

Research on Common Problems and Countermeasures in the Safety Management of Energy Storage Batteries

Rukun Feng

Longyuan (Beijing) New Energy Engineering Technology Company, Beijing, 100054, China

Abstract

With the widespread application of current electrochemical energy storage technologies, the safety operation and maintenance issues of batteries have become increasingly prominent. The traditional battery management system can only obtain the voltage, current, and temperature of each battery cell, and is limited by factors such as hardware processing capacity, data transmission bandwidth, and latency. Mastering the health and safety operation status of the massive battery cell energy storage system has become a key technical challenge. This paper mainly studies a series of chain reactions caused by the imbalance of electrochemical reactions within the battery, analyzing from the physical causes of thermal runaway and the chemical evolution process. Through the analysis of microscopic mechanisms such as electrode sheet failure, separator wear, and electrolyte gas production, the main reasons for the instability of the system operation are obtained. Based on this, corresponding protective measures and environmental control methods are proposed to improve the operational efficiency and service life of the entire system. The relevant analysis mainly focuses on the improvement of the hardware structure and the redesign of the warning logic, providing technical references for the stable operation of energy storage facilities.

Keywords

energy storage battery; thermal runaway; operational stability; electrochemical monitoring

储能电池安全管理的常见问题及对策研究

冯儒坤

龙源(北京)新能源工程技术公司, 中国·北京 100054

摘要

随着当前电化学储能技术的广泛应用, 电池储能的安全运维问题日渐突出。传统电池管理系统仅能获得各电池单体的电压、电流及温度, 并且受限于硬件处理能力、数据传输带宽及延迟等条件, 掌握海量电池单体储能系统的健康与安全运行状态成为关键技术难题。本文主要研究电池内部电化学反应失衡所引起的一系列连锁反应, 从热失控的物理原因和化学演化过程两个方面进行分析。通过对极片失效、隔膜损耗和电解液产气等微观机理进行分析, 得到造成系统运行不稳定的主要原因。在此基础上提出相应的防护措施以及环境控制方法, 以提高整个系统运行效率和使用寿命。相关分析主要研究了硬件结构的改善和预警逻辑的重新设计, 给储能设施稳定运行提供技术上的参考。

关键词

储能电池; 热失控; 运行稳定性; 电化学监控

1 引言

全球能源结构转型使得电化学储能技术快速发展, 储能电池高能量密度条件下的高安全性是电池储能系统商业化推广应用的首要保障。由于单体电池能量密度提高, 内部热积累、电化学反应变得越来越复杂, 运行过程中存在的各种风险点也变得多样化起来。为了解决频繁出现的性能波动、系统失效等现象, 应该从微观演化规律和宏观防护体系

两方面进行探究。目前的研究重点已经从单纯的性能提高转变为系统性的风险控制, 依靠物理上的瓶颈被打破和逻辑算法的不断更新, 从而达到准确地识别出运行状态并加以干预的目的。寻找行之有效的技术途径, 对削减运行损耗、提高资产利用率有着十分重要的意义。

2 储能电池运行风险演化机理

储能系统在长时间工作时, 电池内部的电化学环境一直处在动态平衡的持续变化之中, 一旦平衡被破坏, 就会引发不可逆的连锁反应。一般情况下电池工作在 3.7V 的标称电压上, 但是电流密度分布不均匀或者局部阻抗发生变化的时候, 电极表面的锂离子析出动力学就会被抑制, 从而造成

【作者简介】冯儒坤(1995-), 男, 中国河北人, 硕士, 助理工程师, 从事锂离子电池热失控机理、电化学储能电站技术监督, 电化学储能电站防火灾技术研究。

金属锂在负极表面沉积。这种微观层面的结构异变成了之后风险积聚的根源^[1]。随着循环次数的增加,活性物质的脱嵌嵌入过程会伴随着晶格应力的积累,使电极颗粒产生微裂纹,从而增大电解液的副反应接触面。热效应共同起作用的时候,内部温升会加快固体电解质界面膜的分解,产生热量,进而促使内部压力上升,使电池由稳定状态向不稳定状态移动,形成一个恶性循环链,造成物理结构的结构解体。

3 电池电化学结构失效分析

3.1 极片微观结构失效分析

电极极片是否完整,直接影响到电荷迁移的速度以及系统运行的稳定性。充放电循环过程中正负极材料会不断发生体积膨胀和收缩,从宏观上讲就是活性颗粒和导电骨架的分离。负极侧在极端情况下容易产生枝晶,消耗掉有限的活性锂资源,同时也会给多孔结构带来物理挤压。当电极局部电压超过 4.2V 的非正常区时,材料表面的氧化还原反应就会变得非常激烈,产生出来的中间态产物会堵塞离子传输通道。微观结构崩塌过程一般伴随着局部电流密度急剧增大,使电池内阻在很短的时间内出现跳跃式的改变,造成欧姆产热急剧上升,破坏了原来稳定的热量耗散平衡,引发严重的连锁反应。

