

继电保护检修及数字化继电保护

梁海潇

国网山西省电力公司超高压变电分公司

DOI:10.32629/etd.v6i12.19243

[摘要] 继电保护检修要兼顾安全与经济,正从传统向智能转型。本文先构建以预防性检修为主的技术体系,含预知性、状态及故障后检修,借分层处理等提升质量;接着解析数字化继电保护架构,基于多项技术实现二次回路优化等,支撑高级应用;最后探讨智能检修技术(物联网等)在优化检修周期等方面的应用,还分析高比例新能源接入对保护系统的挑战及数字化应对办法,为电网智能运维提供参考。

[关键词] 继电保护检修; 数字化继电保护; 发展趋势

中图分类号: TM63 **文献标识码:** A

Relay Protection Maintenance and Digital Relay Protection

Haixiao Liang

Ultra-High Voltage Substation Branch of State Grid Shanxi Electric Power Company

[Abstract] Relay protection maintenance needs to balance safety and economy, and is transitioning from traditional to intelligent approaches. This paper first constructs a technical system primarily based on preventive maintenance, including predictive maintenance, condition-based maintenance, and post-fault maintenance, improving quality through layered processing and other methods. Then it analyzes the architecture of digital relay protection, achieving secondary circuit optimization and supporting advanced applications based on multiple technologies. Finally, it discusses the application of intelligent maintenance technologies (such as the Internet of Things) in optimizing maintenance cycles and other aspects, and analyzes the challenges of high-proportion renewable energy integration on protection systems along with digital countermeasures, providing references for intelligent operation and maintenance of power grids.

[Key words] relay protection maintenance; digital relay protection; development trends

引言

继电保护检修技术与数字化升级对保障电力系统可靠性至关重要。传统检修模式靠周期性巡检和故障后处理,有效率低、成本高、响应慢等不足。数字化继电保护利用电子式互感器等技术,实现数据全面数字化,支撑智能检修。新能源占比提高、电网结构变复杂,带来功率波动等新挑战。本文将从检修技术体系、数字化架构、智能应用、新能源挑战四个维度,探讨二者协同发展路径。

1 继电保护检修技术体系

1.1 检修技术分类与实施原则

继电保护检修技术体系以预防性检修为主导,涵盖预知性检修与状态检修两种主要模式。预知性检修通过制定周期性检修计划,对继电保护设备进行系统性维护。针对线路保护装置,每三年开展一次全面检查,重点检测采样模块的精度是否符合标准(误差 $\leq \pm 0.2\%$),逻辑回路的可靠性是否达标(动作正确率 $\geq 99.9\%$)^[1]。状态检修则基于在线监测系统,实时采集设备运行

参数。当监测到CPU温度超过70℃或电源模块电压波动超过5%时,系统自动触发预警机制,提示检修人员介入处理。某省级电网公司实践数据显示,采用状态检修模式后,设备突发故障率降低42%,检修成本减少28%,检修效率显著提升。故障后检修作为预防性检修的补充手段,要求检修人员具备快速定位故障的能力。以某220kV变电站母线保护拒动事件为例,检修团队通过分析故障录波数据,发现采样值存在突变特征。结合保护原理,确认启动元件未动作,最终定位故障原因为交流采样插件损坏。此类检修需在48小时内完成故障定位与元件更换,确保电网尽快恢复安全运行。

1.2 检修实施关键环节

检修前准备需完成三项核心工作:一是资料核查,包括近三年定值修改记录、历史缺陷处理报告及最新定值单,确保检修依据的准确性和时效性;二是工具配置,配备高精度数字万用表(精度 ≥ 0.05 级)、继电保护测试仪(采样率 ≥ 10 kHz)及光纤测试仪(衰减测试范围0-60dB),所有仪器需经计量校准,确保测试数

据的可靠性;三是风险预控,针对双套保护同屏场景,制定防误碰措施(如加装绝缘隔离板),对母线保护多间隔关联回路进行隔离标识,防止检修过程中引发二次故障。检修过程实施分层处理:二次回路层重点检查端子排紧固度,采用力矩扳手确保扭矩值在8-10N·m范围内,防止接触不良导致采样值异常;插件层需在防静电工作台上更换故障模块,更换后执行“装置自检+手动复归”验证流程,确保新插件功能正常;元器件层对电容、继电器等易损件进行参数测试,用LCR电桥测量电容容量,偏差超过10%立即更换,避免元件老化引发保护误动或拒动。

