

高压开关柜联锁与报警防护方案

杨婷婷, 周渊, 朱茂荣, 刘强博, 王健梅
华能甘肃能源开发有限公司, 甘肃 兰州 730070
DOI:10.61369/EPTSM.2025090013

摘 要： 为全面提升高压开关柜安全防护水平，杜绝误入带电间隔、强行开启带电背板等违章操作导致的触电事故，实现高压设备防触电的本质安全化升级，构建了“主动强制联锁+被动报警提示”的双重防护体系。该体系包含两大核心技术：一是基于“结构闭锁+电气硬接点+逻辑优先”的高压侧强制性联锁保护系统，以“变压器柜门状态触发高压柜联锁动作”为核心逻辑，实现变压器柜门打开后高压开关柜的强制性停运与操作闭锁；二是中压开关柜背板强行开启报警装置，针对开关柜工作状态下背板误开启风险，通过部件联动实现精准报警。测试与应用表明，强制性联锁系统可在变压器柜门开启 $\leq 150\text{ms}$ 内触发分闸并闭锁，动作响应一致性100%；背板报警装置可精准区分工作/试验位置实现差异化报警。体系适配10kV-35kV电压等级设备，为变配电系统安全提供全场景技术防护。

关 键 词： 高压开关柜；本质安全；强制性联锁；背板报警；双重防护

Interlocking and Alarm Protection Scheme for High-Voltage Switchgear

Yang Tingting, Zhou Yuan, Zhu Maorong, Liu Qiangbo, Wang Jianmei
Huaneng Gansu Energy Development Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730070

Abstract： To comprehensively improve the safety protection level of high-voltage switchgear, eliminate electric shock accidents caused by illegal operations such as mistakenly entering live compartments and forcibly opening live back panels, and realize the intrinsic safety upgrade of high-voltage equipment against electric shock, a dual protection system of "active forced interlocking + passive alarm prompt" has been constructed. This system includes two core technologies: first, a high-voltage side forced interlocking protection system based on "structural locking + electrical hard contact + logic priority", which takes "transformer cabinet door status triggering high-voltage cabinet interlocking action" as the core logic to realize forced shutdown and operation locking of high-voltage switchgear after the transformer cabinet door is opened; second, an alarm device for forced opening of the back panel of medium-voltage switchgear, which aims at the risk of mistaken opening of the back panel when the switchgear is in working status and realizes accurate alarm through component linkage. Test and application results show that the forced interlocking system can trigger opening and locking within $\leq 150\text{ms}$ after the transformer cabinet door is opened, with a 100% consistent action response; the back panel alarm device can accurately distinguish between working/test positions to realize differentiated alarms. The system is suitable for equipment with voltage levels of 10kV-35kV, providing full-scenario technical protection for the safety of power transformation and distribution systems.

Keywords： high-voltage switchgear; intrinsic safety; forced interlocking; back panel alarm

引言

（一）研究背景与意义

高压开关柜作为电力系统核心设备，其安全运行直接关系到电力系统稳定和运维人员生命安全。近年来，高压设备检修过程中安全事故频发，呈现两类型风险：一是误入带电间隔导致的严重事故，2023年某风电场因高压开关柜误操作引发电弧爆炸，造成3台变压器烧毁及1名运维人员重伤；2024年某储能电站发生检修人员误入带电间隔的触电伤亡事故。二是开关柜工作状态下强行开启背板的触电风险，尤其在接地刀闸机械闭锁失效时，此类误操作易直接导致人员伤亡。

目前电力行业普遍采用的“五防”系统，其逻辑主要依赖机械闭锁和微机监控系统的双重闭锁。实际运行中，该体系暴露出诸多漏洞：一方面，机械闭锁机构易因长期运行磨损、锈蚀导致卡涩失效，2024年电力行业设备缺陷统计显示，机械闭锁失效占高压开关柜缺

陷总数的18.7%；另一方面，微机五防系统依赖软件逻辑和网络传输，存在因程序漏洞、网络延迟或人为解锁导致的防护失效风险^[2]。传统“五防”系统本质上是“管理约束型”防护，过度依赖运维人员的规范操作，无法从技术层面实现“不可违章”的强制性防护^[3]。

