

# 电力系统继电保护装置的数字化改造与可靠性提升技术研究

宋孟召

上海电气集团恒羲光伏科技(南通)有限公司 江苏南通 226000

**摘要:** 本研究聚焦于电力系统继电保护装置的数字化改造与可靠性提升技术。随着电力系统规模的不断扩大和复杂性的增加,传统继电保护装置在应对新的运行需求和故障模式时逐渐显现出局限性。通过对继电保护装置进行数字化改造,能够提高其性能和响应速度,增强对故障的准确判断能力。本文详细探讨了数字化改造的具体内容,包括硬件升级、软件优化以及通信技术的应用等方面。同时,研究了提升可靠性的相关技术,如冗余设计、故障诊断与容错技术等。通过实际案例分析,验证了数字化改造和可靠性提升技术在电力系统中的有效性和实用性,为保障电力系统的安全稳定运行提供了重要的技术支持。

**关键词:** 电力系统; 继电保护装置; 数字化改造; 可靠性提升技术

## 引言

电力系统是现代重要基础设施,其安全稳定运行对国民经济和人民生活至关重要。继电保护装置是电力系统关键部分,能在故障时快速切除故障元件,保障系统安全。随着电力技术发展,系统规模扩大、结构复杂,新能源接入使运行特性改变。传统继电保护装置采用模拟技术,存在动作慢、精度低等问题,难以满足需求。数字化技术为继电保护装置升级带来契机,数字化装置有运算快、精度高、功能强等优点,能适应系统发展。同时,提高继电保护装置可靠性是关键需求,误动或拒动会导致严重事故和经济损失。因此,开展继电保护装置数字化改造与可靠性提升技术研究意义重大。本研究旨在探索有效方案和技术,提高装置性能与可靠性,保障电力系统安全稳定运行。

## 一、继电保护装置数字化改造的必要性与现状

### (一) 传统继电保护装置的局限性分析

传统继电保护装置局限性分析是论证数字化改造必要性的起点,通过对比揭示其无法满足现代电网运行要求。它基于模拟技术构建,在多维度存在局限:信息处理上,仅能接入有限模拟量,处理方式简单,对故障特征识别能力有限;功能集成度低,一套装置仅承担一种保护功能,设备多、接线复杂;运行维护缺乏自检和在线监测,定值整定和故障信息记录原始;系统适应性差,硬件逻辑固化,难以适应电网变化。剖析这些局限证明技术升级换代势在必行<sup>[1]</sup>。

### (二) 数字化改造的技术背景与发展趋势

数字化改造的技术背景与发展趋势是论证改造可行性与前瞻性的关键。其核心技术背景是电子、计算机和网络通信技术发展,使得高速采样和复杂算法运算成为可能,光纤通信提供数据传输信道,IEC 61850标准解决通信壁垒。其发展趋势表现为:硬件平台化与软件功能化,实现软硬件解耦;信息采集与传输网络化,简化二次回路;功能集成化与智能化,集成多种功能,引入先进算法。阐述这些证明数字化改造是战略选择,为改造方案提供技术指引。

### (三) 当前数字化改造的实践进展与存在问题

当前数字化改造的实践进展与存在问题连接理论与应用的桥梁。实践方面,国内外开展大量数字化变电站建设与改造,积累了经验,我国具备一定技术实力。但也存在问题:标准执行与互操作性方面,不同厂商对标准理解有差异;网络安全面临病毒、黑客等威胁;测试验证与运维体系不完善,测试手段和标准不足,运维人员技能欠缺;投资成本与效益评估存在挑战,初期投资大,效益长期隐性。分析这些确保后续技术有现实针对性。

### (四) 数字化改造对系统可靠性的影响分析

数字化改造对系统可靠性的影响分析是本研究核心命题聚焦点。它对系统可靠性有双重影响:提升方面,降低装置硬件故障概率,消除二次回路问题,具备强大信息记录和分析能力;引入新型风险方面,依赖通信网络和同步时钟,软件复杂性带来挑战,电磁兼容性问题

