

基于自动化测试技术的继电保护装置性能评估研究

张其方, 王辉春, 杨 婧

(云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650500)

摘要 继电保护装置作为电力系统安全稳定运行的核心保障设备, 其动作的可靠性与速动性对整个电网的安全至关重要。鉴于传统人工测试方法在测试效率、覆盖范围与结果一致性方面存在固有局限, 难以满足智能电网背景下对继电保护装置高性能与高可靠性的严格要求。若保护装置的潜在缺陷未能被及时检出并消除, 在系统发生故障时可能导致保护误动或拒动, 极易引发大规模的停电事故。本研究以某型号数字线路保护装置为研究对象, 系统性开展基于自动化测试技术的性能评估研究, 准确识别装置在不同故障类型及工况下的性能薄弱环节, 旨在为继电保护装置的优化设计、入网检测与运行维护提供科学依据, 进而有效提升电力系统的安全稳定运行水平。

关键词 自动化测试; 继电保护; 性能评估; 测试平台

中图分类号: TM77; TM76

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.005

0 引言

继电保护装置是电力系统不可或缺的重要组成部分, 其性能优劣直接关系到供电可靠性与设备安全。对继电保护装置进行全面、精确的性能评估, 是确保其正确动作、防止故障扩大的关键环节, 对于构建坚强智能电网、保障社会经济稳定发展, 具有不可替代的重要作用。我国《继电保护和自动装置基本试验方法》(GB/T 7261-2016)等一系列技术标准的颁布与实施, 为继电保护装置的测试验证提供了更为科学、规范的指导^[1]。随着电网结构日趋复杂, 新能源大规模并网, 电力电子设备广泛渗透, 系统运行特性发生深刻变化, 对继电保护的动作速度、选择性和适应性提出了更高要求。传统的定期检修与抽样测试模式已难以全面、动态地掌握保护装置在真实复杂工况下的性能状态。因此, 引入高效、精准、可复现的自动化测试技术, 构建系统化的性能评估体系, 成为行业发展的必然趋势。

1 继电保护装置概况

某型号数字线路保护装置广泛应用于220 kV电压等级的输电线路, 占地面积约为标准19英寸机箱的面积。该装置自21世纪初投入研发与应用, 长期承担线路的电流差动保护和距离保护任务^[2]。在功能实现上, 该装置采用了大量集成电路、高性能数字信号处理器(DSP)和实时操作系统。随着智能电网建设的推进与

设备技术迭代, 该型号装置于2020年逐步停产, 但在大量现场运行, 现计划对其进行系统性能评估, 以决定其后续技术改造或替换策略。该装置设计于特定历史时期, 其硬件架构与算法逻辑基于当时的电网条件和芯片技术水平。在当前电网运行方式多样化、故障形态复杂化的背景下, 其处理能力、通信带宽及逻辑判别机制可能面临挑战。对其进行全面的自动化测试与评估, 不仅是对存量设备健康状况的把控, 也为理解早期设备设计逻辑与当前运行需求之间的差距提供了宝贵案例。

2 继电保护装置自动化测试与性能评估

2.1 测试平台构建与方案设计

在自动化测试平台的构建过程中, 通过查阅该保护装置的技术说明书、型式试验报告、通信规约文档等必要资料后, 了解到该装置在既往应用中具备完善的保护功能和通信接口^[3]。通过访谈该装置的多位现场运维人员, 及前往相关调度部门进行取证, 进一步了解到该装置在近年运行中曾出现过数次不明原因的通信中断记录, 同时, 在调查过程中发现, 该装置在区外故障转区内故障的复杂序列下, 曾有过动作延时偏长的报告。考虑到该装置可能存在逻辑判别与时序配合问题, 在测试方案中重点设置了包括单相接地短路、两相相间短路、三相短路以及转换性故障在内的多种故障类型^[4]。依据测试需求, 在测试系统中配置

作者简介: 张其方(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 电力系统自动化测试。

了实时数字仿真器 (RTDS)、功率放大器、精密计时仪及自动化测试主机, 共同构成闭环测试系统。

2.2 测试用例与数据采集

在故障模拟区域, 通过设置故障起始时间、故障持续时间、故障位置和过渡电阻等关键参数, 生成标准 COMTRADE 格式的故障数据文件^[6], 共计生成有效测试用例 (35 个)。在通信压力测试区域, 通过模拟网络背景流量, 在 80 ~ 100 Mbps 的带宽压力下, 测试装置 GOOSE (面向通用对象的变电站事件) 报文的响应时间与丢包率, 获取关键性能数据 (12 组)。在其他功能验证区域, 依据保护定值单完成功能性测试用例 (18 个) 的布置与执行。