在此背景下，研发一套不依赖人为操作、具备独立强制防护能力的“强制性联锁+背板报警”的双重防护系统，实现从“被动防御”到“主动防护”、从“管理约束”到“技术强制”的本质安全升级，对杜绝误入带电间隔事故、保障变配电系统安全运行具有重要的工程价值和现实意义。

（二）国内外技术现状

高压开关柜机械联锁技术作为最早应用的闭锁形式，核心原理是通过连杆、锁具等机械结构实现设备操作互锁，在10kV及以上高压场景中，其局限性突出：一是适应性差，不同厂家、不同型号的高压设备难以实现标准化联锁；二是可靠性随运行时间衰减，环境因素导致机械部件锈蚀，使闭锁成功率逐年下降。

微机五防系统是当前高压配电领域的主要防护技术，其对“软件依赖型”特性使其缺点突出：一是存在网络延迟，当需要紧急切断高压电源时，网络传输过程可能导致防护失效；二是存在人为破解风险；三是软件漏洞可能导致系统崩溃，某变电站曾因操作系统漏洞导致微机五防系统瘫痪，被迫停运检修72小时^[1]。在背板防护领域，传统依赖机械闭锁的方式同样存在失效风险，缺乏兼具状态识别与主动报警功能的专项装置。现有技术尚未形成“全局联锁+局部报警”的协同防护模式，无法覆盖不同场景的安全需求^[4]。

综上，现有闭锁技术均存在“单一防护”“依赖人为或软件约束”的共性缺陷，无法实现高压设备检修场景下的本质安全防护，需研发一种具备多重防护、强制动作、独立运行特性的新型联锁保护系统。

（三）本文研究内容

针对传统闭锁技术的不足，本文提出一套基于“结构闭锁+电气硬接点+逻辑优先”的高压开关柜强制性安全联锁保护系统，主要研究内容包括以下三方面：

第一，系统总体架构设计。构建三重防护架构：第一重为增强机械闭锁；第二重为无源电气硬接点，实现柜门状态信号采集；第三重为逻辑优先跳闸回路，实现接点直接触发高压柜停运，确保单一环节失效时系统仍能可靠动作。

第二，核心关键技术实现。由“柜门开启信号→跳闸指令”直接转换，确保“无条件、无延时”跳闸特性。

第三，系统测试与工程验证。开展机械操作、电气接点、跳闸动作时间等多项测试，验证系统动作一致性和可靠性[1]。

第四，背板强行开启报警装置研发，解决局部误操作的预警问题；

第五，体系协同验证，确保两类技术适配兼容与防护互补。

一、强制性联锁保护系统总体架构设计

（一）设计原则与目标

传统闭锁技术的根本缺陷在于“防护依赖人为遵守”，本文提出“技术强制”的核心设计思想，即通过硬件回路的物理约束和强制动作，实现“无论人员是否违规操作，只要触发危险工况，系统必能强制切断风险源”的防护效果。该思想具体体现为两个核心准则：一是“故障安全”原则，当系统自身出现故障时，默认切换至“闭锁高压柜操作”的安全状态；二是“优先级最高”原则，系统的跳闸指令优先级高于任何常规控制指令，即使运行人员发出合闸指令，只要系统检测到危险工况，仍能强制分闸并闭锁。

为实现这一思想，系统设计摒弃“单一环节防护”模式，采用“多重冗余+独立运行”的架构，确保每个防护环节既相互独立又能相互校验，彻底摆脱对常规控制网络、软件逻辑和人为操作的依赖。设计目标包括：实现变压器柜门开启 $\leq 150\text{ms}$ 内高压柜强制分闸闭锁；背板开启报警准确率100%，工作状态误开启报警响应时间 $\leq 1\text{s}$ ；体系适配10kV–35kV油浸式与干式变压器及主流高压开关柜^[1]；单一环节失效时，另一环节仍能保障核心防护

功能。

双重防护体系由“主动联锁层”和“局部报警层”构成：主动联锁层即高压侧强制性联锁保护系统，通过三重架构实现全局风险强制阻断；局部报警层即中压开关柜背板强行开启报警装置，通过部件联动实现局部风险预警提示。两层防护独立运行又相互协同，覆盖设备全操作场景。