1.3 检修质量控制体系

建立三级验收制度:检修人员自检需填写《继电保护检修记录表》,详细记录元件参数与测试波形,确保数据可追溯;组长复检核对测试数据与历史记录偏差,重点检查采样值误差是否 $\leq \pm 0.5\%$,逻辑回路动作时间是否符合标准($\leq 30\text{ms}$);技术负责人终检审查检修报告与现场照片,重点确认定值修改符合调度要求,保护装置版本与定值单一致。某区域电网公司推行该制度后,检修返工率从12%降至3%,检修质量显著提升^[2]。数据追溯管理要求每项检修任务生成唯一标识码,关联设备台账、测试报告及校准证书,形成完整的设备生命周期档案。对于户外端子箱等特殊设备,需建立防潮密封性档案,每年开展淋雨试验(试验压力 $\geq 100\text{Pa}$)并记录绝缘电阻变化趋势(初始值 $\geq 100\text{M}\Omega$,变化率 $\leq 20\%/年$)。某沿海变电站通过数据追溯发现,某批次端子排因盐雾腐蚀导致接触电阻年均上升15%,据此提前更换全部同类设备,避免因接触不良引发保护误动,有效提升设备运行的稳定性。

2 数字化继电保护技术架构

2.1 系统组成与工作原理

数字化继电保护系统以电子式互感器、合并单元、智能终端及保护装置为核心,构建了从数据采集到动作执行的完整数字化链路。电子式互感器采用罗氏线圈实现电流信号的数字化采集,结合电阻分压技术完成电压信号转换,采样频率突破10kHz,可精准捕捉电力系统的瞬态变化。合并单元作为数据枢纽,通过高精度同步时钟实现多间隔采样值同步,并依据IEC61850-9-2协议将数据封装为标准化报文,经光纤传输至保护装置,传输延时严格控制在2ms以内,为快速保护提供可靠支撑。保护装置采用双核处理器架构,主核(如ARM Cortex-A系列)专注于故障量计算与保护逻辑判断,从核(如FPGA)负责通信任务与数据预处理。以线路距离保护为例,主核在5ms内完成阻抗测量、故障方向分析及动作出口逻辑运算,从核同步将动作信息(如故障类型、动作时间、录波数据)上传至监控系统。

2.2 技术优势与应用价值

2.2.1 二次回路优化与抗干扰能力提升

数字化系统采用光纤替代传统铜缆传输采样值,彻底消除电磁干扰影响。在强电磁环境(如近区雷击、开关操作)下,光纤传输使采样值误差从传统电缆的0.8%降至0.2%,抗干扰能力提升3倍。某新能源场站对比测试表明,数字化系统在雷击故障中

未出现保护误动或拒动,而传统系统因电磁干扰导致3次误动,验证了光纤传输的可靠性。此外,光纤无需绝缘检查,年维护工时降低60%,二次回路故障率下降75%。

2.2.2 设备集成化与空间节约

智能终端整合断路器操作机构、非电量保护(如瓦斯、温度)及信号采集功能,实现“测控一体”。某220kV变电站改造后,屏柜数量从12面减少至7面,节省占地面积25%,同时减少二次电缆敷设长度3.2km,降低材料成本与施工难度。智能终端支持即插即用,设备更换时间从传统方案的4小时缩短至30分钟,提升运维灵活性。例如,某换流站通过智能终端集成化改造,年停电检修时间减少120小时,供电可靠性显著提升。

2.2.3 通信标准化与互操作性增强

IEC61850协议实现设备间信息模型统一,某区域电网通过统一通信规约,使不同厂商保护装置与监控系统对接时间从72小时缩短至8小时,调试效率提升90%。标准化的GOOSE(面向通用对象的变电站事件)报文支持保护动作、断路器分合等信号的快速传输(传输时间 $\leq 3\text{ms}$),为快速保护(如差动保护)提供可靠通信保障。某特高压直流工程中,基于IEC61850的跨系统协同控制使故障恢复时间缩短40%,减少停电损失超千万元。

2.2.4 数据共享与高级应用开发

数字化系统支持全站数据实时共享,某省级电网构建的继电保护状态监测平台,可接入2000余套保护装置的运行参数(如CPU温度、电源模块电压、采样值精度),通过大数据分析提前30天预测85%的设备缺陷。例如,通过分析某线路保护装置的历史采样值偏差,系统提前15天预警电流互感器误差超标,避免保护误动风险。此外,数据共享支撑了故障录波联合分析、保护动作行为评估等高级应用,提升电网故障诊断能力。

