

# 水力发电厂直流操作电源系统电池 新型自动核容方法

高石磊 宋洪亮 时瑞成 王燕武  
(华能澜沧江水电股份有限公司)

**摘要：**针对直流操作电源系统电池核容技术低效问题，本文提出一种水力发电厂直流操作电源系统电池新型自动核容方法。首先，针对传统直流操作电源系统将电池组手动切出核容问题，提出一种能量双向流动的直流新架构，通过双向 AC/DC 充放电拓扑，实现直流供电和电池自动核容放电。进一步，提出模块化并联电池方案，通过电池加 DC/DC 结构，允许电池组之间灵活充放电，解决单体蓄电池异常后整组蓄电池无法带载的问题。实际运用案例表明，新架构显著提升了系统的维护便捷性。

**关键词：**电力操作电源；电池核容；水力发电厂；并联式电源

## 0 引言

水力发电厂直流操作电源系统，作为水力发电厂的关键设施，其设计方案的可靠性对发电厂的可靠性有直接影响<sup>[1]</sup>。蓄电池组作为电力操作电源系统的核心，其可靠性严重依赖于其设计、生产、试验、使用和维护的全过程。电池长期处于不用或者长期浮充状态，电池极板的活性物质易硫化，电池的放电能力也会越来越差<sup>[2]</sup>，此外由于电池之间的离散性，单体电池之间的实际电压也不尽相同，进而影响整个电池组的性能，使得串联电池组脱离直流母线，影响发电厂的可靠性。

为确保蓄电池组持续提供稳定的电力支持，对其进行定期的性能评估显得尤为必要。根据 DL/T 724《电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程》，已运行一年及以上的蓄电池组需在一至两年内

至少接受一次核对性测试，新投运的蓄电池组则需在半年内完成核对性放电试验<sup>[3]</sup>并淘汰 SOH 低于 80% 的电池<sup>[4]</sup>。然而，传统的蓄电池组容量测试方法需离线进行，并涉及繁琐的接线操作，耗时费力且易出错，增加了电池损坏风险，降低了系统可靠性<sup>[5]</sup>。因此，亟需更为高效、可靠的核容技术投入运用。

针对直流操作电源系统电池核容技术存在的相关问题，学者进行大量的研究。文献 [6] 提出了采用磷酸铁锂电池的在线自动全容量核容的设计方案。文献 [7] 等基于传统配网环网电房的串联直流电源系统运行的若干问题，提出了多蓄电池模组并联直流电源系统，任意并联电源模组的蓄电池模组发生劣化或开路故障时均不影响配网环网电房直流系统可靠供电。文献 [2] 评估传统直流电源系统可靠性低的问题，在不改变直流系统

原有结构的前提下，提出一种基于蓄电池抽头分组的守护型直流电源系统，解决了蓄电池组单节电池故障等造成母线失压的问题。但上述直流操作电源核容系统多为单向能量流动拓扑，且针对多蓄电池模组模块化并联直流电源系统相关领域尚无现有相关文献研究。

鉴于此，本文提出一种水力发电厂直流电源蓄电池组自动核容系统。采用双向 AC/DC 充放电拓扑，不仅能从电网取电，还能将电池能量反馈回电网，自动获取充放电数据，实现蓄电池信息化管理，消除以往蓄电池管理“信息孤岛”瓶颈，符合数字化电站建设需要<sup>[6]</sup>。并引入模块化并联电池方案，通过电池加 DC/DC 结构，允许电池组之间灵活充放电，实现无扰、无感的容量核算。此外，方案采用脉冲修复技

术，通过高电压、大电流的脉冲克服电池接受能力下降的问题，有效去极化且不产生严重副反应，显著延长铅酸蓄电池的循环寿命。

## 1 传统电池核容技术现状分析

### 1.1 直流系统构成

电力操作电源通常采用 220V 或 110V 的直流电源系统<sup>[8]</sup>。该系统由四个主要部分构成：系统监控装置、充电装置、蓄电池组和馈电回路，主要任务是为断路器操作、二次回路设备（包括仪器、仪表、继电保护装置）及应急故障照明等提供稳定的直流电源，传统直流系统的电池容量评估方法采用两套直流系统母联，将电池组切出单独充放电，如图 1 所示。

