

高压开关柜断路器拒动故障的成因分析与 二次保护联动实验验证

任志鹏

宁夏回族自治区红寺堡扬水管理处，宁夏 中宁 755100

DOI:10.61369/WCEST.2025020015

摘要：本文聚焦高压开关柜断路器拒动故障，旨在分析其成因并通过二次保护联动实验进行验证。实验平台由模拟故障发生系统、二次保护与控制单元、一次设备模拟模块及数据监测中心构成，采用多维度工况模拟方案，涵盖基础功能、极限性能及特殊工况测试，并通过多参数、高精度监测体系采集数据。研究明确了机械卡涩、电源波动等关键薄弱环节，为高压开关柜断路器拒动故障的预防与系统优化提供了数据支撑。

关键词：高压开关柜；断路器；拒动故障；成因分析

Cause Analysis of Refusal Fault of High-Voltage Switchgear Circuit Breaker and Experimental Verification of Secondary Protection Linkage

Ren Zhipeng

Hongsipu Water Lifting Management Office, Ningxia Hui Autonomous Region, Zhongning, Ningxia 755100

Abstract : This article focuses on the refusal fault of high-voltage switchgear circuit breakers, aiming to analyze its causes and verify them through secondary protection linkage experiments. The experimental platform consists of a simulated fault occurrence system, a secondary protection and control unit, a primary equipment simulation module, and a data monitoring center. It adopts a multi-dimensional working condition simulation scheme, covering basic functions, limit performance, and special working condition tests. Data is collected through a multi-parameter, high-precision monitoring system. The research has identified key weak links such as mechanical jamming and power fluctuations, providing data support for the prevention and system optimization of high-voltage switchgear circuit breaker refusal faults.

Keywords : high-voltage switchgear; circuit breaker; refusal fault; cause analysis

引言

断路器拒动故障，即无法按指令完成分合闸动作，是威胁电力系统安全的重大隐患，可能导致故障范围扩大、设备损毁甚至大面积停电等严重后果。当前研究表明，拒动故障的发生不仅与一次设备本体的机械磨损、性能劣化相关，还与二次回路的指令传输异常、保护装置的逻辑判断失误以及操作维护的规范性密切相关。本文聚焦高压开关柜断路器拒动故障，从一次设备本体、二次回路、操作与维护等维度剖析故障成因，明确各环节的关键影响因素；在此基础上，设计二次保护联动实验，通过搭建“模拟 – 控制 – 监测”一体化平台，模拟各类典型故障工况，系统测试保护系统的响应特性与联动协调性；最终结合实验数据，量化分析不同故障类型的影响权重与关联关系，为断路器拒动故障的精准防控与系统优化提供理论依据和实验支撑。

一、断路器拒动故障的成因分析

(一) 一次设备本体原因

之所以会出现故障问题，原因包括两种，第一种传统系统操动机构故障，脱扣失灵、轴销松断、卡涩、分合闸铁芯松动、位移损坏、部位变形、机构卡涩都是常见的表现^[1]。一次设备本体缺陷是断路器拒动的核心因素之一，故障根源集中在机械结构与

核心部件性能劣化。操作机构作为分合闸动力源，易发生故障，弹簧操动机构可能因弹簧疲劳、变形或断裂导致储能不足，或因齿轮啮合处润滑不良、积污、磨损引发卡涩；液压操动机构常因密封圈老化漏油、液压泵故障或油路堵塞导致压力不足；电磁操动机构可能因铁芯锈蚀、卡阻或合闸线圈过载烧毁而动力缺失。灭弧室性能异常也会引发拒动，如真空断路器灭弧室真空度下降导致触头熔焊，SF₆ 断路器灭弧室气体泄漏触发气压闭锁。此

