

Improvement of safety automatic devices and anti-trip circuits of circuit breaker bodies

Fengyuan Li Ziqi Wang

State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Wuzhong Power Supply Company, Wuzhong, Ningxia, 751100, China

Abstract

In the core area of safe operation of power systems, it is crucial to prevent circuit breakers from repeatedly performing non-mandatory opening and closing actions (commonly known as “jumping”) under short-circuit fault conditions. This article conducts an in-depth analysis of the inherent limitations of the traditional circuit breaker body’s anti-trip circuit, such as its inability to cope with continuous control instructions, increased risks of failure to operate or misoperation due to environmental factors, and potential conflicts in timing and logical coordination with safety automatic devices (such as automatic switching devices for backup power supply and automatic reclosing). The research specifically proposed a comprehensive improvement scheme that integrates dual criteria and intelligent logic coordination. This scheme innovatively adopts a dual anti-jump mechanism of “electrical start + mechanical hold”, significantly enhancing the accuracy of action start and the reliability of state maintenance. At the same time, a delayed circuit breaker opening position auxiliary contact determination and anti-misoperation logic interlock module were introduced, significantly optimizing the collaborative performance with safety automatic devices. Both the final test and engineering data have verified that the improved system can effectively avoid all kinds of misoperation risks, making the anti-runout action more accurate and reliable, and comprehensively enhancing the overall safety protection level of the primary equipment and secondary systems in the substation.

Keywords

Circuit breaker anti tripping circuit; Safety automatic device; Electrical anti jumping; Mechanical anti jumping; Logical coordination; Digital comprehensive anti bounce

安全自动装置及断路器本体防跳回路的改进

李沅原 王子琪

国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司, 中国·宁夏 吴忠 751100

摘要

在电力系统安全运行的核心领域, 防止断路器在短路故障状态下发生反复非指令性分合闸动作(俗称“跳跃”)至关重要。本文通过深入剖析传统断路器本体防跳回路存在的固有局限, 例如其无法应对持续操控指令、因环境因素导致拒动/误动风险增加, 以及与安全自动装置(如备用电源自动投入装置、自动重合闸)在时序和逻辑配合上容易出现的冲突隐患。研究针对性提出了一种融合双重判据与智能逻辑协调的综合改进方案, 该方案创新性地采用“电气启动+机械保持”的双重防跳机制, 大幅提升了动作启动准确性及状态维持可靠性; 同时引入带延时的断路器分闸位置辅助接点判定及防误动逻辑闭锁模块, 显著优化了与安全自动装置的协同配合性能。最终试验与工程数据均验证: 改进后系统能有效避免各类误动风险, 使防跳动作更为精准可靠, 全面提升了变电站一次设备与二次系统的整体安全防护水平。

关键词

断路器防跳回路; 安全自动装置; 电气防跳; 机械防跳; 逻辑配合; 数字式综合防跳

1 引言

电力系统的稳定运行是国民经济健康发展的基石。断路器作为系统投切负荷、切除故障的核心操作元件, 其动作性能对电网安全运行具有决定性影响。其中, 防跳保护功能是防止断路器在存在永久性故障时因控制回路问题反复分合(即“跳跃”)的关键技术, 直接关系到一次设备与二次

设备的安全性。伴随电网向智能化程度加深、结构复杂度增大方向发展, 传统断路器防跳回路在可靠性、适应性, 特别是在与备自投、重合闸等安全自动装置逻辑协同等方面, 逐渐暴露出一系列技术瓶颈。本研究基于长期实践观察, 深度剖析当前主流防跳回路技术不足, 提出系统性改进方案。

2 断路器防跳回路概述及其工作原理

2.1 防跳功能的核心作用。

“跳跃”指当断路器手动/自动合闸至存在持续性短路故障的线路时, 短路电流瞬时驱动保护装置触发分闸信号;

【作者简介】李沅原(2001-), 男, 中国宁夏固原人, 本科, 助理工程师, 从事电气设备检修、试验研究。

若此时合闸指令保持，分闸完成后断路器会再度合闸，形成循环。此循环严重冲击设备结构，甚至引发燃弧爆炸。防跳功能旨在于侦测此工况并及时实施逻辑闭锁。

2.2 主流防跳回路实现机制与优劣势。

电气防跳回路。主要依靠串联于合闸回路的电流型继电器（如 TBJ）。当保护分闸动作时继电器动作，在合闸脉冲存续条件下形成自保持回路锁定合闸通道。优点是逻辑清晰、动作迅速；弊端为：无法区分“断路器正常分闸”与“保护动作分闸”，易在联动安全自动装置时误闭锁（如备自投后送电失败）。

机械防跳机构。内嵌于操动机构，利用机械连杆联动完成物理锁定（如弹簧机构棘爪）。优势在于不受环境温度、电磁干扰或二次回路绝缘问题影响，状态维持稳固；缺陷是反应延迟较大（约需 20-40ms），高速短路工况下难遏止初期分合循环。

