工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 10 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

水电站直流系统运行隐患与维护管理研究

李赞　沈远航
黄河水利水电开发集团有限公司　河南济源　459000

DOI：10.32629/ems.v8i10.22581

［摘　要］直流系统为水电站继电保护、自动装置、断路器分合闸及事故照明等负荷供电[1]，交流厂用电失电时须依靠蓄电池维持控制回路供电[2]，其运行状态直接关系机组与电网安全。本文梳理直流系统构成与供电对象，分析接地故障、蓄电池劣化、充电与监控模块异常及回路配合等隐患的产生机理，指出巡检深度、检修计划、图纸台账、人员技能和备品管理中的薄弱环节，并提出蓄电池周期化运维、接地规范查找、充电与监控装置维护及制度人员管理等改进措施，以提高直流系统供电可靠性。

［关键词］水电站；直流系统；接地故障；运行维护

1 引言

水电站设备逐步进入运行中后期后，直流系统暴露的问题有所增多。已有研究归纳了直流接地故障的成因与查找方法，认为潮湿、电缆绝缘老化和端子受潮是主要诱因；长电缆分布电容显著的电站，一点接地还可能经分布电容效应与寄生回路引起出口继电器误动[3][4]。蓄电池方面，阀控密封铅酸蓄电池运行多年后出现整组容量下降、个别单体频繁欠压并须整组更换的情况已在多座电站得到印证；充电装置则普遍采用 N+1 冗余并联与模块热插拔提升后备能力。上述成果多集中于单一故障类型或单一设备，把隐患识别、现场处置与日常维护管理串起来讨论的成果相对有限。本文从隐患类型和管理环节两个角度展开分析，为现场安排检修周期、排查异常缺陷提供参考。

2 直流系统构成与功能

典型水电站直流系统按功能分为控制母线、合闸母线和相应馈出回路，母线多采用单母线分段接线，由充电装置屏、馈电屏和蓄电池屏组屏构成。充电装置一般采用高频开关电源模块并联运行，以 N+1 冗余方式供电，模块间采用硬件低差自主均流技术实现负荷均担，经降压硅堆自动调压装置向控制母线供电。蓄电池组多为阀控式密封铅酸蓄电池，串联成组，正常处于浮充状态，浮充电压随温度自动补偿。

直流母线上挂接的负荷包括线路与机组保护装置、自动装置、断路器控制回路、分合闸线圈、励磁调节装置控制电源、监控系统直流负荷以及事故照明和应急油泵等[1]，按用电特性可分为经常负荷、事故负荷和冲击负荷。这些负荷对供电连续性要求高，多数不允许短时失电：保护失去直流电源将闭锁，断路器操作电源丢失会在故障时拒动，事故扩大风险随之上升。

正常运行方式下，充电装置与蓄电池组并联接在母线上，充电装置承担经常性直流负荷并以小电流补足电池自放电损耗；交流电源丢失时转为蓄电池放电运行，交流恢复后采用恒压限流方式均衡充电。均衡充电由稳流、均充稳压定时和长期稳压浮充三个阶段构成，达到整定限流值与定时条件后自动转入浮充[2]。

直流系统的特殊性在于平时处于浮充备用状态，承担大电流放电的机会不多，性能缺陷常被正常浮充电压掩盖。单体落后、回路绝缘缓慢下降等问题若不在定期检查中发现，待事故放电时才暴露，后果严重。因此维护不能只看母线电压是否正常，须把单体数据、回路绝缘和模块工况一并纳入监视，通过蓄电池巡检装置在线监测单只电池电压与容量、通过绝缘监察装置监视母线及支路绝缘[5]。

3 运行中主要隐患类型及成因

3.1 直流接地隐患

一点接地时正负极对地仍有较大绝缘电阻，系统通常可短时运行，绝缘监察装置发出预告信号；若两段母线之间存在互联点，则一点接地即表现为两段绝缘同时降低，并可能造成保护误动、拒动。若再出现第二点接地，两点之间的控制、信号或跳闸回路可能被短接：两点落在同一极或同一回路时可能引起继电器误动、断路器误跳闸；分别落在跳闸线圈两端时可能直接启动脱扣；串入分闸回路还可能切断操作电源导致拒动。长控制电缆的对地与芯间分布电容在接地瞬间形成的阶跃响应足以使动作功率较小的出口继电器误动，

