成，控制器与功率箱之间通过网线实现CAN总线及RS485同步信号的互联，功率箱之间通过功率母线串

联,产生母线电压 U_L 。测试系统连接如图 8 所示。

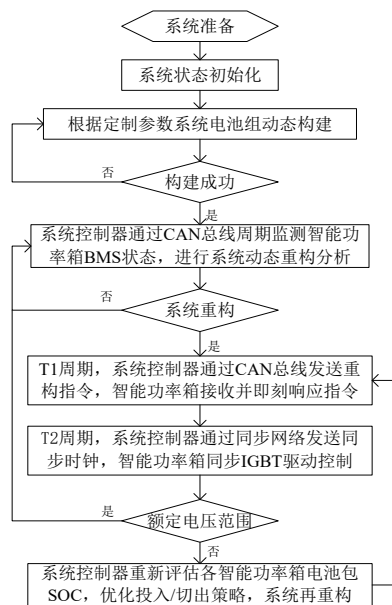


图 7 电池组动态重构同步控制软件设计流程图

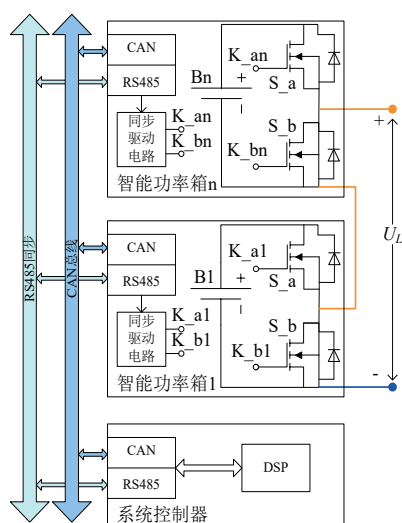


图 8 分布式电池组动态重构同步控制技术测试系统连接示意图

3.1 试验内容及方法

试验分 3 个步骤进行:

第一步驱动空载状态同步偏差测试,测试方法:断开 IGBT 模块,系统控制器发送同步投/切命令,用示波器捕获功率箱 1 与功率箱 2 同步驱动电路输出 K_{a1} 、 K_{a2} 信号波形,测量时间偏差;

第二步驱动挂载状态同步偏差测试,测试方法:连接 IGBT 模块,系统控制器发送同步投/切命令,用示波器捕获功率箱 1 与功率箱 2 的 IGBT 模块驱动 K_{a1} 、 K_{a2} 信号波形,测量时间偏差;

第三步电池组动态重构测试,测试方法:系统控制器下发命令,控制功率箱 1 与功率箱 2 一投一切同步操作,用示

波器捕获母线电压 U_L 波形,测量电压波动时间区间。

3.2 试验结果及分析

测试 1: 驱动空载状态同步偏差测试结果如图 9 所示,示波器通道 1 为功率箱 1 驱动输出 K_{a1} 信号波形,通道 2 为功率箱 2 驱动输出 K_{a2} 信号波形。可以看出,信号 K_{a1} 与 K_{a2} 时间偏差仅为 80 ns。依据 2.1 节公式 (3),可以得出指令传输延时偏差加同步信号延时偏差加驱动电路延时偏差即:

$$(T_{at}-T_{bt})+(T_{as}-T_{bs})+(T_{ad}-T_{bd})\approx 80\text{ ns} \quad (4)$$

某典型隔离 CAN 收发器,时序特性总环路延时最小值 110 ns、最大值 210 ns,由此可得出 CAN 收发器每传输 1 bit 位便可能引入 100 ns 时间偏差,多位叠加将带来更大误差。本文论述的同步控制方法可规避 CAN 总线指令延时偏差的影响,系统同步控制时间偏差由同步信号延时偏差决定。

