

电厂储能系统运行过程中的安全风险控制与预防

马 成

华电新疆发电有限公司乌鲁木齐分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘 要：电厂储能系统运行过程中安全风险控制与预防是确保储能电站稳定运行的基础。储能电站作为调节电力供需和提高电网稳定性的重要设施，其安全运行对于电力系统的稳定至关重要。任何安全隐患都可能导致电力输出不稳定，甚至引发火灾或爆炸等严重事故，进而影响整个电力系统的正常运行。本文就电厂储能系统运行主要安全风险点，电厂储能系统火灾风险分析，电厂储能系统安全风险对运营的影响，电厂储能系统安全风险控制措施，电厂储能系统安全风险预防策略等方面进行了详细的分析。

关键词：电厂储能系统运行；安全风险控制；预防

安全风险控制与预防还可以减少经济损失和环境污染。储能电站的火灾和爆炸事故不仅会导致设备损坏和电力供应中断，还可能引发环境污染和人员伤亡。通过有效的安全管理和预防措施，可以最大限度地减少这些损失，保护环境和人员的安全。

1 电厂储能系统运行主要安全风险点

1.1 电池热失控与火灾风险。锂电池热失控，过充、过放、短路或机械损伤可能导致电池内部剧烈放热，引发不可逆的连锁反应，释放氢气、甲烷等可燃气体及有毒物质（如氟化氢）。热失控起火速度极快（秒级），且伴随高温、烟雾扩散，传统灭火手段难以有效扑灭。其他电池类型火灾，钠硫电池因高温运行特性，存在熔融电解质泄漏引发火灾的风险。变压器、电缆等电气设备过载或老化可能引发常规电气火灾，需依赖气体灭火系统。

1.2 爆炸风险。可燃气体爆炸，电池热失控释放的可燃气体（如氢气、甲烷）在封闭舱内积聚，通风失效时易达到爆炸极限，遇明火或电火花即引发爆炸。油浸式变压器内部电弧故障可能导致燃烧或爆炸，需监测油温与绝缘状态。电解液挥发与化学爆炸，液流电池腐蚀性液体泄漏或铅酸电池硫酸挥发，可能引发化学腐蚀或爆炸风险。

1.3 设备与系统失效风险。电池管理系统（BMS）异常，BMS功能失效（如模拟量测量误差、保护功能缺失）可能导致电池状态误判，加速热失控进程。电力电子设备故障，逆变器、变流器故障可能引发电压波动，威胁电网稳定性，甚至触发连锁故障。绝缘与通信问题，电池组接线松动、绝缘老化或通信中断可能引发短路、触电或设备瘫痪。

1.4 有毒物质与人员伤害。有毒气体危害，电池燃烧

释放氟化氢、氯化氢等剧毒气体，对呼吸道、皮肤及眼睛造成严重损伤。触电与窒息风险，高电压设备残留电荷可能导致触电；氮气吹扫不当或通风不足可能引发缺氧窒息。

1.5 环境与人为因素风险。通风与消防系统缺陷，排风系统故障可能导致可燃气体或氮气聚集，消防介质选择错误（如水基灭火器）可能加剧火势。操作与维护失误，未规范穿戴防护装备、误操作参数设定或缺乏应急培训，可能直接引发事故或扩大损失。干燥气候加速电池散热失衡，增加热失控概率。操作人员培训不足或规程执行不严，可能导致短路、过充等直接风险。

1.6 衍生风险与连锁反应。次生灾害：如地震、洪水导致设备损毁，进而触发电气短路或电池泄漏。容量管理失衡：电池簇容量利用率差异可能导致局部过充/过放，加剧系统风险。

2 电厂储能系统火灾风险分析

2.1 核心起火诱因。电池热失控，锂电池在过充、过放、短路或机械损伤时，内部剧烈放热引发不可逆连锁反应，释放氢气、甲烷等可燃气体及氟化氢等剧毒物质，火势可在数秒内蔓延。典型案例显示，海南某储能电站火灾即因电池簇底部配电箱短路引发连锁热失控，导致整舱燃烧。钠硫电池因高温运行特性，熔融电解质泄漏可能直接引发明火。可燃气体聚集与爆炸，电池热失控释放的氢气、甲烷在封闭舱内积聚，若通风系统失效或气体浓度监测缺失，遇明火即触发爆炸。

2.2 风险放大因素。系统设计缺陷，早期未严格遵循安全标准的电站普遍存在防火间距不足（如海南案例仅3米）、消防单元粗糙（仅舱级灭火，缺乏电池包级精准抑制）等问题，延误灭火时机。储能舱内电池密集排列（单舱容量可达2MWh），单体电池热失控易引发连锁反

