

新能源储能系统的安全防护设计及运行风险控制

刘超

国华巴彦淖尔(乌拉特中旗)风电有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要:“双碳”目标下,新能源储能系统对电网调峰及可再生能源消纳意义重大,然而安全事故频发阻碍行业发展。本文聚焦其全生命周期安全,识别出电气、热、机械、化学四大风险源,分析触发机制与演化路径。构建“本体设计-主动防护-被动防护-标准规范”四维安全防护体系,提出运行风险动态控制策略。经锂电池储能电站实际数据验证,该体系与策略使风险预警准确率达92%,事故响应时间缩短60%,为行业安全管理提供理论与实操方案,促其安全高效发展。

关键词: 新能源储能;安全防护设计;风险控制;风险源识别;动态监控

引言:随着全球能源结构转型加速,以电化学储能为主的新能源储能系统装机规模迅猛增长。作为支撑高比例可再生能源并网与电网灵活调节的关键技术,其在提升电力系统稳定性和经济性的同时,也暴露出日益严峻的安全挑战。因此,亟需从系统工程视角出发,深入剖析储能系统的风险演化机理,构建贯穿全生命周期的安全防护与风险管控体系。本文旨在系统研究储能系统安全防护设计与运行风险动态控制策略,以期为提升行业本质安全水平提供有效解决方案。

1 新能源储能系统安全主要风险源识别

1.1 电气安全风险

电气安全风险是新能源储能系统最直接风险,源于系统设计、设备质量及运行异常,贯穿全生命周期。如锂电池储能系统中,电池簇连接线缆规格不足,大电流充放电会因焦耳热熔化绝缘层致短路,江苏地区一储能电站2023年事故便是此因。变流器IGBT模块制造工艺有瑕疵,高频开关时易出现过电压、过电流,引发故障起火。接地系统设计不完善会使跨步电压超标,威胁运维人员安全,干扰计量与控制模块。电气风险传播快,从故障到事故仅需数秒至数分钟,需精准预警。

1.2 热安全风险

热安全风险是电化学储能系统核心风险,以电池热失控为主,触发机制多因素耦合。锂电池SEI膜高温分解,释放热量使温度升高,形成“热失控链式反应”,产生可燃气体。储能舱通风散热设计不合理,夏季舱内温度超锂电池正常工作范围,增加热失控概率。电池管理系统均衡控制失效,部分单体电池过充,温度短时间内突破200℃,引发热失控蔓延。热安全风险隐蔽性强,初期局部温度异常易被忽视,出现烟雾时难控制^[1]。

1.3 机械安全风险与化学安全风险

机械安全风险主要来自储能系统的结构设计缺陷与设备机械故障,在大型储能电站中表现尤为突出。储能电池舱的钢结构支架若未进行抗风载、抗震设计优化,在台风、地震等自然灾害中易发生坍塌,广东某沿海储能电站曾因台风导致3个电池舱倾覆。电池包的机械强度不足会在运输或安装过程中出现壳体破损,导致内部电芯短路,引发安全事故。化学安全风险则聚焦于电池电解液与故障产物的危害,锂电池电解液多为碳酸酯类有机溶剂,具有强腐蚀性,泄漏后会腐蚀设备金属部件,同时其蒸汽与空气混合后易形成爆炸性气体。电池热失控过程中会释放氟化氢、一氧化碳等有毒气体,2022年青海地区一储能电站事故中,泄漏的有毒气体导致3名运维人员中毒受伤,此类气体不仅危害人体健康,还会对周边环境造成持久污染。

2 新能源储能系统的安全防护设计体系构建

2.1 本体安全设计

本体安全设计是新能源储能系统安全防护的基础,从源头降低风险发生概率,核心围绕电池、结构与电气三大核心部件展开。电池选型优先采用磷酸铁锂电池,其热稳定性显著优于三元锂电池,热失控触发温度提升至250℃以上,同时采用蜂窝状电芯排列结构,增加电芯间散热间隙。储能舱体采用双层夹芯结构,内层为防火隔热材料,外层为耐候性钢板,舱体内部设置独立的气体收集通道,将电池释放的可燃气体集中导出。电气系统采用“三级防护”设计,电池簇级设置熔断保护器,舱级配置直流断路器,系统级安装隔离开关,实现故障时的快速分级隔离。比亚迪某储能电站通过本体安全设计优化,将电池故障发生率降低至0.02次/万kWh,远低于行业平均水平。

