

水电站电气二次系统抗干扰设计分析

孔言哲

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐, 830000;

摘要: 在水电站电气二次系统运行中, 外部干扰易影响其运行稳定性及安全性。基于此, 文章基于实例, 结合《水电站工程设计规范》(GB50063-2017) 及工程所处区域特殊环境要求, 从接地系统优化设计、电缆敷设电磁屏蔽优化设计、设备选型与适配性设计、软件抗干扰优化设计层面提出水电站电气二次系统抗干扰设计策略, 旨在提高水电站电气二次系统抗干扰能力, 为水电站稳定运行打下坚实基础。

关键词: 水电站; 电气二次系统; 抗干扰设计; 接地系统

DOI: 10.69979/3060-8767.26.03.010

引言

新疆地处我国西北地区, 境内分布众多河流, 地势落差明显, 水电资源丰富, 是我国“西电东送”战略核心基地之一。近年来, 随着疆电外送通道的不断完善, 伊犁河、额尔齐斯河、盖孜河等流域新建了大批水电站工程, 这为区域经济发展注入了新的动力。但与内陆地区相比, 新疆地区地理环境更为特殊, 水电站运行面临着严峻的安全挑战。在水电站运行中, 二次电气系统具备监控、保护、测量、通信等核心功能, 其运行稳定性直接影响着机组启停、负荷调节及故障处置的可靠性。但目前, 新疆地区水电站电气二次系统运行中面临着诸多干扰影响, 不仅会引起模拟量数据跳变、开关量误动作等问题, 严重时还会造成机组非计划停机、电网振荡等事故。因此, 应结合新疆地区环境特点, 根据水电站电气二次系统现状, 制定完善的抗干扰设计优化方案, 从而保障新疆地区能源供应稳定。

1 工程概况

该水电站位于新疆伊犁河流域中游, 为坝后式地面厂房布局, 总装机容量为320MW, 内部安装有4台单机容量80MW混流式水轮发电机, 额定电压为13.8kV, 采用单机单变单元接线方式, 机组经升压220kV后, 最终并入新疆电网。该水电站所处区域海拔为1680m, 年平均气温为8.2℃, 极端最低气温可达-25.1℃, 年雷电日数为38天, 土壤电阻率约为 $80\Omega\cdot\text{m}$ 。该水电站厂房为“现地控制+远方监控”相结合的控制模式。现地控制单元选用PLC控制系统, 同时搭配8块AI采集模块、6块DI模块及4块DO模块, 可采集与控制机组有功功率、油压、油温等28路模拟量与56路开关量。模拟量

信号为4mA~20mA标准电流信号, 模拟量信号电缆敷设最长路径为180m, 部分区域模拟量信号电缆与励磁电缆、动力电缆并行敷设。

在该工程运行中, 3号机组发电环节出现了关键模拟量数据频繁跳变的现象, 有功功率波动 $\geq 15\text{MW}$, 励磁电流、油压装置油位及主变绕组温度等参数存在明显异常, 空转阶段数据稳定, 但升至额定电压后干扰显著, 严重影响了负荷调节精度与设备状态判断。经停机排查, 明确以下三点问题核心成因。其一, 励磁电压变送器接地不当, 由于处于励磁系统强电磁环境中, 因此可控硅开关产生的高频干扰难以释放, 由模拟量信号传输回路侵入现地控制单元。其二, 在长期运行后, 现地控制单元柜AI模块抗干扰能力下降; 受环境因素叠加影响, 电子元件性能进一步下降。其三, 部分地区土壤电阻率较高, 原接地网降阻处理不当, 地电位不均衡, 受强电磁干扰产生共模干扰电压。受上述多重因素影响, 机组有功功率、励磁电流等关键模拟量数据频繁跳变, 严重阻碍了设备稳定运行。

2 水电站电气二次系统抗干扰设计

2.1 接地系统优化设计

加强接地系统优化设计可有效抑制电磁干扰。针对工程所处区域土壤电阻率高、地电位不均的问题, 技术团队依托“分层接地、等电位连接、强化泄放”理念展开接地系统优化设计。

2.1.1 变送器接地强化设计

以独立接地支线, 将励磁电压变送器与现场所有模拟量变送器的接地端引至二次专用接地网中, 接地支线为耐低温等级达-40℃、截面积为 4mm^2 的多股铜芯绝缘

线,并以压接端子与接地母线相连接,将接触电阻控制在 0.01Ω 以下;将厚度为 10mm 的黄铜接地垫板设置在变压器安装底座与变压器底座之间,黄铜接地垫板与接地支线相连接,从而构成“设备+垫板+接地支线+接地网”相结合的接地通路,以此提升干扰电荷泄放效率^[1]。同时,加强变压器接地端改造,利用M6专用接地螺栓取代原有焊接接口,为后续现场安装及维护提供便利条件。

