

水电站机组保护与控制二次系统优化

王伟银

中国大唐集团四川公司四川川汇水电投资有限责任公司 四川 成都 610091

【摘要】：水电站机组保护与控制二次系统是保障水轮发电机组安全、稳定、高效运行的核心支撑系统，承担故障快速切除、运行工况调节、状态实时监测及控制信号传输等关键功能，直接决定电站整体运行安全水平与供电可靠性。当前国内大量中小型水电站及老旧电站，普遍存在二次设备老化严重、二次回路布线不规范、保护定值整定不合理、控制逻辑不完善、系统抗干扰能力薄弱等突出问题，极易造成机组非计划停运、保护误动或拒动等安全事故。本文结合水电站机组实际运行工况，系统梳理并分析机组保护与控制二次系统存在的典型问题，围绕保护装置升级改造、二次回路规范整改、控制逻辑优化完善、抗干扰与可靠性提升、智能运维体系构建等方面提出整体优化方案，并结合工程实例验证改造效果，可为同类水电站二次系统升级改造、提高机组运行稳定性提供工程参考与实践借鉴。

【关键词】：水电站；水轮发电机组；继电保护；控制二次系统；系统优化；运行可靠性

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.010

引言

水轮发电机组是水电站的核心发电设备，其运行可靠性直接关系电站发电效益、电网安全稳定运行及电力持续供应。机组保护与控制二次系统相当于机组的“神经中枢”，由继电保护装置、控制回路、测量仪表、信号线缆及通信接口等组成，能够在机组发生电气故障、机械异常时快速动作切除故障，同时实现机组转速调节、电压控制、同期并网、负荷调节等自动化控制，是防止设备损坏、避免事故扩大、保障机组连续可靠运行的关键防线。

随着电网结构不断强化、电力系统智能化水平持续提升，电网侧对水电站供电质量、响应速度及运行可靠性提出更高要求，传统老旧水电站二次系统的短板日益凸显。部分电站投运时间较长，保护装置仍以电磁式、晶体管式为主，存在动作精度差、功能单一、维护困难等问题；二次回路长期在潮湿、多尘、强电磁环境下运行，绝缘老化、接线松动、接地不规范等隐患普遍存在；控制逻辑设计简单，缺乏完善的闭锁机制与协同控制策略，难以实现一键启停、自动并网及远程集中监控；加之系统抗干扰措施不足、运维体系不健全，导致保护误动、拒动、人为误操作等事件时有发生，严重威胁机组与电网安全。在此背景下，对水电站机组保护与控制二次系统进行系统性优化升级，已成为老旧电站技术改造、提升自动化与智能化水平的重要内容。本文立足中小型水电站实际，从问题分析、优化原则、实施方案及工程应用等方面展开研究，形成一套可落地、经济适用的优化思路，为同类电站改造提供参考。

1 机组保护与控制二次系统现存主要问题

目前中小型及老旧水电站机组保护与控制二次系统普遍存在设备性能、回路结构、控制逻辑、抗干扰能力及运维管理等多方面问题，已成为制约机组安全稳定运行的主要因素。

在保护装置层面，大量运行时间较长的电站仍采用老式继

电保护装置，整体性能与功能配置难以满足现代电站安全运行要求。老式保护装置机械结构易磨损、元件老化快，动作精度低、定值误差大，对轻微故障和早期异常不敏感，容易出现拒动或误动；同时功能单一，仅具备基础的过流、过压、差动等保护，不具备故障录波、事件记录、远程通信及在线监测功能，不利于故障溯源与状态分析。部分电站虽已更新微机保护，但未结合机组参数与电网要求重新整定定值，保护逻辑与实际运行工况不匹配，保护配合不合理，未能真正发挥故障防护作用。

在二次回路方面，老旧电站普遍存在设计不规范、施工遗留问题多、长期运行损耗严重等情况。早期施工对线缆敷设缺乏统一规划，强弱电电缆混布、控制回路与信号回路交叉并行，电磁干扰问题突出，极易造成信号失真、保护异常动作。二次电缆长期处于潮湿多尘环境，绝缘层老化开裂，端子排氧化、接线松动现象普遍，存在接地、短路、信号中断等隐患。同时，接地系统不规范、接地电阻超标、未设置独立接地网，防雷与浪涌保护缺失或失效，CT、VT二次回路接线错误等问题，进一步加剧设备损坏与人身安全风险。关键控制与保护回路多采用单回路设计，无冗余通道，一旦发生断线或接触不良，将直接导致保护与控制功能失效。

