

电力系统继电保护装置的可靠性提升策略

刘俊成

贵州黔西中水发电有限公司 贵州省毕节市 551514

摘要: 文章聚焦电力系统继电保护装置可靠性提升问题,深入剖析影响其可靠性的关键因素并提出对应策略。硬件方面,元件质量、制造工艺与设计缺陷影响装置稳定性;软件因素涵盖算法准确性、稳定性及更新维护;运行环境中的温湿度、电磁干扰和振动冲击也会加速装置老化。针对上述问题,提出深化软件全生命周期管理,优化硬件设计与质量管控,构建智能化运行环境防护体系等策略,通过全流程质量管控、智能环境调控等手段,全方位提升继电保护装置可靠性,为电力系统安全稳定运行提供有力保障。

关键词: 电力系统;继电保护装置;可靠性

在现代电力系统向智能化、复杂化演进的背景下,继电保护装置作为保障电网安全运行的关键防线,其可靠性直接关系到电力供应的稳定性与社会经济发展。许继、南瑞等主流厂商的装置虽广泛应用,但仍面临硬件老化、软件缺陷及复杂环境干扰等挑战。本文通过剖析影响可靠性的核心因素,针对性提出提升策略,旨在为电力系统安全高效运行提供理论与实践支撑。

1. 电力系统继电保护装置可靠性的影响因素

1.1 硬件因素

硬件系统作为继电保护装置的物质载体,其全生命周期质量与设计水平直接决定装置的可靠性与稳定性。在元件质量层面,继电保护装置依赖高精度芯片、特种电阻电容等核心电子元件实现信号采集、逻辑运算与保护动作功能。当元件存在材料纯度不足、半导体掺杂比例偏差等制造缺陷时,会导致元件电性能参数离散性增大,运行中易受温度、湿度等环境因素影响发生参数漂移。随着服役时间延长,这些潜在缺陷会加速元件老化进程,造成信号采集失真、逻辑判断失效等故障,严重威胁装置运行可靠性。制造工艺对硬件可靠性的影响贯穿生产全流程。焊接工艺中,虚焊、冷焊等缺陷会形成动态接触电阻,在大电流冲击下引发局部过热,导致焊点金属疲劳断裂;波峰焊接温度曲线控制不当,易造成电路板基材分层,破坏内部电气连接结构。电路板布线环节,不合理的走线布局会产生电磁耦合干扰,影响微弱信号的采集精度;电源模块与信号处理模块未进行有效隔离,会导致电源噪声串扰,降低装置抗干扰性能。以

许继、南瑞等行业头部企业为例,其采用 SMT 高速贴装技术与 AOI 自动光学检测系统,通过工艺参数闭环控制与全过程质量追溯体系,将焊接缺陷率控制在 0.01% 以下,显著提升硬件制造可靠性。

1.2 软件因素

软件系统作为继电保护装置的“智能中枢”,其算法准确性与程序稳定性直接决定故障判别与动作执行的可靠性。在算法设计层面,传统继电保护算法多基于稳态电气量构建数学模型,当电力系统呈现高比例新能源接入、交直流混联等复杂运行特征时,若未充分考虑分布式电源间歇性出力、电力电子器件快速暂态过程等因素,将导致故障特征提取偏差。例如,基于相量计算的距离保护算法,在新能源故障电流非周期分量占比过高时,易出现保护范围收缩或超范围动作;而缺乏自适应调整机制的差动保护算法,无法动态适应系统运行方式变化,可能引发保护误判。软件稳定性受代码质量、资源管理策略等多因素制约。在代码实现过程中,指针异常引用、未初始化变量调用等低级错误,会导致程序运行时内存非法访问;而线程同步机制缺失或锁竞争问题,易引发数据不一致与死锁现象。随着继电保护装置功能集成度提升,复杂的软件架构对内存、CPU 等资源管理提出更高要求,内存泄漏将导致可用资源持续消耗,最终引发系统崩溃;而不合理的中断处理优先级设置,可能造成关键任务调度延迟,影响保护动作时效性。此外,软件模块间的耦合度设计直接关系到系统容错能力,若核心功能模块缺乏独立性,一处代码缺陷可能通过调用链扩散至整个系统。

