

# 电力系统中继电保护与自动化装置的可靠性

陈顺燕 马超超

国网青海省电力公司海北供电公司 青海 海北藏族自治州 812200

**摘要:** 电力系统中, 继电保护与自动化装置的可靠性关乎电网安全稳定运行。继电保护能精准、快速切除故障, 防止故障蔓延; 自动化装置可实现远程监测与智能控制, 提升运行效率。二者需具备高选择性、灵敏性、速动性。当下, 借助先进技术如数字化采样、智能算法等提升其可靠性, 同时强化设备运维、人员技能培训, 以适应电网发展, 保障电力可靠供应。

**关键词:** 电力系统; 继电保护与自动化装置; 可靠性

引言: 随着电力行业飞速发展, 电力系统规模不断扩大且结构愈发复杂, 对安全稳定运行的要求也日益严苛。继电保护与自动化装置作为保障电力系统安全的关键防线, 前者能在故障瞬间精准动作、隔离故障, 后者可实现远程智能监控与调节, 提升运行效率。但在实际运行中, 诸多因素影响其可靠性。深入探究提升二者可靠性的策略, 对保障电力供应、推动电力系统可持续发展意义深远。

## 1 电力系统中继电保护与自动化装置可靠性基础理论

### 1.1 基本概念与定义

(1) 可靠性的数学表征: 可靠度指装置在规定条件和时间内完成规定功能的概率, 常用指数分布模型描述; 失效率反映单位时间内装置失效的概率, 分为早期失效、偶然失效和耗损失效三个阶段; 可用率则结合工作时间与总时间(工作+维修), 体现装置实际可用程度, 是评估运行效能的核心指标。(2) 继电保护装置的功能与分类: 主保护承担快速切除故障的首要任务, 如线路纵联保护; 后备保护在主保护失效时启动, 按范围分为近后备(同一设备)和远后备(相邻设备); 自动化装置涵盖自动重合闸、备用电源自动投入等, 实现故障自愈与系统稳定控制。

### 1.2 可靠性评估指标体系

(1) 硬件可靠性指标: 元件寿命指硬件元件从投入使用到失效的时间, 受材料、工艺等影响; 故障率反映硬件元件在单位时间内发生失效的概率; 修复时间则是硬件出现故障后, 从开始维修到恢复正常工作所需的时间, 直接影响装置的可用率。(2) 软件可靠性指标: 算法稳定性指软件算法在不同工况下保持正确运行的能力; 抗干扰能力体现软件抵御外部电磁干扰、数据干扰等影响的性能; 响应速度是软件接收到输入信号后, 完成相应处理并输出结果的时间, 关系到保护装置的动作

及时性。(3) 系统级可靠性指标: 冗余设计通过增加备用元件或系统, 如双CPU结构, 提高系统在部分组件失效时的容错能力; 容错能力指系统在存在故障部件的情况下, 仍能维持正常功能的能力; 协同可靠性衡量多个装置或系统协同工作时的可靠性, 如继电保护装置与自动化监控系统的协同配合效果<sup>[1]</sup>。

### 1.3 可靠性分析方法

(1) 解析法: 马尔可夫模型基于状态转移理论, 通过建立装置的状态转移矩阵, 分析不同状态下的可靠性指标; 故障树分析以系统失效为顶事件, 自上而下构建故障树, 找出导致系统失效的基本事件及组合; Petri网通过库所、变迁等元素, 描述系统的动态运行过程, 进而评估可靠性。(2) 仿真法: 蒙特卡洛模拟通过大量随机抽样, 模拟装置的失效过程, 计算可靠性指标, 适用于复杂系统; 数字孪生技术构建与实际装置一致的虚拟模型, 实时映射装置运行状态, 可模拟不同故障场景下的可靠性表现。(3) 数据驱动法: 基于大数据的可靠性预测与健康监测, 通过采集装置运行过程中的海量数据, 如电流、电压、温度等, 利用机器学习、数据挖掘等技术, 预测装置的可靠性趋势, 实现故障提前预警与健康状态管理。

## 2 影响继电保护与自动化装置可靠性的因素分析

### 2.1 内部因素

(1) 硬件因素: 元件老化是核心问题, 如电容容量衰减、电阻阻值漂移, 会导致采样精度下降, 甚至引发装置误动; 制造工艺缺陷(如虚焊、外壳密封不良)会使装置在长期运行中出现接触不良, 增加故障概率; 电磁兼容性(EMC)问题表现为装置对外部电磁辐射抗干扰能力弱, 如高频信号干扰会导致数据传输错误, 影响保护逻辑判断。(2) 软件因素: 算法逻辑错误可能导致故障判别偏差, 例如短路故障时未能准确识别故障类

