

# 电力系统继电保护隐性故障

王 轩

国网北京检修分公司 北京 100073

**摘要:** 电力系统继电保护隐性故障是威胁电网安全稳定运行的重要隐患。本文系统分析隐性故障的定义与隐蔽性、危害性等核心特征,深入探讨其对系统稳定性、设备安全及供电可靠性的多重影响。重点研究静态检测、动态检测及智能诊断等检测方法,并提出风险评估、监控体系完善、预防性措施等综合防控策略,为提升继电保护系统可靠性提供理论依据与实践参考。

**关键词:** 隐性故障; 继电保护; 检测方法; 防控策略

## 引言

电力系统安全稳定运行依赖继电保护,但隐性故障作为特殊隐患,在常规运行中潜伏,在系统故障或扰动时被激活,导致保护误动或拒动,破坏系统稳定。隐性故障隐蔽性强,常规手段难察觉,其危害涉及系统稳定、设备安全与供电可靠性。研究隐性故障的定义、特征、危害、检测与预防方法,对提升电力系统安全水平、保障电力可靠供应具有关键作用。

## 1 继电保护隐性故障的定义与特征

### 1.1 定义

继电保护隐性故障作为电力系统保护环节的特殊隐患,由保护装置硬件缺陷、软件逻辑错误或人为配置失误引发,在系统日常常规运行中以潜在缺陷形式隐匿存在,常规监测手段难以及时察觉其踪迹。这类故障不会在系统正常运行时直接暴露,而是以潜在缺陷的形式长期潜伏于保护装置本体或二次回路系统中<sup>[1]</sup>。当电力系统发生故障、遭受外部扰动或运行方式发生显著变化时,隐性缺陷可能被激活,导致保护装置出现误动作或拒动作行为。误动作表现为非故障元件被错误切除,拒动作则导致故障元件无法及时隔离,两种情况均会破坏电力系统的安全稳定运行框架。

### 1.2 核心特征

隐蔽性是隐性故障最显著的特征。这类缺陷通常隐藏于保护装置的采样环节、逻辑判断模块或执行机构中,常规巡视检查和周期性试验难以有效识别。例如,采样回路中某个电阻元件的缓慢老化可能引起电压测量值微小偏移,这种变化在正常运行时不会触发报警,但在系统故障时可能导致定值比较错误。危害性体现在故障激活后的连锁反应。当隐性缺陷被触发后,保护装置的异常动作会直接改变系统拓扑结构,可能引发相邻保护装置的相继动作。这种多米诺骨牌效应往往导致故障范围

从单一元件扩展至整个区域电网,严重时甚至造成大面积停电事故。触发条件依赖性决定了隐性故障的激活具有特定场景要求。系统故障时的短路电流冲击、负荷突变引起的电压波动、操作过电压等动态过程,都可能成为激活隐性缺陷的关键因素。不同类型隐性缺陷对触发条件的敏感度存在差异,有些需要特定幅值的电流突变,有些则对电压相位变化更为敏感。这种条件依赖性使得隐性故障的识别和预防需要结合系统运行方式进行综合分析。

## 2 隐性故障的危害与影响

### 2.1 对系统稳定性的威胁

隐性故障对电力系统稳定运行构成严重威胁,主要体现在误动与拒动两种典型表现形式。误动情形下,非故障区域的保护装置因隐性缺陷在系统扰动时异常动作,错误切除正常运行线路或变压器等关键元件。这种非计划性停电会打破原有功率平衡,迫使剩余输电通道承担超额负荷,可能引发潮流转移过载。若相邻保护装置未能及时响应,故障范围将沿输电网络持续扩散,最终导致区域电网解列运行。拒动情形则表现为故障区域保护装置因隐性缺陷未能按预定逻辑动作,故障元件无法在第一时间隔离。持续的短路电流冲击会加速设备绝缘老化,甚至引发设备爆炸起火等物理损坏。当故障持续时间超过系统稳定极限,电压崩溃与频率失稳将接踵而至,严重时可能造成整个区域电网瘫痪,引发大面积停电事故。这两种极端情况均会破坏电力系统"三道防线"的协同防御机制,使电网运行状态从可控转向不可控。

### 2.2 对设备安全的损害

隐性故障引发的设备损害具有累积性和扩散性特征<sup>[2]</sup>。保护失效导致设备长期暴露于异常工况,例如变压器在区外故障时因后备保护拒动承受持续短路电流冲击,绕组绝缘材料在高温作用下加速劣化,缩短设备使用寿命。断

