

储能电站电池管理系统运维策略与效能提升

杨海 雷振鹏

三峡新能源(涇源县)有限公司 宁夏 固原 756405

摘要: 随着“双碳”战略目标的深入推进和新型电力系统的加速构建,电化学储能作为支撑可再生能源消纳、提升电网灵活性的关键技术,正迎来规模化部署的黄金期。电池管理系统(Battery Management System, BMS)作为储能电站的核心控制单元,其运行状态直接关系到储能系统的安全性、可靠性与经济性。然而,当前BMS在实际运维中仍面临数据质量不足、故障诊断滞后、热失控预警能力弱、系统协同效率低等挑战。本文系统梳理了储能电站BMS的基本架构与核心功能,深入分析了当前主流运维模式存在的问题,并从智能化、标准化、协同化三个维度提出了一套面向全生命周期的BMS运维策略。在此基础上,结合数字孪生、边缘计算、人工智能等新兴技术,探索了BMS效能提升的技术路径与实施框架。研究表明,通过构建“感知—分析—决策—执行”闭环的智能运维体系,可显著提升BMS的故障预测准确率、延长电池使用寿命、降低运维成本,并为储能电站的安全高效运行提供坚实保障。

关键词: 储能电站; 电池管理系统; 智能运维; 效能提升; 数字孪生; 人工智能

引言

电化学储能凭借响应速度快、配置灵活、能量密度高等优势,成为平抑新能源出力波动、参与调频调峰、提升供电可靠性的关键支撑技术。在储能系统中,电池组作为能量存储的核心载体,其性能衰减、安全风险与运行效率高度依赖于电池管理系统的精准管控。BMS不仅承担着单体电压/电流/温度监测、荷电状态(SOC)、健康状态(SOH)估算、均衡控制等基础功能,还需与能量管理系统(EMS)、功率变换系统(PCS)深度协同,实现系统级优化调度。然而,近年来多起储能电站安全事故暴露出BMS在早期预警、故障隔离、热蔓延抑制等方面存在明显短板。同时,传统“被动响应式”运维模式难以满足大规模、高密度储能电站对精细化、前瞻性运维的需求。因此,亟需构建一套科学、高效、智能的BMS运维策略,并探索其效能提升的技术路径,以保障储能系统全生命周期的安全、经济、高效运行。

1 储能电站 BMS 的功能架构与运维挑战

1.1 BMS的基本功能架构

典型储能电站BMS采用“三级架构”:底层是电池单体监控单元(BMU),采集单体电压等参数并执行均衡;中层为电池簇管理单元(BCMU),汇总BMU数据,进行SOC/SOH估算、热管理控制与初步故障诊断,再向上层通信;顶层是电池堆管理单元(BAMS),协调多个电池簇,与EMS、PCS交互,执行充放电指令等任务。该分层结构兼顾局部实时控制与系统统一调度。BMS核心功能多样,状态感知是基础,需高精度高频获取参数;状态估算决定调度指令合理性,复杂工况下对

SOC/SOH准确性要求高;安全防护要快速响应异常工况;均衡管理可延缓电池不一致性、延长寿命。此外,BMS还要与外部高效通信,积累长期数据,为性能评估和策略优化提供支撑。

1.2 当前BMS运维面临的主要挑战

尽管BMS技术不断进步,但在实际运维中仍存在以下突出问题:(1)数据质量与完整性不足:传感器漂移、通信丢包导致数据失真;采样频率低(如1-10秒/次),难以捕捉瞬态故障特征;缺乏对电池内部状态(如析锂、SEI膜增长)的直接观测手段。(2)故障诊断与预警能力薄弱:多数BMS依赖阈值告警,缺乏对早期微弱故障(如微短路、内阻缓慢增长)的识别能力;热失控预警模型多基于经验规则,泛化能力差;故障定位精度低,难以区分是电池本体问题还是BMS硬件故障^[1]。(3)运维模式粗放,缺乏全生命周期视角:运维以“故障后维修”为主,预防性维护不足;SOC/SOH估算误差大(尤其在低温、高倍率场景),影响调度精度;电池老化机制复杂,现有BMS难以动态调整充放电策略以延缓衰减。(4)系统协同效率低:BMS与EMS、PCS之间信息孤岛现象严重,调度指令与电池实际能力不匹配;多厂商设备协议不统一,集成难度大,运维接口复杂。