型,造成保护拒动;程序漏洞(如内存溢出、权限管理缺陷)易被外部攻击或异常数据触发,导致装置死机;版本兼容性问题常见于系统升级后,新旧软件模块接口不匹配,引发功能冲突,影响装置正常运行<sup>[2]</sup>。(3)设计因素:冗余配置不合理(如双重化系统共用同一电源)会失去冗余意义,单点故障即导致整套装置失效;抗干扰设计缺失(如未设置屏蔽层、滤波电路)会使装置受电磁干扰影响显著;散热设计不足会导致元件长期处于高温环境,加速老化,缩短使用寿命,例如CPU因过热频繁触发保护停机。

## 2.2 外部因素

(1)环境因素:温度超出装置工作范围(如高温 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ 、低温 $\leq -30^{\circ}\text{C}$ )会导致元件性能劣化,如继电器触点氧化;湿度过高( $\geq 85\%\text{RH}$ )易引发电路板腐蚀、绝缘性能下降;振动(如变电站设备运行产生的低频振动)会导致元件焊点脱落、接线松动;电磁干扰(EMI)(如高压设备操作产生的暂态电磁场)会干扰装置信号采集回路,导致数据失真。(2)运行条件:负荷波动过大(如短时过载)会使装置采样电流、电压频繁超出设计阈值,增加元件损耗;短路电流冲击会产生巨大电动力,可能损坏装置内部互感器、继电器等元件;电源质量差(如电压暂降、谐波污染)会导致装置供电不稳定,引发程序运行异常,甚至重启<sup>[3]</sup>。(3)人为因素:操作维护不当(如巡检时误碰接线端子)会导致装置误动作;误整定(如保护定值输入错误)会使装置在故障时动作阈值偏差,例如过流保护定值设置过高,无法及时切除故障;二次回路接线错误(如极性接反、回路短路)会导致装置接收错误信号,引发误动或拒动,是变电站常见故障原因之一。

## 2.3 典型案例分析

(1)我国因继电保护失效导致的大面积停电事故案例:2019年某省电网因220kV线路发生单相接地故障,线路主保护装置因软件算法逻辑错误,未能准确识别故障类型,未及时跳闸;随后后备保护因硬件元件老化(电容失效),采样数据异常,同样拒动,故障持续扩大,导致相邻3座220kV变电站失压,影响周边12万户居民及工业用户供电,停电时长约2.5小时。(2)故障原因剖析与可靠性改进措施:故障根源为双重保护均失效,一是软件算法未考虑接地故障时的谐波分量,导致判别失误;二是硬件元件超期运行(已使用12年,超出设计寿命8年),且未定期开展状态监测。改进措施包括:升级保护装置软件算法,增加谐波分量识别模块;建立元件全生命周期管理机制,对超期元件强制更换;部署在线

状态监测系统,实时监测电容容量、电阻阻值等关键参数;开展运维人员专项培训,强化定值整定与二次回路接线的校验流程。

## 3 电力系统中继电保护与自动化装置可靠性提升策略

### 3.1 设计阶段优化

(1)模块化与标准化设计:采用模块化架构将装置拆解为电源模块、采样模块、逻辑控制模块等独立单元,各模块接口遵循国际标准(如IEC61850),实现故障时的快速更换与升级,减少整体装置停机时间。同时,标准化设计可降低不同厂家设备的兼容性问题,例如统一采样精度与通信协议,避免因设备差异导致的数据传输误差,提升系统整体协同可靠性。(2)冗余设计与容错技术:核心装置采用双重化配置,如线路保护装置设置主备两套独立系统,每套系统具备完整的采样、计算与出口功能,且电源、通信回路完全独立,避免单点故障引发装置失效。对于关键保护逻辑(如母线保护),采用“三取二”表决机制,通过三套独立采样单元的数据对比,剔除异常数据,防止因单一单元故障导致误动或拒动,显著提升装置容错能力。(3)抗干扰与环境适应性设计:在硬件层面,对信号回路加装金属屏蔽层,减少电磁辐射干扰;在电源入口处设置滤波电路,抑制电网谐波与浪涌冲击。针对极端环境,采用宽温域元件( $-40^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ ),并优化装置外壳散热结构,如采用翅片式散热设计,配合内置温控风扇,确保装置在高温、高湿环境下稳定运行,避免因环境因素导致的元件性能衰减<sup>[4]</sup>。

### 3.2 制造与测试阶段改进

(1)严格的质量控制与可靠性试验:建立全流程质量管控体系,从元件采购环节筛选符合工业级标准的供应商,对关键元件(如CPU、继电器)进行100%入厂检测,剔除参数漂移、外观缺陷的产品。制造过程中,采用自动化焊接设备,减少人工操作导致的虚焊、漏焊问题。出厂前,需完成高低温循环试验( $-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ ,20个循环)、振动试验(10~500Hz,加速度10g)、电磁兼容试验(IEC61000-6-2),确保装置在恶劣条件下仍能正常工作。(2)基于数字孪生的虚拟测试与验证技术:构建装置的数字孪生模型,精确映射硬件结构、软件逻辑与运行参数,在虚拟环境中模拟不同工况(如短路故障、负荷波动、电磁干扰),测试装置的动作响应速度与逻辑正确性。通过虚拟测试,可提前发现软件算法漏洞(如故障判别延迟)、硬件设计缺陷(如散热盲区),减少物理样机的迭代次数,降低研发成本,同时提升装置出厂前的可靠性验证覆盖率。