路器因保护误动频繁分合,触头烧蚀问题加剧,机械寿命快速消耗。更严重的是,单一设备隐性故障可能触发多米诺骨牌效应,当某级保护误动切除重要线路后,剩余输电通道潮流骤增,引发相邻线路过载跳闸。这种连锁跳闸过程会沿着电网拓扑结构快速蔓延,最终导致多个发电厂与负荷中心解列,形成系统性设备损坏风险。在此过程中,发电机组可能因甩负荷超速运行,汽轮机末级叶片承受过高应力;输电线路因热稳定极限被突破出现导线断股;变电站母线因短路电流超标发生变形损坏,各类设备均面临不可逆损伤风险。

### 2.3 对供电可靠性的影响

隐性故障导致的误动或拒动可能引发连锁停电事件,直接降低供电可靠性。保护系统隐性故障是造成用户平均停电时间延长的重要因素之一。由于隐性故障的隐蔽性和触发不确定性,其引发的停电事件往往突发性强、影响范围大,且恢复供电时间较长。特别是在负荷密集区域或重要用户供电线路上,此类故障可能导致长时间停电,对社会经济活动造成显著影响。这不仅会造成巨大的直接经济损失,还可能引发社会公共服务中断等一系列次生问题,甚至影响关键基础设施的正常运行,极大地削弱了用户对电力供应连续性的信心。因此,提升继电保护系统的可靠性是保障供电质量、维护社会正常运转的关键环节。

## 3 隐性故障的检测与诊断方法

### 3.1 静态检测方法

静态检测聚焦于保护装置在非运行状态下的固有特性分析。基于测量值相关性的分析方法通过同步采集多路电气量数据,构建输入输出变量间的数学关系模型。当采样值偏离理论计算值超过设定阈值时,可判定存在隐性缺陷。例如电压互感器二次回路断线时,电压采样值与电流采样值的相位关系将出现异常偏移,假设正常情况下两者相位差为90度,断线时可能变为60-70度或100-120度。测量回路完整性检查涵盖电流互感器变比校验、采样保持电路时序测试、模数转换精度验证等环节。通过注入标准测试信号,对比装置输出值与理论值差异,可定位采样环节的硬件故障。例如注入幅值为5安培的标准电流信号,若装置输出值与理论值偏差超过0.1-0.2安培,可判定存在采样故障。这类方法能有效识别元件老化、参数漂移等渐进性缺陷,但对间歇性故障的检测效果有限。测试过程中需确保装置处于完全断电状态,避免运行工况对测试结果产生干扰。

### 3.2 动态检测方法

动态检测着重捕捉保护装置在系统扰动下的响应特

性。保护装置动态特性监测通过记录动作时间、返回系数、制动特性曲线等参数,构建装置动态行为特征库。当实际动作值偏离典型曲线范围时,可判定存在逻辑判断或执行机构故障<sup>[3]</sup>。例如距离保护在区外故障时若动作时间超标,假设正常情况下动作时间为0.1-0.2秒,超标时可能达到0.3-0.5秒,可能预示阻抗元件特性发生偏移。实时信号对比技术将保护装置出口跳闸信号、告警信号与监控主站记录进行时间序列对齐分析。若存在信号时序错位或内容不一致,表明装置通信接口或逻辑处理单元存在异常。这类方法需要高精度时钟同步系统支持,确保不同节点时间标签误差在微秒级以内,一般要求时间标签误差不超过1-5微秒。动态检测能发现静态测试难以捕捉的瞬态故障,但对测试设备精度要求较高。

### 3.3 智能诊断方法

智能诊断方法通过机器学习算法实现故障模式智能识别。神经网络算法利用历史故障数据训练多层感知机模型,输入采样值、动作时间等特征参数,输出故障类型概率分布。经过充分训练的模型可预测元件剩余寿命,提前预警潜在故障风险。专家系统将保护装置原理、历史故障案例、维修策略等知识编码为规则库,通过正向推理机制模拟专家决策过程。当检测到异常特征时,系统自动匹配知识库规则,给出故障位置建议及处理方案。这类方法能有效处理复杂的非线性关系,但需要持续更新知识库以适应新型故障模式。智能诊断与传统检测方法形成互补,可显著提升隐性故障识别准确率。

### 3.4 多源信息融合检测方法

多源信息融合检测方法通过整合保护装置内部监测数据、系统运行状态信息及环境参数,构建综合判据模型。该方法利用数据融合算法(如D-S证据理论、模糊聚类等)对多维度信息进行关联分析,提高隐性故障识别的全面性和准确性。例如,将电气量采样值、装置自检信号、环境温湿度等参数融合处理,可有效区分真实故障与隐性缺陷引发的异常信号。多源信息融合能够弥补单一检测方法的局限性,尤其适用于复杂运行工况下隐性故障的早期诊断。这种融合策略能够弥补单一检测方法的局限性,尤其适用于复杂运行工况下隐性故障的早期诊断与精确定位。

