

High safety lithium battery energy storage system integration technology

Runhui Wang Shusen Wang

Qingdao Neusoft Carrier Technology Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

Abstract

To address the bus voltage divergence and power distribution imbalance issues caused by independent current control in charging mode for cascade modular lithium battery energy storage systems, this study proposes a series-connected I-P droop control strategy. By implementing a current-power droop mechanism, the proposed approach scientifically balances dynamic loads among power modules across batteries. Building on this foundation, we integrate traditional proportional balancing concepts to develop an optimized voltage divider coefficient method based on State of Charge (SOC) differences, thereby establishing an improved balancing strategy that effectively regulates power adjustment and maintains SOC equilibrium. Simulation results demonstrate that this control architecture effectively suppresses voltage oscillations, enhances power distribution stability, and significantly reduces regulation time while substantially improving system dynamic response performance under equivalent balancing precision. The proposed strategy proves particularly suitable for high-density, large-capacity energy storage systems requiring precise energy management.

Keywords

battery module; state of charge; sag control; power distribution; balancing strategy

高安全性锂电池储能系统集成技术

王润慧 王树森

青岛东软载波科技股份有限公司, 中国 · 山东 青岛 266000

摘要

针对级联模块化锂电池储能系统在充电模式下由于独立电流控制引发的母线电压发散、功率分配失衡问题, 提出串联型 I-P 下垂控制策略, 采用电流-功率下垂机制, 科学均衡各电池功率模块间的动态负载。在此基础上, 融合传统比例均衡思想, 设计基于 SOC 差异的分压系数优化方法, 构建改进型均衡策略, 合理控制功率调节和荷电状态 (SOC) 的均衡性。仿真结果表明, 该控制架构能够有效抑制电压振荡, 增强功率分配的稳定性, 且改进策略在相同均衡精度下显著缩短调节时间, 大幅度提高系统动态响应性能, 适用于高密度、大容量储能系统的精细化能量管理需求。

关键词

电池模组; 荷电状态; 下垂控制; 功率分配; 均衡策略

1 引言

随着“双碳”战略不断推进, 高密度锂电池储能系统在新能源并网中发挥着重要作用, 但传统集中式由于具有电芯参数离散性, 致使其存在 SOC 不一致、局部过充过放等问题, 严重降低系统运行的安全性。为了解决上述问题, 新一代储能系统采用电力电子电池包 (Power Electronics Battery Pack) 技术路径, 将电池模组和级联模块化双向 DC-DC 变换器进行相互结合, 构成可独立调控的电池功率模块, 输出侧串联接入直流母线, 有助于实现模组级能量管

理。但在此架构背景下, 充电工况中由于受到各模块独立电流控制, 很容易引发母线电压失稳问题, 成为限制系统可靠运行的技术障碍。基于此, 本文针对该问题, 基于电路拓扑特性, 提出串联型 I-P 下垂控制策略, 通过引入电流 - 功率下垂关系, 加强系统运行电压的稳定性。

2 储能系统并网结构和工作原理

本文研究的高安全性锂电池储能系统采用级联模块化拓扑结构, 由 N 个电池功率模块串联接入直流母线, 每个模块由电池模组和两相交错并联双向 DC-DC 变换器集成组成, 具备独立的功率调节能力。在系统工作时, 各模块输出侧串联, 母线电流 I_o 恒定, 模块间电流相同, 功率分配通过调节各模块输出电压进行实现。在放电模式下, DC-DC 变换器工作于升压状态, 其母线侧电压和电池电压满足公式 (1) 要求:

【作者简介】王润慧 (1998-), 女, 中国陕西西安人, 本科, 助理工程师, 从事电化学储能系统集成与并网关键技术研究。

$$\frac{U_{busi}}{U_{Bi}} = \frac{1}{1 - d_i} \quad (1)$$

其中： d_i 为下管 Q1 的脉宽调制占空比；表示第 i 个电池功率模块的母线侧电压； U_{busi} 是第 i 个电池模组的电压。

当其忽略功率损耗，电池侧输入功率等于母线侧输出功率，故电池电流 I_{Bi} 可表示为：

$$I_{Bi} = \frac{U_{busi} I_{busi}}{U_{Bi}} \quad (2)$$

结合 SOC 动态方程：

$$A_{SOCi} = A_{SOCo} - \frac{\int I_{Bi} dt}{Q} \quad (3)$$

其中： Q 为模组额定容量， A_{SOCo} 为初始荷电状态，推导得 SOC 变化率和占空比有直接关联：

$$A_{SOCi} = A_{SOCo} - \frac{\int \frac{1}{1 - d_i} I_o dt}{Q} \quad (4)$$

通过利用上述公式，分析了占空比给 SOC 演化带来的主导作用，等效放电电流升高，SOC 下降速率加快；反之则减缓。

3 串联型下垂控制和均衡策略

3.1 I-P 下垂特性

本系统各功率模块输出电流相同，功率分配等于母线侧电压的协调控制。为此，本文设计电流 - 功率 (I-P) 下垂特性，通过引入功率反馈调节各模块的电流参考值，注重加强电压分配的稳定性。如图 1 所示，不同模块的下垂曲线具有相同的零电压电流偏置 I_{set} ，但下垂系数 g_{di} 存在较大差异，致使其在簇电流参考值 I_{o-ref} 水平线上的交点不同，对应不同的功率输出 P_i 。一旦下垂系数过大，很容易降低功率调节灵敏度，过小则易引发电压振荡，所以工作人员要根据系统进行动态响应。该控制机制通过调节各模块 DC-DC 变换器的占空比，让高功率模块自动降低输出电流趋势，严重抑制电压漂移，大幅度加强系统运行的鲁棒性。

