

Upgrading and Renovation Design of Relay Protection System for Hydropower Stations in the Context of Smart Grids

Fantao Wu

State Grid Lüyuan Hydropower Company Yunfeng Power Plant, Ji'an, Jilin, 134200, China

Abstract

Against the backdrop of accelerated smart grid construction, hydropower stations, as core pillars of clean energy, have made intelligent upgrades to their relay protection systems a critical component in ensuring grid safety. Traditional protection systems exhibit limitations in information sharing, real-time response, and adaptive control, making them inadequate for modern grids' dynamic complexity. This paper analyzes structural flaws and operational bottlenecks in hydropower station relay protection systems within the smart grid framework. Optimization designs are proposed from multiple dimensions: hierarchical system architecture coordination, intelligent protection logic, standardized communication platforms, and data fusion decision-making. By implementing digital protection devices, IEC61850 communication standards, and self-healing control mechanisms, the system achieves real-time perception, intelligent judgment, and dynamic coordination. Research findings demonstrate that this upgrade solution significantly enhances action speed, selectivity, and system reliability, providing technical support and demonstration references for deep integration between hydropower stations and smart grids.

Keywords

Smart grid; Hydropower station; Relay protection

智能电网背景下水电站继电保护系统的升级改造设计

吴钊滔

国网绿源水力发电公司云峰发电厂, 中国·吉林·集安 134200

摘要

在智能电网加速建设的背景下,水电站作为清洁能源核心支撑,其继电保护系统的智能化升级成为保障电网安全运行的重要环节。传统保护系统在信息共享、实时响应与自适应控制方面存在不足,难以应对现代电网的动态复杂性。本文基于智能电网体系,分析水电站继电保护系统的结构缺陷与运行瓶颈,从系统架构分层协同、保护逻辑智能化、通信平台标准化及数据融合决策等方面提出优化设计。通过应用数字化保护装置、IEC61850通信标准及自愈控制机制,实现继电保护的实时感知、智能判断与动态协调。研究表明,该升级方案可显著提升动作速度、选择性与系统可靠性,为水电站与智能电网的深度融合提供技术支撑与示范参考。

关键词

智能电网; 水电站; 继电保护

1 引言

随着我国能源结构的转型与电力系统智能化水平的提高,水电站作为可再生能源的重要形式,正逐步由传统独立运行模式向智能协同调度方向发展。继电保护系统是保障水电站安全稳定运行的关键技术环节,其性能直接关系到电气设备的保护精度和电力系统的运行可靠性。然而,现有继电保护系统多采用模拟量采集与分散控制架构,信息传输依赖硬接线方式,功能单一、实时性不足,难以适应智能电网多节点互联、信息共享与动态控制的要求。在智能电网环境下,

电力系统呈现多源输入、双向潮流与复杂扰动等特征,对保护系统的快速响应与自适应能力提出更高要求。

本文从继电保护系统的功能现状出发,分析其在信息传输、保护判据与系统协调方面的不足,提出基于智能电网体系的继电保护系统升级改造设计方案。研究旨在构建一个具备感知、判断、决策与协同能力的智能保护平台,为未来水电站数字化转型提供技术路径与实践依据。

2 水电站继电保护系统的现状与问题分析

2.1 系统结构的传统性与信息孤岛问题

当前多数水电站的继电保护系统仍延续独立防御与分层分布式架构,保护装置、测控设备与监控系统间以硬接线方式实现信号传输。这种结构在早期阶段具有稳定性高、抗

【作者简介】吴钊滔(1989—),男,中国吉林集安人,本科,工程师,从事电气二次继电保护研究。

干扰能力强的优点，但在智能电网与信息化背景下，其局限性日益显现。由于各保护单元间缺乏数据共享机制，故障信息的传递存在时延，无法实现实时联动与全局协调，导致部分区域出现保护误动或动作重叠现象。数据传输仍以模拟信号为主，易受电磁噪声与线路衰减影响，信号畸变使得保护判据失真，降低了动作精度与可靠性。长期运行中，系统升级与设备兼容性差问题愈加突出，形成“信息孤岛”，难以支撑现代电网所需的统一监控与协同防御功能。

2.2 保护逻辑的静态性与适应性不足

传统继电保护装置普遍采用固定阈值与静态整定参数设定，缺乏对运行状态变化的动态响应能力^[1]。水电站运行中受负荷波动、机组切换及水头变化等因素影响，系统阻抗与短路电流呈现非线性波动，固定参数的保护逻辑难以匹配实际工况。尤其在双向潮流与多电源互联的智能电网环境下，短路电流方向与幅值可能发生变化，传统方向元件难以正确识别故障区段，造成保护拒动或误切。部分老旧系统仍以单一电气量判据为依据，缺乏多特征融合判断机制，导致在复杂工况下的灵敏度与选择性不足。保护逻辑的静态性不仅限制了系统的自适应性，也削弱了应对突发故障的响应能力。