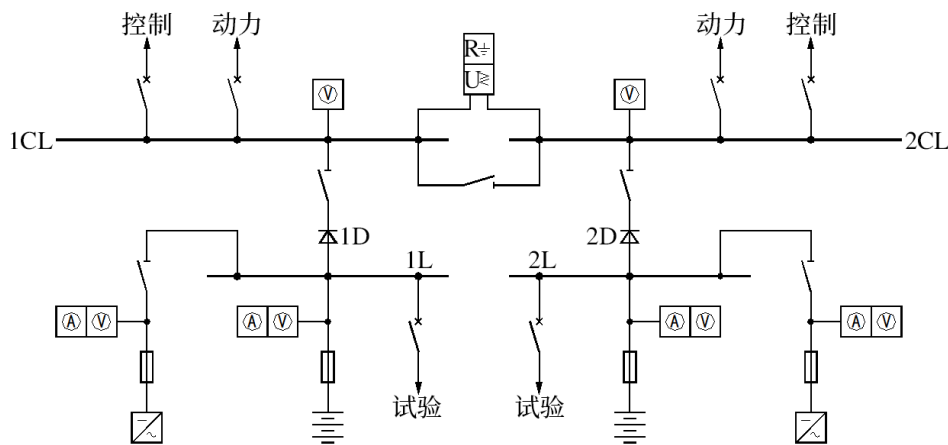


图 1 传统直流电源架构

直流系统由 2 组蓄电池、2 组整流器组成，直流母线为两段单母线接线。由于直流系统标称电压为 220V 或 110V，而蓄电池单体电压通常为 2V 或 12V，因此需要将多个电池串联以满足电压要求，如图 2 所示。此外，铅酸蓄电池在充放电过程中，整组电池的电压会升高，系统需通过调压装置维持直流母线电压稳定。

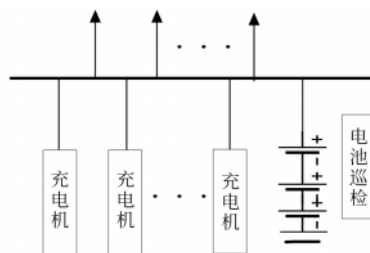


图 2 串联型电池组

### 1.2 传统电池核容的不足分析

传统电池核容在正常运行时，母联开关断开，各母线段的充电装置经充电母线对蓄电池充电，同时提供经常负荷电流，蓄电池的浮充电压即为直流母线正常的输出电压。任一母线段的充电装置故障时，可将母联开关合上，由另一母线段的充电装置和蓄电池组给整个系统供电，母联回路具有防止两组蓄电池并联的二极管止逆措施。蓄电池组需要测量电池健康状态 SOH 时，将充满的电池组（浮充时间 3~5h）从直流操作电源系统中脱开，然后接入阻性负载，按照 10h 放电率进行恒功率放电<sup>[9]</sup>，计算在该放电条件下电池所能释放的能量，如式（1）：

$$SOH = (Q_n / Q_d) \times 100\% \quad (1)$$

式中，SOH 为电池健康状态； $Q_n$  为电池额定容量； $Q_d$  为当前电池实际容量。

根据较长时间工程现场运行经验，该直流电源架构存在以下缺陷。

- 1) 人工核容效率低、代价大，通常需要 5~10h 放电时间。核容常用假负载，易热失控，不环保。电池监测误差较大，准确性低。
- 2) 设备监测不全面，智能化程度低。且远方遥控遥调功能，安全等级低。
- 3) 母联响应速度慢，母线存在掉电风险。

4) 直流设备存在品牌多、相互兼容难度大等问题，且同品牌存在代次差，后期维护升级代价较大。

5) 蓄电池串联的数量多，容易出现单体电池电压不均衡的现象，进而导致有的电池长期过充电，有的电池长期过放电。一旦单体蓄电池异常后整组蓄电池将无法带载，严重影响整个蓄电池组的使用寿命。

因此，考虑到上述传统架构的诸多缺陷，迫切需要在架构层面进行根本技术创新，来优化系统，提高系统整体的智能化和灵活性。

## 2 新型直流系统设计

### 2.1 系统结构

针对现有核容技术存在的痛点问题，本文基于智能、安全、高效的基本理念，提出一种新型直流电源架构，如图 3 所示。采用具有双向能量流动的充电模块，既可以实现 AC/DC 给负载充电，又可以实现 DC/AC 向电网放电，实现无需人为参与的无感自动核容功能。