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

实测芯线对地电容约 300 pF/m，折算约 1 200 m 即达误动门槛，现场已发生因直流接地导致发变组高压侧断路器无保护跳闸的事故。

接地故障来源分散：厂房湿度大、易结露，端子箱和机构箱密封不良易进水受潮；电缆受温度变化和机械摩擦影响出现绝缘破损；施工遗留杂物、金属丝搭落端子排及小动物窜入屏柜均可形成接地点。辅机运行环境差时其辅助接点绝缘下降亦易引发公用直流接地，部分盘柜未按规程将交直流端子隔开或标记清晰，检修中易接错线、短接，甚至使交流电源串入公共直流系统。接地故障还具有极性交替、支路漂移的特点，直流网络分布广、分布电容大时，注入式低频交流信号受电容电流影响，报出支路常与实际接地点不一致，现场往往须改用拉路法逐路排查。

3.2 蓄电池组隐患

蓄电池是直流系统的最后一道电源,隐患集中在四方面。一是极板硫化和容量衰减，长期浮充且充放电不足时极板活性下降，整组可用容量降低；运行多年的固定式阀控密封铅酸蓄电池已出现容量下降、个别单体频繁欠压、额定电流放电 1h 后终端电压低于规定值的现象，最终须整组更换。二是单体不一致，落后电池内阻增大、浮充端电压偏低、放电时电压迅速跌落，整组放电深度受最差单体约束，须借助蓄电池巡检装置实时监测单只电池电压、容量以及时检出超标电池。三是连接松动和腐蚀，极柱与螺栓连接处接触电阻增大，大电流放电时发热明显，更换施工中按力矩要求紧固连接螺栓是必要工序。四是温度影响，电池室通风不良、温度偏高会加速失水和极板老化。核对性充放电与核容试验本身也有风险。放电期间母线由蓄电池组单独供电，操作顺序不当或熔断器配置不合理时，试验电流可能窜入其他回路造成设备损坏；放电须设定单体终止电压和整组放电深度，避免过放损伤极板，新旧电池混用时落后单体被过放的可能性更高。

3.3 充电装置与监控模块隐患

高频整流模块是日常运行中故障率较高的设备。功率器件随使用年限增加而老化，风道积灰、风扇停转会造成温升偏高，充电机输出过热、稳压装置过电压和充电模块运行异常是常见告警。并联运行时均流特性变差会使个别模块承担电流偏大，正常设计应通过硬件低差自主均流将模块间电流不平衡度控制在 5%以内。现场还出现过航空插座插针松动、采样回路接触不良，导致模块输出电流显示为零而被误判为正常的情况；监控模块通信中断、采样偏差或误报警同样会削弱对蓄电池和母线电压的监视能力。充电模块全部退出时系统只能由蓄电池供电，后备容量不足则直流电压很快降至允许范围以下；因此充电装置通常按 N+1 冗余配置并支持带电热插拔，监控装置异常时模块还能自动转入安全模式按设定浮充电压运行。

3.4 回路配合与绝缘监察隐患

馈线开关级差配合不当会造成接地或短路时越级跳闸，扩大停电范围，故馈线侧宜选用带报警接点和辅助接点的直流断路器，使跳闸信息实时上送监控装置；部分改造电站沿用旧开关和旧电缆，保护定值与新负荷不匹配，如早期馈线柜出线路数不足、未按双重化配置时，需增设馈线柜并重新分配负荷，以满足两套保护装置的直流电源取自不同蓄电池组母线段的要求。绝缘监察装置测量不准、采样支路配置不全会出现告警缺失或误报；改用直流漏电流传感器可克服上述缺陷。此外，寄生回路在新旧回路搭接、备用线芯利用不当时容易形成，典型表现为两段母线经二极管混合双电源或经改动后的跳闸回路构成互联点，选线时表现为多个支路乃至两段母线同时告警，须结合图纸逐路排查。

4 维护管理中的薄弱环节

隐患往往不是单一设备故障,而是管理环节叠加的结果。其一，巡检深度不足，运行人员多以查看母线电压、浮充电流和告警信号为主，对单体电压、内阻、连接条温度等数据采集周期偏长，落后单体难以及时识别。其二，检修计划粗放，核对性充放电周期较长（如每 2 年放、充电一次以活化电池和测量容量），且受机组运行方式限制容易延后，电池长期处于浅充浅放状态。其三，台账和图纸更新不及时，设备换型、回路改接后图纸未同步修订，现场实际接线与设计图纸不符是互联点和寄生回路长期存在的重要原因，故障查找仍依赖经验回忆，延长处理时间。其四，人员技能不均衡，接地查找、模块更换和电池更换均需规范操作，新人独立处置能力不足，误短接端子导致交流串入直流并造成多机跳闸的事故即暴露出作业行为管控薄弱。其五，备品储备和到货质量把关不严，备用模块、熔断器和个别规格蓄电池储备不