3.2 隔膜热收缩引发的内部短路

多孔聚合物隔膜是正负极之间重要的屏障,它的热稳定性是保证系统可靠性物理底线。当局部热点温度上升到 120℃ ~ 150℃ 的时候,常规聚烯烃材料就会出现明显的向心收缩现象,造成电极边缘露出来。在没有物理隔绝的情况下,活性电极直接接触引起的快速放电会瞬间释放出巨大的能量。该种能量释放的过程具有很强的瞬时性,局部温度可以在几毫秒内升高到 300℃ 以上。隔膜的闭孔作用可以部分阻止离子流,但是严重的机械应力或者枝晶穿刺会大大削弱它的保护效果。物理完整性消失造成电化学能无序地转化为热能,是系统运行中出现的最严重的一种物理风险因素,必须依靠材料改善来加以控制。

3.3 电解液分解与产气压力累积

电解液是离子传输的介质,高温或者高压时化学稳定性较差。当电池内部温度大于电池的热分解温度时,有机溶剂和溶质盐就会发生复杂的氧化分解反应,产生氢气、一氧化碳等挥发性气体^[2]。这些气体在电池壳体内很快积聚起来,使内压呈指数增长。当压力超过壳体的物理承载极限或者泄压阀的预设值的时候,就会造成壳体破裂,使内部的易燃物质和外界的氧气接触。分解反应产生的酸性物质又会对电极表面造成侵蚀,活性金属不断被溶解,这样就使电池的可用容量降低,同时也在系统内部埋下了热失效的隐患。气液固三相平衡被破坏就是电化学窗口被关闭的明确标志,也是风险不可逆转的信号。

3.4 活性物质损失对电压的影响

循环过程中锂离子不断流失、活性位点失活会造成电

池开路电压和极化电压的异常波动。由于固体电解质界面膜反复修补和再生,大量的锂离子被永久地锁在副反应产物里,使系统的可逆容量不断降低。这种损失从外部看表现为端电压下降速度加快、充放电曲线变坏。当有效活性物质的比例降到预设范围以外的時候,电池的动力学特性就会发生根本性的变化,极化电压的增大意味着在相同的电流下产生更多的焦耳热。由于各个单体活性物质衰减速率不同,单体间电压不一致会不断增大,出现木桶效应,使整个储能电池组运行效率大大降低,还存在局部过充、过放的风险,影响系统长期稳定运行。

4 运行风险防护技术路径

4.1 高导热封装材料的应用效能

提高电池模组内部的换热效率是抑制热量堆积的一种方法。使用具有高导热系数的复合封装材料,可以迅速把单体电池产生的热量传到散热基板上。该类材料一般是由导热绝缘基材和相变填料组成的,在大电流充放电过程中,依靠物理吸热来减缓温升速度^[3]。相比于传统的空气间隙封装,采用高导热材料填充可以使得模组内部温差保持在 5℃ 之内,不会出现局部热点。同时该类材料还具有很好的阻燃性,在极端高温下不会助长火势蔓延。经过对导热路径进行改进后,可以使得热量在空间上的分布更趋均匀,从而延长了元件的使用寿命,也为后面主动散热系统的节能降耗打下了基础,从根源上提高了能量转换效率。

4.2 电池模组结构冗余设计

从物理结构上采取冗余设计的思想,就能很好地阻止局部失效变成整个系统失效。在单体电池之间设置物理防火屏障或者隔热空气层,可以切断热失控的传导途径。因此模组框架要具有足够的机械强度来抵抗由于产气造成的物理冲击,防止外壳在 500Pa 以上的压力作用下产生形变而造成短路。同时电气连接处应使用带有过流保护特性的柔性连接件,在电流出现异常脉冲的时候可以依靠熔断来切断故障单元。结构冗余不只是物理空间的隔离,还有传感监测维度的冗余配置,即使一个传感器失效了,也能得到电池运行的主要参数。多重防护架构形成起系统的防御纵深,防住连锁反应。

4.3 灭火介质在模组内部的扩散

为防止出现极端放热反应,在终端处设置高效的灭火介质喷淋系统。选择具有很强吸热能力的氟化酮类或者细水雾灭火剂,在火源产生初期就能实现准确扑灭。灭火介质的管路要覆盖每一个模组的进气口,在触发信号之后能迅速填充到内部空隙里,降低环境中的氧气含量,带走大量的热量。研究表明,快速充入的降温介质可以在几十秒内把电池表面温度由 180℃ 降到稳态。另外,灭火介质的绝缘性不可忽视,在喷淋过程中不能引起二次短路^[4]。使用流场动力学优化技术,使灭火剂在狭窄模组间隙内均匀分布,是系统快速恢复、损失最小化的有效技术手段,可以防止灾害的扩大。

