

智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术分析

胡蝶, 徐金晖

(国网湖北省电力有限公司黄冈供电公司, 湖北 黄冈 438000)

摘要 随着电力系统向智能化、数字化方向深度转型, 智能变电站已成为现代电力网络的核心组成部分, 其继电保护系统的可靠性直接决定了电力系统的安全稳定运行。二次回路作为继电保护系统的“神经网络”, 负责信号传输、指令执行等关键功能, 其故障易导致保护装置误动、拒动, 引发大面积停电等严重事故。本文基于智能变电站二次回路的数字化、网络化特性, 深入分析二次回路常见故障类型及成因, 系统探讨当前主流故障诊断技术, 包括传统诊断技术的优化应用与新型智能诊断技术的创新发展, 并结合实际应用场景对各类技术的优势与局限性进行对比研究, 针对现有诊断技术存在的不足, 提出未来技术发展方向, 以期提升智能变电站继电保护二次回路故障诊断的准确性、及时性和智能化水平提供参考。

关键词 智能变电站; 继电保护; 二次回路; 故障诊断; 数字化技术

中图分类号: TM63

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.013

0 引言

电力系统进行智能化转型之际, 智能变电站所具备的信息交互便捷、运行效率高、运维成本低等优势已成为电网建设主体。继电保护系统是保障设备安全、阻止故障蔓延的核心屏障, 二次回路成为其与一次设备的连接桥梁, 承担信号采集、指令传输等关键职责。与传统二次回路相比, 智能变电站二次回路通过光纤通信实现数字化传送, 但结构愈发复杂, 包含电子元件以及通信协议等多个方面, 故障更具隐蔽多元性, 诊断难度明显增大。二次回路故障引发继电保护异常事件屡有发生, 如光纤接头松动造成主变误跳闸、绝缘破损引起接地故障等, 极大地危害电网安全^[1]。深入剖析二次回路故障诊断技术, 构建高效精准诊断体系, 对增强继电保护可靠性、保证电网稳定运行意义重大。本文以故障类型分析为切入点, 归纳主流诊断技术, 研究其应用状况与发展趋势, 为相关研究与工程实践提供借鉴。

1 智能变电站继电保护二次回路概述及常见故障类型

1.1 二次回路结构与特性

智能变电站继电保护二次回路以 IEC 61850 标准作为核心, 实现设备间的互通互联和信息共享, 其结

构主要由采样回路、控制回路、通信回路这三个模块构成。采样回路通过合并单元将一次设备模拟量信号变为数字量信号, 传递到保护装置; 控制回路履行接收保护装置跳闸、合闸指令的任务, 驱动一个设备实施相应行动; 通信回路采用的是光纤以太网, 实现合并单元、保护装置、智能终端等设备的数字化通信互通^[2]。与传统二次回路相比, 智能变电站二次回路呈现以下特性: (1) 信号数字化, 避免模拟信号在传输期间出现衰减与干扰。(2) 连接实现网络化, 削减了电缆用量, 简化了线路敷设难度。(3) 功能综合化, 多种保护功能通过同一套二次回路达成, 增强了系统的灵活性。数字化、网络化的特点使二次回路故障不再只局限于传统的线路短路、接地之类的硬件故障, 增加了通信协议异常、软件缺陷、数据传输延迟等软件与通信方面的故障, 进一步加大了故障诊断难度。

1.2 常见故障类型及成因

参照运行实际, 智能变电站二次回路常见故障可归为四类: (1) 硬件回路故障, 包含线路与元件故障。线路故障主要为电缆绝缘破损、光纤接头污染松动、线路断路, 其中光纤接头故障高发, 由施工不规范、运维不当、环境湿度过大导致; 元件故障涉及合并单元、智能终端等损坏, 成因包括设备质量缺陷、长期过载运行及电磁干扰。(2) 通信故障, 因二次回路高度依

作者简介: 胡蝶 (1994-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 继电保护 / 电气工程及其自动化。

赖数字化通信成为主要故障类型,包含协议不兼容、报文丢失延迟、网络拥堵。协议不兼容源于不同厂家设备对 IEC 61850 标准落实差异,报文问题由光纤链路、交换机故障及传输距离过长引发;网络拥堵多见于倒闸操作等数据高峰场景。(3)软件故障,涉及保护装置、合并单元等软件系统,表现为程序漏洞、配置错误、数据异常。程序漏洞易致保护误动,配置错误多由人工操作失误引发,数据异常会使保护装置无法精准识别故障。(4)电磁干扰故障,变电站内高压设备等干扰源强度超阈值时,会导致合并单元采样失真、光纤通信报文传输异常等设备异常,成因与电磁环境复杂、设备抗干扰设计不足相关^[3]。