此外，本方案引入模块化并联的电池组架构，如图 4 所示。在并联电池模块中，使用 12V 蓄电池，单节数量减少。充放电管理电路模块代替蓄电池组的巡检装置，并使蓄电池和管理电路模块可以进行组对管理，便于单个铅酸蓄电池的切入和退出，确保即使单个电池组出现问题，也不会影响整个系统的供电稳定性。

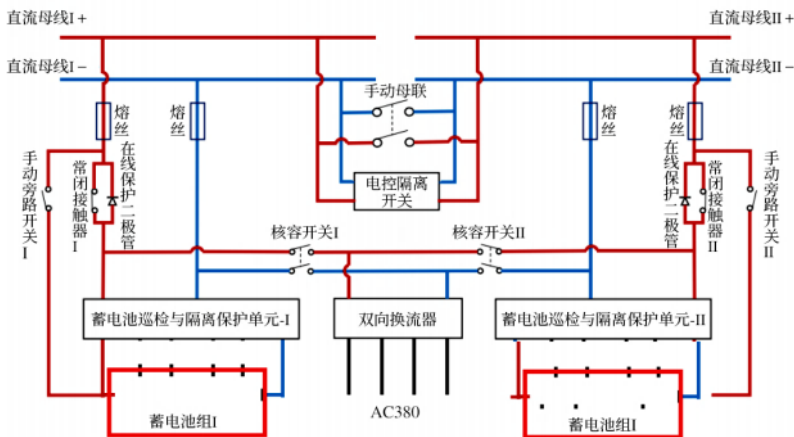
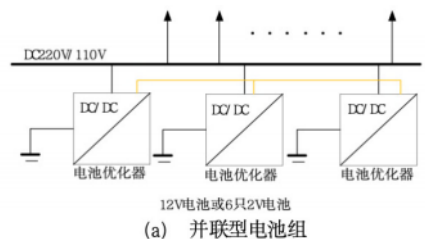


图 3 改进型直流电源架构



(a) 并联型电池组



(b) 变电站直流电源模块化并联电池组

图4 模块化并联电池组

每个电池模块内部配备独立的充放电单元，当检测到电池内阻或电压异常时，该模块可自动退出并联系统，随后进行独立的脉冲修复和涓流充电。待充满电后，再进行放电维护，确保电池状态良好。经过多轮循环后，电池组的平均参数将实现均衡分配。

### 2.2 工作原理

系统交流输入正常时，常闭接触器 I、II 闭合，打开手动旁路开关 I、II 与核容开关 I、II，使蓄电池正常在线。双向充放电模块将交流电压变换为 220V 直流给直流负载供电，同时给电池进行均衡充电，充电过程如图 5 所示。

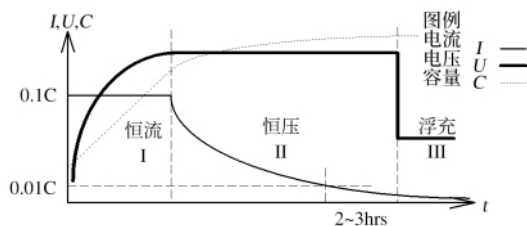


图5 均衡充电曲线

环境温度高于电池厂家设定值时，充电电压降低  $V_-$ ；反之，则充电电压升高  $V_+$ ，温度补偿如图 6 所示。温度变化后充电电压变化  $V_{\pm}$  计算如下：

$$V_{\pm} = n \times K_c \times \Delta T \quad (2)$$

式中， $n$  为蓄电池组电池个数； $K_c$  为温度补偿系数，一般取 3~5mV； $\Delta T$  为温度较基准温度，基准温度一般为 25°C。

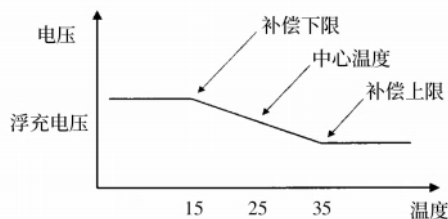


图6 蓄电池温度补偿

系统交流输入故障停电时，由蓄电池不间断地给直流负载供电。监控模块实时监测蓄电池的放电电压和电流，当蓄电池放电到设置的终止电压时，监控模块告警。同时监控模块时刻显示、处理配电监控电路上传的数据，系统工作时能量流动如图 7 所示。