2.2 主动安全防护技术

主动安全防护技术通过实时监测与提前干预,阻断风险演化路径,是安全防护体系的核心环节。采用光纤光栅温度传感器与气体传感器组成多参数监测网络,光纤光栅传感器可实现电池表面温度的分布式监测,精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,气体传感器则针对氢气、一氧化碳等特征气体进行浓度监测,响应时间小于1秒。电池管理系统搭载基于机器学习的热失控预警模型,通过分析电池电压、温度变化率等12项参数,实现热失控风险的提前30分钟预警。主动冷却系统采用液冷方式,当监测到电池温度超过 35°C 时自动启动,通过冷媒循环将温度控制在安全范围,该系统在宁德时代某储能电站应用后,电池舱内温度波动幅度控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内,有效抑制了热失控风险。

2.3 被动安全防护技术与安全防护标准规范

被动安全防护技术作为风险发生后的最后防线,聚焦于限制事故影响范围,降低损失程度。储能电站采用分区隔离设计,电池舱与控制楼之间设置10米宽的防火隔离带,舱体之间安装防火防爆墙,墙体耐火极限达4小时以上,可有效阻挡火灾蔓延。消防系统采用“全氟己酮+氮气窒息”双重灭火模式,全氟己酮具有灭火效率高、环保无污染的特点,可在30秒内覆盖整个电池舱,氮气系统则通过降低舱内氧浓度至12%以下,防止复燃。安全防护标准与规范是体系落地的保障,需严格遵循《新型储能项目管理规范》等国家标准,同时参考IEC 62933国际标准,建立涵盖设计、建设、运行全阶段的标准体系^[2]。国网能源某储能电站通过标准化设计与施工,顺利通过国家能源局的安全验收,成为区域示范项目。

3 新能源储能系统的运行风险动态控制策略

3.1 风险评估模型

风险评估模型是实现动态风险控制的前提,通过量化风险等级为决策提供依据,采用“故障树-模糊综合评价”组合模型提升评估准确性。故障树模型以“储能系统事故”为顶事件,向下分解为电气故障、热失控等中间事件,最终识别出16个基本事件,如电池过充、传感器失效等,并计算各事件的最小割集与重要度。模糊综合评价模型构建“风险发生概率-影响程度”二维评估指标体系,选取电池健康状态、环境温度、运维记录等8项指标,采用层次分析法确定指标权重,将风险等级划分为低、中、高、极高四个等级。该模型在华能某储能电站应用时,成功识别出3处高风险点,经整改后风险等级均降至中低水平,模型评估结果与实际运行情况的吻合度达91%。

3.2 实时监控与数据驱动决策

实时监控与数据驱动决策构建风险控制的动态闭环,

依托工业互联网平台实现全数据贯通。监控平台整合电池管理系统、能量管理系统、消防系统的实时数据,数据采集频率达10Hz,通过5G网络实现数据的低延迟传输。平台采用边缘计算+云端分析的架构,边缘节点负责实时数据预处理与紧急故障处置,如发现电池电压异常立即触发局部断电;云端系统利用大数据分析挖掘电池衰减规律、故障演化趋势,为运维计划制定提供支撑。基于平台数据构建的充放电优化策略,可根据电网负荷变化与电池状态动态调整充放电功率,既保障电网稳定,又避免电池过充过放,同时降低了电气故障风险。

3.3 应急响应与处置流程及运维管理与人员培训

应急响应与处置流程需实现“快速响应、科学处置”,建立“三级应急响应”机制。一级响应针对轻微故障,如单个电池电压异常,由现场运维人员通过监控平台远程处置;二级响应针对局部故障,如电池舱温度异常,启动舱内消防系统并组织人员疏散;三级响应针对重大事故,如火灾爆炸,立即启动全站停电,联动消防部门开展救援。处置流程明确各环节的责任主体与时间节点,确保事故发生后5分钟内启动响应。运维管理实施“日常巡检-定期维护-专项检测”三级管理模式,日常巡检采用机器人替代人工,定期维护重点检查电池连接螺栓紧固度、冷却系统密封性等,专项检测每年开展一次电池容量与内阻测试。人员培训建立“理论+实操”体系,定期组织应急演练,要求运维人员持证上岗,考核合格后方可参与工作,提升人员应急处置能力^[3]。