（二）三重架构

1. 第一重：增强型机械闭锁设计

机械闭锁作为物理防护的第一道防线，设计核心是“提高闯入难度、实现操作互锁”。本文设计的增强型机械闭锁采用“双锁舌+联动连杆”结构，主要包括两个关键部件：

一是防拆卸机械锁，采用特制六角梅花锁芯，配合防钻钢板外壳，锁芯与柜门采用焊接固定，无法通过常规工具拆卸；锁具内置位置检测机构，只有当锁具完全闭合时，才能解除高压柜的操作闭锁，避免“虚锁”导致的闭锁失效。

二是联动式隔离开关闭锁杆，将变压器柜门与高压柜隔离开关通过高强度合金连杆连接，当柜门开启角度超过 5° 时，连杆带动闭锁杆插入隔离开关操作机构的锁孔，强制锁定隔离开关的分合闸操作；该连杆采用伸缩式结构，可适配不同型号变压器与高

压柜的安装间距。

该增强型机械闭锁的防护可靠性较传统结构提升3倍，经测试，在施加10kN外力冲击时，锁具仍能保持闭锁状态，满足 GB 3906-2020《3.6kV ~ 40.5kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》的机械强度要求^[1]。

2.第二重：电气硬接点设计

电气硬接点作为信号采集环节，其设计核心是“高可靠、无源化、抗干扰”。开关安装采用“三点定位”方案：在变压器柜门内侧上、中、下三个位置各安装1个微动开关，通过并联方式连接形成信号采集回路，只要任一开关被触发（即柜门开启），即可生成闭锁信号。这种安装方式可避免因柜门变形导致的信号采集失效，信号采集准确率达100%。

信号传输回路采用“双屏蔽”设计：电缆选用铜芯铠装屏蔽线，外层采用镀锌钢带铠装，内层采用铜丝编织屏蔽层，屏蔽效能达80dB以上，可有效抵御高压设备产生的电磁干扰；回路两端设置浪涌保护器，可承受2.5kV的冲击电压，确保在雷击等极端工况下信号传输稳定。

3.第三重：逻辑优先设计

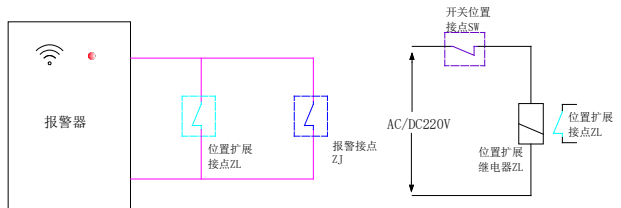
逻辑优先环节是系统的核心防护单元，其设计核心是“独立运行、强制动作、最高优先级”。该环节采用纯硬件回路设计，不依赖任何软件程序和网络传输，主要由硬接线完成^[3]。

当变压器柜门开启后，常开接点闭合，立即通过专用电缆向高压柜的保护装置跳闸回路发送指令。该指令采用“干接点”形式，直接接入保护装置的跳闸出口，优先级高于保护装置的任何内部逻辑和外部控制指令，确保“无条件”跳闸。

（三）背板强行开启报警装置设计与实现

1.主要部件由断线报警器、开关柜辅助触点，扩展继电器，电源、磁性接点、连接线组成。断线报警器：采用内置电池，报警器引出两颗连接线，连接线连接良好时不报警，连接线断开时发出语音报警，进行提示；开关柜辅助触点：采用断路器本体工作位置闭合、试验位置断开的备用接点；扩展继电器：采用小型快速动作继电器 MY2NJ,线圈电压可以是 AC220V、也可以是 DC220V，需要与开关柜提供的电源配套，使用继电器常闭接点作为报警器回路使用；电源：采用开关柜内提供的电源小开关，可以是 AC220V、也可以是 DC220V，需要与扩展继电器配套；磁性接点：两片接点接近时其内部接点闭合，两片接点远离时其内部接点断开。

