

核电厂蓄电池接地运行故障分析

裴江辉 赵欣欣 文耀华

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要: 在核电厂复杂且严苛的运行环境中, 蓄电池系统作为保障其安全稳定运行的关键辅助电源, 地位至关重要。一旦出现接地运行故障, 将严重影响核电厂的正常供电, 甚至可能引发一系列危及核安全的连锁反应。本文深入剖析了单点接地、多点接地、接地电阻超标、绝缘老化与击穿等常见故障类型及其成因。借助LBA001BT蓄电池故障案例, 详细阐述了电压法检测的原理、操作流程以及关键技术要点。并从设计优化、维护策略、技术升级三个维度提出针对性防控措施, 通过这些措施有效提升系统抗接地故障能力, 为核电厂稳定运行和核安全提供坚实保障。

关键词: 核电厂; 蓄电池组; 接地故障

引言: 核电厂的安全稳定运行在能源领域占据着举足轻重的地位, 它不仅关乎着国家能源战略的顺利实施, 更与社会的稳定、人民的生命财产安全紧密相连。在核电厂的众多系统中, 蓄电池系统作为关键辅助电源, 具有不可替代的重要作用。然而, 由于核电厂运行环境的复杂性以及蓄电池系统自身的特性, 该系统极易出现接地运行故障。这种故障一旦发生, 不仅会严重影响蓄电池系统的正常供电, 更可能引发一系列危及核安全的连锁反应, 对核电厂的安全构成极其严重的威胁。因此, 深入研究蓄电池系统接地故障的类型、诊断检测方法, 并制定科学合理地优化预防措施, 对于及时排除故障隐患、保障核电厂的安全稳定运行、推动核能事业的持续健康发展具有极其重大的意义。

1 核电厂蓄电池系统概述

核电厂蓄电池系统是保障核电厂安全稳定运行的关键辅助电源系统, 在应对突发断电等紧急状况时发挥着不可替代的作用。该系统主要由蓄电池组、充电装置、监控保护装置等部分构成。蓄电池组作为核心储能元件, 通常采用阀控式密封铅酸蓄电池, 具备能量密度高、自放电率低、维护量小等优点, 能在较长时间内稳定储存电能。充电装置负责为蓄电池提供合适的充电电流和电压, 确保蓄电池始终处于良好的充电状态, 延长其使用寿命。监控装置则实时监测蓄电池的电压、电流、温度等关键参数, 并将数据传输至主控, 以便运维人员及时掌握系统运行状况, 提前发现潜在问题^[1]。在核电厂中, 蓄电池系统主要为应急照明、仪表控制、通信设备等重要负荷供电, 确保在主电源失电时, 这些关键设备仍能正常运行, 为核电厂的安全停堆、事故处理提供必要的电力支持, 是核电厂纵深防御体系的重要组成部分, 对保障核安全意义重大。

2 核电厂蓄电池接地运行故障类型

2.1 单点接地故障

单点接地故障是核电厂蓄电池系统最常见的接地故障类型, 指蓄电池组正负极或直流母线某一点通过导体与大地形成通路, 未形成闭合回路的故障状态。此类故障初期通常不会影响蓄电池的正常供电, 易被忽视, 但却是后续多点接地故障的重要诱因, 需及时排查。单点接地故障的成因主要包括: 蓄电池壳体破损导致电解液泄漏, 与接地的设备外壳形成通路; 直流电缆绝缘层因老化、磨损或挤压受损, 导体裸露后接触接地体; 接线端子松动、受潮腐蚀, 导致绝缘性能下降形成接地。故障发生后, 若未及时处理, 当出现第二个接地点时, 将形成两点接地短路, 引发大电流放电, 损坏蓄电池组及相关供电设备。

2.2 多点接地故障

多点接地故障是核电厂蓄电池系统中危害程度较高的故障类型, 指蓄电池组正负极或直流母线存在两个及以上接地点位, 形成闭合短路回路的故障状态。此类故障发生后, 将引发直流回路短路, 产生大量短路电流, 导致蓄电池组电压骤降, 无法为负载正常供电, 严重时还会烧毁电缆、损坏充电设备及负载设备, 甚至引发火灾等次生灾害。多点接地故障多由单点接地故障未及时处置演变而来, 例如首个接地点未排查到位时, 因环境湿度变化、设备振动或电缆磨损等因素, 新增第二个接地点, 形成短路回路。施工不当也可能直接引发多点接地, 如直流电缆敷设过程中绝缘层多处受损, 或接线时误将不同极性的导体与接地体连接。

2.3 接地电阻超标

接地电阻超标是指蓄电池系统接地装置的接地电阻值超过设计标准规定的阈值, 导致接地系统无法正常发

挥故障电流排放和电位稳定的功能。此类故障的成因较为复杂,主要包括:接地网敷设不规范,如接地极数量不足、埋设深度不够,或接地极之间的间距过小,导致散流能力不足;接地材料老化腐蚀,如接地极采用的钢材长期埋在潮湿、多盐碱的土壤中,发生锈蚀后截面减小,电阻增大;接地连接点松动或氧化,形成接触电阻,叠加后导致整体接地电阻超标。接地电阻超标会导致故障发生时,接地电位升高,不仅可能损坏设备绝缘,还会对运维人员的人身安全构成威胁。