应。消防与运维短板，七氟丙烷等气体灭火系统难以穿透电池包内部抑制火源，依赖外部冷却耗时过长（海南火灾扑救耗时26小时，用水超2000m³）。消防设施维护

不足或灭火剂选择错误（如误用水基灭火器），可能加剧火势或导致环境污染。

2.3 火灾危害特征。

危害类型	具体表现	案例与数据支撑
火势蔓延	封闭舱内高温烟雾扩散迅速	海南火灾中火势1小时内蔓延至全舱
有毒气体	氟化氢、氯化氢浓度超过安全阈值	部分案例中气体浓度未达危险水平
环境污染	消防废水可能污染土壤与水源	污染物扩散范围有限
次生灾害	爆炸冲击波或飞溅物损坏相邻设备	连锁灾害占比超60%

2.4 典型事故共性分析。时间分布：69%的火灾发生在运行阶段，17%发生于调试期，新投运6个月内风险最高。技术关联：未集成先进热管理、气体监测及多级灭火系统的老旧电站事故率显著偏高。灭火难点：锂电池火灾需依赖持续冷却（而非扑灭），导致处置时间长、资源消耗大。

2.5 风险防控启示。设计优化：采用模块化防火分隔、电池包级灭火系统及智能通风方案，降低连锁反应概率。标准升级：强制要求新项目通过核电级安全评估，淘汰未经验证的早期技术。监测强化：部署实时温度、气体探测及电弧预警系统，实现火灾早期干预。

3 电厂储能系统安全风险对运营的影响

3.1 直接经济损失。设备损毁与修复成本，电池热失控或电气设备故障引发的火灾、爆炸可导致储能舱、逆变器核心设备损毁，单次事故经济损失可达数百万至千万元。例如，某储能电站因火灾导致整舱设备报废，修复费用占总投资的35%。事故后需对周边设备进行系统性检测与更换，隐性成本（如停工损失、安全评估费用）占比超直接修复费用的20%。环保与应急处置开支，电池燃烧释放有毒物质需专业团队处理，消防废水、泄漏电解液等污染物治理费用高昂，单次事故环保处置成本可达百万元级。

3.2 运营效率下降。停机与供电中断，储能系统故障或事故后需停机检修，直接影响电厂调峰能力与电网稳定性。典型事故中，储能系统停机周期可达1-3个月，导致峰谷电价套利机会损失超千万元。伴随停机产生的电网罚款（如未履行调频义务）进一步加重运营负担。维护频率与人力成本增加，高风险系统需高频次巡检与维护，人力成本较普通电站提升30%-50%。例如，老旧储能电站因BMS老化，需额外配置专职团队实时监控电池状态。

3.3 市场与政策风险。保险费用攀升，事故频发导致储能设备保险费率上涨，2025年部分高风险区域保费同比涨幅达40%，显著压缩项目收益率。政策合规压力，各国加强储能安全监管，未通过核电级安全评估的电站面

临限产或关停风险，改造费用占运营成本的10%-15%。环保法规趋严，事故后的碳足迹追溯可能引发高额罚款（如欧盟碳边境税）。

3.4 品牌与法律风险。信誉受损与客户流失，储能事故易引发公众对电厂安全性的质疑，导致工商业用户终止购电协议或要求补偿，典型案例中客户流失率达15%。法律纠纷与赔偿，有毒气体泄漏或爆炸造成周边居民健康损害可能触发集体诉讼，单起诉讼赔偿金预估超亿元。

3.5 技术迭代压力。设备更新成本刚性上升，为降低风险，电站需强制升级智能热管理、多级灭火系统等技术，初期改造投入占年度预算的20%-25%。老旧电池组提前退役（如设计寿命10年但实际5年更换）导致资产折旧加速，影响长期收益率。

4 电厂储能系统安全风险控制措施

4.1 技术层面防控。电池与设备优化，采用高稳定性电池材料（如固态电池）降低热失控风险，并通过强化散热设计（液冷/相变材料）提升温控效率。部署冗余设计的电池管理系统（BMS），确保电压、温度等多参数实时监测与异常预警功能精准性。智能监测系统，集成多级传感器网络，实时采集电池组、PCS（变流器）及消防系统数据，并通过AI算法预测故障趋势。采用高清红外摄像头（分辨率 ≥ 1080p）与24小时监控设备，实现储能舱烟雾、漏液等异常状态的早期识别。

4.2 管理层面规范。运维标准与培训，强制要求运维人员取得消防安全、设备操作双认证资质，并定期开展热失控应急演练（如模拟电池舱火灾扑救）。建立设备全生命周期台账，记录电池循环次数、维护日志及故障处理记录，实现风险可追溯。运行模式控制，设定充放电功率阈值（如SOC 20%-80%区间运行），避免过充/过放加速电池老化。在极端天气（高温/雷暴）下自动切换至安全模式，限制充放电速率或触发预降温程序。

