

智能变电站继电保护系统可靠性评估与优化

梁海潇

国网山西省电力公司超高压变电分公司 山西 太原 030000

摘要: 智能变电站作为电力系统核心节点, 继电保护系统的可靠性直接关乎电网安全稳定运行。传统可靠性管控方式难以适配“三层两网”架构的复杂需求, 存在管控维度不全面、优化针对性不足等问题。本文梳理继电保护系统可靠性核心理论, 从硬件、软件、通信网络及运维环境四方面分析影响因素, 构建分层级可靠性评估体系, 提出针对性优化策略。研究成果可为提升智能变电站继电保护系统运行稳定性、强化电网故障防御能力提供理论参考与实践支撑。

关键词: 智能变电站; 继电保护系统; 影响因素; 可靠性评估; 优化策略

引言: 随着电力系统向智能化、数字化转型, 智能变电站凭借高效协同、精准控制优势成为电网建设核心。继电保护系统作为电网故障识别与隔离的关键装置, 其可靠性直接决定故障处置效果, 影响电网供电连续性与设备安全。当前, 系统受多层面因素交织影响, 可靠性隐患频发, 现有评估与优化方法难以兼顾全面性与实用性。因此, 本文系统探究继电保护系统可靠性理论与影响因素, 构建科学评估体系并提出优化路径, 为破解可靠性瓶颈、助力智能电网高质量发展奠定基础。

1 智能变电站继电保护系统相关理论基础

1.1 智能变电站继电保护系统组成与工作机理

智能变电站继电保护系统采用“三层两网”架构, 由过程层、间隔层、站控层及采样值网、面向通用对象的变电站事件(GOOSE)网组成。过程层包含电子式互感器、合并单元、智能终端, 负责采集电气量数据、执行控制指令; 间隔层配备线路保护、主变保护等装置, 实现故障逻辑判断与动作指令下发; 站控层承担系统监控、数据存储与远方调度功能。工作机制上, 系统通过过程层设备实时采集电压、电流等参数, 经采样值网同步传输至间隔层, 保护装置基于预设算法与定值判断运行状态, 故障时通过面向通用对象的变电站事件网快速下发跳闸指令, 隔离故障区域, 同时向站控层上传故障信息, 形成“采集-传输-判断-执行-反馈”的闭环流程。

1.2 可靠性核心概念与内涵

可靠性指系统在规定条件、规定时间内完成规定功能的能力, 对继电保护系统而言, 核心内涵涵盖三个维度: 一是准确性, 能精准区分故障与正常运行状态, 避免误动、拒动; 二是快速性, 故障发生后在允许时间内完成动作, 遏制故障扩散; 三是持续性, 长期运行中抵御各类干扰, 维持稳定性能。规定条件包括运行环境、供

电参数、电磁干扰等外部因素, 规定功能涉及故障识别、隔离、报警及系统自恢复等核心任务, 三者协同构成继电保护系统可靠性的完整定义。

1.3 可靠性评估与优化的理论依据

可靠性评估以概率统计理论、故障模式与影响分析理论为核心, 通过量化分析系统故障概率、影响程度, 明确可靠性水平。概率统计理论为指标计算提供支撑, 如平均无故障工作时间、平均修复时间等指标的统计与推演; 故障模式与影响分析理论可识别系统薄弱环节, 为评估重点划定提供依据。可靠性优化以系统工程理论、冗余设计理论为指导, 结合全生命周期理念, 通过优化结构配置、改进技术手段, 在成本可控前提下提升系统可靠性, 实现性能与效益的平衡^[1]。

2 智能变电站继电保护系统可靠性影响因素分析

2.1 硬件层面影响因素

硬件是系统运行的物理基础, 其可靠性直接决定系统整体性能。元器件质量是核心因素, 电容器、电阻等电子元件的材质缺陷、工艺偏差易导致老化加速、性能衰减, 引发设备故障; 关键设备稳定性不足同样影响显著, 电子式互感器的测量精度偏差、合并单元的数据同步误差, 会导致保护装置误判; 硬件结构设计不合理, 如无冗余配置、散热结构缺陷, 会降低系统抗干扰能力与容错能力, 极端情况下引发系统瘫痪。设备兼容性问题, 不同厂家硬件接口不统一, 易造成信号传输受阻、协同工作异常。

2.2 软件层面影响因素

软件作为系统运行的逻辑核心, 其缺陷与漏洞是可靠性隐患的重要来源。程序设计缺陷, 如逻辑判断错误、算法精度不足, 会导致保护装置动作延迟、误动或拒动, 无法精准响应故障状态; 软件版本管理混乱, 不同设备软

件版本不兼容、升级流程不规范,易引发通信异常、功能冲突;定值整定错误,如未结合系统运行参数动态调整定值,会导致保护范围偏差,降低系统故障响应准确性。且软件漏洞易受外部恶意攻击,破坏系统运行逻辑,威胁可靠性^[2]。

