

复杂故障下继电保护装置 优化与可靠性保障探究

管俊飞

(江苏世昌电力工程有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要 随着电力系统结构日趋复杂和自动化程度不断提高, 继电保护装置面临的工作环境日益恶劣, 复杂故障的频繁发生对继电保护装置的性能和可靠性提出了更高要求。本文从全生命周期质量管理、日常维护巡检等方面构建可靠性保障体系, 通过自适应保护算法、分层分布式架构、状态监测诊断等技术的综合应用, 以期显著提升继电保护装置应对复杂故障的适应能力和可靠性水平提供参考, 进而为电网安全稳定运行提供坚实的保障。

关键词 复杂故障; 继电保护装置; 自适应保护算法; 分层分布式保护体系; 可靠性保障体系

中图分类号: TM774

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.35.011

0 引言

继电保护作为电力系统安全稳定运行的“守护神”, 肩负着及时发现和隔离各类故障的重任。然而随着新能源的大规模接入、电网互联规模的扩大以及负荷性质的多样化, 电力系统呈现出结构日趋复杂、环境更加恶劣的特点。频繁出现的雷电、污秽等外部干扰以及设备自身的绝缘老化、机械磨损等因素引发的复杂故障, 对继电保护装置的适应性和可靠性提出了严峻考验。为确保继电保护装置在复杂恶劣环境下正常运行, 必须开展系统性的优化设计和可靠性保障探究, 这对于提高电网本质安全水平和供电可靠性具有重要意义。

1 复杂故障环境下继电保护面临的挑战与问题

1.1 复杂故障类型多样, 传统保护配置难以适应

电力系统中的复杂故障形态远比传统单一故障更复杂, 其多样性不仅表现在故障类型上, 还体现在其时空特性与物理机制上。从故障持续时间看, 复杂故障包括毫秒级的瞬时性故障和持续性故障; 从涉及相数看, 既有单相故障, 也有复杂的多相故障; 从故障性质看, 既有金属性短路, 也有高阻抗故障和间歇性故障。这些多样性使得针对传统故障设计的保护装置在面对复杂故障时往往表现出明显的不适应性, 尤为突出的是复杂故障通常伴随着非线性现象, 如电弧放电、导体饱和等。

在电弧故障过程中, 故障阻抗呈现出强烈的非线性和时变特性, 故障电流波形严重畸变, 包含大量奇次和偶次谐波成分^[1]。这种非线性特性使得传统基于基波分量或简单特征量分析的保护算法准确性大大降

低, 容易产生“边界效应”导致保护装置误动或拒动。

1.2 故障传播速度加快, 实时决策能力亟待提升

现代电力系统正经历前所未有的变革, 规模不断扩大且结构日趋复杂, 联系愈发紧密, 这些变化导致故障传播速度显著加快, 特高压、超高压输电通道的广泛建设使电网各区域间的“电气距离”大幅缩短^[2]。在传统电网中故障电流和电压扰动需要几个电气周期才能传播至相邻区域, 而在现代超高压电网中, 故障波可在毫秒量级内横跨数百公里。

电力电子装置的广泛接入为故障高频分量提供了快速传播通道, 逆变器、变流器等电力电子设备本身响应速度快, 其内部控制系统能够在微秒级对系统扰动作出反应, 并通过开关器件的高频动作将扰动放大和传播。当这些设备集中接入电网特定区域时, 可能形成“故障扰动放大器”, 使故障影响范围迅速扩大。如某风电场集中接入区域发生单相接地故障, 原本可控的故障通过多台变流器的相互作用, 在百毫秒内扩展为多点故障, 最终导致大面积风机脱网。

1.3 设备老化失效风险增大, 可靠性保障机制有待健全

继电保护设备作为电力系统安全运行的重要保障, 其可靠性状况直接影响整个电网的安全稳定, 随着电网建设的快速发展, 大量保护设备已服役多年, 设备老化问题日渐凸显。目前, 我国电网中有相当数量的继电保护装置运行时间较长, 不少变电站仍在使用较早早期的微机保护装置, 这些设备不仅在技术标准上相对滞后。加上其核心元件如电容器、继电器触点和光

耦等已经进入使用寿命的后期阶段,设备失效的可能性明显增加。这种情况下加强对老旧保护设备的管理和维护尤为必要,以确保电网运行的安全可靠。

复杂故障环境进一步加剧了设备老化进程,与标准故障相比,复杂故障通常伴随更为复杂的电磁暂态过程和能量释放,对保护装置产生更为严峻的考验。频繁的电压波动和电流冲击会加速保护装置内部元器件的疲劳损伤,电弧故障产生的高频干扰信号可能穿透传统电磁屏蔽,干扰保护装置的正常运行,系统谐振和铁磁谐振引起的持续过电压则可能导致保护装置供电回路和取样回路的绝缘加速老化^[3]。