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

全；全站采用统一型号的高频开关整流模块则互换性更好。此外，历次检修和试验数据分散，缺少纵向对比，设备劣化趋势难以判断。

5 隐患治理与维护管理改进措施

5.1 蓄电池组周期化运维

按规程和电站实际制定年度维护计划，区分季度巡检、年度核对性放电和阶段性容量试验。日常巡检逐节测量单体端电压并记录，重点关注偏离整组平均值较大的电池；定期测量内阻并与历史数据对比，内阻变化超出厂家范围或同批电池明显离散的单体列入观察或更换清单，有条件时配置蓄电池巡检装置实现实时监测与告警。电池室保持通风和温度稳定，必要时安装空调，并配合浮充电压温度补偿；连接螺栓按力矩要求紧固并做防松标记。充放电试验前编制方案，明确隔离范围、熔断器配置、现场监护和应急恢复步骤，放电采用恒流方式并设定放电电流、时间和终止电压，试验后按规范均衡充电。

5.2 接地故障规范查找

收到告警后先结合绝缘监察显示判断接地极性和大致支路，区分交流窜入与直流真实接地，尤其警惕交流电源经误短接端子或未隔离回路串入直流的情形。查找宜从新增工作回路、潮湿屏柜和户外机构箱开始，采用拉路法时先切临时负荷和次要负荷，重要保护回路短时断电前应征得同意并做好安全措施；分布电容较大的电站注入式选线可能失效，拉路法与逐路假接地试验仍是定位接地点和互联点的有效手段[4]。对寄生回路和多路漂移告警，应回到二次图纸核对接线，通过分段断开支路断路器、测量断口返电电压确认互联点，必要时使用支路选线仪辅助定位。缺陷消除后复测正负极对地绝缘恢复正常方可结束工作，并将接地点位置和原因记入缺陷台账。

5.3 充电装置与监控系统维护

定期清扫模块风道和散热片，检查风扇运转与均流情况，记录各模块输出电流，对采样异常、通信异常的模块及时校验或更换。单模块退出时观察其余模块负载率，防止冗余能力下降后长期带病运行；宜采用模块化 N+1 热备份，模块可带电热插拔，监控退出时能自动按设定浮充电压安全运行。监控装置设定值应与规程和现场配置一致，不随意改动出厂参数；每年结合检修对绝缘监察装置进行传动和精度校验，模拟不同接地电阻值检验告警动作可靠性。同时建立模块、监控装置和蓄电池的设备档案，记录投运年限、维修历史和更换时间，为老化更新改造提供依据。

5.4 制度与人员管理

完善现场运行规程和检修作业指导书，把巡检项目、判废标准、试验流程和接地查找步骤固化；技改类作业应提前编制专项方案，明确技术措施与安全措施并严格执行[5]。开展直流系统专项培训和事故演练，使人员熟悉回路构成与应急处置顺序，重点防止误短接、误接线导致交流串入直流。备件按关键程度设置最低储备量，蓄电池型号尽量统一以减少混用；新设备入库前核对规格、内阻和出厂合格证，蓄电池更换后按规定完成容量测试与并入运行。条件具备时逐步引入蓄电池在线监测和绝缘在线选线，通过监控装置实现遥测、遥信、遥控、遥调并接入电站计算机监控系统。

结束语

直流系统平时备用、事故顶用，隐患隐蔽性强，维护管理的价值在于把缺陷消除在事故发生之前。接地故障、蓄电池劣化和充电模块异常是最常见的三类风险源，处理效果与巡检质量、检修周期、图纸台账和人员技能密切相关。应把蓄电池周期试验、接地规范查找和模块监控校验落到实处，并通过台账、培训和备件管理补齐短板。文中周期和判据需结合本电站规程与厂家说明书执行。

[参考文献]

[1]何新清.简述中小型水电站直流系统的配置及特点[J].广西水利水电，2003(增刊)：74-77.（DOI:10.16014/j.cnki.1003-1510.2003.s1.022）

[2]余义华.水电站直流系统技术改造浅析[A].新疆下坂地水利枢纽工程建设管理学术论文集：106-109.

[3]肖明，卢建勇，马应成.小浪底电厂开关偷跳原因分析与处理[J].人民黄河，2010，32(8).（DOI:10.3969/j.issn.1000-1379.2010.08.059）

[4]张宏磊，马应成，刘宇明.小浪底水电厂 220 V 直流系统的改进方案[J].水电能源科学，2011，29(10)：200-203.

[5]张铁锋，卢建勇，李侠，等.小浪底水力发电厂直流系统互联状况分析[J].吉林电力，2005(1)：27-29.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.