2.4 绝缘老化与击穿

绝缘老化与击穿是导致蓄电池系统接地故障的核心诱因之一,指蓄电池本体及直流回路的绝缘材料因长期使用、环境影响等因素,绝缘性能逐渐下降,最终丧失绝缘功能的现象^[2]。绝缘老化的主要驱动因素包括:电化学腐蚀,蓄电池运行过程中产生的电解液蒸汽或泄漏的电解液会对绝缘材料造成腐蚀,破坏绝缘结构;环境因素,核电厂部分区域存在高温、高湿度、辐射等恶劣环境,会加速绝缘材料的老化进程,如高温会导致绝缘材料分子结构破坏,高湿度会降低绝缘材料的表面电阻率;电应力影响,长期的电压波动、浪涌电流会对绝缘材料产生电老化作用,导致绝缘性能逐渐衰减。当绝缘老化发展到一定程度,在额定电压或过电压作用下,就会发生绝缘击穿,形成接地通路。

3 核电厂蓄电池接地运行故障诊断与检测方法(基于LBA001BT蓄电池故障案例)

3.1 核心检测原理与标准依据

蓄电池自身具有电动势,无法采用绝缘电阻表直接测量绝缘电阻,核电厂普遍采用电压法进行接地故障检测,该方法符合NB/T 42083-2016《电力系统用固定型铅酸蓄电池安全运行使用技术规范》要求。以LBA001BT蓄电池组为例,其开路电压 U_k 为120V,假设正负极绝缘良好,正对地电压 U_+ 与负对地电压 U_- 应相等。结合万用表内阻 R_b 取25k Ω 的行业常规设定,通过公式推导可知:当蓄电池对地绝缘电阻 $R_d \geq 3M\Omega$ 时, U_+ 与 U_- 的计算值为0.5V,因此明确蓄电池脱离系统后,首尾对地电压绝对值需控制在0.5V以内,此为判断接地故障的核心标准。对比LCA001BT蓄电池组检测数据,其首端(正极)对地电压0.01V、尾端(负极)对地电压-0.01V,完全满足标准要求,可作为正常运行参照基准。

3.2 故障检测与初步定位流程

对LBA001BT蓄电池组的检测显示,其首端对地电压17.9V、尾端对地电压-40.4V,均远超0.5V的阈值标准,表明存在明显接地故障。依据电压法核心公式 $R_d = \frac{U_+}{(U_+ + U_-) - 1} \times R_b$,代入 $U_k = 120V$ 、 $U_+ = 17.9V$ 、 $U_- = 40.4V$ 、 $R_b = 25k\Omega$ 计算,得出对地绝缘电阻 R_d 约为1倍万用表内阻,

初步判定该蓄电池组存在高阻接地回路。考虑到该蓄电池组由58节电池串联(首端为1#、尾端为58#),结合电位分配规律,通过公式 $N_d = U_+ \times N / (U_+ + U_-) + 1$ (其中 N 为串联电池总数)计算,得出 $N_d \approx 19$,即初步定位19#蓄电池为高阻接地故障疑似单体。进一步通过逐节电池对地电压测量验证:1-18#电池对地电压极性均为正且绝对值逐步递减,20-58#电池对地电压极性均为负且绝对值逐步增大,而19#电池对地电位最低,且其正极柱对地电压为正、负极柱对地电压为负,符合内部存在接地点的电位特征,进一步佐证了理论计算结果。

3.3 故障验证与根源确认

为精准确认故障点,将19#蓄电池与相邻电池的连接线拆除后复测,结果显示1-18#电池组及20-58#电池组首尾对地电压绝对值均降至0.1V,满足标准要求,故障暂时消除;恢复连接线后故障复现,明确故障点局限于19#蓄电池。对19#蓄电池进行现场拆解检查,发现其安装位置的支架存在湿润区域,吊起电池后可见底部一角有渗液痕迹,使用擦酸纸擦拭存在明显湿润反应,而另一端支架干燥、无渗液痕迹。将该电池置于干燥木托板上重新接入系统复测,对地电压恢复正常,最终确认故障根源为19#蓄电池底部缓慢渗液,通过安装支架形成高阻接地通路。整个检测过程结合理论计算与现场验证,形成“标准比对-公式计算-电位分析-拆检验证”的闭环流程,确保故障定位精准、根源清晰。