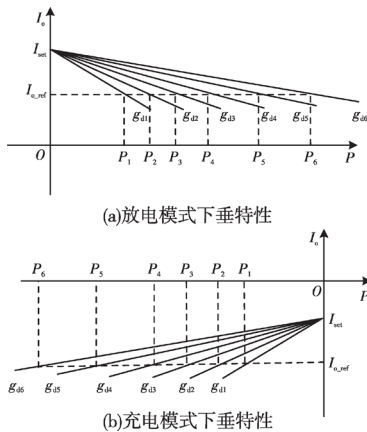


图 1 I-P 下垂特性

为了补偿下垂控制引入的电流偏差，提出前馈补偿机制，在放电模式下下垂作用让实际母线电流低于参考值；充电模式下则绝对值偏大。为此，将补偿系数 k_{dp} 引入控制环路，构建修正后的模块级电流参考值 $I_{oi-droop}$ ，表达式为：

$$I_{oi-droop} = \begin{cases} (1 + k_{dp})I_{o-ref} - g_{di}P_i, & \text{放电模式} \\ (1 + k_{dp})I_{o-ref} - g_{di}P_i, & \text{充电模式} \end{cases} \quad (5)$$

式中， I_{o-ref} 为系统级簇电流指令， P_i 是第 i 个电池功率模块的母线侧输出功率， g_{di} 为对应模块的下垂增益系数， k_{dp} 表示补偿系数，用于抵消下垂引入的静态误差。

3.2 均衡策略

3.2.1 基于下垂控制的比例均衡策略

为了实现级联模块化锂电池储能系统在功率分配基础上的荷电状态均衡，本文在 I-P 下垂控制框架下积极引入比例均衡机制，构建基于 SOC 反馈的自适应下垂系数调节策略。传统比例均衡通过调整各模块输出电压进行能量再分配，本文将其与 I-P 下垂控制进行相互结合，将下垂系数成为 SOC 偏差的函数。依据式 (6) 进行分析：

$$g_{di} = \frac{k_{dp}}{U_{busi-ref}} \quad (5)$$

其中： $U_{busi-ref}$ 为第 i 个电池功率模块的母线侧电压参考值， k_{dp} 表示下垂补偿系数，通过调控 $U_{busi-ref}$ 可动态调整功率分配权重。

在放电模式下，设定：

$$U_{busi-ref} = U_{dc}/N + k_p(A_{COSi} - A_{SOCavg}) \quad (7)$$

充电模式下，其为：

$$U_{busi-ref} = U_{dc}/N + k_p(A_{SOCavg} - A_{COSi}) \quad (8)$$

式中： U_{dc} 为直流母线电压， N 为串联模块数 A_{COSi} 是第 i 模组的 SOC (定义为放电时单体最小值、充电时最大值)， A_{SOCavg} 表示所有模组 SOC 均值， k_p 代表均衡加速因子，决定电压偏置幅值和 SOC 偏差的映射关系。

将上述电压参考表达式代入下垂系数公式，得到 SOC 相关的动态下垂增益：

$$g_{di} = \begin{cases} \frac{k_{dp}}{U_{dc}/N + k_p(A_{COSi} - A_{SOCavg})}, & \text{放电} \\ \frac{k_{dp}}{U_{dc}/N + k_p(A_{SOCavg} - A_{COSi})}, & \text{充电} \end{cases} \quad (9)$$

在本设计中，确保高 SOC 模组在放电时获得更高母线电压指令，对应更小的 g_{di} ，使其在 I-P 下垂曲线上承担更大功率输出；而充电时则相反，抑制其电流输入，有助于实现“削峰填谷”式均衡。最终，各模块的电流参考值 $I_{oi-droop}$ 由式 (5) 生成，并通过 $I_{Bi-ref} = (U_{busi} I_{oi-droop}) / U_{Bi}$ 转换为电池侧电流指令，驱动双闭环控制器调节占空比 d_{1i} 、 d_{2i} ，精确控制系统的充放电过程^[1]。

3.2.2 改进均衡策略

设计中，工作人员采用分压系数，科学固定分压系数

之和，让系统总功率仅由簇电流指令独立调节，同步控制系统运行功率，避免不同电流之间进行相互干扰。在其均衡过程中，依据模组间 SOC 极差动态重构分压系数分布，放电时将最大分压系数赋予 SOC 最高的模组，充电时则赋予 SOC 最低的模组，形成强驱动电势差^[1]。当 SOC 偏差收