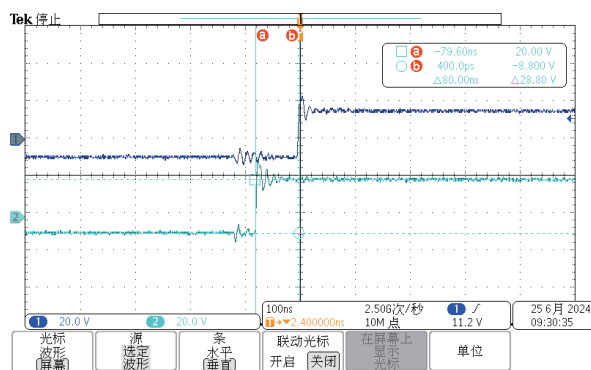


图 9 驱动空载状态同步偏差波形图

测试 2: 驱动挂载状态同步偏差测试如图 10 所示,通道 1 为功率箱 1 的 IGBT 模块驱动信号 K_{a1} 波形,通道 2 为功率箱 2 的 IGBT 模块驱动信号 K_{a2} 波形。可以看出挂载时,IGBT 模块对驱动信号的影响明显,边沿缓慢上升大约持续 2 μ s,之后有 2~14 μ s 振荡区间。挂载状态下得出校正结果:

$$(T_{at}-T_{bt})+(T_{as}-T_{bs})+(T_{ad}-T_{bd})\approx 10\text{ }\mu\text{s} \quad (5)$$

振荡时间长短由 IGBT 模块与驱动电路电气匹配度决定,通过优化驱动电路可以改善系统动态响应特性。

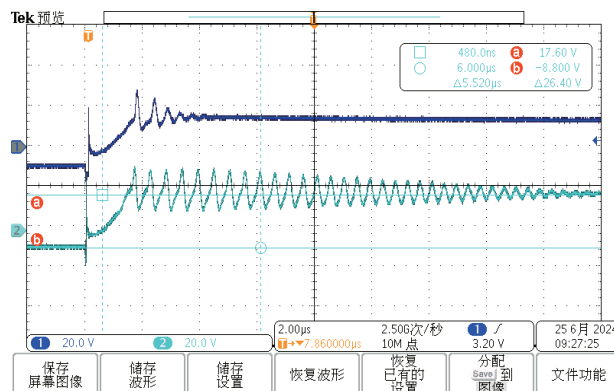


图 10 驱动挂载状态同步偏差波形图

测试 3: 当两个功率箱以理想状态同步投 - 切动作时, 串联母线电压稳定, 实际测试中因无法做到真实同步故母线电压会有短时、小幅波动。电池组动态重构测试如图 11~12 所示, 其中图 11 为系统执行功率箱 1 切出 / 功率箱 2 投入动作时母线电压波形, 图 12 为系统执行功率箱 1 投入 / 功率箱 2 切出动作时母线电压波形。由图 9 看出驱动信号 K_{a2} 快于 K_{a1} , 功率箱 2 动作快于功率箱 1, 因此, 图 11 母线电压表现出小幅上升后回稳过程, 反之图 12 母线电压先下降然后缓慢上升。测试电池组动态重构母线电压波动幅度小于 $\pm 15\text{ V}$, 响应时间小于 $100\text{ }\mu\text{s}$ 。依据 2.1 节分析方法, 得出两箱体同步控制偏差:

$$T_a - T_b = (T_{at} - T_{bt}) + (T_{as} - T_{bs}) + (T_{ad} - T_{bd}) + (T_{ar} - T_{br}) \approx 100\text{ }\mu\text{s} \quad (6)$$

结合公式 (5), 得出 IGBT 响应延时偏差:

$$T_{ar} - T_{br} \approx 90\text{ }\mu\text{s} \quad (7)$$

综合式 (4) ~ (7) 结果分析, 整个同步控制系统时间偏差主要由 IGBT 模块驱动及响应电路产生。本文论述的同步控制方法带来的时间偏差不到 $1\text{ }\mu\text{s}$, 影响因素占比不到 1%, 同步性能高。