仍需重视。分析这种双重影响确立研究核心任务，为后续可靠性提升技术指明方向<sup>[2]</sup>。

## 二、继电保护装置数字化改造的关键技术

### （一）数字化保护装置的硬件架构与软件平台

数字化保护装置的硬件架构与软件平台构成了整个数字化改造项目的物理实现基础和逻辑运行核心，这两大要素直接决定了保护装置的整体性能表现、运行稳定性水平以及未来功能扩展能力。本部分内容从系统级整体设计的宏观视角出发，通过科学合理的架构设计，致力于构建一个具有高可靠性、强实时性和良好兼容性的综合性软硬件平台。在硬件架构方面，采用基于高性能、低功耗特性的多核处理器作为核心运算单元，通过模块化设计理念将各功能单元进行合理划分，对关键部件实施冗余配置策略，同时特别注重电磁兼容性等可靠性设计要素。在软件平台方面，重点构建稳定可靠、安全可控且具备良好扩展性的嵌入式实时操作系统和配套应用软件框架，采用分层解耦的系统架构设计方法，显著提升系统的可移植性和互操作性，同时深入探讨软件可靠性工程相关技术。通过对软硬件平台的系统性研究，为数字化保护装置提供了高可靠性的技术实现载体，这些基础性研究工作也是后续实现各类高级应用功能的重要前提条件和技术保障。

### （二）智能电子设备（IED）的应用与集成

智能电子设备（IED）的应用与集成是构建数字化变电站信息共享体系和功能协同机制的关键环节，通过将传统的单一功能单元整合为具有智能化特征的复合设备，为构建全站统一的数字化平台奠定了坚实基础。本部分研究的重点集中在IED的标准化配置方法和系统集成技术两个方面。在应用层面，深入探讨IEC 61850国际标准的具体实现方案，对各类保护功能进行精确的建模处理，通过集成多种功能来有效精简设备配置规模。在集成层面，重点解决不同厂家、不同类型IED之间的协同工作问题，利用全站系统配置语言（SCL）实现统一配置管理，同时深入探讨逻辑闭锁机制和联动配合策略等关键技术。通过对IED应用与集成技术的系统性研究，成功打破了传统变电站中存在的信息孤岛现象，构建了数字化变电站的基础架构体系，为实现智能化的保护和控制功能提供了必要的技术支撑和实现路径。

### （三）通信网络与信息交互技术

通信网络与信息交互技术作为数字化继电保护系统的核心“神经网络”，其传输性能、稳定性和安全性直接决定了保护动作的实时响应能力和判断准确性。本部分

研究立足于继电保护的特殊需求，致力于构建一个具备高实时性、高可靠性和高安全性的通信体系架构。在网络拓扑设计方面，针对过程层网络和站控层网络的不同业务特点，采用差异化的优化方案：过程层网络重点部署冗余组网技术，通过双环网或双星型拓扑实现无缝切换；同时应用虚拟局域网（VLAN）技术实现业务隔离，并采用优先级标签（QoS）机制保障关键保护信息的传输时延。在信息交互技术方面，深入研究IEC 61850标准定义的制造报文规范（MMS）、通用面向对象变电站事件（GOOSE）和采样值传输（SV）三种服务模型，同时特别重视网络安全防护体系的构建，包括加密传输、访问控制和入侵检测等措施<sup>[3]</sup>。

### （四）数据采集与处理技术的优化策略

数据采集与处理技术的优化策略是数字化保护装置获取准确测量信息并做出正确保护判断的关键环节，其性能优劣直接决定了保护的测量精度和动作可靠性。研究工作贯穿整个信号处理链路，形成完整的优化体系。在数据采集环节，重点研究电子式互感器的性能提升方案，包括改进传感头设计、优化信号调理电路、增强抗干扰能力等措施；针对合并单元，深入研究同步采样技术，提出基于IEEE 1588精确时间协议的时钟同步方案，确保多源采样数据的相位一致性。在数据处理环节，着力提升数字信号处理算法的鲁棒性和精确性：设计具有优良频率特性的数字滤波器，抑制噪声干扰；采用自适应滤波技术实现动态环境下的最优滤波；建立完善的数据有效性判别机制，包括数据完整性检查、突变检测和合理性验证等。通过对数据采集与处理技术的系统性优化研究，为保护装置提供了高质量的数据源和强大的数据处理能力，这不仅是提升系统整体性能的基石，更是实现保护装置智能化的重要技术支撑。

## 三、数字化改造后的可靠性提升技术

### （一）可靠性评估指标体系

本研究针对数字化继电保护系统的全生命周期管理需求，建立了一套科学完备的可靠性评价标准体系。首先通过深入分析数字化继电保护系统与传统电磁式保护装置在可靠性特征方面的本质差异，明确了评估的重点方向和关键指标。该评估体系采用多维度、多层次的架构设计：在硬件层面，不仅包含元器件失效率、平均无故障时间等基础可靠性指标，还特别增加了可维护性指标，如平均修复时间、备品备件可用性等；在软件层面，创新性地引入软件工程领域的成熟评估方法，通过代码质量分析、测试覆盖率等量化指标来评估软件可靠性；