### 3.3 运行维护阶段管理

(1) 状态监测与健康评估: 部署基于物联网 (IoT) 的在线监测系统, 通过传感器实时采集装置的运行参数 (如温度、电流、电压、通信信号强度)、核心元件状态 (如电容容值、继电器触点电阻), 并将数据上传至云端平台。利用大数据分析技术, 建立元件健康度评估模型, 通过对比历史数据与标准阈值, 识别潜在故障隐患 (如电容容值衰减至80%以下), 生成健康状态报告, 为维护决策提供依据, 避免因元件老化导致的突发故障。(2) 智能运维策略: 推行预测性维护模式, 基于状态监测数据与健康评估结果, 制定个性化维护计划, 如针对电容老化趋势, 提前安排更换, 而非采用传统的定期维护, 减少不必要的停机时间。同时, 开发装置故障自诊断与自愈功能, 当检测到软件程序异常时, 自动触发备用程序; 当某一模块故障时, 冗余模块快速切换, 实现“故障不中断运行”, 提升装置运行连续性<sup>[5]</sup>。

(3) 人员培训与标准化操作流程: 定期开展运维人员专业培训, 内容涵盖装置原理、故障排查、定值整定等, 结合虚拟仿真系统进行实操训练, 提升人员对复杂故障的处理能力。制定标准化操作流程 (SOP), 明确装置巡检、定值修改、二次回路接线的操作步骤与安全规范, 如定值修改需经过“双人核对、三级审批”, 二次回路接线需采用“图纸核对-接线测试-绝缘检测”三步法, 避免因人为操作失误导致的装置误动或损坏。

### 3.4 新兴技术应用

(1) 人工智能在可靠性评估与故障预测中的应用: 采用机器学习算法 (如LSTM、随机森林), 基于历史故障数据、运行数据、环境数据, 构建可靠性评估模型, 可实时预测装置未来一段时间内的失效概率; 同时, 利用深度学习技术分析故障特征 (如电流波形畸变、电压暂降模式), 实现故障类型的自动识别与定位 (如区分短路故障与接地故障), 缩短故障排查时间, 提升运维效率。例如, 通过训练LSTM模型, 可将装置故障预测准确率提升至90%以上, 提前7~14天预警潜在故障。(2) 区块链技术提升数据安全性与可信度: 将装置的运行数

据、维护记录、定值修改日志等上传至区块链网络, 利用区块链的去中心化、不可篡改特性, 确保数据不被恶意篡改或删除, 为可靠性评估、故障溯源提供可信数据支撑。例如, 当发生保护装置误动时, 可通过区块链追溯定值修改记录, 快速定位人为误整定问题; 同时, 区块链技术可实现多部门数据共享 (如调度中心、运维单位), 避免数据孤岛, 提升协同运维效率。(3) 5G通信技术实现实时数据传输与远程控制: 利用5G的高带宽 (10Gbps)、低时延 (< 1ms) 特性, 实现装置与调度中心之间的实时数据交互, 如传输高清故障录波数据、实时运行状态视频, 为调度人员提供精准决策依据。同时, 基于5G的远程控制功能, 运维人员可在云端对装置进行远程定值修改、程序升级, 无需现场操作, 减少因人员往返导致的维护延迟, 尤其适用于偏远地区变电站的装置运维, 提升整体运维响应速度。

### 结束语

电力系统中, 继电保护与自动化装置的可靠性是保障电网安全稳定运行的基石。通过不断优化装置设计、采用先进技术提升其性能, 加强日常运维管理、提高人员专业素养等举措, 能有效增强其可靠性。未来, 随着智能电网的发展与新能源的大规模接入, 对二者可靠性要求更高。我们需持续创新研究, 完善保障体系, 以应对新挑战, 确保电力系统可靠供电, 为经济社会发展提供坚实的电力支撑。

### 参考文献

- [1] 戚继宏. 电力系统中继电保护自动化技术分析[J]. 电力设备管理, 2024(02):47-49.
- [2] 李佳霖. 电力系统中继电保护自动化技术的应用[J]. 电力系统装备, 2022(05):52-54.
- [3] 曹鹏, 武娟. 电力系统中的继电保护自动化技术应用研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(11):32-34.
- [4] 吴瑞林. 继电保护与自动化装置的可靠性分析探究[J]. 中国高新科技, 2024, (18):87-89.
- [5] 常建. 电力系统自动化继电保护装置及其测试研究[J]. 光源与照明, 2023, (12):74-76.