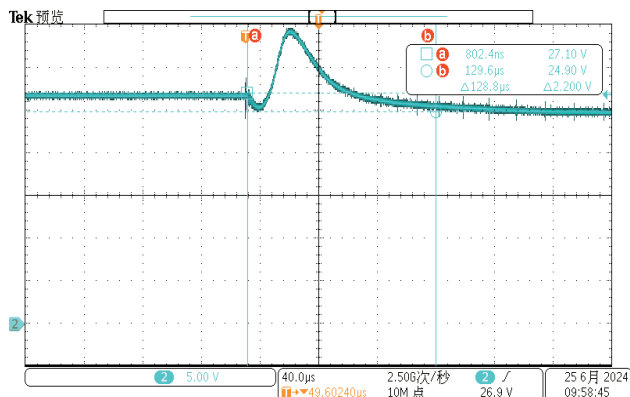


图 11 电池组动态重构母线电压波形图 1

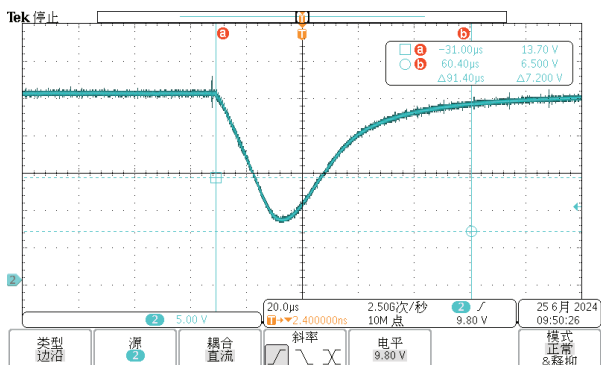


图 12 电池组动态重构母线电压波形图 2

4 总结

本文论述了一种分布式可重构电池组同步控制技术。首先对分布式可重构电池组系统组成及工作原理简单概述; 然

后重点阐述同步控制电路设计及软件工作流程; 最后结合分布式动态重构电池组实际应用环境, 试验测试同步控制时间偏差, 验证高同步性能。

本文论述的同步控制技术同步精度可达 $0.1\text{ }\mu\text{s}$ 级, 由此构建的分布式动态重构电池组母线电压波动小, 响应时间小于 $100\text{ }\mu\text{s}$, 可以满足大部分用户需求。通过试验测试及分析计算得出, 可通过优化驱动电路及匹配合适 IGBT 模组构建预设母线电压的高压电池包。本文所述的同步控制技术除分布式电池组动态重构应用外, 还可用于任意分布式系统离散量同步控制, 比如安全联锁、电机启停等应用场景^[11], 故具有较实用价值。

参考文献:

- [1] 苏新玲. 新能源汽车高压电池管理系统安全性与故障诊断策略研究 [J]. 汽车测试报告, 2023(23):73-75.
- [2] 王军雄, 任人, 马海峰, 等. 新型智能供电系统中关键技术研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2023,44(2):65-69.
- [3] 李琦, 鞠海鸥. 某品牌纯电动车高压系统安全措施浅析 [J]. 内燃机与配件, 2020(9):43-44.
- [4] 许乐俊, 王世林, 王勇, 等. 低压环境下锂离子电池热失控特性研究进展 [J]. 电池, 2023,53(6):687-691.
- [5] 李妍, 查翔, 仇佳鑫. 含多种分布式电源和储能的微电网控制技术研究 [J]. 光源与照明, 2024(12):231-233.
- [6] 叶泽雨, 尹靖元, 张桐硕, 等. 基于混合开关器件的可重构电池组串并联拓扑结构 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(8): 2674-2684.
- [7] 方明耀. 新能源电池管理系统 (BMS) 优化策略研究 [J]. 南方农机, 2025,56(9):135-138.
- [8] 张兰兰. 基于 CAN 总线的商用车分布式车身控制系统开发与验证 [D]. 济南: 山东大学, 2024.
- [9] 卢超. 基于 RS485 总线网络的高速数字采编系统设计与实验 [D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [10] 王佳军, 陈思坤, 顾隽楠, 等. 一种大功率 IGBT 模块驱动电路设计 [J]. 微特电机, 2021,49(11):43-46.
- [11] 於佳斌. 汽轮机运行控制系统研发 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2020.

【作者简介】

马海峰 (1986—), 男, 陕西延安人, 硕士, 副高级研究员, 研究方向: 智能控制技术研究。

(收稿日期: 2025-08-19 修回日期: 2026-03-05)