

# 数字化背景下水电厂继电保护应用探讨

刘毅

贵州乌江水电开发有限责任公司索风营发电厂

DOI:10.32629/pe.v4i4.21755

**[摘要]** 数字化技术正深刻重塑水电厂继电保护体系,本文系统探讨数字化背景下水电厂继电保护的应用架构与关键技术。在概述数字化水电厂特征及保护定位的基础上,分析了电子式互感器、网络化接入、站域同步等支撑技术,提出了发电机、主变、线路及母线的数字化保护配置方案,并讨论了定值整定、故障诊断及检修模式的运行管理变革。针对采样同步可靠性、网络安全风险等现实问题,展望了智能化保护的发展方向。研究表明,数字化改造显著提升了保护动作的快速性与准确性,但需在工程应用中统筹解决同步、安全与运维适应性难题。

**[关键词]** 水电厂; 数字化; 继电保护; 电子式互感器; 站域同步; 网络化; 智能化

中图分类号: TV7 文献标识码: A

## An Exploration of Relay Protection Applications in Hydropower Plants in the Context of Digital Transformation

Yi Liu

Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd.

**[Abstract]** Digital technologies are profoundly transforming the relay protection systems of hydroelectric power plants; this paper systematically explores the application architecture and key technologies for relay protection in hydroelectric power plants within the context of digitalization. Building upon an overview of the characteristics of digitally transformed hydroelectric power plants and the role of protection systems, the paper analyzes supporting technologies—including electronic current transformers, networked access, and station-level synchronization—and proposes digital protection configuration schemes for generators, main transformers, transmission lines, and busbars. It also discusses the operational management reforms pertaining to setting parameter configuration, fault diagnosis, and maintenance modes. Addressing practical challenges such as sampling synchronization reliability and cybersecurity risks, the paper outlines the future development direction for intelligent protection systems. The study demonstrates that digital transformation significantly enhances the speed and accuracy of protection operations; however, it is essential to holistically address the challenges related to synchronization, security, and operational and maintenance adaptability during engineering implementation.

**[Key words]** Hydropower plants; Digitalization; Relay protection; Electronic current transformers; Station-level synchronization; Networking; Intelligence

### 引言

水电厂作为电力系统调峰调频的重要电源,其继电保护系统的可靠性直接关系到电网安全稳定运行。随着智能化变电站技术和IEC61850标准的广泛推广,水电厂继电保护正经历从传统电缆硬接线向全站信息数字化的深刻转变。数字化环境不仅改变了保护量的采集与传输方式,更重构了保护功能的实现逻辑与运维管理模式。然而,水电厂具有机组启停频繁、暂态过程复杂、地下厂房环境特殊等特点,使其数字化保护应用面临区别于常规变电站的独特挑战<sup>[1]</sup>。因此,有必要立足水电厂实际,系

统审视数字化背景下继电保护的技术路线、应用方案及运行管理策略,为工程实践提供参考。

### 1 数字化水电厂继电保护概况

#### 1.1 数字化水电厂的基本特征

数字化水电厂以一次设备智能化、二次系统网络化、信息平台统一化为核心标志,实现了全站运行数据的标准化采集与共享。在过程层,电子式互感器和智能终端取代了传统电磁式互感器和硬压板,采样值和开关量通过光纤网络传输;在间隔层,保护、测控、计量等功能采用基于IEC61850的通用对象模型,

数据语义一致性强;在站控层,统一的时间同步源和通信协议支撑起全景数据平台,为高级应用提供了信息基础<sup>[2]</sup>。这种架构使水电厂的运行状态感知从离散点式跃升为连续广域式,为继电保护的性能提升创造了条件。

### 1.2 继电保护在数字化环境中的定位

在数字化水电厂中,继电保护不再是一个孤立的、封闭的动作单元,而是嵌入整个信息采集与控制闭环中的关键环节。保护装置通过过程层网络获取经合并单元同步后的数字采样值,其动作决策可同时共享给站域保护、故障录波和在线监测系统,保护信息从“私有”走向“共享”。与此同时,保护功能的实现不再严格依赖于特定硬件通道,保护逻辑可由软件定义并动态重构,这使保护系统能够根据水电厂不同运行方式(如抽水蓄能工况转换)自适应调整。保护的角色正从单纯的故障隔离执行者,向电网安全防御体系中的信息节点和智能决策参与者转变。

## 2 数字化继电保护的关键支撑技术

### 2.1 电子式互感器与采样数字化

电子式互感器(含光学互感器和罗氏线圈互感器)采用无铁芯设计,从根本上消除了磁饱和与铁磁谐振问题,其输出的低电平模拟或数字信号经合并单元处理后,转换为符合IEC61850-9-2标准的采样值报文,供多台保护及测控装置共享。对于水电厂发电机出口和主变高压侧,电子式互感器能准确再现非周期分量和高次谐波,为差动保护提供高保真的暂态电流数据。但水电厂湿度大、振动明显的环境对互感器的长期稳定性提出了更高要求,需结合在线校验手段确保采样链路全程可信,并合理设置采样频率以平衡数据量与传输带宽<sup>[3]</sup>。