2 面向全生命周期的 BMS 智能运维策略

2.1 投运阶段:夯实数据基础,建立数字档案

在储能电站投运初期,运维工作的重点应放在数据基础建设与系统初始化上。首先,需对所有电压、温度、电流传感器进行全面校准,消除安装误差与初始漂

移, 确保采集数据的可信度。同时, 应通过标准充放电测试获取每簇电池的开路电压曲线、内阻分布、热特性等关键参数, 构建完整的初始参数数据库。这些数据不仅是后续状态估算模型训练的基础, 也为故障诊断提供了基准参照。在此基础上, 建议为每簇电池建立数字孪生体, 即通过物理模型与数据驱动方法构建其虚拟映射。该孪生体可在后续运行中用于仿真验证控制策略、预演故障场景, 并支持远程调试与优化。更重要的是, 应根据电池化学体系(如磷酸铁锂或三元材料)、应用场景(如电网调频或用户侧削峰填谷)以及部署环境(如高寒、高湿地区)制定差异化的运维基线。例如, 针对调频场景中频繁充放电的特点, 可适当放宽SOC运行窗口但加强均衡频率; 而在高温地区, 则需强化热管理策略, 避免加速老化。这种“一簇一策”的精细化管理思路, 有助于从源头提升BMS的适应性与鲁棒性。

2.2 运行阶段: 构建“感知—分析—决策—执行”闭环

2.2.1 增强感知能力

在储能电站正式运行后, BMS运维的核心任务是构建一个高效、自适应的闭环控制体系。该体系首先依赖于增强的感知能力。通过提升采样频率至毫秒级, 并部署分布式高密度传感器网络, 可更全面地捕捉电池动态行为^[2]。同时, 引入声学、气体(如一氧化碳、挥发性有机物)等多模态传感手段, 能够辅助识别热失控早期征兆, 弥补传统电参数监测的不足。边缘计算节点的部署则可实现本地数据预处理与特征提取, 有效降低通信负载并提升响应速度。

2.2.2 智能分析与诊断

在感知数据的基础上, 智能分析与诊断成为提升BMS效能的关键环节。传统基于安时积分或卡尔曼滤波的SOC/SOH估算方法在复杂工况下精度受限, 而深度学习模型(如LSTM、Transformer)能够有效建模电压、电流、温度等多维时序数据的非线性关系, 实现全工况下的高精度状态估算。对于故障诊断, 图神经网络(GNN)可刻画电池单体间的拓扑关联, 精准定位故障传播路径; 无监督学习算法则能识别未知异常模式, 提升系统对新型故障的鲁棒性。尤其在热失控预警方面, 结合温升速率(dT/dt)、电压骤降斜率等多维特征构建的多阶段预警模型, 可将预警提前时间从几分钟延长至二三十分钟, 为应急处置争取宝贵窗口。

2.2.3 自适应决策与执行

基于上述分析结果, BMS应具备自适应决策与执行能力。例如, 可根据电池不一致性程度动态切换均衡

策略——在轻微不一致时采用低功耗被动均衡, 而在严重偏移时启用高效率主动均衡。同时, 实施“寿命友好型”充放电控制, 在满足电网调度需求的前提下, 主动规避深度充放、高倍率充放等加速老化操作。一旦检测到热失控征兆, 系统应能自动触发安全联锁机制, 包括切断主回路、启动灭火装置、隔离故障电池簇等, 最大限度遏制事故蔓延。

2.3 退役阶段: 支持梯次利用与回收评估

当储能电池达到设计寿命终点时, BMS的运维价值并未终结, 反而在退役评估与资源再利用中发挥关键作用。依托长期积累的运行数据, BMS可对每簇电池的剩余使用寿命(RUL)与健康度分布进行量化评估, 生成包含历史充放电次数、最大温升、内阻增长趋势等信息的“电池健康护照”。该护照不仅为梯次利用(如用于通信基站备用电源或低速电动车)提供科学依据, 还能指导回收企业优先处理高风险电池, 提升资源回收效率与安全性。通过将BMS数据贯穿至退役环节, 真正实现了电池全生命周期的价值闭环。

3 BMS效能提升的技术路径

3.1 数字孪生驱动的BMS仿真与优化

数字孪生技术为BMS提供了虚实融合、迭代优化的新范式。通过构建高保真的电-热-力耦合模型, 可在虚拟环境中精确模拟电池在极端工况(如过充、短路、高温)下的行为特征。这使得BMS保护逻辑的验证不再依赖高风险现场测试, 而可在数字空间中反复推演与优化^[3]。此外, 数字孪生还可用于均衡策略参数调优, 减少不必要的能量损耗, 提升系统整体效率。