2.3 检修模式变革

通过构建保护装置数字孪生体,实时映射设备运行状态(如温度、功耗、通信质量),结合历史故障数据与实时采样值,动态模拟装置工况。某试点工程中,系统通过分析某500kV断路器保护装置的数字孪生模型,将保护动作正确率预测精度提升至99.6%,较传统定期检修模式提升25%。数字孪生技术还可模拟极端工况下的装置响应,为保护定值优化提供数据支持^[3]。深度学习模型可识别0.02秒级的短路故障特征(如电弧波形、谐波含量),较传统傅里叶算法识别速度提高10倍。某特高压直流工程中,智能诊断系统通过分析故障录波数据,在100ms内定位故障点至具体换流阀模块,较人工分析时间缩短90%。此外,机器学习算法可自动识别保护装置的隐性故障(如元件老化、参数漂移),提前预警设备退化趋势。检修策略优化通过周期、范围与资源的协同调整,显著提升电网运维效率与经济性。周期调整方面,依托设备健康指数动态制定检修计划,综合采样值偏差、通信中断次数等参数评估设备状态,将状态良好设备的检修间隔从3年延长至5年。某电网公司实施后,年检修成本降低35%,同时减少非计划停电风险,设备可用率提升至99%以上。范围精准化聚焦具体问题实施检修,通过状态评估锁定老化电容、采样模块漂移

等关键缺陷,避免“全检全换”的过度维修模式。某变电站改造后,年检修工作量减少40%,备件更换量下降50%,有效降低因拆卸导致的二次故障概率。资源调配依托区域共享平台实现快速响应,集成本品备件、技术专家及移动检修队伍信息,通过智能匹配优化资源配置。

3 技术融合与发展趋势

3.1 智能检修技术应用

物联网技术推动设备全生命周期管理向智能化转型。通过在断路器、互感器等关键部件嵌入RFID标签,系统可自动采集设备投运时间、检修记录、备件更换周期等数据,并与企业资源计划(ERP)系统联动,实现备件库存动态优化。某省级电网应用后,备件库存周转率提升40%,过期元件使用率降至零,年节约采购成本超千万元。大数据分析赋能检修决策,基于设备运行数据(如温度、振动、采样值偏差)构建的缺陷预测模型,可提前识别电容老化、元件接触不良等隐性故障。某电网公司通过分析10万条历史数据,成功预测82%的电容老化案例,将非计划停电次数减少65%。增强现实(AR)技术重塑现场作业模式。检修人员佩戴AR眼镜可实时调取设备三维模型、历史检修记录及操作步骤视频,并通过手势交互完成端子排核对、二次回路检查等任务^[4]。某特高压直流工程检修现场测试显示,AR辅助使端子排核对时间从15分钟缩短至5分钟,接线错误率降低90%,同时减少纸质图纸使用,降低作业环境复杂度。数字孪生技术推动检修模式创新,通过构建保护装置的虚拟镜像,可在投运前模拟极端工况(如短路电流冲击、电磁干扰)下的设备响应,优化保护定值与硬件设计。

3.2 新能源接入挑战

高比例新能源接入对保护系统适应性提出严峻挑战。风电、光伏的功率波动导致保护装置采样值波动幅度达20%,超出传统保护定值整定范围。数字化系统通过动态调整保护策略应对挑战,例如基于新能源渗透率实时切换过流保护动作特性,某试点

工程将电压波动抑制幅度从50%提升至72%,避免保护误动。构网型技术发展要求保护装置具备惯量支撑与频率调节功能,某储能电站应用的数字化保护系统可监测电网频率变化率(RoCoF),在0.1秒内完成保护策略切换,通过快速调整储能出力抑制频率跌落,支撑电网稳定运行。多能互补场景下,保护装置需处理光伏、风电、储能等多源异构数据^[5]。某综合能源示范项目通过构建统一数据平台,整合不同能源系统的采样值、状态量及控制指令,实现跨系统保护协同。例如,当光伏逆变器因故障退出运行时,系统可自动调整储能保护定值,避免因功率突变导致保护误动,同时协调周边风电场降低出力,维持区域功率平衡。

4 结语

继电保护检修与数字化技术深度融合,是电网向智能化、自适应化发展的关键推动力。构建预防性检修体系、优化数字化架构、应用智能检修技术,能提升检修效率、降低成本、增强电网抗风险力。新能源大规模接入带来功率波动等挑战,数字化保护系统要强化动态策略调整等能力。未来,物联网等新技术持续渗透,继电保护检修将迈向全生命周期智能化管理,为新型电力系统构建提供坚实保障。

[参考文献]

- [1]张秉寅,钱彦丰.数字化继电保护设备状态监测与调试技术研究[J].电力设备管理,2025(1):120-122.
- [2]陆维诚.数字化变电站继电保护装置测试与调试研究[J].光源与照明,2025(2):100-102.
- [3]李玥.数字化背景下电厂自动化继电保护技术研究[J].光源与照明,2025(4):236-238.
- [4]时浩.数字化继电保护装置故障分析与维修方法研究[J].家电维修,2025(11):113-115.
- [5]孟凡柱.数字化技术在电力系统继电保护中的应用[J].科学与信息化,2025(17):78-80.