在系统层面，既关注保护功能的正确动作率、误动率等核心指标，又充分考虑通信环节的时延、丢包率对系统可靠性的影响，同时还针对特殊运行工况制定了专门的评估指标。这套指标体系为电力企业提供了科学、全面的评估“标尺”，既可用于设备选型和技术改造的决策支持，又能为后续技术研发提供明确的优化目标和验证标准，对提升电力系统安全运行水平具有重要意义<sup>[4]</sup>。

### （二）冗余设计与容错技术的应用

冗余设计与容错技术是提升数字化继电保护系统软硬件可靠性的核心解决方案，通过构建多重保障机制，有效降低因单点故障导致系统整体失效的风险概率。在硬件冗余方面，采用分级设计理念：组件级重点考虑关键元器件（如CPU、电源模块等）的冗余配置策略；装置级深入研究保护双重化配置方案及确保独立性的设计原则；系统级则着重优化网络拓扑结构的冗余设计，确保通信通道的可靠性。在软件容错方面，通过多种技术手段提升软件的健壮性和抗干扰能力，包括但不限于：实时监控程序运行状态、采用多重数据校验与纠错算法、建立完善的异常检测和处理机制等。这些技术共同构建了数字化继电保护系统的多重“防线”，大幅提升了系统在异常情况下的容错能力和自恢复能力，为电网安全稳定运行提供了坚实的技术保障。

### （三）状态监测与故障诊断技术

作为现代电力系统智能化转型的关键技术支撑，状态监测与故障诊断技术从根本上改变了传统的“定期检修”模式，推动运维方式向更科学、更精准的“状态检修”转变。该技术体系通过多维度、实时化的监测手段，能够对设备运行状态进行精准评估，并基于大数据分析实现故障的早期预警，显著提升了运维工作的针对性和有效性。具体而言，状态监测环节需要确定反映设备健康状态的关键参数指标，利用先进的传感装置和采集终端实现数据的实时采集与本地存储，并通过可靠的通信网络将数据汇总至后台分析系统。在故障诊断方面，需要开发融合多种人工智能技术的智能诊断模型和算法，包括基于专家经验的规则推理系统、基于机器学习的深度数据挖掘方法，同时还需要重点研究故障的精确定位与溯源技术。

### （四）实施过程中的主要问题与改进方向

本部分深入剖析了状态监测与故障诊断技术在工程实施各环节遇到的主要问题，并提出了系统性的改进方向。在规划设计阶段，普遍存在缺乏顶层设计思维的问

题，导致系统架构扩展性不足，建议制定兼顾前瞻性和实用性的总体规划方案；在设备选型与系统集成阶段，突出表现为设备互操作性差和版本兼容性管理混乱等问题，亟需建立严格的设备准入机制和完善的版本管理流程；在安装调试阶段，主要受限于传统测试手段的不足，需要重点研发支持数字孪生技术的闭环测试系统；在运行维护阶段，面临运维人员技能水平不足和智能化支撑工具缺乏的双重挑战，建议构建分层级的专业培训体系，并开发集知识库、案例库和决策支持于一体的智能运维平台<sup>[5]</sup>。

### 结语

综上所述，对电力系统继电保护装置进行数字化改造并提升其可靠性是电力行业发展必然趋势。构建可靠性评估指标体系，为电力企业提供标准依据，明确提升目标；应用冗余设计与容错技术，降低系统失效风险，保障电网防线稳固；研究状态监测与故障诊断技术，推动向“状态检修”转变，提升运维效能。虽在相关技术研究中成果显著，但存在规划设计缺前瞻性、设备互操作性不足、调试手段滞后、运维人员技能不匹配等问题，需深入解决。未来，随着电力系统发展和智能化水平提高，该技术将不断创新完善。一方面优化现有技术，提高系统可靠性与稳定性；另一方面加强与人工智能、大数据等融合，适应智能电网需求。同时，注重培养高素质人才，提高运维人员能力，保障电力系统安全稳定运行。

### 参考文献

- [1]王明杰.关于电力系统继电保护与自动化装置可靠性探析[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2021(7): 1.
- [2]袁靓.电力系统中继电保护和自动化装置可靠性研究[J].轻松学电脑, 2021, 000(006): P.1-1.
- [3]李伟.电力系统继电保护及自动化装置可靠性研究[J].百科论坛电子杂志, 2020, 000(005): 1385-1386.
- [4]吴志程.电力系统继电保护及其自动化装置可靠性研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(11): 3.
- [5]付帝豪, 图尔荪·依明, 王萌, 等.电力系统中继电保护和自动化装置可靠性研究[J].市场周刊·理论版, 2020(42): 0166-0166.