2.3 采集样品检测

2.3.1 动作时间样品采集

采集该保护装置在各类测试用例下的动作时间数据送往测试系统内置分析模块完成处理。动作时间检测项目涉及保护启动时间、判断时间及出口跳闸时间等关键指标, 见表 1。

2.3.2 通信性能样品采集

在通信性能样品采集过程中, 通信报文的类型大部分为 GOOSE 报文与 SV (采样值) 报文^[6]。通信性能检测项目涉及传输延时、抖动、丢包率及其他类型通信质量的常规指标等^[7], 见表 2。

2.4 测试结果

2.4.1 动作时间测试结果

动作时间测试结果显示, 该型号保护装置在金属性

短路故障条件下, 动作时间稳定在 21 ~ 26 ms 范围内, 满足行业标准要求的 30 ms 以内。但在过渡电阻 (100 Ω) 接地故障情况下, 平均动作时间延长至 35.8 ms, 最大动作时间达到 38.9 ms, 已超出定值整定范围。上述检测结果表明, 该保护装置在高阻接地故障条件下存在动作延迟的风险。值得关注的是, 在模拟转换性故障时, 装置平均动作时间达到 45.3 ms, 最大动作时间达到 52.1 ms, 这一现象产生是由于该保护装置的故障判别逻辑在故障类型突变时需要进行序列复归与再判别, 消耗了额外的处理时间。过长的动作时间可能导致故障切除延迟, 对电力系统稳定性和设备安全产生不利影响。

2.4.2 通信性能测试结果

本次测试过程中, 通过通信测试仪采集到的 GOOSE 报文性能数据中, 传输延时、丢包率及抖动在 95 Mbps 高背景流量下均出现超标现象, 最大传输延时达到 14.8 ms, 丢包率达到 0.25%, 抖动达到 3.2 ms。通信性能劣化区域主要集中在高负载网络压力测试场景。通过分析通信劣化原因, 发现该保护装置采用的通信处理芯片在处理高优先级报文队列时, 缓存容量不足, 当网络流量瞬时突增, 极易造成报文堆积与延迟。由于 GOOSE 报文承载着关键的跳闸与联锁信息, 其传输的实时性与可靠性直接关系到保护系统的正确动作, 通信性能的劣化可能造成保护功能的失效或异常。

2.5 装置性能风险评估

2.5.1 危害识别

通过分析装置的硬件逻辑图与软件架构说明, 并

表 1 某型号保护装置动作时间测试结果统计表 (ms)

序号	故障类型	过渡电阻 (Ω)	测试次数	平均动作时间	最大动作时间	是否超标
1	A 相接地短路	0	10	24.5	26.1	否
2	A 相接地短路	100	10	35.8	38.9	是
3	BC 相间短路	0	10	22.7	23.5	否
4	三相短路	0	10	21.2	22.0	否
5	转换性故障	N/A	10	45.3	52.1	是

表 2 某型号保护装置通信性能测试结果统计表

序号	性能指标	背景流量 (Mbps)	测试值 (最大)	标准限值	是否超标
1	GOOSE 延时 (ms)	80	6.5	10	否
2	GOOSE 延时 (ms)	95	14.8	10	是
3	丢包率 (%)	80	0.01	0.1	否
4	丢包率 (%)	95	0.25	0.1	是
5	抖动 (ms)	95	3.2	2.0	是

结合自动化测试结果,确定动作延时与通信可靠性是影响该装置性能的两个突出风险点。动作延时问题主要源于装置在复杂故障(如高阻接地、转换性故障)下的算法处理效率^[8]。通信可靠性问题则可能与装置采用的早期网络接口芯片及其驱动程序的处理机制有关,在高负载下容易出现性能瓶颈。

2.5.2 暴露评估

对该保护装置在电网中可能面临的风险,需要综合考虑故障发生时其动作失败(拒动或误动)对系统稳定、设备损坏及供电中断等不同途径的影响。动作失败概率的计算基于可靠性工程中常用的故障树分析(FTA)模型。保护系统拒动概率的计算公式可简化为:

$$P_{fail}=P_{hw}+P_{sw}-P_{hw}\times P_{sw} \quad (1)$$

式(1)中: P_{fail} 表示系统整体拒动概率; P_{hw} 为硬件失效导致的拒动概率; P_{sw} 为软件逻辑或时序错误导致的拒动概率。根据装置历史运行数据及测试结果,假设硬件失效率为 1.0×10^{-6} /小时,结合测试中发现的复杂故障下软件逻辑延时问题,设定 P_{sw} 为 5.0×10^{-5} /次动作。经由公式(1)运算得出,在面临特定复杂故障时,该装置的等效拒动概率上升至约 5.1×10^{-5} /次动作。