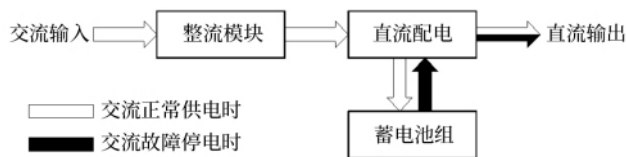


图7 系统工作能量流向图

需要对电池进行核容时，投入电控隔离开关实现母联，断开常闭接触器 I、II，闭合核容开关 I、II。充电模块将输出电压调低，控制电池放电电流为 0.1C，若负载电流  $I_0$  小于 0.1C，启动其中一个充电模块由 AC/DC 供电模式转换为 DC/AC 放电模式，放电电流为  $I_A$ ，电池输出电流为  $I_B$ ，如图 8 所示。

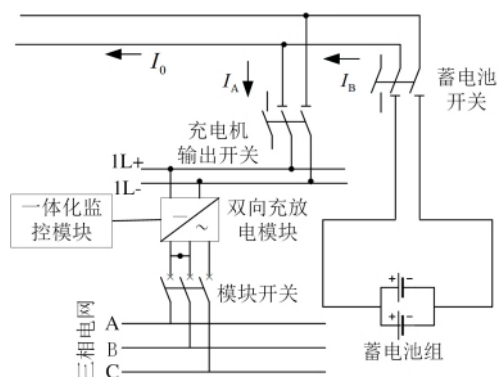


图8 在线核容功能

当电池性能出现衰退，例如铅酸蓄电池因长期使用、不当维护或环境因素导致的接受能力下降时，利用高电压和大电流的脉冲能够迅速地为电池注入能量，从而克服由于电池内部电阻增加、活性物质老化或电解液浓度变化等原因导致的电池接受能力下降。激活电池内部的化学反应，使电池重新获得较高的电荷接受能力。在大电流脉冲结束后，电池会经历一个短暂的休息期，即电外加充电过程。这个过程中，电池内部的电荷分布会重新平衡，有助于去除电池内部的极化现象，从而恢复其正常的电荷传输能力。此外，与传统的连续充电方式相比，脉冲充电产生的热量较少，从而避免电池因过热而产生的副反应，如电解液的蒸发、电极的腐蚀等，从而显著延长铅酸蓄电池的循环寿命。

### 2.3 系统方案特点

本文改进型直流电源架构相较于传统直流电源架构有如下特点：

1) 采用模块化并联电池组方案替代传统串联电池方案，可以提高电池供电的可靠性，实现电池的在线热插拔维护。并联电池组方案还可以实现一个交直流系统中采用不同品牌，不同新旧程度的电池。该模块化结构与传统并联结构相有优势如表1所示。

表1 并联方式对比

	模块化并联电池组	常规并联电池组
安装便利性	高 (无需蓄电池巡检装置)	一般
运维便利性	高 (可在线 0.1C 全容量核容)	差 (需要外接后备蓄电池组)
检修便利性	高 (可在线更换蓄电池)	一般
更换改造便利性	高 (新旧蓄电池混用)	一般
维护工作量及成本	低 (具有在线 0.1C10 核容功能)	高 (离线核容, 工作量大)
检修工作量及成本	低 (在线检修各蓄电池)	高 (单体蓄电池异常, 需整体更换)

2) 采用双向变流器方案实现直流供电和电池自动核容放电，不需要人工参与核容过程，自动化获取电池数据，无感核容的同时可以实现自动化报表和数据分析。

3) 采用电池优化器实现单体电池的在线修复和实时数据检测，整个过程中无需停机或人为干预。通过算法优化每节电池的容量负担和独立电池管理可以延长整组电池的使用寿命，提升设备全生命周期价值。

4) 新型交直流电源系统采用电力电子自诊断技术设计了新一代监控系统，通过对电源电池开关等设备多维度大数据实时分析可实现交直流电源系统的自动巡检、自诊断和故障预测。从而提高设备运维的自动化程度，使得运维工作安全，高效，数字化，智慧化。