1.3 运行环境因素

继电保护装置的运行环境构成其可靠性的外部约束条件,极端环境参数和复杂电磁工况会通过物理化学作用加速设备老化,削弱其故障响应能力。在温湿度影响方面,高温环境会加剧半导体材料的载流子热激发效应,导致芯片阈值电压漂移和逻辑判断错误,同时加速焊点金属间化合物生长,降低电气连接的机械强度;低温环境下,电子元件内部电解质粘度增加、介电常数改变,使得电容容值失准、晶体振荡器频率偏移,影响采样精度和计时准确性。湿度对装置的影响呈现双向作用,高湿度环境易在电路板表面形成水膜,降低绝缘电阻并引发电化学迁移,导致线路短路;低湿度环境则因静电积累产生高达数千伏的瞬时电压,击穿 CMOS 器件栅极绝缘层,造成不可逆损伤^[1]。电磁干扰对继电保护装置的威胁源于复杂电磁环境下的场-线耦合机制。变电站内断路器开断操作产生的暂态电磁脉冲(TREMP),其上升时间短至纳秒级、频谱范围覆盖数十 MHz,通过空间辐射和传导耦合进入装置内部。当干扰频率与装置 PCB 板的固有谐振频率相近时,会激发强烈的电磁谐振,导致信号采集模块的 A/D 转换器出现量化误差,通信接口的以太网信号产生误码。此外,高压设备局部放电产生的高频谐波分量,会通过 CT/PT 二次回路侵入保护装置,干扰同步采样系统的时钟信号,造成相位测量偏差,最终影响差动保护、距离保护等依赖精确量计算的功能模块正常运行。

2. 提升电力系统继电保护装置可靠性的策略

2.1 深化软件全生命周期管理

构建覆盖需求分析、架构设计、编码实现、测试验证到版本迭代的全流程质量管控体系,需以系统性思维强化软件可靠性。在需求分析阶段,采用基于模型的系统工程(MBSE)方法,结合电力系统运行特性与保护装置功能需求,建立精确的需求模型。通过需求追溯矩阵确保每一项功能需求均能映射至后续设计与实现环节,避免因需求模糊导致的功能缺失或冗余。同时,引入利益相关者协同评审机制,组织电力系统运维人员、继电保护专家参与需求确认,确保软件功能贴合实际运行场景^[2]。

算法研发是提升软件可靠性的核心环节。针对新能源高比例接入、交直流混联电网等复杂工况,采用自适应保护算法,基于实时量测数据动态调整保护整定值,通过卡尔曼滤波等算法优化故障特征提取精度。引入深度学习算法构建

故障诊断模型,利用历史故障数据训练神经网络,实现对故障类型、位置的快速精准识别。结合数字孪生技术,在虚拟仿真平台中构建与实际电力系统高度匹配的仿真环境,模拟包括短路故障、振荡、新能源功率波动等在内的数千种故障场景,通过对比仿真结果与理论预期,量化评估算法的准确性与稳定性指标,确保算法在极端工况下仍能可靠运行。软件开发过程严格遵循 MISRA C、IEC 61508 等安全编码规范,采用静态代码分析工具进行自动化检查,识别潜在的内存越界、空指针引用等编码缺陷。引入形式化验证技术,基于数学逻辑对关键软件模块进行正确性证明,确保程序行为符合设计规约。建立单元测试、集成测试、系统测试三级测试体系:单元测试针对函数和类进行白盒测试,覆盖率需达到 100% 语句覆盖和 90% 分支覆盖;集成测试验证模块间接口兼容性与数据交互准确性;系统测试则在模拟实际运行环境中,进行长时间稳定性测试与压力测试。

2.2 深化软件全生命周期管理

构建覆盖需求分析、架构设计、编码实现、测试验证、部署运维及退役的全流程质量管控体系,需以系统性思维和工程化方法保障软件可靠性。在需求分析阶段,引入基于模型的系统工程(MBSE)方法论,通过 SysML 建模语言将电力系统继电保护功能需求转化为可视化、结构化的模型。建立需求追溯矩阵,确保每一项功能需求可追踪至设计、编码、测试环节,实现全流程需求一致性验证。组织电力系统调度人员、继电保护工程师、设备运维专家开展多轮需求评审,识别潜在的需求冲突与模糊表述,通过场景模拟和用例分析明确软件在不同工况下的功能边界与性能指标^[3]。

算法研发作为软件核心竞争力的关键,需结合电力系统发展趋势持续创新。针对新能源高比例接入导致的故障特性复杂问题,采用自适应保护算法框架,基于实时量测数据动态调整保护整定值。通过卡尔曼滤波、粒子滤波等算法优化故障信号处理,结合机器学习中的随机森林、支持向量机等模型实现故障类型的快速分类与定位。引入数字孪生技术,构建包含电网拓扑、设备参数、运行状态的虚拟仿真环境,模拟短路、振荡、新能源功率波动等数千种故障场景。运用蒙特卡洛仿真方法对算法进行鲁棒性测试,通过统计分析确定算法在不同工况下的误判率、拒动率等可靠性指标,确保算法在极端条件下的稳定性。软件开发过程严格遵循 IEC 61508 功能安全标准与 MISRA C 安全编码规范,采用静态代