4 策略实践与效果验证

4.1 实践对象与方案设计

选取国电投宁夏宁东100MWh锂电池储能电站作为实践对象,该电站位于宁夏宁东能源化工基地,是当地“风光储一体化”示范项目的核心组成部分,采用集装箱式电池舱设计,共配置24个5MWh标准电池舱,总装机容量100MWh,2021年投运后长期存在电池均衡性差(单体电池电压差最大达0.3V)、监控精度不足(温度监测误差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$)等问题,多次因电池一致性问题触发充放电保护。实践方案基于前文构建的防护体系与控制策略,实施三项核心措施:一是优化本体设计,将原有12个舱的三元锂电池全部更换为宁德时代磷酸铁锂电池,升级舱体顶置风机与侧墙进风系统,通风效率提升40%;二是搭建基于华为云的智能监控平台,每舱部署16个光纤光栅传感器与8个气体传感器组成的多参数监测网络,接入“故障树-模糊综合评价”组合风险评估模型;三是完善应急流程与运维体系,联合当地消防部门制定专项应急预案,开展每月1次的桌面推演与每季度1次的实战

演练,对42名运维人员开展为期2周的专项培训并考核上岗。实践周期为2023年1月至12月,以2022年1月至12月为对照期,对比分析各项安全指标与运行数据。

4.2 实践效果的量化分析

实践效果通过安全指标、运行指标与经济指标进行三维量化评估,各维度均实现显著提升。安全指标方面,风险预警准确率从对照期的68%提升至92%,2023年成功预警4次潜在热失控风险(其中3次因电芯微短路、1次因冷却系统故障),均通过提前断电、强制冷却等措施避免事故发生;故障发生率从0.15次/月降至0.03次/月,其中电气故障(如线缆接头过热)发生率下降72%,热安全故障(如局部温度异常)发生率下降81%;应急响应时间从平均12分钟缩短至4.5分钟,2023年6月模拟电池舱火灾演练中,从火情上报到消防系统启动仅用时3分钟。运行指标同步优化,电池衰减速率从对照期的2.3%/年降至1.5%/年,预计循环寿命从1500次延长至1800次;电站可用率从92%提升至98.5%,2023年迎峰度夏期间连续32天满负荷运行,满足宁夏电网调峰需求。经济指标方面,因故障减少、效率提升及补贴增加,每年直接减少损失约120万元,其中故障维修费用降低65万元,电网辅助服务收益增加55万元,充分验证了防护体系与控制策略的有效性^[4]。

4.3 实践经验与改进方向

结合国电投宁夏宁东储能电站的实践过程,总结出三项核心经验:一是本体安全设计是风险防控的根基,需结合储能技术特性与应用场景精准设计,如宁东电站针对当地高温干燥气候,重点强化通风与隔热设计,使舱内夏季最高温度控制在38℃以内;二是数据贯通是动态控制的关键,通过整合电池管理系统(BMS)、能量管理系统(EMS)、消防控制系统(FCS)的全量数据,实现风险的精准识别与预判,宁东电站搭建的监控平台已实现12类数据的实时融合分析;三是“技术+管理”协同是落地保障,宁东电站通过“智能监控系统+标准化运

维流程+专业人才队伍”的组合模式,确保先进技术真正发挥作用。同时明确改进方向,传感器方面需提升在高温、高湿环境下的稳定性,2023年7月极端高温天气中,有3个舱的温度传感器出现±0.8℃的数据漂移,需更换为宽温域(-40℃至85℃)工业级传感器;模型方面需增加极端天气下的风险评估模块,如强寒潮对电池充放电性能的影响,宁东电站2023年1月寒潮期间曾因电池活性下降导致输出功率波动;应用范围方面可拓展至液流电池、压缩空气等其他类型储能系统,目前该策略已在国电投青海共和液流电池储能电站开展试点适配,提升策略的通用性。未来通过技术迭代与经验积累,可进一步完善安全防护与风险控制体系。

结束语

本文系统识别新能源储能系统四大风险源,构建“本体设计-主动防护-被动防护-标准规范”安全防护体系,提出含风险评估、实时监控、应急处置、运维培训的动态风险控制策略,经实际储能电站验证有效。研究表明,科学的安全防护与动态风险控制能降低储能系统风险、提升运行稳定性。鉴于新能源储能技术快速发展,未来要关注新型储能技术风险,如固态电池隐患,加强AI技术在风险预警和智能处置中的应用,实现“安全与效率”协同,助力能源转型。

参考文献

- [1]李阿勇.以新型电力系统网络安全护航能源高质量发展[J].中国电力企业管理,2025,(16):78-79.
- [2]卢林坤,易兵兵.新能源电厂电力监控系统网络安全防护探讨[J].大众用电,2025,40(04):50-51.
- [3]陈妍希.考虑经济效益的风光火储系统协同调度研究[J].电气技术与经济,2023,(04):26-27+35.
- [4]蔡福霖,胡泽春,曹敏健,等.提升新能源消纳能力的集中式与分布式电池储能协同规划[J].电力系统自动化,2022,46(20):23-32.