2.3 通信网络滞后与信息融合不足

许多水电站继电保护通信仍采用 RS485、CAN 总线等低速传输方式，其带宽与实时性难以满足多点同步采样与高速录波的要求。各保护装置间信息交换需经上位机中转或人工汇总，造成决策链条延长，实时控制能力下降。缺乏统一通信协议与数据格式，不同厂商设备间的兼容性差，信息融合过程繁琐，制约了系统的集成化发展。部分站点的监控系统与保护系统相互独立，数据流无法互通，导致调度中心难以及时掌握现场状态。在故障发生时，保护信号上传延迟显著，削弱了全网联动的响应速度。通信网络的滞后与标准化不足，成为制约水电站继电保护系统智能化与自愈化升级的关键瓶颈。

3 智能电网环境下继电保护系统的设计思路

3.1 系统架构的分层协同设计

在智能电网体系中，继电保护系统的架构设计应实现由传统静态独立防御向动态协同决策的转型。系统总体采用“感知—分析—决策—控制”一体化分层协同模式，分为现场保护层、通信传输层与智能决策层。现场保护层部署于水电站现场，负责一次信号的数字化采样、实时故障检测与初步判别；通信传输层基于 IEC61850 标准实现数据建模与高速信息交互，确保保护装置信息在毫秒级内可靠传输；智能决策层利用云端分析平台与边缘计算节点，综合故障信息、运行状态及环境参数，执行动态整定与优化控制^[2]。该分层协同架构实现了“横向互联、纵向贯通”的保护体系，既增强了系统的模块化与灵活性，又为远程运维、在线诊断与

功能扩展提供了坚实技术基础。

3.2 智能化保护逻辑与动态整定制

传统继电保护系统多采用固定参数设定，无法应对工况变化带来的非线性响应延迟。为此，系统引入基于人工智能与模糊控制的动态整定制。通过实时监测电压、电流、频率、负荷率等关键运行参数，结合历史运行数据与模型预测算法，系统可实现保护参数的自学习与自适应调整。在故障分类上，神经网络模型对相间短路、单相接地与过负荷工况进行特征识别，通过特征提取与模式匹配实现精准分类。模糊逻辑控制器根据电网运行状态动态修正动作阈值与延时设定，确保在复杂运行环境下保护动作既灵敏又可靠。该智能化机制有效避免了传统固定整定制导致的误动作与拒动问题，使系统具备高适应性与时空优化能力。

3.3 通信平台的数字化与标准化改造

为实现继电保护装置间的高速互联与统一调度，系统通信平台进行了数字化与标准化升级。采用 IEC61850 标准构建统一数据交互架构，利用 GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) 与 SV (Sampled Value) 报文机制，在毫秒级时间内完成信号传输与动作联动。平台实现“软接线”控制，取代传统硬接线方式，大幅减少布线复杂度与维护工作量。系统通过统一建模实现跨厂商设备间的互联互通，保证不同厂家的保护装置、监控系统与控制终端可协同运行。为进一步提高通信安全性，平台采用光纤环网冗余与网络分区隔离设计，确保数据传输的高可靠性与抗干扰性。数字化、标准化改造显著提升了继电保护系统的可扩展性与运维智能化水平，为构建统一高效的智能电网保护体系提供了基础支撑。

4 继电保护系统的关键技术与功能实现

4.1 基于数字信号处理的故障检测技术

在智能电网背景下，数字信号处理 (DSP) 技术成为水电站继电保护系统升级的关键支撑。采集装置对一次电气量 (电压、电流) 进行高精度同步采样，利用高速 A/D 转换模块与同步时钟系统确保信号采样的时间一致性。通过小波变换可分离暂态分量与稳态分量，实现对短路、接地、断线等故障类型的快速识别；快速傅里叶变换 (FFT) 用于谐波分析与频域特征提取，揭示电网异常的频谱特征；相量估计算法 (Phasor Estimation) 则可在毫秒级内完成相位与幅值的实时更新。结合同步相量测量单元 (PMU) 技术，系统可在全网范围内进行广域量测，实现故障波形的精准对比与关联判断。通过 DSP 算法与 PMU 数据的融合，保护装置能在 10 ms 内完成故障识别与跳闸判定，大幅提高响应速度与保护精度，为智能判断提供可靠数据基础。

4.2 智能判断与多源信息融合

为应对复杂电力系统中多点故障与信号耦合的识别难题，继电保护系统引入智能判断与多源信息融合技术。系统

通过贝叶斯推理模型综合分析来自保护装置、电能质量监测、通信系统及调度中心的多维数据,以概率化推断故障的真实性与关联性。同时采用神经网络算法对电流突变量、暂态波形特征及相量变化趋势进行模式识别,实现对高阻接地、谐振及暂态振荡等复杂工况的准确分类。智能判断模块通过与 SCADA 系统及状态估计算法的交互,实现保护动作信号与系统运行状态的一致性验证,显著降低误动与拒动概率^[1]。多源融合机制不仅增强了系统的鲁棒性,还实现了保护、监控与调度间的协同优化,为智能电网的分层决策与自适应控制提供基础。