2.1.2 二次接地网结构优化

构建“主接地网+专用信号接地母线+局部等电位体”相结合的接地结构,主接地网为 $60\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的热镀锌扁钢,网格间距为 $5\text{m}\times 5\text{m}$;针对现地控制单元室及励磁室设置,技术团队设置专用信号接地母线,信号接地母线采用 $100\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的铜排,并通过4根截面积为 35mm^2 的铜芯电缆与主接地网相连接,以此构建等电位平面。将 $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 10\text{mm}$ 的铜质接地汇流排设置在励磁柜及现地控制单元柜底部,以此构建局部等电位体。柜中各设备接地端均与铜质接地汇流排相连接,而铜质接地汇流排通过2根截面积为 16mm^2 的铜芯电缆与专用信号接地母线相连接。二次接地网与一次接地网保持适当的安全距离,从而避免一次系统故障电流影响二次系统运行。

2.1.3 接地网降阻优化

针对工程所处区域土壤电阻率较高的问题,团队应用“水平铜带+垂直接地极+化学降阻剂+深井接地”相结合的降阻方案。在接地网敷设区域开挖深度为 1.5m 的水平沟槽,再铺设 $60\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的热镀锌扁钢,并每隔 10m 设置一根长度为 2.5m 、直径为 20mm 的铜包钢垂直接地极;将耐低温型高效化学降阻剂填充在沟槽内,填充量为 $1.5\text{kg}/\text{m}$;将深度为 30m 的深井设置在厂房四角,井内设置直径为 25mm 的铜包钢接地极,并借助截面积为 35mm^2 的铜芯电缆连接至主接地网。

2.1.4 差异化接地方式选择

结合信号类型,项目团队选择不同的接地方式,以此解决地电位差干扰问题。针对强电二次回路电缆屏蔽层,采用两端接地,接地电阻值 $\leq 1\Omega$;针对弱电回路电缆屏蔽层,采用单点接地,并集中连接至现地控制单元柜侧专用接地母线;针对长度 $\geq 150\text{m}$ 的长距离信号回路,将辅助接地极设置在信号源端,并借助截面积为 10mm^2 的铜芯电缆连接至主接地网,以此构成“主接地

+辅助接地”相结合的接地体系^[2]。

2.2 电缆敷设电磁屏蔽优化设计

本项目中干扰信号主要由电缆传递,针对工程厂房跨度大、电缆敷设路径长、电磁环境复杂的特征,项目团队从电缆选型、敷设路径、屏蔽措施三个层面展开优化。

2.2.1 抗干扰电缆选型升级

针对励磁电压、有功功率等关键模拟量信号电缆,项目团队选用双层铜网屏蔽双绞线,内层屏蔽网与外层屏蔽网之间设置有绝缘隔离层,从而构成双重屏蔽体系,以此抑制高频电磁耦合干扰;电缆绝缘材料为耐低温交联聚乙烯,温度耐受范围为 $-40^\circ\text{C}\sim 90^\circ\text{C}$,即使在新疆极端低温环境下,仍可保持良好的运行状态;电缆导体为截面积 $\geq 1.5\text{mm}^2$ 的多股软铜芯,可显著降低信号传输损耗;普通模拟量信号电缆淘汰传统锡皮屏蔽电缆,选用屏蔽层覆盖率 $\geq 85\%$ 的单层铜网屏蔽双绞线。

2.2.2 敷设路径优化与隔离防护

技术团队选择“分层桥架+屏蔽钢管+空间隔离”相结合的敷设形式,将电缆桥架拆分为强电层及弱电层,两层间距控制在 30cm 以上,以此避免强电回路与弱电回路电磁耦合;针对强电电缆与弱电电缆交叉部位,技术团队选择垂直交叉形式,从而降低交叉耦合面积;励磁柜至现地控制单元柜的信号电缆外部穿有管壁厚度 $\geq 2.5\text{mm}$ 、直径为 50mm 的镀锌钢管,钢管两侧借助铜编织带连接至接地汇流排,以此构建电磁屏蔽腔体, $1\text{MHz}\sim 100\text{MHz}$ 频率范围的屏蔽效能可达 80dB 以上;加强电缆路径优化调整,与强电磁辐射源保持 1.5m 以上的距离^[3]。

2.2.3 终端阻抗匹配与屏蔽层处理

针对长度为 100m 以上的模拟量信号电缆,技术团队将 120Ω 终端匹配电阻加装至现地控制单元柜AI模块输入端,以此减轻信号反射影响;加强电缆屏蔽层敷设环节保护,保障屏蔽网与电缆护套绝缘性能达标;在电缆终端头制作环节中,当屏蔽层修整完成后,借助屏蔽夹进行固定,以保障其与接地汇流排接触可靠。将接触面积控制在 20mm^2 以上,以此保障屏蔽效能。