### 2.2 保护装置的网络化接入方式

数字化背景下,保护装置通过过程层光纤网络接入GOOSE和SV报文,取消了传统的大量二次电缆。采用点对点直采与网络组网相结合的方式,重要主保护(如发电机差动)采用直采直跳以保证速动性,后备保护及辅助功能则通过过程总线共享信息,实现硬件资源的最优配置。网络化接入使得保护装置可灵活获取非本间隔的关联数据,例如厂用电保护可依据系统侧电压信息自动调整低电压闭锁门槛。然而,网络延迟和流量拥塞成为新的制约因素,必须在交换机配置、VLAN划分及优先级标记方面精心设计,确保关键报文传输延时小于3毫秒。

## 3 数字化水电厂继电保护应用方案

### 3.1 发电机保护数字化配置

发电机保护采用“双重化配置、独立采样”原则,每套保护分别取自不同的合并单元和独立的时间同步源,以避免单一设备失效引发误动。差动保护利用机端和中性点侧电子式互感器的同步采样,实现故障分量高灵敏度判别,匝间短路保护则引入纵向零序电压与负序功率方向协同判据,数字化平台使得多电气量融合计算更加便捷<sup>[4]</sup>。针对抽水蓄能机组频繁转换工况的特点,保护定值区和逻辑可通过GOOSE接收机组状态信号自动切换,确保发电和抽水两种模式下保护特性均满足灵敏度要求,同

时配置注入式定子接地保护,利用数字化频率跟踪技术提高低频注入信号的处理精度。

### 3.2 主变与厂用电保护数字化配置

主变保护配置差动、瓦斯、过激磁及阻抗保护,高压侧与低压侧电子式互感器的采样值经合并单元同步后,由保护装置进行幅值和相位校正,数字化的校正算法可灵活适应变压器不同接线组别,避免了传统硬接线中转角误差累积。厂用电保护则面向多级辐射式网络,数字化方案中采用网络化备自投与过流保护配合策略,通过过程总线获取相邻馈线故障信息,实现故障区段快速定位和选择性隔离,大幅减少全厂停电风险。此外,主变本体非电量保护仍保留独立硬回路以保障极端情况下的可靠性,但非电量动作信号通过智能终端转化为GOOSE报文上送站控层,便于事件综合分析。

### 3.3 线路及母线保护数字化配置

线路保护以光纤纵联差动为主保护,采用双方采样值同步交换机制,通过专用光纤通道或复用SDH网络传输同步数据,水电厂出线通常较长且经过山区,数字化通道在线监测功能可实时评估通道误码率和延时,提前预警通信异常。母线保护利用过程层网络获取所有连接单元的SV采样值,在母线区内故障时快速出口,其动作时间相比传统集中式母线保护可缩短5毫秒以上,因无需经过中间转换环节<sup>[5]</sup>。为提高可靠性,母线保护同样按双重化配置,两套保护独立组网,分别采用不同的光纤路径传输采样和跳闸信号,并配置母线差动闭锁逻辑,当电压互感器断线或频率异常时自动闭锁差动保护以防误动。

## 4 数字化背景下继电保护运行管理

### 4.1 定值整定与在线校核

数字化环境下,保护定值不仅包括传统动作门槛和时限,还需定义SV报文有效值计算系数、GOOSE通信超时时间等数字化参数,整定计算需综合考虑电子式互感器变比和合并单元延时补偿。在线校核依托站控层信息平台,实时获取系统运行方式和故障电流水平,将实际运行工况与定值配合条件进行比对,当发现灵敏系数或选择性不满足要求时自动预警并给出调整建议。对于水电厂季相变化大、系统阻抗波动明显的特征,定值在线校核可显著减少人工定期核算的工作量,并为动态定值区切换提供可信依据,使保护定值始终贴近实际运行状态。

### 4.2 保护动作信息分析与故障诊断

数字化保护装置能够记录动作前后数个周波的波形数据及内部逻辑变量序列,这些信息经故障录波和专家系统整合后,可自动形成故障分析报告,清晰地展示从采样异常、逻辑判别到出口跳闸的完整因果链。借助站域共享信息,还可以关联故障时刻其他间隔的电压电流突变和开关变位记录,实现跨间隔的综合故障诊断,精准判别是区内故障、区外穿越性故障还是设备异常导致的误动<sup>[6]</sup>。基于机器学习算法的故障模式识别模块,可对高频扰动信号进行聚类分析,提前识别出互感器漂移、通信抖动等隐性缺陷,为运维人员提供针对性处置依据。