2 智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术

2.1 传统故障诊断技术的优化应用

传统二次回路故障诊断技术主要凭借人工经验与常规检测工具,在智能变电站情景里,与数字化技术相结合,提升了诊断效率与准确性,发挥了重要功效。

2.1.1 万用表与示波器检测技术

万用表能对二次回路电缆的通断、绝缘电阻进行检测,以及设备电源的电压与电流等参量,检查线路是否短路、接地以及电源有无故障等问题,在智能变电站中,万用表常同数字化监测数据联合运用,对实测参数同后台监控系统显示参数做对比,迅速锁定故障位置。示波器可用来检测合并单元输出的数字信号波形以及通信报文波形,检测信号有无失真、延迟等状况,为通信故障与采样故障的诊断提供依据,该技术操作简单、成本低廉,适用于初步排查故障,对复杂故障的诊断准确度不高。

2.1.2 绝缘电阻测试技术

绝缘电阻测验是诊断二次回路绝缘故障的惯用方法,借助摇表等设备测定二次回路线路对地、线路间绝缘电阻值,若电阻值达不到规定阈值,那就说明有绝缘破损之类的故障,针对智能变电站二次回路数字化的特性,目前研发出了智能绝缘电阻测试仪,可以完成测试数据的数字化记录与远程传递,有利于二次检修人员对测试结果做分析对比,同时防止了传统测试方式中人工读数的差错。

2.1.3 信号注入测试技术

该技术给二次回路添加模拟信号,观测保护装置、智能终端等设备的响应情形,检测回路状况是否正常,在智能变电站中,信号注入测试技术由传统模拟信号注入进阶为数字信号注入,运用专门的数字信号发生器,向合并单元或保护装置输入符合 IEC 61850 标准的数字报文,模拟多样故障状态中的信号,然后验证

二次回路信号传输链路及设备功能正常与否,对比传统模拟信号注入,数字信号注入更契合智能变电站的信号传输特征,诊断结论更精准^[4]。

2.2 新型智能诊断技术

伴随人工智能、大数据、物联网等技术成长,智能变电站二次回路故障诊断采用一批新型智能诊断技术,大幅提高了诊断智能化水平。

2.2.1 依托故障树及专家系统的诊断技术

故障树诊断技术凭借构建二次回路故障树,把顶事件(如保护装置误动)拆解成中间事件(如通信故障、采样故障)与底事件(如光纤接头松动、合并单元故障),运用逻辑推理判定故障缘由,专家系统会把二次检修人员的诊断经验变为规则库,结合二次回路实时运行的相关数据,经由推理机实现规则库匹配,完成故障的自动诊断。在智能变电站中,故障树与专家系统相融合,可以实现复杂故障的分层诊断,若保护装置产生拒动状况时,系统先借故障树确定可能故障模块,然后借助专家系统进一步查找具体故障点,此技术具备诊断逻辑清楚、可解释性较强的优点,构建规则库要靠专家经验,针对新型故障的适应性欠佳。

2.2.2 基于机器学习的诊断技术

机器学习技术根据大量二次回路故障数据进行学习,构建出故障诊断模型,实现故障自动识别及定位。一般算法包括支持向量机、神经网络、随机森林等,对二次回路的电流、电压信号、通信报文特征、设备运行状态等相关数据进行采集,实施神经网络模型训练操作,训练好的模型可凭借实时监测数据判断是否有故障,还要展示故障类型以及故障位置。相较于传统诊断技术而言,机器学习技术拥有更强的自适应及泛化本领,可切实诊断隐蔽性故障及新型故障,但该技术对故障数据的数量及质量要求颇高,应构建完备的故障数据库,而且模型训练进程复杂,运维成本不低。

2.2.3 基于大数据分析的诊断技术

智能变电站工作过程中会形成大量二次回路相关数据,涉及设备状态数据、通信报文数据、运维记录数据等各类数据,借助大数据分析的诊断技术整合、清洗、分析这些数据,找寻数据背后的关联规律,做到对故障的预判与诊断,经由剖析历史故障数据与设备运行参数间的关联关系,构建故障预警模式。在变电站运行维护时接收告警信号,再由二次检修人员前往现场或者远程判断故障,后续进行排查隐患以及处理缺陷相关工作;研究通信报文的时序数据,发现报文传输异常规律,查找通信回路里的潜在故障,该技术可提前察觉故障,减少故障发生频次,然而需有强大的数据存储与计算能力,数据安全和隐私保护问题应重点留意。

