

电化学储能电站储能电池运行安全研究

苏捧刚

宁夏龙源新能源有限公司 宁夏 银川 750000

摘要: 电化学储能电站作为能源存储的关键设施,其储能电池的运行安全直接影响系统稳定性与可靠性。本文聚焦储能电池运行安全问题,系统分析热失控机理,包括电池组成、热失控诱因、过程及传播机制;从电池本体特性、系统设计、运行环境及运维管理等维度,剖析影响运行安全的核心因素;探讨电池管理系统(BMS)、热管理、安全监测与预警等关键技术;最终从标准制定、设备选型、运维制度及应急管理等方面,提出提升运行安全的统性策略,为电化学储能电站的安全运营提供理论与技术参考。

关键词: 电化学储能电站; 储能电池; 运行安全; 热管理; 预警技术

引言:随着全球能源转型加速,电化学储能技术因高效灵活的储能特性,在智能电网、可再生能源消纳等领域应用愈发广泛。然而,储能电池运行过程中,热失控引发的火灾爆炸事故频发,严重制约行业发展。当前,储能电站规模化建设使电池系统复杂性剧增,电池本体缺陷、设计漏洞、环境应力及运维不当等多重因素交织,加剧了安全风险。深入研究储能电池热失控机理,厘清运行安全影响因素,构建高效安全技术体系,成为保障电化学储能电站可靠运行的迫切需求。

1 电化学储能电站储能电池热失控机理

1.1 电池组成与热失控诱因

电化学储能电池主要由正负极材料、电解液、隔膜及外壳组成。正负极材料决定电池能量密度,电解液负责离子传导,隔膜则防止两极短路。热失控诱因复杂,内部因素包括过充过放导致电极材料结构坍塌、隔膜失效引发内短路;外部因素如机械挤压、高温环境加速电池内部化学反应。这些诱因打破电池热平衡,引发热量累积,最终触发热失控。

1.2 热失控过程

热失控起始于电池内部热量生成速率超过散热速率,温度迅速升高。当温度达到临界点,电极材料与电解液发生剧烈副反应,产生大量可燃气体与热量。副反应进一步加剧,导致电池内部压力骤增,外壳破裂。高温下,电池内的易燃物质燃烧,释放大量能量,形成剧烈的热失控现象,伴随明火、浓烟及有毒气体释放,危及储能电站安全。

1.3 热失控传播机制

作者简介: 苏捧刚,男,汉族,宁夏,助理工程师,大专,研究方向:主要从事风力发电机组运维,110kV输变电设备以及配套储能电站运维工作。

热失控具有极强的连锁效应。单个电池热失控产生的高温与火焰,通过热辐射、热传导、热对流作用于相邻电池,使周边电池温度升高至热失控阈值。同时,热失控释放的可燃气体在密闭空间聚集,遇明火发生爆燃,加速热失控在电池簇间传播。此外,电池管理系统响应延迟或失效,无法及时切断故障电池,也会导致热失控快速蔓延,扩大事故范围^[1]。

2 影响电化学储能电站储能电池运行安全的因素

2.1 电池本体特性

电池材料及制造工艺缺陷是运行安全的首要隐患。部分正负极材料在充放电过程中易发生结构相变或退化,导致容量衰减、内阻增加,产生局部过热;电解液稳定性差,在高温或过充状态下易分解产气,引发电池鼓胀甚至爆炸。制造环节中,若电极涂布不均匀、隔膜裁切精度不足,易造成内部微短路,加速电池老化。此外,不同批次电池的性能参数存在离散性,并联使用时易出现电流分配不均,加剧电池失衡,降低整体安全性。

2.2 系统设计缺陷

系统设计不合理直接威胁电池运行安全。电池簇布局紧凑,散热通道狭窄,导致热量难以有效散发,易形成局部高温区域;电气连接设计若未充分考虑过载保护,在短路或过流时无法快速切断电路,会引发火灾风险。电池管理系统(BMS)功能不足,如传感器精度低、控制算法不完善,无法准确监测电池状态,或缺乏有效的均衡策略,导致电池组内单体电压、温度差异扩大,最终触发热失控。同时,消防系统与储能系统匹配性差,也会延误火灾初期处置。

2.3 运行环境

极端环境条件对电池安全构成严峻挑战。高温环境下,电池内部化学反应速率加快,电解液分解加剧,加

速电池老化；低温环境中，电解液黏度上升，离子迁移受阻，充放电效率降低，可能引发负极析锂，造成内短路。此外，湿度高易导致电池外壳及连接件腐蚀，破坏绝缘性能；沙尘、盐雾等环境污染物进入电池内部，会干扰电化学反应，增加故障概率。部分储能电站选址靠近工业污染源，有害气体侵蚀电池材料，进一步缩短电池寿命、提升安全隐患。