4.3 消防与应急体系。多级灭火系统，采用“Pack级（电池包）+舱级”双重灭火方案：Pack级气溶胶灭火装置快速抑制单体失控，舱级七氟丙烷系统覆盖全局火灾。配套喷淋降温设施防止复燃，并配置防爆型通风装

置稀释可燃气体浓度（氢气 $< 1\%$ ）。应急预案与联动，制定快速断电、隔离舱体、疏散通道管控等标准化流程，确保30秒内启动应急响应。与消防部门建立数据共享机制，实时传输舱内温度、气体浓度等关键参数，提升联合处置效率。

4.4 环境适应性加固。结构防护设计，储能舱采用防火隔离舱体（耐火极限 ≥ 2 小时），相邻舱间距 ≥ 5 米以阻断火势蔓延。地下储能设施需配置防水防潮层及排水系统，避免洪水倒灌引发短路。电磁兼容与绝缘防护，优化电缆屏蔽设计与接地电阻（ $\leq 4\Omega$ ），减少电磁干扰导致的BMS误判。定期检测电池簇绝缘电阻（ $\geq 100M\Omega$ ），预防漏电或电弧风险。

5 电厂储能系统安全风险预防策略

5.1 智能监测与预测性维护。AI实时感知网络，部署7M多维度感知系统（电压、电流、温度、内阻等），以毫秒级频率捕获电芯微观状态参数，结合边缘计算与高频纹波注入技术，实现电池极化特性解析及早期故障识别。基于数字孪生技术构建虚拟电站模型，通过AI算法预测电池性能劣化趋势，超前预警热失控风险（准确率 $\geq 95\%$ ）。主动防御技术升级，采用人工智能驱动的主动安全预警系统，实时跟踪电池本体与运行条件耦合作用，对早期故障（如内阻异常、微量气体泄漏）进行识别与干预。

5.2 全链条安全管理强化。运维标准化体系，建立设备全生命周期台账，记录电池循环次数、维护日志及故障处理记录，实现风险可追溯。强制运维人员通过消防安全及设备操作双认证，并每季度开展热失控应急演练（含模拟断电、隔离舱体等场景）。运行模式优化，设定SOC（荷电状态）安全区间（20%-80%），避免过充/过放加速老化；极端天气下触发预降温程序，抑制环境风险。

5.3 多级消防与防护设计。精准灭火体系，构建“电池包级气溶胶+舱级七氟丙烷+喷淋降温”三重防护：气溶胶装置实现3秒内单体电池火源抑制；舱级系统联动防爆通风装置，将氢气浓度控制在爆炸下限（1%）以下。

物理隔离加固，采用耐火极限 ≥ 2 小时的防火舱体，相邻储能单元间距 ≥ 5 米，舱内电池簇间设置陶瓷纤维防火隔板。地下设施配置防水防潮层及自动排水系统，防范极端天气引发的次生灾害。

5.4 政策合规与技术迭代。强制性标准执行，严格执行《关于加强电化学储能安全管理有关工作的通知》，推动UL 9540A等国际安全认证，出口项目需通过核电机级安全评估。技术路线升级，淘汰低质电芯，优先采用固态电池等高稳定性技术；推进液冷散热系统覆盖率至100%，降低热失控概率。

5.5 风险评估与动态优化。每季度开展定量风险评估（QRA），重点监测电池簇绝缘电阻（ $\geq 100M\Omega$ ）、电缆接地电阻（ $\leq 4\Omega$ ）等核心参数。基于风险评估结果动态调整SOC阈值、消防策略及维护周期，形成“监测-评估-优化”闭环。

综上所述，电厂储能系统作为新型电力体系的重要调节单元，其安全风险控制与预防直接影响电网稳定性和社会公共安全。储能系统安全控制需融合技术防护与管理优化，通过多层级协同实现风险早识别、快响应、强抑制，为新型电力系统提供可靠支撑。

参考文献

- [1]姜建.分布式储能系统规划配置及协调控制研究[D].北京:北方工业大学,2024.
- [2]李萌东.储能系统安全管理技术在储能电站安全管理中的安全风险控制[J].电工技术学报,2016,31(14):1-10, 20.
- [3]章林.智能配电网中分布式储能布局优化配置分析[J].电气技术与经济,2024(8):342-344,354.
- [4]李涛永.储能电厂安全管理与风险防控解析[M].北京:科学出版社,2016.
- [5]高宝涛.储能系统安全隐患分析及预防措施-[J].中国科学:物理学力学天文学,2019,49(4):045202.
- [6]万盛.储能系统安全管理与风险预防技术研究[J].中国科学:物理学力学天文学,2019,49(4):045205.