在控制逻辑与自动化功能方面，传统二次系统控制策略简单，自动化与智能化程度偏低，难以适应少人值守、远程集中管控的运行模式。机组启停流程繁琐，依赖人工分步操作，缺少一键启停、自动准同期并网功能，操作效率低且人为误操作风险高。调速系统与励磁系统相互独立，缺乏协同控制逻辑，无法快速响应电网AGC、AVC调节指令，机组并网稳定性与供电质量难以保证。系统缺乏完善的电气闭锁与软件闭锁逻辑，带负荷误操作、非同期并网等风险依然存在。此外，二次系统与上位机监控平台通信不畅，数据无法实时上传、控制指令无法远程执行，远程监控与集中管控能力不足。

在抗干扰与运维管理方面，水电站现场电磁干扰复杂、雷

击浪涌频繁,而二次系统普遍缺少针对性抗干扰措施,导致保护装置采样失真、控制指令误发、通信丢包延时等问题频发。柜内温湿度、粉尘环境缺乏管控,加速电子元件老化,降低系统整体寿命。多数电站未建立标准化二次系统运维体系,缺乏定期巡检、定值校核、回路测试、绝缘检测等制度化工作流程,故障发生后依靠人工逐点排查,处置时间长、机组停运损失大。加之图纸资料不全、设备台账缺失、运维人员专业能力有限,进一步加剧系统运行风险,形成运维薄弱环节。

2 二次系统优化设计基本原则

为确保优化改造既符合安全规范又贴合电站实际,在方案设计与实施过程中严格遵循以下原则,实现安全性、经济性、实用性与先进性的统一。

坚持安全可靠优先原则。优化后的保护与控制系统必须动作准确、响应迅速,杜绝保护误动与拒动,关键回路与核心设备采用冗余配置,具备故障自诊断与自动切换能力,保证机组在异常工况下仍能安全可控。

坚持先进性与经济性兼顾原则。选用技术成熟、运行稳定的微机保护与智能控制设备,不盲目追求高端配置,在满足规程规范前提下控制改造成本,以最小投入实现系统性能显著提升,提高改造性价比。

坚持规范化与标准化原则。严格按照国家及行业相关设计规范、继电保护规程开展改造,统一回路设计、线缆选型、标识编号、接地与防雷标准,做到布线整齐、标识清晰、接线规范,便于后期运维与检修。

坚持兼容性与扩展性原则。优化方案充分考虑与现有机组设备、调速器、励磁系统、上位机监控系统的对接能力,支持 Modbus、IEC 60870-5-104 等主流规约,预留扩展接口,便于后续接入智能监测、状态评估等功能。

坚持易运维与可落地原则。简化操作界面与控制流程,强化故障报警与定位功能,降低运维难度;同步完善图纸资料、设备台账与运维规程,实现改造、运维、管理一体化,提高电站整体运维水平。

3 机组保护与控制二次系统优化实施方案

结合电站实际问题,本文从保护装置、二次回路、控制逻辑、抗干扰及可靠性提升等方面构建系统性优化方案,全面消除运行隐患,提升系统整体性能。

对机组保护装置进行整体升级与功能优化。全面淘汰老式电磁式、晶体管保护装置,更换为一体化微机综合保护装置,集成差动保护、定子接地保护、过流过压保护、失磁保护、过速保护及温度保护等完整功能,具备高精度采样、快速动作、故障录波、事件记录及远程通信能力。结合机组额定参数、电网运行要求及现场工况,利用专业计算工具重新整定并校核保护定值,优化差动制动系数、接地保护阈值、过流时限等关键

参数,消除保护死区并提高保护配合合理性。对主保护采用双装置冗余配置,主备保护实时同步,故障时自动无扰切换,配合后备保护构成完整防护体系,从根本上杜绝保护拒动风险。

对二次回路开展全面整改与规范化治理。整体更换老化绝缘不达标的电缆,采用屏蔽电缆并严格执行强弱电分离敷设,减少电磁耦合干扰。按照功能分区梳理控制回路、信号回路、电源回路,拆除废弃线缆,统一编号标识,做到回路清晰、查阅便捷、维护方便。重建二次系统独立接地网,将接地电阻控制在规范要求范围内,实现保护装置、屏蔽层、柜体单点可靠接地,避免电位差干扰与环流问题。在电源入口与信号回路加装浪涌抑制与防雷模块,规范 CT、VT 二次回路接线,杜绝开路、短路等安全隐患。对关键控制与保护回路采用双回路冗余设计,提高系统故障容忍度,同时加强端子紧固、绝缘检测与防潮防尘处理,提升回路长期运行稳定性。