3.2 人工智能赋能的状态估算与故障预测

人工智能技术正深刻改变BMS的核心算法体系。在SOC估算方面, 传统方法难以兼顾精度与鲁棒性, 而融合卷积神经网络(CNN)与时序模型(如LSTM)的混合架构, 能够同时提取电压/电流波形的空间特征与时间依赖关系, 实现误差小于2%的高精度估算。在SOH预测领域, 迁移学习技术可将在实验室加速老化实验中学到的知识迁移到现场小样本数据上, 有效解决实际运行中标签数据稀缺的问题。对于未知故障检测, 变分自编码器(VAE)等无监督模型通过对正常数据分布的学习, 能够敏锐捕捉偏离常态的异常点, 显著提升系统对新型故障的识别能力。这些AI驱动算法革新, 使BMS从“规则执行者”逐步转变为“智能决策者”。

3.3 边缘-云协同架构提升响应效率

为兼顾实时性与全局优化能力, BMS架构正向“边缘智能+云端大脑”的分层模式演进。在边缘层, 轻量化

的AI模型部署于本地控制器,可实现毫秒级的故障响应与均衡控制,满足安全防护的严苛时延要求。在云端,则汇聚多个储能电站的运行数据,训练更强大的全局模型,并定期将优化后的策略参数下发至边缘节点,形成持续学习闭环。同时,推动IEC 61850、Modbus TCP等标准通信协议的应用,可有效打破多厂商设备间的信息壁垒,简化系统集成与运维接口。该架构可将BMS平均故障响应时间从秒级降至毫秒级,同时降低云端计算负载,显著提升系统整体效能。

3.4 多系统协同优化运行

BMS效能的最终体现,离不开与EMS、PCS等系统的深度协同。理想的运行模式应是:EMS根据BMS提供的实时SOH与SOP信息,动态调整调度计划,避免下达超出电池能力的指令;PCS则依据BMS反馈的电池温度与电压状态,实时调节充放电功率,防止局部过热或过压;而BMS在执行指令的同时,也将运行约束反馈给上层系统,形成双向互动。通过建立“BMS-EMS-PCS”联合优化目标函数,可在满足电网服务需求的同时,兼顾电池寿命、系统效率与安全裕度^[4]。

4 实施路径与保障措施

4.1 标准体系建设

BMS智能运维的规模化推广,亟需健全的标准体系支撑。应加快制定BMS数据接口、通信协议、安全等级、性能测试等国家标准,明确不同应用场景下的技术要求。同时,建立第三方认证机制,对BMS的SOC/SOH估算精度、故障诊断覆盖率、热失控预警能力等关键指标进行权威评估,引导行业从“能用”向“好用”转变。

4.2 运维人才培养

智能运维对人才提出了更高要求,需兼具电池电化学、电力电子、人工智能等多学科知识。高校与职业院校应加强交叉学科建设,培养复合型技术人才。同时,

推广远程诊断平台、增强现实(AR)辅助运维工具等新型手段,可降低现场操作门槛,使普通运维人员也能高效处理复杂问题。

4.3 政策与商业模式创新

政策层面,可将BMS智能运维水平纳入储能项目并网考核指标,激励业主采用先进技术。商业模式上,探索“运维即服务”(MaaS)模式,由专业第三方提供BMS托管、数据分析、策略优化等全栈服务,降低用户运维负担。此外,基于BMS长期运行数据开发电池健康保险产品,可有效转移安全风险,增强投资者信心。

5 结语

储能电站的安全高效运行离不开高性能、高可靠的电池管理系统。面对当前BMS在数据质量、故障预警、协同效率等方面的短板,必须从运维理念、技术手段、系统架构等多维度进行革新。本文提出的全生命周期智能运维策略,以数字孪生、人工智能、边缘计算等技术为支撑,构建了“感知—分析—决策—执行”闭环体系,显著提升了BMS的态势感知能力、故障预测精度与系统协同水平。未来,随着标准体系的完善、人才结构的优化与商业模式的成熟,BMS将从“被动守护者”转变为“主动优化者”,为构建安全、绿色、智能的新型电力系统提供核心支撑。

参考文献

- [1]白庆华,王健雁,周亚鹏.储能电站电池管理系统研究现状和发展趋势[J].无线互联科技,2023,20(23):78-80.
- [2]余斌,朱维钧,徐浩,等.电池储能电站电池管理系统关键技术[J].湖南电力,2020,40(05):55-59.
- [3]田刚领,叶晖,张柳丽,等.基于数据挖掘的电池储能电站运维技术综述[J].太阳能,2022,(05):23-32.
- [4]肖冬.面向储能电站的电池模组管理单元设计与实现[D].杭州电子科技大学,2024.