2.4 运维管理不足

运维管理漏洞显著增加电池运行风险。日常巡检流程不规范，对电池外观破损、温度异常等隐患排查不细致，无法及时发现潜在故障；设备定期维护缺失，如未按时校准BMS传感器、更换老化部件，导致系统监测失效。运维人员专业能力不足，对电池故障预警信号识别不敏感，应急处置流程不熟悉，在事故初期无法采取有效措施控制事态。同时，缺乏统一的运维数据管理平台，难以实现电池全生命周期健康状态的动态评估与风险预测。

3 储能电池运行安全技术

3.1 电池管理系统（BMS）技术

3.1.1 电池状态监测与评估

电池状态监测与评估是BMS的核心功能基石，通过多维度感知与智能算法实现精准管理。在硬件层面，高精度电压、电流、温度传感器实时采集数据，其中，电压传感器精度达毫伏级，确保单体电池电压监测的准确性；温度传感器采用分布式布局，可捕捉电池组内细微温差。在算法层面，安时积分法结合卡尔曼滤波技术，动态修正电池荷电状态（SOC）估算误差；基于电化学模型与机器学习的健康状态（SOH）预测算法，能提前识别电池容量衰减趋势、内阻异常等隐患。同时，通过历史数据与实时数据的对比分析，构建电池状态预警模型，有效降低过充、过放等安全风险。

3.1.2 电池保护与均衡控制

电池保护与均衡控制是BMS保障储能系统安全运行的关键防线。保护功能方面，BMS实时监测电池运行参数，一旦触发过压、欠压、过流、高温等预设阈值，毫秒级响应速度可迅速切断主回路继电器，阻断能量传输，防止电池热失控。在均衡控制领域，被动均衡通过电阻消耗实现电压较高单体的能量泄放，成本低且可靠性强；主动均衡则利用电感或电容转移能量，效率更高，能快速缩小单体间的电压差异。两种技术结合使用，可将电池组内单体电压差控制在极小范围，避免单体失衡导致的性能衰减与寿命缩短，显著提升电池组运行安全性与一致性。

3.2 热管理技术

3.2.1 风冷散热技术

风冷散热技术通过空气流动带走电池产生的热量，是应用最广泛的被动散热方式。其原理是利用风扇或自然对流，使空气在电池组散热通道中循环，将电池表面热量传递至环境。该技术结构简单、成本较低，便于安装与维护，适用于小型储能系统或对散热要求不高的场景。但风冷受环境温度影响较大，高温环境下散热效率显著下降；且空气导热系数低，难以满足高功率电池组的散热需求，易导致电池温度分布不均，局部过热风险较高。此外，长期运行中，空气中的灰尘、杂质易堆积在电池表面和散热通道，进一步降低散热性能。

3.2.2 液冷散热技术

液冷散热技术采用冷却液（如水或乙二醇溶液）作为传热介质，通过循环系统将电池热量带走，散热效率远高于风冷。冷却液在电池模组间的管道中流动，与电池表面紧密接触，通过对流换热实现高效散热。该技术可精确控制电池温度，温度均匀性好，能有效避免局部过热，适用于大容量、高功率的储能电站。但液冷系统结构复杂，涉及管道布局、水泵、换热器等组件，成本较高；存在冷却液泄漏风险，一旦泄漏可能腐蚀电池和电气设备，引发短路等安全问题；且维护难度大，需定期检查冷却液液位、更换滤网等，增加运维成本。

3.2.3 其他散热技术

除风冷和液冷外，相变材料（PCM）散热、热管散热等技术也在储能电池热管理中逐步应用。相变材料利用自身相变过程吸收或释放潜热，将电池温度控制在一定范围内，无需外部动力，具有被动散热、无噪音、安装灵活等优势，但散热能力有限，需与其他散热方式结合使用。热管散热通过内部工质的相变循环，实现热量的高效传递，导热系数高、响应速度快，可快速均衡电池组内温度，但成本较高，且对安装工艺要求严格。此外，微通道散热、喷雾冷却等新型技术也在研发探索中，为储能电池热管理提供了新的发展方向^[2]。

3.3 安全监测与预警技术

3.3.1 电气参数监测

电气参数监测是保障储能电池安全运行的基础防线。通过高精度电流、电压传感器实时采集电池充放电过程中的关键数据，如单体电压、总电流、充放电功率等。一旦监测到过压、欠压、过流等异常情况，系统可快速识别电池是否存在短路、过充过放等故障风险。同时，结合欧姆定律与等效电路模型，分析电池内阻变化趋势，提前预判电池性能衰退与潜在故障。该技术借