### 4.3 检修维护模式调整

传统定期检修模式在数字化系统中逐渐被状态检修取代,保护装置内嵌的自检模块持续监视电源、CPU负载、通信端口误码率和采样通道线性度,当自检参数超出阈值时触发检修提醒并记录故障前兆信息。智能终端和合并单元的在线健康评估,结合同型号设备的历史故障统计,可动态调整检修周期,避免过度检修或漏检,尤其对于水电厂汛期高负荷运行期间,状态检修能有效减少计划性停运对发电量的影响。同时,检修安全措施也发生改变,退出单一保护装置时需通过GOOSE软压板配合硬压板共同实现隔离,并利用仿真测试仪注入虚拟采样值验证检修后保护逻辑的正确性。

## 5 存在问题与发展方向

### 5.1 采样同步与可靠性问题

采样同步精度直接决定差动保护的可靠性,但合并单元晶振老化、光纤传输时延漂移以及交换机存储转发的不确定性,均可能导致采样值相位偏差累积,在区外故障大电流穿越时可能产生虚假差流。目前多采用插值重采样和时钟源冗余切换来缓解,但同步丢失瞬间的保护闭锁策略仍需优化,过长的闭锁时间会降低保护可用率。未来的发展方向是引入基于IEEE1588的透明时钟机制和延时自动补偿算法,同时在合并单元层面增加同步质量自评估能力,当误差超限时快速向保护装置发送无效标志,避免错误采样参与动作判别。

### 5.2 网络安全对保护功能的影响

数字化保护系统高度依赖网络通信,GOOSE和SV报文面临伪造、重放、拒绝服务等网络攻击风险,一旦保护装置接收到恶意构造的跳闸报文或虚假采样值,可能导致大面积停电事故。现有安全防护主要依赖物理隔离和VLAN划分,但缺乏针对继保通信协议的深度包检测和入侵响应机制。今后需在保护装置中嵌入轻量级加密认证模块,对关键GOOSE跳闸指令实施数字签名,并设置异常报文快速丢弃与报警的网络安全代理,同时开展保护系统网络安全等级保护测评,将网络安全演练纳入水电厂日常运维体系<sup>[7]</sup>。

### 5.3 智能化继电保护发展趋势

人工智能技术正在融入继电保护领域,基于深度残差网络的故障类型识别和故障测距算法,能够利用数字化提供的高频暂态波形直接判别故障性质,减少传统逻辑判据对定值配合的依赖。边缘计算架构使保护装置具备分布式学习和协同决策能

力,不同间隔保护之间可快速协商最优隔离策略,适应水电厂灵活多变的运行工况。未来趋势还包括保护系统与数字孪生模型的深度融合,在虚拟空间中实时模拟保护动作响应,提前发现逻辑缺陷和配合失效问题,实现从“被动动作”向“主动防御”的跨越式升级。

## 6 结语

数字化技术为水电厂继电保护带来了采样精度、信息共享和功能重构的显著优势,但也引入了同步稳定性、网络安全和运维认知的新挑战。本文从概况、支撑技术、应用方案、运行管理和问题展望五个维度,较为完整地梳理了数字化背景下水电厂继电保护的技术脉络<sup>[8]</sup>。实践表明,数字化改造需紧密结合水电厂的特殊工况,在保障主保护速动性和可靠性的前提下,稳妥推进网络化和智能化升级。未来,随着新一代通信技术和人工智能算法的深度赋能,水电厂继电保护将朝向更智能、更协同、更安全的方向持续演进,为新型电力系统的韧性运行提供坚实支撑。

## [参考文献]

- [1]朱梓豪,周毅,罗宁生,等.水电厂电制动停机对发变组继电保护功能的影响[J].水电与新能源,2025,39(5):74-76+90.
- [2]陈美伶.水电厂继电保护和励磁新技术的应用[J].电力设备管理,2025,(6):188-190.
- [3]胡喆.水电厂继电保护隐性故障诊断方法研究[J].通讯世界,2024,31(8):106-108.
- [4]王治全.继电保护中的隐秘故障诊断分析[J].集成电路应用,2023,40(7):162-163.
- [5]陈俊.水电厂继电保护和励磁新技术的应用探索[J].水电与抽水蓄能,2022,8(1):2-3.
- [6]王文学.水电厂继电保护装置的影响因素及改进研究[J].智能城市,2021,7(2):25-26.
- [7]蔡巧连.水电厂继电保护技改工作的开展及注意事项[J].低碳世界,2020,10(10):114-116.
- [8]黄旭.水电厂发电机变压器保护原理及继电保护措施[J].通讯世界,2018,(10):210-211.

## 作者简介:

刘毅(1990—),男,汉族,贵阳人,大学本科,职称:工程师,研究方向:水电厂二次继电保护。