## 4 隐性故障的预防与控制策略

### 4.1 风险评估与易损区域定位

风险评估通过系统梳理历史故障数据,挖掘隐性故障的时空分布规律。针对不同电压等级、设备类型及运行年限的保护装置,统计其误动、拒动事件的发生频次与故障类型,构建易损指数计算模型。该模型综合设备

老化程度、运行环境恶劣度、历史缺陷记录等因素,量化评估各装置的隐性故障风险等级<sup>[4]</sup>。通过分层分类分析,可识别出高风险变电站或输电线路段,为后续防控资源分配提供依据。易损区域定位则聚焦于具体保护装置的薄弱环节,通过分析误动记录中的动作时序、故障量特征及关联设备状态,锁定采样回路、逻辑判断模块或出口执行机构等易发故障部位。例如某变电站频繁出现距离保护误动,经分析发现故障时刻均伴随电压互感器二次回路瞬时断线,由此确定该区域电压采样环节为重点防控对象。这种精准定位方式避免了盲目排查,显著提升防控效率。

#### 4.2 监控体系完善

监控体系完善需构建多层次、全覆盖的在线监测网络。在关键变电站、枢纽线路及重要用户供电线路等节点部署智能监测装置,实时采集保护装置的采样值、动作信号、通信状态等运行数据。通过高速通信网络将数据汇聚至区域监控中心,利用数据清洗、特征提取等技术对原始信号进行预处理,消除噪声干扰。数据驱动的预警机制基于机器学习算法构建故障预测模型,将历史故障数据划分为正常状态与多种故障模式,训练得到能识别早期故障特征的分类器。当实时监测数据输入模型后,若输出结果偏离正常范围,系统自动触发预警流程,生成包含故障类型、发生概率及建议处置措施的预警报告。这种基于大数据的预警方式能提前数小时甚至数天发现隐性故障征兆,为运维人员争取处置时间。例如,通过该预警机制,可提前6-12小时发现某保护装置的隐性故障征兆,避免故障发生。

#### 4.3 预防性措施

提升设备抗干扰能力从硬件层面筑牢防护屏障。采用屏蔽电缆替代普通控制电缆,减少电磁辐射对采样信号的干扰;优化接地系统设计,降低地电位差引起的共模干扰;在装置电源输入端加装滤波器,抑制电源波动对逻辑电路的影响。强化定值管理通过引入自适应整定技术实现保护参数动态优化。该技术根据系统运行方式变化、负荷波动情况及设备状态信息,实时调整保护定值,确保在各种工况下均能可靠动作。例如线路负荷突增时,自适应距离保护可自动放宽动作阻抗边界,避免

因过负荷误动。定期维护与测试制定标准化检修流程,明确采样回路校验、逻辑功能测试、绝缘性能检测等关键环节的操作规范。通过周期性开展预防性试验,及时发现并更换老化元件,确保装置长期处于最佳运行状态。

#### 4.4 冗余配置与容错设计

冗余配置与容错设计通过硬件或功能冗余提升保护系统的可靠性。常见的冗余方式包括双重化配置、三取二逻辑判断等,当单一装置因隐性故障失效时,冗余系统可接管保护功能,避免误动或拒动。容错设计则侧重于在保护装置内部构建自检与自恢复机制,例如通过多重校验逻辑防止单一元件故障导致整体功能丧失<sup>[5]</sup>。在具体应用中,需根据保护对象的重要性与成本效益进行优化设计,例如在关键枢纽变电站采用更高等级的冗余架构。还应建立完善的冗余系统切换测试与状态评估机制,定期验证备用回路的可用性,确保在主系统隐性故障被触发时,冗余设计能够切实发挥作用。冗余与容错技术的应用需结合经济性与可靠性要求,通常适用于关键节点或高风险区域的保护系统。

#### 结束语

电力系统继电保护隐性故障的检测、诊断与预防控制是保障电网安全稳定运行的重要工作。通过多种检测诊断方法可及时发现隐性故障,采取风险评估、完善监控体系、预防性措施及冗余配置等策略能有效预防和控制故障发生。未来需持续探索创新,提升技术水平,以更好地应对隐性故障带来的挑战,确保电力系统可靠运行。

#### 参考文献

- [1]林钊毅.基于信息融合的电力系统继电保护隐性故障检测技术[J].电气技术与经济,2025(7):151-153,156.
- [2]杜永刚,赵丽娟,邓忻依.电力系统继电保护隐性故障的研究[J].百科论坛电子杂志,2025(1):28-30.
- [3]谢先进.继电保护系统隐性故障在线监视与诊断技术研究[J].电气技术与经济,2024(10):327-330.
- [4]杨鹏杰,张克宇,徐宇,等.继电保护和安全稳定控制系统隐性故障分析[J].电气技术与经济,2023(7):294,306.
- [5]陆凌峰,金士杰,沈晓东.电力系统继电保护的隐性故障分析[J].百科论坛电子杂志,2025(20):67-69.