5 外部环境耦合效应处置

5.1 高温工况下的强制对流冷却

外部环境温度上升会使电池的散热环境变差,必须依靠强制对流技术来加以干预。通过设计合适的风道结构或者冷却板流路,使积聚的热量带走不小于 0.1m/s 的速度。高温季节该冷却系统要和电池运行功率联动起来,按照实时产热率来调节冷却介质的循环频率。研究表明,在环境温度大于 35℃ 的时候,单纯的自然冷却不能使电池处在最佳的工作窗口内。强制液体冷却技术依靠液体的高比热容特性,可以给电池内部最高温度保持在低于 50℃ 的临界点。采用精准控制泵阀开度的方式,使能量消耗和温控效果达到协调优化的目的,保证系统在极端气候下具有稳定性,减少热应力的积累。

5.2 低温环境预热对活性影响

低温环境会造成电解液离子传导能力下降,引起电池内阻增加、充电难。严寒地区系统要具备完备的预热功能,在启动之前用电加热膜或者热泵循环使电池本体温度达到 15℃ 以上。预热过程中要控制好加热速率,防止局部过热造成热应力损伤。利用均匀加热技术可以活化电极表面的电化学活性,减小电荷转移阻抗。低温下,未预热的强制充电很容易造成锂枝晶生长,所以预热逻辑要先于充电指令执行。该类环境适应性技术应用之后,季节更替给储能站调峰造成的不良影响被消除,储能系统可以在全年范围内保持稳定的功率输出,不会因为低温而出现系统停机的情况,保证能源供应的连续性。

5.3 机械冲击导致的结构性损伤

储能设施在运输、安装和运行过程中会受到震动或者机械冲击的影响,这些外部应力会对电池的封装以及连接结构造成直接的作用。机械损伤隐蔽性大,微小的封装开裂会造成水分渗入,从而引起电解液变质、绝缘电阻下降。因此电池集装箱和模组支架应该具有较好的减震性,用弹性衬垫或者阻尼装置来吸收高频振动。结构设计时需要保证电池单体和汇流排之间有较好的柔性冗余,在受到冲击载荷的时候不会出现疲劳断裂的情况^[9]。定期对物理完整性进行检查,用超声波检测等无损检测方法发现内部结构的隐患,是防止机械应力积累造成的失效。物理稳固性是电化学稳定运行的基础保证,在硬件设计阶段要加以加强。

5.4 长期运行的性能退化监控

电池系统经过几千次循环以后,它的物理性质同初始状态相比会明显发生漂移,这就需要监控策略具有长期演化的跟踪功能。通过对历史运行数据进行采集,得到容量衰减曲线以及内阻增长趋势图,从而可以准确地预测出电池的健康状态剩余值。当容量衰竭到初始值的 80% 时,电池的产热特性以及倍率性能会发生质的变化,这时需要改变充放电深度来减小运行应力。性能退化监控不只是看单个的表现,还要关注系统内部一致性变化,防止个别差的单元影响整个表现。通过不断改变运行参数的边界,使控制策略和电池目前的物理状态相适应,从而最大限度地发挥出电池的残余效能。以寿命周期为基础进行动态监测可以提高系统的长期可靠性,保证系统的全生命周期平稳运行。

6 结语

储能电池系统运行稳定受到电化学机理、物理结构和外界环境等诸多因素的相互作用。通过探究热失控的演化路径并改进防护技术手段,可达到运行风险有效控制的目的。未来技术发展要重视新型热管理材料的应用以及多维监测逻辑的健全,创建起由微观材料到宏观系统全方位防护体系。经过不断的科技更新和实践操作的积累,使系统对于各种极端工况的应对能力得到提升,给能源结构的绿色转型赋予稳固的支持。系统的科技支撑会成为产业持续健康发展的重要根基,也会给更大的能源互联赋予物质支撑。在现有的技术体系之下,依靠细致的预警以及有针对性的处理,可以有效地削减系统的失效几率,从而促使储能技术向着高效化迈进。

参考文献

- [1] 陈文涛,申韶鹏,张世杰,等. 储能电池产业发展、标准近况与对策建议[J].电源技术,2025,49(12):2495-2500.
- [2] 邱初暄,叶中轩,陆瑞强,等. 锂离子储能电池运输安全要求分析[J].中国口岸科学技术,2025,7(08):47-52.
- [3] 何明,柴二亮,何亮,等. 基于智能BMS技术的移动储能电池安全问题研究[J].自动化与仪器仪表,2024,(09):374-378.
- [4] 李云松,蔡天亮,崔健,等. 电化学储能电站安全风险及防控措施[J].电力安全技术,2023,25(12):1-3+16.
- [5] 蔡涛,张钊诚,袁奥特,等. 锂离子电池储能安全管理中的机器学习方法综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):178-187.