2.2.4 凭借物联网的在线监测及诊断技术

把物联网传感器装在二次回路关键节点,如温度传感器、振动传感器、绝缘传感器等,实时采集回路的温度、振动、绝缘状况等参数,通过无线通信网络把数据传至后台诊断系统,实时数据由后台系统实时分析,参数出现异常状况时,即刻发出报警讯息,并且结合别的监测数据找到故障点。该技术实现了故障在线实时监测诊断,改进了传统离线诊断的滞后情形,能极大地缩减故障排查时长。在光纤接头处安置温度传感器,可实时监测接头温度的变动,温度出现异常升高时,及时找出接头松动以及接触不良等故障。该技术要在变电站大量安设传感器,起始投资成本偏高,而传感器稳定性与可靠性直接决定了诊断结果。

3 故障诊断技术应用对比与优化建议

3.1 各类诊断技术应用对比

多种故障诊断技术在适用场景、诊断精度、成本投入等方面存在差异情况,具体对比情形如下:传统优化诊断技术(如万用表、示波器检测等)可用于故障初步排查及简单故障诊断,花销少、操作易,只是诊断精度不高、依靠人工经验;基于故障树与专家系统的诊断技术可分层诊断复杂故障,解释性较为显著,只是针对新型故障的适应力弱;基于机器学习的诊断技术可用于隐蔽性故障与新型故障的诊断,适应能力颇为强,但数据需求高、运维花费大;运用大数据分析的诊断技术适合故障预判及趋势分析,能实现预先警示,但要有强大的计算力量;物联网下的在线诊断技术适合实时故障监测与诊断,响应速度迅猛,可初期投入高。

在实际运用中,应参照智能变电站的规模、运行状态、故障特征等因素,选取合适的诊断技术组合,小型智能变电站可运用传统优化诊断技术与专家系统相结合的方法,保障诊断效果的同时降低成本;大型智能变电站可建立“物联网在线监测以及大数据分析和机器学习”的综合诊断架构,做到故障的实时监测、提前预报与精准判定^[5]。

3.2 技术优化建议

为进一步提高智能变电站二次回路故障诊断技术应用效果,提出下列优化意见。

3.2.1 加强多技术融合应用

将传统诊断技术和新型智能诊断技术有机整合,通过物联网传感器采集的实时数据给机器学习模型提供支撑,借助故障树分析对大数据分析方向进行优化,做到优势互补,提高诊断的精度及效率。

3.2.2 建立完善的故障数据库

归整各厂家、各类智能变电站的二次回路故障数据,涵盖故障类别、故障特点、诊断流程、处理成效等,为机器学习、大数据分析等技术供应高质量数据支撑,同时促进故障数据的分享与沟通,提升行业整体诊断质量。

3.2.3 提升设备标准化水平

针对现在不同厂家设备通信协议不契合、数据格式不统一等情况,进一步完备智能变电站二次回路相关标准,规范设备接口、通信协议及数据格式,降低故障诊断困难度,助力诊断技术通用化运用。

3.2.4 提高二次检修人员素养

伴随诊断技术智能化进步,加大二次检修人员技术培训力度,对二次检修人员的专业技能设定更高要求,定期开展技术训练,提高二次检修人员对新型诊断设备、软件系统操作的水平,以及对复杂故障的分析判断水平。

4 结束语

智能变电站继电保护二次回路故障诊断对保障电力系统安全稳定运行至关重要。本文分析了智能变电站二次回路的结构特性及常见故障种类,系统剖析了传统优化诊断技术与新型智能诊断技术的应用态势。传统诊断技术在排查简单故障时作用无可替代,新型智能诊断技术大幅提高了故障诊断的智能化以及精准化水平,只是各类技术皆存在一定的制约。智能变电站继电保护二次回路故障诊断技术未来会朝多技术融合、全生命周期监测、智能化决策方向发展,通过增强传统技术与新型技术的融合应用,构建健全的故障数据库及标准化体制,增强二次检修人员的专业水平,可使故障诊断的准确性与及时性进一步提升,缩减故障引发的损失。伴随 5G、边缘计算等技术的加入,故障诊断系统的实时性、可靠性能进一步增强,为智能变电站安全高效运行提供有力保障。

参考文献:

- [1] 蔡乙立,常莎.电网继电保护二次回路故障排查与处理方法研究[J].电工技术,2025(15):150-152.
- [2] 张庆余,陈文文.变电站继电保护二次回路检修技术研究[J].电气技术与经济,2025(07):184-186.
- [3] 郑健,王颜林.变电站二次回路及继电保护调试技术分析[J].电气技术与经济,2025(07):332-334.
- [4] 陈文文,孟晓东.变电站继电保护二次回路缺陷识别技术研究[J].电气技术与经济,2025(07):347-349.
- [5] 周杰,王祥.110kV智慧变电站二次回路故障定位技术[J].办公自动化,2025,30(14):16-18.