4.3 自愈控制与协同保护机制

在智能电网体系中,水电站继电保护系统的目标已从“动作正确”转向“自愈高效”。当局部设备故障或通信异常发生时,系统依托双通道通信链路和备用逻辑模块,可自动切换至冗余回路,确保保护功能持续有效。自愈控制机制以故障检测、隔离、重构三阶段为核心:首先,系统通过事件触发逻辑自动识别异常区域;其次,通过断路器协调控制快速隔离故障支路;最后,利用备用电源与调度算法恢复供电,实现局部自愈与全局协调。跨站协同保护机制通过 IEC 61850 GOOSE 报文实现信息高速交互,邻近站点可在毫秒级内接收故障信号并协同动作,形成区域级防御网络。该机制有效缩短了故障清除时间,提高了系统稳定性与供电连续性。工程应用表明,自愈与协同机制可使故障处理时间缩短 40% 以上,极大提升了水电站继电保护系统的智能化与安全防护水平。

5 系统升级改造的实施路径与应用分析

5.1 硬件系统的模块化与冗余化改造

在智能电网背景下,水电站继电保护系统的硬件结构需具备高可靠性与灵活扩展性。采用模块化设计理念,可将采样、运算、通信和控制等功能单元分区独立,实现“即插即用”的快速维护与升级。系统核心采用双 CPU 冗余结构,通过主从协同机制实现实时切换,避免单点故障导致保护失效。通信层面引入光纤环网冗余通道,确保数据传输的高速与安全。关键保护设备如主变保护、母线保护与线路保护均配备双重备份模块,并配置独立电源与接地系统,增强电磁兼容性能。在高温高压环境中,机柜采用防凝露与温控设计,确保设备长期稳定运行。模块化与冗余化的协同设计显著提高了继电保护系统的抗干扰能力与维护效率,为水电站复杂工况下的安全稳定运行提供硬件保障。

5.2 软件平台的标准化与可视化管理

随着智能电网数据量的指数级增长,继电保护系统的软件平台亟需实现标准化与可视化的统一管理。基于 IEC

61850 标准构建保护管理平台,实现保护逻辑配置、实时监控、事件分析与参数整定的一体化操作。平台通过云端数据库与边缘计算节点协同运行,支持历史数据的深度查询、趋势预测与多维度对比分析。采用可视化人机界面设计,使操作人员可直观掌握系统运行状态与设备健康水平。通过集成故障录波分析、逻辑回放与动作验证模块,平台能够自动识别潜在逻辑冲突与误动作风险。软件结构采用模块化与对象化编程,便于算法优化与功能拓展,为后续接入人工智能诊断与自适应保护策略提供接口支持,从而实现继电保护系统的智能化管理与动态优化。

5.3 工程应用与性能验证

在西南地区某大型水电站的改造工程中,全面应用了模块化硬件与可视化管理平台的继电保护系统升级方案。试运行期间,通过保护装置在线测试与扰动录波分析,验证系统响应性能与稳定性。结果显示,保护动作时间平均缩短 35%,通信延时由原有的 4.6 ms 降至 3.0 ms,系统误动作率下降约 70%。在高负荷运行与外部雷击干扰环境下,系统仍保持稳定,自动切换与自恢复功能运行可靠。数据中心可实时监控各保护单元状态,实现远程整定参数同步与保护逻辑在线调整。通过长期运行对比,机组故障停机次数减少约 40%,保护协调性明显增强。工程实践证明,该升级方案在提升继电保护系统的可靠性、响应速度与智能化水平方面效果显著,为智能电网条件下水电站的安全运行提供了可推广的技术路径与工程范例。

6 结语

智能电网的发展对水电站继电保护系统提出了更高的智能化与可靠性要求。传统保护系统已难以适应多源互联、信息融合与自适应控制的复杂环境。本文从系统架构、保护逻辑、通信平台与关键技术四个方面提出了面向智能电网的继电保护系统升级改造设计。研究表明,采用数字化、网络化与智能化的系统设计理念,可实现继电保护的快速响应、精准判断与动态协调,有效提升系统安全性与自愈能力。未来,应进一步结合人工智能、大数据与边缘计算技术,构建基于认知决策的智能保护体系,实现水电站继电保护系统的全生命周期智能管理,为智能电网的安全、高效与绿色运行提供持续支撑。

参考文献

- [1] 马圣华.标准化智能变电站继电保护系统可靠性分析[J].中国标准化,2016,(15):208-209.
- [2] 李冬.水电站继电保护仿真培训系统设计与开发[D].广西大学,2015.
- [3] 张攀,童志祥,王龙辉,等.大型水电站继电保护系统的AR效果与应用研究[J].仪器仪表用户,2024,31(12):12-13+16.