外，传动连杆、拐臂等机械部件磨损、变形、松动，以及触头系统烧蚀变形、粘连、行程调整不当，都会直接阻碍分合闸动作。

(二) 二次回路原因

二次回路作为断路器操作指令的传输与控制中枢，其故障会直接阻断分合闸指令的有效执行。控制电源异常是常见诱因，例如直流电源电压过低，无法满足分合闸线圈的动作电压要求，导致线圈驱动力不足；直流系统发生接地故障时，可能引发控制回路误动或熔断器熔断，使回路供电中断。分合闸线圈作为二次回路与一次机构的连接节点，其可靠性至关重要，线圈匝间短路会导致输出功率下降，无法驱动机构动作；线圈引线接头松动或断线则会造成回路开路，指令无法传递。控制回路中的继电器、接触器等元件故障也会导致拒动。继电器触点因氧化、烧蚀出现接触不良，或衔铁卡涩无法吸合，会使指令在传递过程中中断；接触器的主触点粘连则可能导致分闸指令失效^[2]。回路接线的可靠性同样关键，接线端子因振动松动、腐蚀或过热氧化，会造成接触电阻增大甚至断线；电缆绝缘层破损引发的短路或接地故障，会使回路电流异常，触发保护装置动作切断电源。辅助开关作为反映断路器位置状态的关键元件，若其触点切换不到位或接触不良，会导致控制回路无法形成完整通路，例如合闸后辅助开关未能及时切换，可能使合闸线圈长期带电烧毁，同时阻断分闸回路。

二、二次保护联动实验设计

(一) 实验目的与原则

二次保护联动实验是验证高压开关柜断路器保护系统可靠性的核心手段，设计需围绕电力系统安全运行需求明确目标与准则^[3]。实验目的有三：一是验证保护逻辑有效性，检验保护装置对各类故障的识别及触发分闸的能力；二是测试联动机制协调性，考察二次回路与一次设备的响应匹配度；三是评估系统极限性能，测试极端工况下的抗干扰能力与动作稳定性。实验设计遵循四项原则，安全性原则，需设完善安全联锁并控制实验能量；真实性原则，要求实验场景贴近实际，参数和信号波形与真实故障一致；系统性原则，要覆盖保护系统全环节；可重复性原则，需有标准化流程，通过多次重复实验确保数据可靠。

(二) 实验平台搭建

实验平台搭建需构建“模拟 – 控制 – 监测”三位一体闭环系统，核心包括模拟故障发生系统、二次保护与控制单元、一次设备模拟模块及数据监测中心。

模拟故障发生系统作为“信号源”，由调压器、电流发生器等组成，可输出模拟故障电流和电压信号，参数通过PLC调节，还配备干扰发生器模拟电磁干扰^[4]。二次保护与控制单元与实际开关柜配置一致，含保护继电器、直流电源系统等，能实时上传保护指令。一次设备模拟模块采用缩小比例的断路器操作机构，机械特性与真实设备一致，通过传感器反馈状态。数据监测中心由高速采集设备等组成，可同步采集多类信号，采样频率不低于10kHz。平台采用分区布局，物理隔离各区域，减少电磁干扰。

(三) 实验方案设计

实验方案通过多维度工况模拟覆盖二次保护联动关键场景，分基础功能、极限性能、特殊工况三类测试^[5]。基础功能测试含故障类型模拟与操作指令验证，前者调节故障发生器参数，模拟三相短路和单相接地故障，记录动作时间、指令准确性等；后者通过手动与自动两种方式触发分合闸，对比动作一致性，检查辅助开关触点切换。极限性能测试包括电源波动测试和负载特性测试^[6]。特殊工况测试有电磁兼容测试和环境适应性测试。实验遵循“单因素变量法”，每次仅变一个参数，3次重复测试取平均值，测试前做预实验和“空白对照”。

(四) 数据采集与测量方案

数据采集与测量需构建多参数、高精度监测体系，覆盖保护联动全链条。核心测量参数分三类：电气参数、机械参数、状态信号。数据采集系统采用分布式架构，满足同步性与高精度要求^[7]。各参数通过相应传感器采集并实时上传，采集设备需时间同步。测量方案针对关键节点设专项监测点，实验中生成实时数据报表，数据存储处理采用标准化格式，经软件处理后形成含多种图表的实验报告，为保护系统优化提供量化依据。