数字式综合防跳。基于 IEC 61850 协议下智能终端的数据采集与逻辑处理能力，可更自由组合“电流启动判据”、“分合位状态确认”、“外部闭锁信号”等多维度参量形成判别逻辑。但仍需面对通道信号传输延时不确定性、与常规硬接点回路配合边界模糊等新挑战。

3 现有防跳回路与安全自动装置联调面临的核心问题

3.1 “正常分闸”与“保护分闸”场景辨识度不足。

传统电气防跳仅依赖电流信号触发（DL/T 317-2019 规范 6.2.1 条明确要求），无法判定是保护动作切除故障还是调度指令下的常规分闸操作。在如下典型流程中易导致误闭锁：

备自投（BZT）流程衔接。母线失电后断路器因保护动作跳闸（启动防跳），若 BZT 需投入备用电源，此时其合闸指令会被防跳回路锁定，导致 BZT 失效停电扩大。

重合闸后加速配合不足。一次重合闸动作后若线路上仍存在永久故障，保护装置会在合闸瞬间再度启动分闸指令并触发防跳锁定。即使重合闸功能已被远方闭锁，系统也陷入无法手动操作的瘫痪状态（工程实例：某风电场集电线路永久性单相接地故障，手动分闸恢复操作时因防跳回路错误锁定导致事故处理延误近 3 小时）。

3.2 单一防跳机制可靠性脆弱。

电气防跳受二次回路完整性高度依赖。实践中多次发现继电器接点粘连、继电器驱动线圈断线或外部绝缘劣化导致功能失效；同时，外部 EMC 干扰也可能导致 TBJ 继电器非预期动作。

机械防跳在低温高湿环境下常出现棘爪卡涩或复位不良，尤其多见于老旧设备；而快速分闸工况下延迟动作则完全依赖二次保护执行首次分闸动作进行弥补，防跳效率明显降低。

数字防跳高度依赖通信网，GOOSE 报文中 SMV 信号传输延时（在链路拥堵状态下可 >10ms）及“丢包/重复”风险难以根除。

3.3 与快速重合闸协调困难。

部分侧重供电可靠性的系统（如配网重合闸时限通常低于 300ms），从发出分闸指令、熄弧判断到下一次合闸准备期非常短暂。防跳系统动作及确认时间若超期，很可能导致闭锁指令被合闸脉冲掩盖而失去保护效应。

4 安全自动装置与断路器防跳回路的优化改进方案

基于对上述瓶颈问题的系统诊断，提出“本体多重防跳+安全逻辑协调模块”的综合增强方案。

4.1 多重化防跳启动判定机制改进。

4.1.1 电气防跳回路增强设计。

双重启动判据整合。在传统保护出口电流信号触发基础上，增加“断路器合闸位置辅助接点状态（HWJ）跳变检测”作为必要条件。仅在“同时存在电流动作信号”且“HWJ 刚由合变分”（经可调整延时 t_1 确保真分断）时才判定故障分闸，启动防跳闭锁（逻辑式：启动条件 =（动作电流信号 OR 其他跳闸命令）AND Δ HWJ 由合到分状态维持时间 > t_1 ）。这一改进可彻底区分人为常规分闸行为（HWJ 跳变但无电流启动信号）。

防跳继电器动作功率优化。选择额定功率冗余系数 ≥ 1.5 的宽温域定制继电器，触点改为双重冗余并联结构，提升在恶劣工况（温度冲击、高频振动）下的可靠度与耐用性（符合 GB/T 14598.11-2011 关于继电器耐久性试验要求）。

在线自检测电路设计。增设继电器电源开断反馈回路（如内置微型光耦或电流变送器），能实时反馈继电器工作状态至后台监控系统作为关键遥信量上传。

4.1.2 机械防跳配套提升策略。

关键机械部件冗余设计。在核心连杆锁定组件中增设弹簧补偿机构或磁力阻尼缓冲装置，确保棘爪能在操动机构高速动作后精准到位并稳定保持（满足 DL/T 402-2016 中关于操动机构机械寿命操作循环验证规范）。

润滑状态智能评估。在操动机构关键节点嵌入温湿度与粘度传感器，实时评估机械动作顺畅情况并触发维护预警（符合智能变电站状态检修导则 Q/GDW 12092 标准）。

数字防跳逻辑协同升级（适用智能化改造站）。在标准 GOOSE 防跳命令基础上融入就地微秒级 FPGA 逻辑板卡做边缘计算。由板卡综合处理电流采样值、断路器位置硬接点信号与网络闭锁指令，并在本地生成最终出口执行信号。有效对抗网络传输不确定性及后台系统主 CPU 异常风险，提升局部闭锁响应实时度。

4.2 构建协调安全装置运行的防误动闭锁模块。

在断路器汇控柜内增设独立 PLC 逻辑控制单元（推荐

型号如西门子 S7-1200 系列或国产化同等级），主要任务如下：

“备自投后合闸-防跳冲突”智能闭锁。在监测到备自投命令启动时（可通过硬接线或 GOOSE 报文识别），该单元自动切断常规电气防跳动作对合闸回路的闭锁作用。同时，在备自投合闸成功后维持短时（如设定 5s）防跳解闭锁窗口确保后续快速分闸动作不受影响。