3.4 检测技术要点与注意事项

采用电压法检测时,需严格遵循“脱离系统全部电气连接”的前置要求,避免系统其他回路对检测数据产生干扰,确保测量结果真实反映蓄电池组自身绝缘状态。选用的万用表需满足内阻 $25k\Omega \pm 1k\Omega$ 、精度0.5级的标准,且优先采用三位半数字式万用表,符合NB/T 42083-2016规范对检测设备的要求。现场检测过程中,除电压数据采集外,需同步结合外观检查,重点关注电池壳体完整性、支架湿润情况、电解液泄漏痕迹等直观特征,形成“数据+外观”的双重判断依据。对于串联电池组的故障定位,需充分利用电位分配规律,通过逐节电压测量构建电位变化曲线,精准锁定故障单体,避免盲目拆检导致故障扩大或损坏其他正常电池^[3]。

4 优化策略与预防措施

4.1 设计优化

设计优化是从源头提升核电厂蓄电池系统抗接地故障能力的核心举措,需贯穿系统规划、选型、布局全流

程。在蓄电池选型环节,应优先选用绝缘性能优异、耐环境性强的产品,如核级专用铅酸蓄电池或镍镉蓄电池,同时严格核查产品的绝缘设计参数,确保符合核安全标准。在接地系统设计方面,应采用单点接地与等电位连接相结合的设计方案,合理规划接地网布局,增加接地极数量、优化埋设深度,确保接地电阻稳定达标;同时选用耐腐蚀、导电性能好的接地材料,如铜质接地极和导体,提升接地系统的长期可靠性。在直流回路设计上,应优化电缆敷设路径,避免电缆与尖锐物体、高温设备接触,减少绝缘层受损风险;合理设置绝缘监测装置的监测点,确保能够全面覆盖蓄电池组正负极及关键直流母线。另外,还应考虑环境适应性设计,在高温、高湿度、辐射区域,采取绝缘防护、降温除湿等辅助措施,延缓绝缘材料老化。

4.2 维护策略

科学的维护策略是预防核电厂蓄电池接地故障的关键保障,需建立全生命周期的维护管理体系,实现从日常巡检到定期检修的闭环管理。日常巡检应重点关注蓄电池的运行状态,包括电压、电流、温度是否正常,壳体是否完整、有无电解液泄漏,电缆绝缘层是否完好,接地连接点是否牢固、有无锈蚀等,同时核查绝缘监测装置的运行状态,确保报警功能正常。定期检修需按规范开展接地电阻测量和绝缘电阻检测,跟踪数据变化趋势,对于异常数据及时分析排查;定期对蓄电池进行均衡充电,避免因单体电池电压不均衡加速绝缘老化;定期清理蓄电池表面和接线端子的灰尘、腐蚀物,对松动的连接点进行紧固,对锈蚀部位进行防腐处理。还应建立故障档案,记录每次故障的发生时间、原因、处置措施和结果,通过故障分析优化维护策略,同时根据蓄电池的使用寿命及时开展更换工作,避免超期服役导致的绝缘劣化和接地故障风险。

4.3 技术升级

技术升级是提升核电厂蓄电池系统接地故障防控能力的重要途径,通过引入先进的监测技术和设备,实现

故障的早期预警、精准诊断和快速处置^[4]。在监测技术升级方面,可将基于大数据的故障预测模型与现有绝缘监测系统融合,实现多维度数据的整合分析,提升故障预测的准确性和时效性;引入红外热成像检测设备和局部放电监测装置,弥补常规检测技术在隐蔽性故障诊断中的不足,实现对绝缘劣化和接地故障的精准定位。在设备升级方面,可更换老化的接地装置和直流电缆,选用绝缘性能更优、耐环境性更强的材料和设备;升级绝缘监测装置,提升其抗干扰能力和监测精度,增加趋势分析和数据上传功能,实现与核电厂DCS系统的联动。另外,还可引入智能运维系统,通过物联网技术实现对蓄电池系统运行状态的远程监测和智能诊断,减少人工巡检的工作量,提升运维效率,同时利用数字化技术构建蓄电池系统的虚拟模型,实现故障的模拟分析和处置方案的优化。

结束语

核电厂蓄电池接地运行故障的防控是一项长期且系统的工程。通过对其故障类型的深入剖析、诊断检测方法的不断探索以及优化预防措施的有效实施,能够显著提升蓄电池系统抗接地故障的能力。未来,随着技术的持续进步,应进一步强化设计优化、完善维护策略、推动技术升级,构建更加安全可靠的蓄电池系统,为核电厂的稳定运行和核安全提供坚实保障,助力核能事业的高质量发展。

参考文献

- [1]陈富杰.核电站应急柴油机起动蓄电池1E级鉴定研究[J].电工技术,2021,(19):173-176+188.
- [2]陆佩芳,陈冬,倪丹,刘桃松,吴贤章.核电站1E级阀控式蓄电池排气阀老化鉴定研究[J].电源技术,2021,45(04):521-522.
- [3]孙志明,张泽枫.非能动核电厂1E级VRLA蓄电池设备鉴定中的关键问题[J].核安全,2025,24(01):26-31.
- [4]姜博文,李阳.核电厂蓄电池室防爆设计探讨[J].智能建筑电气技术,2024,18(05):27-30.