助高速数据采集与传输模块,将数据实时反馈至监控中心,为电池管理系统提供精准决策依据,有效避免因电气参数异常引发的安全事故。

3.3.2 温度监测与热失控预警

温度监测与热失控预警对防范电池热失控至关重要。采用分布式温度传感器,如热电偶、光纤传感器等,对电池模组及关键部位进行全方位温度监测,确保捕捉到细微的温度变化。通过建立热失控预测模型,结合实时温度数据、历史运行数据及热传导规律,分析电池温度上升速率与异常趋势,提前发出热失控预警信号。当监测到局部温度异常升高或温度梯度超出安全阈值时,系统可迅速启动应急响应,如调整充放电策略、加强散热等,阻止热失控的发生与蔓延,降低火灾爆炸风险。

3.3.3 气体监测

气体监测作为电池故障早期预警的重要手段,可通过气体传感器实时检测电池内部泄漏或分解产生的特征气体。锂电池热失控前常释放氢气、一氧化碳、烷烃类等可燃气体,利用红外、电化学等传感技术,可精准识别气体种类与浓度变化。当特征气体浓度达到预设阈值时,系统立即触发预警,提示运维人员电池可能存在内部短路、热分解等故障隐患。此外,结合气体扩散模型与电池运行状态数据,可定位故障电池位置,为早期故障排查与处置提供关键信息,避免事故扩大化。

4 提升电化学储能电站储能电池运行安全的策略

4.1 制定安全标准与规范

当前电化学储能行业标准体系尚不完善,不同地区、企业执行标准存在差异,导致安全管控缺乏统一依据。因此,需加快制定涵盖电池设计、生产、安装、运行全生命周期的安全标准与规范。一方面,明确电池热失控防护、消防设施配置、电气安全等核心指标,统一测试方法与认证流程,确保设备安全性达标;另一方面,细化储能电站建设选址、布局规划、抗震防火等要求,降低环境风险。同时,建立动态更新机制,结合技术发展与事故案例,定期修订标准内容,强化标准的适用性与权威性,推动行业安全管理规范化、标准化。

4.2 加强设备选型与质量管控

设备选型与质量是保障电池安全运行的基础。在选型阶段,需综合评估电池的热稳定性、循环寿命、安全性能等参数,优先选择通过严格安全认证、具备良好市场口碑的产品,避免因成本导向选择劣质设备。建立供应商资质审核机制,对生产工艺、原材料质量、品控流程进行严格审查,确保源头质量可靠。在安装前,应对

电池单体及系统进行全面检测,包括容量一致性测试、内阻检测、充放电性能评估等,淘汰不合格产品。运行阶段,持续跟踪设备质量表现,建立质量追溯体系,对故障设备及时分析原因,倒逼供应商改进工艺,从全链条提升设备安全性能。

4.3 建立健全运行维护制度

科学的运行维护制度是降低电池故障风险的关键。需制定详细的巡检规程,明确巡检周期、内容与标准,采用人工检查与智能监测相结合的方式,及时发现电池外观破损、温度异常、电气参数波动等隐患。建立设备维护计划,定期校准传感器、清理散热通道、更换老化部件,确保系统功能正常。运用大数据分析 with 人工智能技术,构建电池健康管理平台,实现运行数据的实时监控、趋势预测与风险预警,辅助运维决策。同时,完善设备故障处理流程,明确责任分工与响应时间,确保故障得到快速、有效处置,降低事故发生概率。

4.4 强化人员培训与应急管理

人员专业能力与应急水平直接影响事故应对效果。针对运维人员,需开展涵盖电池原理、安全技术、设备操作等内容的系统化培训,定期组织技能考核,确保人员熟悉设备运行特性与安全规范。模拟热失控、火灾等典型事故场景,开展应急演练,提升人员对故障预警信号的识别能力与应急处置实操水平,确保在突发情况下能迅速启动应急预案、正确使用消防设备、有效疏散人员。此外,建立应急资源储备与调配机制,配备充足的灭火器材、防护装备及备用电源,定期对应急预案进行评估与修订,确保预案的科学性与有效性,最大限度降低事故损失^[3]。

结束语

电化学储能电站的安全运行关乎能源产业稳定发展,储能电池作为核心组件,其安全问题不容忽视。本文系统剖析了电池热失控机理、运行安全影响因素,探讨了BMS、热管理等关键技术,并针对性提出安全提升策略。但随着储能系统规模扩大与技术迭代,新的安全挑战不断涌现。

参考文献

- [1]宁娜,岳芬.2021国际储能市场回顾:后疫情时代的机遇与挑战[J].储能科学与技术,2022,11(1):405-407.
- [2]周正,徐仕先,丁卫华,等.电化学储能安全性分析及预警技术进展[J].工业安全与环保,2023,49(2):154-156.
- [3]王兴春,吴菲,郁颖蕾.电化学储能电站风险评估指标体系设计[J].化工安全与环境,2022,35(47):118-123.