三、实验结果与分析

(一) 一次设备原因模拟实验结果

在一次设备原因模拟实验中，复现并测试了操作机构、灭弧室及传动部件的典型故障^[8]。操作机构机械卡涩影响显著，弹簧操动机构齿轮啮合处积污，30次分合闸测试中8次合闸延迟、3次完全拒动，分闸线圈电流峰值升15%–20%，显示机构阻力增大导致线圈过载；液压操动机构泄漏，分闸时间从60ms延至120ms，触头行程减15%，触发灭弧失败告警。灭弧室故障中，真空断路器真空度降至 10^{-2} Pa，10次短路分闸测试2次触头粘连，分闸线圈持续通电致烧毁；SF6断路器气体泄漏，触发气压闭锁，分合闸指令无效，二次回路反馈“气压低”信号。传动部件故障方面，连杆1.5°弯曲，30次测试动作时间标准差从2ms增至8ms，5次触头接触不良；触头烧蚀（0.5mm 蚀坑）致合闸弹跳最长8ms，超国标3ms上限，易引发二次回路误判。

(二) 二次回路原因模拟实验结果

二次回路故障模拟实验聚焦控制电源、线圈及接线可靠性，结果呈现出明显的故障关联性^[9]。控制电源电压波动测试中，当直流电压降至额定值的80%，分合闸线圈动作成功率下降至75%，线圈电流峰值降低20%，且动作时间延长10–15ms；电压升至120%（240V）时，线圈温升速率加快，连续10次合闸后线圈温度达85°C，超过绝缘耐热等级（70°C），存在绝缘老化风险。分合闸线圈故障模拟中，匝间短路导致线圈输出力下降30%，在20次分闸测试中出现5次拒动，同时监测到线圈电阻从正常的 5Ω 降至 3.8Ω ，控制回路电压波形出现明显畸变。线圈引线松动时，分闸指令传递延迟显著，指令发出到线圈带电的间隔时间从正常的2ms增至15ms，且伴随3次间歇性动作失败。接线端子故障测试显示，模拟端子腐蚀使接触电阻从 $50m\Omega$ 增

至 $500\text{m}\Omega$ ，导致二次回路压降增大，保护装置采样电流误差达 8%，在过流保护测试中出现 2 次保护延时。电缆绝缘破损模拟引发控制回路接地故障，30s 内触发直流系统绝缘监察装置报警，同时导致分闸回路熔断器（2A）熔断 2 次，验证了接地故障的危害性。

（三）保护装置故障模拟实验结果

保护装置故障模拟实验重点测试了采样精度、逻辑判断及指令输出环节。采样回路故障中，电流互感器二次侧断线导致保护装置测量电流为零，在模拟短路故障时，装置未触发速断保护，持续 2s 后由上级保护动作，验证了 CT 断线闭锁功能的必要性^[10]。电压互感器失压模拟时，保护装置正确发出“失压告警”，但零序保护灵敏度下降，在 5A 零序电流下延迟 100ms 动作，说明电压信号缺失对保护逻辑存在干扰。保护装置逻辑错误模拟导致动作时间离散性异常，相同故障电流下（800A），10 次测试的动作时间在 150–350ms 间波动，标准差达 80ms，远超设计的 10ms 上限。指令输出插件接触不良模拟中，20 次分闸指令有 6 次未送达二次回路，故障时监测到插件引脚电压波动，触发装置内部“出口异常”自检告警。抗干扰测试显示，当高频干扰信号注入保护装置时，采样精度下降，电流测量误差从 1% 增至 5%，但未出现误动或拒动；干扰场强升至 20V/m 时，装置出现 2 次误发合闸指令，验证了电磁兼容设计的临界阈值。