### 2.4 运用案例

目前该技术已在黄登大华桥水电厂完成试点，准备在全网推广应用，水电站的无人值班应用情况如图9所示。

无人值班变电站的需求使得变电站对于智能化的要求不断提高，要求实现“四遥”等功能，即遥信、遥测、遥控和遥调<sup>[10]</sup>。本方案采用一种先进的电池核容技术，实现了在线、无缝切换、全自动的电池核容





图 9 部分监控功能

流程。在核容过程中，电池模块无需任何人工干预，能够实时捕捉并自动归档充放电环节中的关键数据。

总监控具备完善的蓄电池组在线放电测试功能，可远程控制蓄电池开始放电及停止放电，并通过放电时间、蓄电池组放电容量、蓄电池组放电终止电压、单节蓄电池组放电终止电压等参数的设置，可自动终止蓄电池放电，并自动计算蓄电池组放电容量及终止剩余容量。

在充放电过程中，双向换流器与电池巡检单元紧密配合，确保实时数据的准确传递至系统监控中心。监控系统通过标准化的协议无缝接入电池监控信息，实时展示电池模组的各项关键参数，包括但不限于SOC（电量状态）、SOH（健康状态）、循环次数、总电压、总电流、电池包状态、环境温度、MOS温度、电芯温度、告警信息以及单体电压等。

此外，支持对遥测通信数据进行长时间录波存储，提供各种可视化的查询分析界面，方便运维人员进行故障判断，历史数据支持永久保存。监控中心对这些数据进行高效、智能的处理，生成的报表具备便捷的打印和下载功能，极大地提升了在数据管理和分

析方面的便利性。

### 3 结束语

本文提出一种新型直流系统架构。该系统显著提升了直流电源系统的供电可靠性，优化了核对性容量检测流程，有效缩短了试验时间，降低了人工成本，并提高了数据记录的质量与可控性，所得结论如下：

- 1) 自动核容系统无需人为干预充放电，无需开工作票和手动倒闸，避免了安全风险，提高了运维安全性。系统消除了夜间值班的需要，降低了劳动强度，提高了工作效率。
- 2) 无感核容技术可自动侦测电池健康状态，便于数据收集和分析，实现实时监测，预测电池故障和寿命，提升设备运行稳定性。
- 3) 通过动态休眠、动态阻抗匹配和小电流脉冲充电等算法，自动核容系统可实时修复潜在风险电池，提高设备利用率。
- 4) 模块化并联结构允许单节蓄电池热插拔，并支持新旧蓄电池混用，从而极大地改善更换和改造的便利性。

(下转第 62 页)

### 参考文献

- [1] 黄烈江, 陈思超, 王鹏程, 等. 变电站并联型直流蓄电池全容量核容方法研究 [J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2024, 38 (2): 56-61.
- [2] 程煜杰, 杨士奇, 丁圆, 等. 一种基于蓄电池抽头分组的守护型直流电源系统及其控制策略 [J]. 电器与能效管理技术, 2024 (3): 15-20, 35.
- [3] DL/T 724—2000 电力系统用蓄电池直流电源装置运行与维护技术规程 [S].
- [4] GB/T 19638.1—2014 固定型阀控式铅酸蓄电池 [S]. 2014.
- [5] 葛礼嘉, 宋政湘, 张国钢. 变电站用阀控式铅酸蓄电池浮充寿命研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41 (6): 191-195, 201.
- [6] 邓渝生, 赵应春, 叶云. 变电站用蓄电池在线有源逆变核容放电研究 [J]. 华东电力, 2012, 40 (2): 313-315.
- [7] 高锋, 刘文平, 李新海, 等. 多蓄电池模组并联直流电源系统研究与应用 [J]. 电器工业, 2023 (12): 19-23.
- [8] 程正年, 赵小军, 何炳愚. 一种蓄电池混联型直流电源系统解决方案 [J]. 电气技术, 2020, 21 (9): 86-89.
- [9] 钟国彬, 刘新天, 何耀, 等. 变电站用铅酸电池 SOH 估计 [J]. 电源技术, 2016, 40 (12): 2407-2410.
- [10] 刘源俊, 杜贵平, 黎嘉健, 等. 变电站直流电源系统现状与展望 [J]. 电源学报, 2020, 18 (3): 86-94.

(收稿日期: 2024-06-24)