码分析工具（如 Coverity、Cppcheck）进行自动化缺陷检测，识别潜在的内存越界、空指针引用、未初始化变量等安全隐患。对关键软件模块（如保护逻辑判断、跳闸出口控制）采用形式化验证技术，通过数学逻辑证明程序行为符合设计规约。建立分级测试体系：单元测试采用白盒测试方法，实现 100% 语句覆盖和 90% 分支覆盖；集成测试验证模块间接口兼容性与数据交互准确性；系统测试在模拟实际运行环境中进行长时间稳定性测试、压力测试及故障注入测试。

2.3 优化运行环境防护体系

构建智能化、多层次的运行环境防护体系，需融合物联网、自动化控制及大数据分析技术，实现环境参数的实时监测、精准调控与风险预警。依托物联网传感器网络，在继电保护装置机柜内部署高精度温湿度传感器（精度达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 1\% \text{ RH}$ ）、三轴加速度振动传感器、电磁干扰场强检测仪，通过 LoRa、Modbus 等通信协议将数据上传至智能管理平台，形成装置运行环境的全域感知网络。平台采用边缘计算技术实时处理采集数据，结合历史运行数据建立环境参数变化预测模型，实现对潜在环境风险的超前预判^[4]。

在温湿度环境控制方面，采用智能联动调控策略。部署具备 PID 调节功能的精密空调与超声波加湿器，通过环境监测数据触发设备自动启停与参数调节。当温度超过设定阈值时，空调启动分级制冷模式，优先开启自然冷却系统以降低能耗，若温度持续升高则启动机械制冷；针对湿度异常，采用湿度补偿算法，结合除湿机与加湿器协同工作，将相对湿度精确控制在 45%–55% 的最优区间。同时，在装置内部加装石墨导热片与微型散热风扇，构建主动式散热系统，进一步降低元件局部温升，延缓电子器件老化进程。电磁干扰防护需从装置安装与设备本体两方面构建立体防御体系。在安装层面，依据 IEEE 1584 标准实施等电位连接，通过铜排将继电保护屏柜、电缆桥架、接地网进行多

点互联，形成法拉第笼结构；采用分层分区布线原则，将交流电流 / 电压回路、直流控制回路、通信网络回路分槽敷设，并保持 $\geq 20\text{cm}$ 的间距，减少电磁耦合干扰。设备本体防护方面，选用双层屏蔽的金属铠装电缆，其屏蔽层采用 360° 环接工艺确保接地连续性；在信号输入输出端口加装浪涌保护器与共模扼流圈，针对高频干扰设计 π 型滤波电路，将电磁干扰抑制比提升至 60dB 以上，保障信号传输的完整性与准确性。

结语

继电保护装置的可靠性是电力系统安全稳定运行的基石。本文系统分析了硬件缺陷、软件漏洞、复杂运行环境及人为因素对装置可靠性的影响，并针对性提出深化软件全生命周期管理、强化硬件质量管控、优化运行环境防护等提升策略。通过构建全流程质量管控体系、引入智能监测与调控技术，可有效降低装置误动与拒动风险。未来，随着新能源大规模接入与电网智能化升级，继电保护装置可靠性研究需持续创新，为新型电力系统的安全运行提供更坚实的技术保障。

参考文献：

- [1] 黄玮. 继电保护实用技术在电力系统中的应用与研究[J]. 电工技术, 2024, (S2): 655–656+659.
- [2] 王宇轩, 胡威. 新型电力系统的继电保护隐藏故障及预防措施分析[J]. 电工技术, 2024, (S2): 674–676.
- [3] 季晓蕾. 电力系统继电保护二次回路的维护与检修[J]. 光源与照明, 2024, (11): 63–65.
- [4] 刘红亮, 魏胜孟. 智能化背景下电力系统继电保护技术的应用探究[J]. 科技资讯, 2024, 22 (22): 68–70.

作者简介：刘俊成，性别：男，出生：1995 年 4 月，民族：汉族，籍贯：云南曲靖；学历：大专；职称：助理工程师；研究方向：继电保护装置的可靠性提升研究；