敛至设定阈值后，自动切换至比例均衡策略进行精细调节，显著缩短了均衡时间，提高了系统在频繁变工况下的响应性能，为高一致性储能系统提供了高效的控制解决方案（见图 2）。

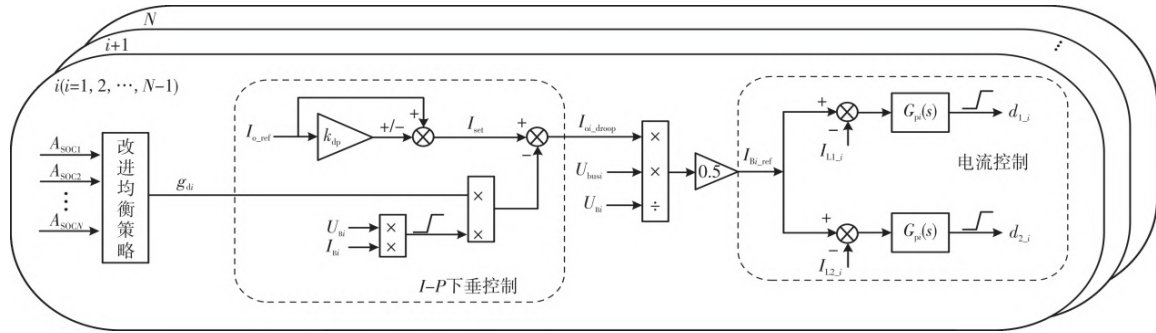


图 2 改进均衡策略框图

4 仿真分析

4.1 研究对象

本研究以直流侧采用 5 个 1P52S 电池 PACK 构成的高安全性锂电池储能系统为研究对象，每个 PACK 由 52 节 314Ah 磷酸铁锂（LFP）电芯串联而成，单 PACK 额定电压 166.4V，系统总直流母线电压 832V。基于客户提供的电芯规格（标称容量 314Ah，工作电压 2.5-3.65V，内阻 $\leq 0.25m\Omega$ ），重新构建级联模块化拓扑仿真模型，集成两相交错并联双向 DC-DC 变换器，实现模组级独立功率控制。研究主要研究该架构在充电工况下的母线电压稳定性和 SOC 均衡控制问题^[3]。

4.2 研究过程

在 PSCAD/EMTDC 平台搭建含 5 个 1P52S 电池模块的级联仿真系统，设定初始 SOC 极差为 10%（54% 至 44%）。基准实验表明，独立电流控制在充电工况下导致母线电压发散^[4]。引入 I-P 下垂控制后，功率实现自主分配。在此基础上，提出改进型均衡策略，维持母线电压差在允许上限，确保高、低 SOC 模组间充放电电流差处于最大可调范围。仿真在 832V 母线、8.4kW 额定功率下进行充放电测试^[5]。

4.3 研究结果

仿真结果表明，所提协同控制策略有效解决了充电模式下的电压失稳问题。在 I-P 下垂控制作用下，母线电压稳定。改进均衡策略显著提升了均衡效率：放电工况下，SOC 极差从 10% 降至 0.1% 耗时 508.3s，较比例策略缩短 67.5%；充电工况下，均衡时间由 1652.1s 下降至 520.7s，效率提升 68.5%。在 SOC 极差小于 1% 的精细调节阶段，均衡耗时缩

短超过 61%。下垂系数动态演化曲线显示，高 SOC 模组在初始阶段承担更大功率，随 SOC 趋同，各模块下垂系数收敛至统一值，实现平稳过渡^[6]。

5 结语

本文针对级联模块化锂电池储能系统在充电工况下母线电压失稳和 SOC 均衡速率低的问题，提出串联型 I-P 下垂控制策略，自主分配系统运行功率。接着，构建基于 SOC 反馈的比例均衡机制，创新性提出改进型均衡策略，科学优化分压系数，维持最大电流差，显著提升均衡速度。仿真验证表明，该控制体系在充放电模式下均能实现母线电压、功率、SOC 进行协同均衡，尤其在小极差阶段，改进策略大幅度缩短了均衡时间。在未来研究中，工作人员要注重多时间尺度协调控制、老化模型嵌入、硬件在环验证，推动高安全性储能系统向智能化方向发展。

参考文献

- [1] 韩金洋,李卫超,周亮,等. 大功率锂电池储能系统变增益自抗扰斩波补偿控制策略[J]. 海军工程大学学报,2025,37(2):26-33,77.
- [2] 甄箫斐,王贝贝,张小虎,等. 锂电池储能系统热失控气体生成及扩散规律研究[J]. 储能科学与技术,2024,13(6):1986-1994.
- [3] 马世明. 45MWh磷酸铁锂电池储能系统热管理方法研究[D]. 吉林:吉林大学,2024.
- [4] 雷博,吴越,史尤杰,等. 液冷式锂电池储能系统高倍率调频应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(3):159-166.
- [5] 姜海瑶. 集装箱式锂电池储能系统消防设施有效性分析[J]. 工业安全与环保,2025,51(5):67-73.
- [6] 鄢仁武,姜雪儿. 变调节因子的不同容量锂电池储能系统能量控制策略[J]. 电气技术,2024,25(2):21-30.