优化机组控制逻辑并完善自动化控制功能。重构机组控制流程,实现一键自动启停与自动准同期并网,优化调压、调速及同期捕捉逻辑,缩短并网时间、提高并网平稳性,同时设置严格并网闭锁条件,防止非同期合闸。构建调速与励磁协同控制逻辑,实现负荷、电压、频率的联动调节,提升机组一次调频与响应电网调度指令的能力,改善供电质量。建立完善的“电气闭锁+软件逻辑闭锁”双重防误体系,对断路器、隔离开关、机组启停等关键操作设置强制联锁条件,从逻辑上杜绝各类误操作风险。打通与上位机监控系统的通信接口,实现运行参数远程监视、控制指令远程下发、故障信号远程告警,支持现地/远程控制模式切换,为电站实现少人值守奠定基础。

全面提升系统抗干扰能力与运行可靠性。对控制保护柜体采取屏蔽接地处理,在电源与信号回路加装滤波器与隔离器,减少电磁干扰传导。优化柜内环境,配置温湿度控制、散热及除湿装置,保持内部环境稳定,延缓元件老化。采用双路冗余电源供电,一路取自厂用电、一路由 UPS 不间断电源供电,实现快速自动切换,保证断电工况下核心设备不间断运行。同时强化系统自诊断功能,对装置异常、通信中断、回路故障等实时监测并主动告警,提高故障定位效率。

4 工程应用与效果分析

某中小型水电站装机容量 $2 \times 10\text{MW}$,已连续运行 18 年,机组保护与控制二次系统为早期常规配置,存在装置老化、回路破损、逻辑简单、抗干扰差等问题,年均发生保护误动及机组停运多次,严重影响运行效益与安全。本次按照上述优化方案实施全面改造,包括更换微机综合保护装置、重新敷设并规范二次回路、优化控制与保护逻辑、完善接地防雷及抗干扰措施。

系统投运后运行效果显著提升。机组保护动作准确可靠,未再发生误动、拒动现象,故障响应快速灵敏,二次回路绝缘

与接地系统运行稳定,机组年均故障停运次数显著下降,可用系数明显提升。机组实现一键启停、自动准同期并网,远程监控与集中控制功能投入正常,中控室可完成全流程操作,人工操作强度大幅降低,基本达到少人值守运行要求。系统抗干扰能力显著增强,在复杂电磁与潮湿环境下数据采集准确、通信稳定,未出现信号异常与指令误执行问题。同时故障定位与处置效率大幅提高,日常维护工作量减少,备品备件通用性增强,年均运维成本明显下降,机组发电效益与运行安全性得到双重提升。

5 结论

水电站机组保护与控制二次系统优化是提升机组安全性、稳定性与自动化水平的关键工程措施。针对老旧电站普遍存在的设备性能不足、回路隐患多、控制逻辑不完善、抗干扰能力

弱及运维体系不健全等问题,通过保护装置升级、二次回路规范化整改、控制逻辑优化、冗余与抗干扰设计强化以及运维管理完善,可系统性消除运行隐患,构建安全可靠、响应快速、自动化程度高的现代二次系统。工程实践表明,优化改造后机组保护可靠性、控制精准度与运行稳定性显著提升,误操作与故障停运风险大幅降低,运维成本有效下降,能够很好满足现代水电站安全经济运行需求。

未来,随着数字孪生、人工智能、物联网等技术在水电领域的深度应用,机组保护与控制二次系统将进一步向智能化、云端化、可视化方向发展。可在现有优化基础上融入状态在线评估、故障智能预警、趋势预测、远程云端运维等高级功能,实现机组全生命周期健康管理与主动防御控制,持续提升水电站智慧化运行水平,为电网安全稳定运行提供更可靠支撑,推动水电行业向绿色、高效、智能方向高质量发展。

参考文献:

- [1] 国家能源局.水力发电厂机电设计规范 SL 582-2012[S].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局.继电保护和安全自动装置技术规程 GB/T 14285-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [3] 张卫东.老旧水电站机组继电保护系统改造优化实践[J].水电自动化与大坝监测,2021,45(2):67-70.
- [4] 李刚.水电站机组控制二次回路故障分析与优化措施[J].水电站机电技术,2022,45(8):89-92.
- [5] 王健.中小型水电站机组保护与监控系统一体化优化设计[J].水利科技与经济,2023,29(4):78-81.
- [6] 陈强.水电站二次系统抗干扰技术与接地优化研究[J].电工技术,2022(15):132-134.