2 继电保护装置优化设计与策略研究

2.1 自适应保护算法研究,提高对复杂故障的识别与判断能力

随着电力系统日益复杂,传统保护算法应对复杂故障时显得力不从心,这些固定阈值设置的方法往往在复杂故障面前陷入两难:定值设得太灵敏容易引起误动作,设得太迟钝又可能导致拒动。实际运行中电网工况千变万化,故障呈现出多样化特点,单一判据难以应对所有情况,特别是在电弧故障、高阻故障等非线性故障情形下,保护装置的判断变得尤为困难,这种“一刀切”的定值保护模式,已经难以满足现代电网的安全运行要求。

针对复杂故障的复杂多变特点,传统的以固定阈值为基础的保护算法已难以胜任,为准确识别复杂故障特征,必须赋予继电保护装置一定的自适应能力。一方面可通过提取电压、电流波形中的多种特征量,结合先进的信号处理和模式识别技术,构建复杂故障的多维度特征模型,利用模糊逻辑、人工神经网络等智能算法,实现对复杂故障类型的自适应识别和状态评估。另一方面针对复杂故障的随机性和不确定性可引入自学习机制,通过对海量历史故障数据的挖掘分析,总结复杂故障发生的规律,形成知识库和案例库供实时故障诊断时调用,通过算法参数的动态优化,不断提高继电保护装置的自适应水平。

2.2 分层分布式保护体系构建,增强系统冗余性与自愈性

当前电力系统保护面临的主要问题之一是传统集中式架构的局限性,这种架构下,各保护单元往往独立工作,信息交流有限且缺乏整体协同能力。分层分布式保护体系通过设置多个层级的保护单元,构建起更为灵活的保护网络,这种架构将保护功能按照责任范围划分为站内层、区域层和系统层,各层之间既相对独立又相互配合。站内层处理本站设备和直连线路

的保护,反应最为迅速,区域层负责对多个相关站点的整体保护,能够基于更全面的信息作出判断,系统层则从全局角度监控电网运行状态处理跨区域协调问题。这种分层架构的一个主要优势在于信息共享机制的建立,通过高速通信网络各保护单元不再是信息孤岛,而是能够获取更为全面的系统状态数据。如当线路一侧检测到可能故障时,可立即与线路另一侧共享数据,通过比对双端信息提高判断的准确性,这种信息共享机制使得保护系统能够从更宏观的角度分析故障,减少误判概率。

冗余性是分层分布式保护的又一优势,当某一层级的保护装置发生异常时,其他层级能够及时接替功能避免形成保护盲区。如母线保护装置故障时,区域保护可自动承担其职责,虽然动作可能略慢但仍能确保基本保护功能完整性,这种功能冗余设计大大降低了单点故障的风险,提升了整体系统的可靠性^[4]。在工程实现上分层保护体系采用模块化设计思路,不同保护功能被划分为相对独立的功能模块,可根据实际需求灵活组合,这不但简化了系统复杂度,也便于日后维护和升级,使保护系统能够更好地适应电网的不断变化。

2.3 状态监测与诊断技术应用,实现设备状态的在线评估与预警

传统继电保护装置运行维护主要依赖定期校验和例行检修,这种“时间基准”维护策略存在明显弊端,一方面,固定周期的检修可能导致过度维护,增加不必要的人力物力投入。另一方面,装置实际劣化速度往往因运行环境和负载条件不同而差异巨大,固定周期难以适应这种差异,容易出现“维护过度”与“维护不足”并存的情况。更为关键的是,定期检修难以发现装置运行过程中的突发性故障,装置可能在两次检修间隔期出现关键性能下降而未被及时发现,埋下安全隐患。

状态监测与诊断技术通过实时采集继电保护装置运行状态数据,实现对设备健康状况的在线评估,使维护决策从“时间驱动”转向“状态驱动”,有效提升设备可靠性。核心理念是将传统的“被动等待故障”转变为“主动预知风险”,通过对设备状态的持续监测,及早发现潜在问题,在故障发生前采取干预措施实现预防性维护。状态监测系统的构建需从硬件入手,硬件层面需在继电保护装置的关键部位布置各类传感器网络,形成全方位的监测体系。温度传感器可监测装置各功能模块的发热情况及时发现异常发热点,湿度传感器可监控装置所处环境的潮湿程度评估腐蚀风险^[5]。电源质量监测模块可记录供电电压波动、电源杂波等