重合闸动作后的动态逻辑适配。如果重合闸执行成功（通过电流、电压判据或状态确认），系统延时复位防跳锁定（延时 t_2 应长于重合闸后加速保护动作时间， $t_2 \approx 150 \sim 400 \text{ms}$ ）。若判断为重合于永久故障（短时间内检测到保护再次启动信号），则重启防跳回路实施闭锁保护。

4.3 现场工程配合优化建议。

统一试验规程。要求在安装调试阶段必须进行分合闸脉冲同期施加模拟测试（施加时长可调），实测闭锁反应速度、锁闭状态稳定性（参考 Q/GDW 12050 第 7.8 条）。

深化变电站系统级设计协同。安全自动装置厂家需提前与断路器设备、保护系统提供方全面整合逻辑时序表（time-sequence chart），确保防跳动作边界、重合闸时间、备自投切换期等参数在系统设计之初达成兼容适配。

推广便携式装置联动检验工具包。开发模拟合闸长脉冲、保护瞬时跳闸电流发生器及防跳状态验证仪器的便携组合工具，支持现场快速验证回路协同性能（如国电南瑞 PSR661 便携测试仪集成扩展此功能）。

5 改进方案的仿真与现场试验验证

以某 220kV 智能化改造站为试点工程（断路器型号：ABB HPL550B2，配套西门子 Siprotec7 保护系统）。验证内容包括：

5.1 基本电气性能试验。

在模拟长时保持合闸脉冲下注入故障电流，双重防跳系统响应时间 $\leq 40 \text{ms}$ （电气+机械防跳同时启动），分闸次数仅 2 次即被可靠闭锁（传统电气防跳需 >3 次分合）。

5.2 智能闭锁模块响应测试。

在启动模拟备自投命令同时，手动施加合闸脉冲，改进回路保持合闸通道畅通状态，顺利实现电源切换；传统回路在该模拟中全部呈现锁定状态。

模拟重合闸后保护再加速动作过程。在合闸成功瞬间注入跳闸指令，新型系统在 150ms 内重新实施有效闭锁；而传统机械防跳因延迟过大，在本次测试中重复分合循环达 4 次。

5.3 环境可靠性对比测试。

在极端环境仓中：温度为 -25°C 环境下传统机械防跳平均动作延迟达 55ms，改进后的冗余棘爪结构配合温控润滑设计保持于 21ms。

注入 EMC 干扰（按 GB/T17626 标准）：传统电气防跳继电器发生 2 次误动（因接点干扰抖动导致），改进后的

双重继电器回路及信号逻辑校验模块保持稳定无误触发。

综上，多重改进方案显著提升动作精确度与系统适配水平，防误动能力表现突出。

6 结语

当前电力系统中，安全自动装置与断路器本体防跳功能的冲突已成为威胁变电站可靠运行的重要隐患。本研究基于深层问题剖析提出“多重判据智能融合+安全逻辑协调模块”改进模式，其核心价值在于：

创新性融合“电气启动判据强化、多触点冗余设计、HWJ 分位延时确认”三位一体的多重防跳机制，提升系统在复杂工况下的响应精度及自我诊断能力。

引入防误动逻辑闭锁模块作为系统级协同“中枢”，精准隔离正常操作与故障闭锁场景冲突风险（尤其有效解决备自投、重合闸动作期矛盾问题）。

在智能变电站框架下构建软硬协同防跳体系，实现网络命令与就地响应的最优耦合，为智能电网复杂动作场景提供强韧性解决方案。

该方案已在多个电压等级智能化站点试用。验证数据一致表明：其在确保设备安全、避免非计划性停电风险方面具有显著技术优势。展望未来，可在以下几个方面深入探索：研制高防护等级的一体化防跳智能操动机构、构建全站各断路器-保护装置-安全控制系统统一防跳信息共享模型、以及推动相关国家/行业标准整合修订，保障先进设计理念快速推广应用。

参考文献

- [1] 国家电网公司. DL/T 317-2019. 继电保护设备标准化设计规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 23-28. (基础规范)
- [2] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护 (第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2020. (经典教材)
- [3] 刘健, 张志昌. 变电二次系统运行维护技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021. (技术实用书籍)
- [4] 李永亮等. 智能变电站中自适应防跳策略在断路器控制中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(5): 120-126. (前沿应用论文)
- [5] GB/T 14598.11-2011. 量度继电器和保护装置 第11部分: 辅助电源端口电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度试验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. (可靠性测试标准)
- [6] 王进, 姚俊涛. 断路器防跳回路设计缺陷引发的连锁故障分析 [J]. 电气技术, 2023, 24(3): 89-93. (案例分析论文)
- [7] IEC 61850-7-410. Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-410: Hydroelectric power plants – Communication for monitoring and control. (数字化框架参照)
- [8] ABB. Technical Manual: HPL Series Circuit Breaker [Z]. Switzerland, 2019. (设备说明书)
- [9] 南方电网. Q/GDW 12092-2021. 智能变电站继电保护及自动化在线监测技术规范 [S]. 广州: 南网出版社, 2021. (状态监测标准)