通信失效后果量化评估通过计算因通信延迟或丢失导致保护动作失败的风险增量进行。

$$Risk_{inc}=P_{comm}\times Severity \quad (2)$$

式(2)中: $Risk_{inc}$ 表示风险增量; P_{comm} 为高负载下通信失效概率(根据测试数据估算为0.25%); $Severity$ 为动作失败后果的严重程度等级(此处量化为 10^6 元/次)。计算得出,因通信问题导致的期望风险损失为2500元/次事件。暴露评估通过对不同风险路径下的概率与后果进行量化,为评估装置潜在风险提供关键的数据支撑。

2.5.3 毒性评估(失效影响评估)

该型号保护装置所在线路由于长期面临潜在的误动与拒动风险,会严重威胁电网安全运行。通过查阅该装置及同系列装置服役区域的电网事件报告发现,该系列装置所在区域的保护不正确动作率(包括误动和拒动)明显高于全网平均水平。研究发现,通过对同系列装置进行深入的故障录波数据分析后,结果清晰地显示,在多起事件中,装置的故障判别时间或通信响应时间超出了预期设计值,一系列数据证实了动作延时与通信不可靠对保护系统正确动作产生的危害。

2.5.4 风险表征

针对具有明确后果的硬件失效与设计缺陷,采用行业内定量风险分析中常用的风险矩阵完成风险等

级的评定。风险值(Risk)的计算公式为:

$$Risk=Likelihood\times Consequence \quad (3)$$

式(3)中: $Likelihood$ 为失效发生的可能性(根据概率分级); $Consequence$ 为失效后果的严重性。通过严谨的计算与矩阵定位,该保护装置在高阻接地故障下的动作延时问题,其可能性等级为“偶尔”,后果等级为“严重”,风险等级被评定为“高风险”。在通信可靠性方面,高负载下的通信劣化问题,其可能性等级为“偶尔”,后果等级为“临界”,风险等级被评定为“中等风险”。上述结果表明,该保护装置在特定运行条件下存在不可忽视的运行风险,尤其是应对复杂故障的能力不足,可能导致故障切除时间延长,增加系统稳定破坏的风险。

3 结束语

该型号数字线路保护装置在常规故障条件下性能基本满足要求,但在高阻接地、转换性故障等复杂场景下存在明显的动作延时,且其通信性能在网络高负载情况下存在劣化风险,整体性能评估揭示出中等至高风险隐患。为保障电网后续安全稳定运行,建议对该系列装置进行软件逻辑优化或有计划地实施技术改造与替换。同时,在运维策略中加强对复杂故障的监测与诊断,制定科学合理的设备健康管理方案,确保继电保护系统能够充分满足智能电网对可靠性与速动性的高标准要求。

参考文献:

- [1] 吴丹阳.继电保护和自动装置的两种基本试验方法比较[J].魅力中国,2018(32):270-271.
- [2] 荣浩.220kV电网输电线路继电保护与自动装置设计研究[J].电气技术与经济,2024(06):196-199.
- [3] 徐钊,田娟.基于LabVIEW的继电保护装置柔性自动化测试系统设计[J].微型电脑应用,2024,40(11):213-216.
- [4] 聂祥论,李义,吴瑀,等.基于RGB图像生成的CNN-CBAM-BiLSTM配网接地故障分类方法[J].智能电网,2025,15(04):73-81.
- [5] 曹可.带故障录波的多功能电表方案分析[J].现代建筑电气,2024,15(06):33-36.
- [6] 杨静,程克杰,郭亮,等.配电网5G通信UDP封装GOOSE/SV报文自动判断测试的设计与实现[J].东北电力技术,2023,44(08):19-23.
- [7] 王顺其.融合通信系统流媒体自适应传输研究[D].西安:西安电子科技大学,2023.
- [8] 应雨龙,李靖超,武文杰,等.基于模型与数据混合驱动的重型燃气轮机全通流部件性能诊断方法[J].中国电机工程学报,2025,45(15):6000-6012.