数据,判断电源系统健康状况,通信质量监测则可实时评估保护装置与外部系统的数据传输质量,发现潜在通信故障。

3 可靠性保障体系建设与管理

3.1 全生命周期质量管理,确保继电保护装置的可靠性基础

继电保护装置作为电力系统的“安全卫士”,其质量管理必须贯穿全生命周期各环节,才能有效应对复杂故障环境下的严峻挑战。全生命周期质量管理不仅关注设备本身的性能指标,更注重建立系统性的管理机制,确保从源头到退役的各环节无缝衔接从而形成质量闭环。

设计阶段是保证继电保护可靠性的关键起点,针对复杂故障环境的特殊性,设计必须充分考虑各类应力因素对装置的影响。电磁兼容性设计尤为重要,必须确保装置在强电磁干扰环境下仍能稳定运行。如通过合理布局印制电路板的信号走线,增加关键信号线的屏蔽层,采用数字隔离器替代传统光耦,可大幅提高抗干扰能力。

3.2 定期巡检与测试制度完善,及时发现和消除可靠性隐患

为及时发现和消除继电保护装置运行过程中出现的可靠性隐患,必须建立健全定期巡检和测试制度,巡检内容不仅包括常规的外观检查、清洁、联接紧固等,还应涵盖环境监测、运行工况记录等。测试则应针对保护功能的完整性、逻辑关系的正确性、定值的适用性等开展,既要进行常规的保护试验,也要模拟复杂故障工况进行专项测试。巡检和测试过程中如发现缺陷或异常,必须及时分析原因,制定整改措施,对于暂时不能消除的缺陷要评估其影响程度,必要时应用退出运行或采取应急措施防止问题扩大,定期巡检与测试是做好状态维护、保证继电保护可靠运行的有效手段。

巡检频率和深度应基于风险评估进行差异化设置,不同类型、不同重要程度、不同运行年限的保护装置,其巡检要求应有所区别。可采用“分级分类”的巡检策略:对于关键线路和设备的保护装置,或处于恶劣环境的装置,应提高巡检频率增加检查深度,而对于新投运的标准环境下的一般装置,则可适当降低要求。与此同时引入“动态调整”机制,根据装置的实际状态和历史表现,动态调整巡检计划。如某变电站的一台保护装置在近期多次报告自诊断异常,即应临时提高该装置的巡检频率直至问题解决,这种基于风险和状态的差异化巡检策略,既能提高整体效率,又能确保关键环节不放松。

3.3 应急处置与协同机制建立,最大限度减少故障的影响与损失

在复杂电网环境下,尽管可通过优化设计和加强管理来提高继电保护装置的可靠性,但仍不可避免地会出现各类故障,因此还必须建立完善的应急处置和协同机制。一方面要制定针对性的应急预案,明确故障情况下的处置流程和责任分工,储备必要的备品备件和应急器材,组织相关人员开展应急演练。另一方面要强化与调度、变电、线路等部门的横向协同,建立信息共享和联动机制,发生继电保护故障时调度要及时调整运行方式,变电和线路部门要做好设备巡视和就地处置,各方密切配合尽快恢复正常运行秩序。

物资储备是应急处置的物质保障,根据保护装置的类型和重要性,合理配置备品备件和应急器材,确保关键时刻“有备可用”。一方面对于核心保护装置,应配备足量的同型号备件,必要时甚至配置整机备用,另一方面对于通用性强的部件,如电源模块、通信板卡等,可实行区域共享机制从而提高资源利用效率。除常规备件外,还应配备应急发电设备、便携式保护测试仪等特殊器材,以应对极端情况,物资储备点的设置应兼顾覆盖面和响应速度,重要地区可设立专门的应急物资库,确保关键物资能够在最短时间内调配到位。

4 结束语

面对电网复杂故障环境日益严峻的挑战,继电保护装置优化设计与可靠性保障必须双管齐下。技术层面需重点发展自适应保护算法、分层分布式保护架构和状态监测诊断技术,提高对复杂故障的识别处理能力。管理层面应建立全生命周期质量管理、完善定期巡测试验制度、健全应急处置协同机制。这是一项系统工程,需多方协作,构建技术先进与管理规范并重的保障体系,为电网安全稳定运行筑牢防线。

参考文献:

- [1] 康睿智.复杂故障下继电保护装置优化与可靠性分析[J].机电产品开发与创新,2025(03):132-134.
- [2] 刘科.基于大数据的继电保护系统性能评估与优化[J].电脑校园,2025(06):166-168.
- [3] 许双斌.继电保护装置可靠性的测试及提升措施[J].光源与照明,2023(01):174-176.
- [4] 李智伟.电力系统中的电气二次设备及继电保护研究[J].新潮电子,2024(11):109-111.
- [5] 蔡永阳.基于信息融合的智能变电站继电保护功能优化研究[J].科学技术创新,2025(05):53-56.