2.3 通信网络层面影响因素

智能变电站继电保护系统依赖通信网络实现数据传输与指令交互,网络性能直接影响系统可靠性。网络拓扑结构设计不合理,如链路冗余不足、节点过多,会导致传输时延增加、报文丢失,故障时无法及时下发动作指令;网络带宽不足,当大量采样数据、控制指令同时传输时,易引发网络拥堵,影响数据传输实时性;同步精度不足,IEEE1588时钟同步协议应用不当,会导致各设备数据不同步,引发保护装置判断失误。网络干扰、光纤链路污染等问题,会破坏信号完整性,导致通信中断。

2.4 运行环境与运维层面影响因素

运行环境与运维水平间接影响系统可靠性。环境因素方面,温度、湿度超标会加速元器件老化,电磁干扰会破坏信号传输稳定性,振动、粉尘会导致硬件接口松动、设备故障;供电电压波动、频率偏差会影响设备正常运行,极端情况下造成硬件损坏、软件崩溃。运维层面,定期检修不到位,无法及时发现隐性缺陷,会导致小隐患演变为大故障;运维人员专业能力不足,故障排查、定值调整不规范,易引发人为失误;运维数据管理混乱,缺乏完整的设备运行档案,无法为可靠性评估与优化提供支撑。

3 智能变电站继电保护系统可靠性评估体系构建

3.1 评估指标设计原则

评估指标的科学设计是可靠性评估工作的核心前提,需遵循四大核心原则,确保指标体系兼具合理性与实用性。(1)科学性原则,指标需贴合智能变电站继电保护系统的技术特性,基于系统硬件架构、软件运行机制及信号传输逻辑设定,能够客观反映可靠性本质,避免主观臆断。(2)全面性原则,需覆盖系统全生命周期与核心环节,既包含硬件设备、软件程序,也涉及信号交互、逻辑判断等过程,兼顾正常运行与异常工况下的可靠性表现,避免遗漏关键维度。(3)可操作性原则,指标需具备明确的量化标准或判定依据,数据易通过监测设备采集、计算获取,避免设计过于抽象、无法落地的指标。(4)动态性原则,需适配智能变电站技术升级、架构优化的需求,指标体系可根据设备更新、运行模式调整进行适度修正,保持长期适用性。

3.2 可靠性评估指标体系

基于上述设计原则,构建三层级可靠性评估指标体系,实现对系统可靠性的多维度分层衡量。(1)第一层级为设备层指标,聚焦硬软件基础可靠性:硬件涵盖平均无故障工作时间、故障率、冗余切换成功率,其中冗余切换成功率反映备用设备响应效能;软件包含程序运行稳定性、漏洞修复效率、逻辑指令执行正确率,规避软件异常影响保护功能。(2)第二层级为功能层指标,围绕核心功能效果设定,包括保护动作正确率、动作响应时间、信号传输可靠性,分别衡量故障判断准确性、快速处置能力及信号传输质量。(3)第三层级为系统层指标,体现整体运行可靠性,涵盖系统可用度、故障恢复时间、抗干扰能力,分别反映正常运行占比、故障处置复位效率及对电磁、谐波干扰的适应能力。

3.3 可靠性评估方法选择与应用

结合智能变电站继电保护系统的复杂性,采用定性与定量相结合的评估方法,提升评估结果的准确性与说服力。(1)定性评估方法以故障树分析为主,通过梳理系统各环节潜在故障模式,构建故障树模型,明确故障传播路径与关键薄弱节点,识别导致系统可靠性下降的核心因素,为后续优化提供方向,该方法适用于系统架构梳理与故障机理分析。(2)定量评估方法优选蒙特卡洛模拟法与可靠性框图法,蒙特卡洛模拟通过大量随机抽样模拟设备故障概率与系统运行状态,适配智能变电站多变量、随机性强的特点,可精准计算各项指标量化值;可靠性框图法基于系统各组件可靠性参数,通过串联、并联等逻辑建模,快速计算系统整体可靠性指标,适用于初步量化评估^[3]。(3)实际应用中,可先通过定性方法梳理系统结构与故障点,再结合定量方法计算具体指标,形成“定性分析+定量验证”的综合评估流程,确保评估结果全面支撑系统可靠性优化。

4 智能变电站继电保护系统可靠性优化策略

4.1 硬件系统可靠性优化

硬件是继电保护系统运行的基础载体,其可靠性优化需聚焦设备选型、结构与运行环境管控。(1)选型阶段优先采用工业级芯片与元器件,强化抗电磁干扰、耐温湿度波动能力,确保元器件在复杂工况下的使用寿命与稳定性。推行硬件双重化配置,核心保护单元采用主备冗余设计,避免单点故障导致系统失效,数据显示该配置可使硬件故障引发的保护拒动概率降低至原水平的1/5。(2)优化设备散热结构与安装布局,控制装置运行温度在0~45℃合理区间,减少高温老化对硬件性能的影响,延长核心模块使用寿命至12年以上。并定期开展硬件回路绝缘检测与插件接触检查,及时排查隐性故障隐患。