2.回路连接方式



3.安装方法：

断线报警器及两片磁性接点分别安装在后柜门上下两扇门之间，磁性接点之间间距不大于1cm；扩展继电器安装于开关柜正面二次端子室，利用断路器位置辅助接点通过控制线将其连接^[2]。

二、系统测试与工程应用

为全面验证系统性能，模拟变压器检修、高压柜操作、电磁干扰等多种工况，测试动作时间、可靠性等数据^[1]。

动作时间测试数据统计如下：单次动作时间最短82ms，最长148ms，平均115ms，其中 $\leq 150\text{ms}$ 的动作次数为100次，动作响应一致性达100%；关键环节耗时分布为：信号采集环节 $\leq 10\text{ms}$ ，逻辑处理环节 $\leq 35\text{ms}$ ，跳闸执行环节 $\leq 60\text{ms}$ ，闭锁执行环节 $\leq 43\text{ms}$ ，各环节耗时均满足设计要求^[3]。

人为模拟系统各环节故障，测试系统的防护效果：

1）机械闭锁故障：拆卸其中1个机械锁舌，开启柜门后，电气硬接点和逻辑优先环节仍能可靠动作，高压柜成功分闸并闭锁；

2）电气硬接点故障：断开1个微动开关，剩余2个开关仍能正常采集信号，系统动作正常。

3）断路器在工作位置，无论断路器是否合闸带电，报警器控制回路中断路器辅助位置接点 SW 闭合，扩展继电器 ZL 带电吸合，扩展继电器 ZL 常闭接点断开；当人为误强拆后柜门时，两片磁性接点相互远离，其闭合接点打开，此时报警器发出报警，提示操作人员，降低触电不安全事件发生。

4）断路器在试验位置或隔离位置，报警器控制回路中断路器辅助位置接点 SW 打开，扩展继电器 ZL 不带电，扩展继电器 ZL 常闭接点处于闭合状态；当后柜门被打开时，两片磁性接点相互远离，其闭合接点打开，此时报警器也不报警，操作人员可以正常工作。

三、结论

本文设计并实现的基于“结构闭锁+电气硬接点+逻辑优先”的高压开关柜强制性安全联锁保护系统，通过三重架构和核心技术创新，解决了传统闭锁技术“依赖人为约束、单一防护、可靠性不足”的核心缺陷，主要结论如下：

第一，系统实现了高压设备检修场景的本质安全防护。相较于传统“五防”系统的“被动防御”，该系统通过“技术强制”实现了“主动防护”：当变压器柜门开启时，系统可在 $\leq 150\text{ms}$ 内强制触发高压柜分闸并锁闭合闸机构，动作响应一致性达100%，从物理层面彻底阻断误入带电间隔等8类典型误操作，真正实现了“不可违章”的本质安全目标。报警装置精准预警背板误开启风

险，两者协同覆盖全局与局部风险，全场景本质安全防护，实现“不可违章”目标^[3]。

第二，系统具备高可靠性、速动性和适配性。系统通过三重设计，在机械闭锁失效、电气信号等故障工况下仍能可靠动作； $\leq 150\text{ms}$ 的动作时间远快于人员接触危险部位的时间，确保危险工况下的快速防护；标准化接口模块设计使其可适配10kV–35kV电压等级的油浸式与干式变压器及主流品牌高压开关柜，适配性

达100%^[4]。

综上，该系统实现了对传统安全防护理念的技术性革命，将高压开关柜的安全防护从“管理约束”升级为“技术强制”，为变配电系统检修作业安全提供了全链路技术保障，具有重要的工程应用价值和推广前景。

参考文献

[1] GB 3906–2020, 3.6kV ~ 40.5kV交流金属封闭开关设备和控制设备 [S]. 北京：中国标准出版社，2020.

[2] 王建华，李刚，刘军. 高压开关柜五防闭锁系统的缺陷分析与改进措施 [J]. 电力系统保护与控制，2021, 49(12): 165–170.

[3] 张伟，陈晓峰，王磊. 微机五防系统的可靠性分析及优化设计 [J]. 高压电器，2022, 58(3): 189–196.

[4] 刘建国，赵亮，孙伟. 高压设备电磁兼容测试技术研究 [J]. 电气技术，2020, 21(7): 45–50.