2.3 设备选型与适配性设计

在该项目中,为抵御外部环境干扰,应提高设备自身抗干扰性能。技术团队根据新疆地区环境特点,围绕

二次系统设备展开选型优化及适配性设计。

2.3.1 PLC系统与模件升级

技术团队更换现地控制单元柜内老化的 AI 采集模件,采用抗干扰等级满足 IEC61000-4 系列标准的产品。其中,接触静电放电抗扰度 $\geq \pm 8\text{kV}$ 、空气静电放电抗扰度 $\geq \pm 15\text{kV}$ 、辐射电磁场抗扰度 $\geq 10\text{V/m}$ 、电源端口电快速瞬变脉冲群抗扰度 $\geq \pm 4\text{kV}$ 、信号端口电快速瞬变脉冲群抗扰度 $\geq \pm 2\text{kV}$ 、差模浪涌抗扰度 $\geq \pm 2\text{kV}$ 、共模浪涌抗扰度 $\geq \pm 4\text{kV}$ 、产品工作范围为 $-40^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$,适用新疆极端温度环境;选用 16 位 A/D 转换器,采样频率为 1kHz,可显著提升模拟量采集精度及抗干扰能力。

2.3.2 变送器专项选型

技术团队采用电磁兼容性能优越的智能型变送器,该设备内部设置有金属屏蔽外壳,屏蔽效能可超 60dB,可有效降低外部电磁干扰影响;变送器工作电压为 18VDC \sim 36VDC,可适应大幅度电站直流电源波动;输出信号采用隔离设计,隔离电压超 2.5kV,可避免干扰信号由电源回路传导;由于工程所处区域为高海拔环境,因此技术团队升级变送器外绝缘,保障绝缘性能可靠。

2.3.3 电源系统净化与浪涌防护

技术团队将三级浪涌保护器设置在励磁柜与现地控制单元柜电源入口处,以此构建多层浪涌防护体系。第一级为通流容量 $\geq 40\text{kA}$ 、10/350 μs 的波形浪涌保护器,位于配电柜进线端,可抑制雷电及感应产生的强浪涌;第二级为通流容量 $\geq 20\text{kA}$ 、8/20 μs 的波形浪涌保护器,位于柜内电源分配单元前端,可抑制操作过电压;第三级为通流容量 $\geq 5\text{kA}$ 、2.5/50 μs 的波形浪涌保护器,位于敏感设备电源输入端,可抑制高频尖峰干扰^[4]。此外,技术团队还将容量 1kVA 的在线式 UPS 电源设置在现地控制单元柜中,保障电网电压存在波动时 PLC 系统运行稳定;UPS 输出端设置电源滤波器,以此消除电源谐波干扰。

2.4 软件抗干扰优化设计

在该项目中,技术团队利用软件算法优化的形式展开软件抗干扰优化设计,以此与硬件抗干扰设计实现互补。首先,针对 PLC 程序的模拟量信号,技术团队引入了“滑动平均滤波+中位值滤波”相结合的复合滤波算法。在 PLC 采集的连续模拟量数据中选取 10 个相邻

采样值,再计算其算术平均值,结果即为滑动平均滤波最终输出结果;对每次所采集的 5 个连续数据进行排序,中间值即为中位值滤波最终输出结果。结合信号类型,可动态调整滤波参数,快速变化信号的滤波窗口设置为 100ms、缓慢变化信号的滤波窗口设置为 500ms,在及时响应快速信号的基础上,保障数据值稳定^[5]。其次,在程序中引入模拟量数据有效性判断逻辑,提前预设参数正常运行范围及变化速率阈值,当采集数据超出正常范围或变化速率超出阈值时,系统可将其标记为可疑数据,并选用前三次有效数据的平均值代替,同时发出报警信号;如连续三次采集数据均为可疑数据,则启动冗余采集通道,保障数据采集连续。再次,选择 Modbus-RTU 协议作为监控系统与 PLC 之间的通信协议,同时利用校验和机制展开传输数据完整性校验;将通信波特率提升至 9600bps,在提高数据传输效率的基础上降低干扰影响;将重发机制融入通信程序中,如接收数据校验错误,可发送三次重发请求,以保障数据传输可靠。

3 结语

新疆地理环境及气候条件特殊,对水电站电气二次系统抗干扰能力要求更为严格。技术团队可从接地系统优化设计、电缆敷设电磁屏蔽优化设计、设备选型与适配性设计、软件抗干扰优化设计层面入手,构建完善的抗干扰防护体系。未来,应加强光纤传输技术、数字孪生技术推广,强化设备性能检验,将抗干扰设计融入到日常工作中,从而不断提高水电站电气二次系统抗干扰能力,为保障新疆地区能源供应稳定安全打下坚实基础。

参考文献

- [1]黄崇亨,黄明.基于 110kV 变电站电气二次系统设计与实现[J].电气技术与经济,2025(6):217-220.
- [2]吴永洁.220kV 智能变电站电气二次系统设计优化研究[J].自动化应用,2025,66(21):132-134.
- [3]曲月星.110kV 综合自动化变电站的电气二次设计[J].张江科技评论,2025(6):63-65.
- [4]雷伟华.人工智能在变电站电气二次设计中的应用[J].光源与照明,2025(5):191-193.
- [5]郭必输.电气二次设计在变电站综合改造中的应用研究[J].机电信息,2025(19):13-16.