（四）二次保护联动实验结果

二次回路故障模拟实验聚焦控制电源、线圈及接线可靠性，结果显露出明显故障关联性。控制电源电压降至额定 80%（160V）时，分合闸线圈动作成功率 75%，电流峰值降 20%，动作时间延 10–15ms；升至 120%（240V），线圈温升加快，连续 10 次合闸后达 85°C，超 70°C 耐热等级，有绝缘老化风险。分合闸线圈匝间短路使输出力降 30%，20 次分闸测试 5 次拒动，线圈电阻从 5Ω 降至 3.8Ω ，回路电压波形畸变；引线松动致分闸指令

延迟，伴 3 次间歇性失败。接线端子腐蚀后接触电阻从 $50\text{m}\Omega$ 增至 $500\text{m}\Omega$ ，二次回路压降增大，保护装置采样电流误差达 8%，过流保护 2 次延时；电缆绝缘破损引发接地故障，30s 内触发报警，分闸回路熔断器熔断 2 次。

（五）综合实验数据分析

实验数据显示，不同故障对断路器拒动影响差异显著，一次设备机械故障占比 42%，二次回路故障占 35%，保护装置故障占 23%。动作时间上，机械故障平均延迟 50ms，二次回路接触不良平均延迟 30ms，保护装置故障影响较小（平均 10ms）。故障树分析显示，“操作机构卡涩 + 控制电源电压低”组合故障虽概率仅 0.3%，但后果最严重，需重点防控。相关性分析表明，分闸线圈电流峰值与机构动作时间负相关（系数 -0.82），二次回路电阻与指令传输延迟正相关（系数 0.76）。

四、结束语

本文围绕高压开关柜断路器拒动故障展开了系统的成因分析与二次保护联动实验验证。通过对一次设备本体、二次回路、操作与维护等方面深入探究，明确了机械结构劣化、回路传输异常、操作维护不当等是引发拒动的核心因素，并通过构建“模拟 – 控制 – 监测”实验平台，模拟各类典型故障工况，量化分析了不同故障类型对断路器动作可靠性的影响权重与关联关系。实验结果不仅验证了“一次设备 – 二次回路 – 保护装置”联动机制的复杂性，还揭示了机械卡涩、电源波动、采样精度等关键薄弱环节，为拒动故障的精准排查与防控提供了数据支撑。研究表明单一故障的影响可通过系统性防护措施缓解，而复合故障虽概率较低但危害极大，需在运维中重点关注，通过强化定期检修、优化联动逻辑、提升抗干扰能力等手段降低风险。

参考文献

- [1] 李宁钢. 高压开关柜常见故障和检修维护 [J]. 价值工程, 2020, 39(05): 244–245. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2020.05.103.
- [2] 李尚坤, 王尚斌. 10kV 高压开关柜常见故障和对策分析 [J]. 南方农机, 2019, 50(20): 225.
- [3] 李炼. 供配电系统中高压开关柜常见故障分析与处理 [J]. 企业科技与发展, 2018, (09): 172–173.
- [4] 张天军, 张伟虎. 10kV 高压开关柜常见故障及对策分析 [J]. 技术与市场, 2015, 22(08): 213.
- [5] 朱波, 罗少军, 孙宏志. 矿井高压开关柜防拒动、防误动装置研究与应用 [J]. 山东煤炭科技, 2014, (09): 122+125.
- [6] 全光荣. 基于高压开关柜常见故障和改进对策的分析 [J]. 通讯世界, 2014, (20): 166–167.
- [7] 孟宪丽, 柴国旭. KYN28 型高压开关柜二次回路的优化 [J]. 电器工业, 2022, (08): 63–65.
- [8] 范寿忠. 浅谈高压开关柜二次回路设计 [J]. 中国科技信息, 2014, (23): 169–170.
- [9] 范文波, 韩伟, 赵珊等. 高压开关柜二次失压保护电路的改进 [J]. 城镇建设, 2020, (2): 363.
- [10] 邓永新, 邓人杰. 煤化工生产装置中高压开关柜的常见故障及处理措施 [J]. 氮肥与合成气, 2021, 49(4): 40–41. DOI: 10.19910/j.cnki.ISSN2096-3548.2021.04.013.