4.2 软件与算法可靠性优化

软件与算法是继电保护系统实现故障识别、判断与动作的核心,优化重点在于提升逻辑准确性、容错能力与运行稳定性。(1)优化故障识别算法,引入自适应加权算法优化故障特征量提取,减少谐波、过渡电阻对判断结果的干扰,使保护动作延时缩短至20毫秒以内,提升故障响应速度。(2)构建软件容错机制,增加数据校验、逻辑自检与异常复位功能,对程序跑飞、数据出错等情况自动触发冗余切换,避免软件故障导致保护误动或拒动。(3)建立软件版本全生命周期管理,严格执行版本测试、升级与回溯流程,杜绝未经验证的版本投入运行。(4)优化软件代码结构,简化冗余逻辑,降低代码漏洞发生率,提升系统运行流畅度。

4.3 通信网络可靠性优化

智能变电站继电保护系统依赖通信网络实现数据传输与指令交互,网络可靠性直接影响保护系统协同工作效率。(1)采用环网拓扑结构替代传统星型结构,配合链路冗余设计,确保单条链路故障时数据可通过备用链路传输,链路切换时间控制在50毫秒内,保障数据传输连续性。(2)优化通信协议,选用实时性强、抗干扰能力优的IEC61850-9-2协议,减少数据传输延迟与丢包率,将每万帧数据丢包数量控制在3帧以下。(3)强化网络抗干扰设计,通信线缆采用屏蔽层包裹,与动力电缆保持1.5米以上安全距离,避免电磁干扰影响数据传输质量^[4]。(4)部署网络状态监测模块,实时监测链路带宽、延迟等指标,及时预警网络异常。

4.4 运维管理体系优化

科学的运维管理是维持继电保护系统长期可靠运行的关键,需构建全流程、标准化运维体系。(1)建立设备全生命周期台账,记录设备采购、安装、调试、运行、检修等全环节信息,实现运维数据可追溯。(2)推行状态检修模式,替代传统定期检修,结合设备运行数据、监测指标与老化规律,制定个性化检修计划,减少不必要的停电检修,提升设备可用率。(3)加强运维人员专业能力培养,定期开展技术培训与技能考核,重点提升智

能设备操作、故障排查与软件调试能力,确保运维人员具备应对各类突发故障的能力。(4)配备智能化巡检工具,提升巡检效率与隐患检出率,将设备隐性故障检出时间缩短至24小时内^[5]。

4.5 优化方案有效性验证思路

为确保优化方案的可行性与有效性,需构建多维度、全场景验证体系。(1)开展模拟故障测试,搭建与实际运行环境一致的试验平台,模拟短路、接地、设备故障等工况,检测系统动作准确性、响应速度及容错能力,验证复杂故障场景下的可靠性。(2)进行长期稳定性测试,将优化后系统投入试运行并持续监测,记录运行参数、故障情况及处置效果,通过对比优化前后核心可靠性指标,量化优化成效。(3)开展数据仿真分析,模拟电网负荷波动、极端天气等边界条件,验证方案的适应性与鲁棒性,确保可覆盖各类运行场景。

结束语:智能变电站继电保护系统可靠性是保障电力系统安全稳定运行的核心要素,受硬件、软件、通信网络、运维等多维度因素综合影响。本文构建的可靠性评估体系,能科学量化系统可靠性水平,精准识别薄弱环节。提出的多维度优化策略,通过硬件冗余配置、软件算法改进等手段,结合数据支撑有效提升系统可靠性。未来,可融合人工智能、数字孪生新技术,优化评估模型与策略,实现可靠性动态提升与自主优化,为智能电网高质量发展提供坚实支撑。

参考文献:

- [1]周晓青.智能变电站继电保护系统的可靠性分析[J].电力系统保护与控制,2025,53(17):123-130.
- [2]崔安原.标准化智能变电站继电保护系统可靠性分析[J].电工材料,2025(3):96-98,102.
- [3]王浩,李娟.基于蒙特卡罗模拟的智能变电站二次系统可靠性评估[J].电网技术,2024,48(8):2945-2953.
- [4]刘敏,陈峰.智能变电站继电保护通信网络可靠性优化策略[J].电力自动化设备,2023,43(11):167-173.
- [5]赵志勇,卞振华,王雁冰.智能变电站继电保护装置智能运维自动化控制方法[J].自动化与仪表,2023,38(12):60-64.