

针对特高压站二次屏柜的智能安措布置装置研制研究

董浩博 张培忠 李建 陈臣 张玄哲

国网河南省电力公司直流分公司

DOI:10.32629/pe.v4i1.18995

[摘要] 本研究聚焦特高压站二次屏柜智能安措布置装置的研制工作,核心研究内容包括:基于自主可控共性平台构建“端-边-云”协同系统架构,攻克高可靠电磁锁具集成、多模态状态感知融合及AI风险预警算法等关键技术,建立量化的安措可靠性评估模型。本装置旨在实现安措布置的远程化、程序化与智能化转型,可将单次安措操作时间从传统人工模式的数十分钟缩短至秒级,显著降低人为失误风险,提升电网运检本质安全水平,对保障特高压电网安全稳定运行具有重要工程应用价值与现实指导意义。

[关键词] 特高压; 二次屏柜; 安全措施; 智能化; 自主可控; 可靠性

中图分类号: O521+.9 文献标识码: A

Research on Intelligent Safety Measures Layout Device for Secondary Screen Cabinet in Ultra-High Voltage Stations

Haobo Dong Peizhong Zhang Jian Li Chen Chen Xuanzhe Zhang

State Grid Henan Electric Power Company DC Branch, Zhengzhou City

[Abstract] This study focuses on the development of an intelligent safety measure deployment device for secondary cabinets in ultra-high voltage substations. The core research contents include: constructing a "device-edge-cloud" collaborative system architecture based on an independently controllable common platform, overcoming key technologies such as highly reliable electromagnetic lock integration, multi-modal state perception fusion, and AI-based risk warning algorithms, and establishing a quantitative reliability assessment model for safety measures. The device aims to achieve the remote, procedural, and intelligent transformation of safety measure deployment, reducing the time required for a single safety measure operation from tens of minutes in traditional manual mode to the second level. This significantly lowers the risk of human error, enhances the inherent safety level of power grid operation and maintenance, and holds significant engineering application value and practical guiding significance for ensuring the safe and stable operation of ultra-high voltage power grids.

[Key words] ultra-high voltage; secondary cabinets; safety measures; intelligence; independent controllability; reliability

引言

变电站二次系统作为保障电网安全稳定运行的“神经中枢”,二次屏柜安全措施布置是所有检修、技改作业实施前的核心安全前置环节。传统安措实施需依赖运维人员赶赴现场,手动操作机械锁具、悬挂安全标示牌并铺设红布幔,存在流程烦琐、耗时漫长、操作一致性差、无法远程实时监控等固有缺陷^[1]。在新型电力系统构建背景下,电网运行控制难度显著增大,数字化转型进程持续提速,传统安措模式已无法满足电网高可靠性运行要求与精益化管理需求。因此,研制一套具备远程精准控制、状态实时反馈、智能逻辑防误功能的安措布置装置,推动安措实施从“人工经验驱动”向“程序化智能管控”、从“被动响应处置”

向“主动预警防控”转型,已成为电力行业迫切的技术发展方向^[2]。

1 智能安措系统总体架构设计

1.1 系统设计原则与目标

本装置研制严格遵循三大核心原则:一是高可靠性原则,任何单点故障均不得引发误解锁或误闭锁,安措动作成功率需达到99.99%以上;二是强兼容性原则,需实现对不同厂家、不同型号、不同建设时期二次屏柜物理结构的全面适配;三是本质安全原则,系统需内置完善的防误逻辑、分级权限管控与全流程操作追溯功能。核心目标是推动安措布置从“就地人工操作”向“远程程序化作业”转型,将平均单柜安措布置与校验时间控制在3秒以内,实现安措实施全过程数据可追溯、可审计。

1.2 “端—边—云”协同系统架构

物理执行层(端):部署于各二次屏柜,由智能终端集群构成,核心组件包括高可靠自适应电磁锁具、多模态状态感知模块(集成门磁传感器、微型摄像头、压板状态识别传感器)及就地控制单元^[3]。

站端控制层(边):部署于变电站内,核心设备为安措专用控制主机,承担边缘计算节点职能;核心构成包含全站屏柜终端状态信息聚合模块、本地防误逻辑校验库,具备上层下发指令接收与验证、站内毫秒级响应及离线独立运行机制。

区域集控层(云—网络):部署于地区集控站或调度主站,配备全景化图形化操作界面,涵盖标准化安措票一键生成模块、远程操作指令下发模块及操作权限校验与逻辑顺序校核模块。

云端分析层(云—平台):构建于电力物联网平台之上,核心为大数据分析引擎与人工智能算法引擎,以历史安措操作数据、设备状态监测数据为分析基础,集成数据深度挖掘与深度学习模块。

2 关键硬件技术与可靠性建模

2.1 高可靠自适应电磁锁具设计

本研究摒弃传统机械锁及简易电磁锁,研制基于永磁—电磁复合驱动原理的自适应锁具。锁体采用双线圈冗余设计与心跳包实时自检机制,可持续监测线圈通断状态与磁力强度,确保驱动可靠性;锁舌机构创新性集成微型力矩传感器与位移传感器,能够实时感知锁舌运动受阻情况:当遇到屏柜变形导致的轻微卡涩时,控制算法可动态调整输出力矩实现自适应解锁;若阻力超过安全阈值(如遭遇异物阻塞或暴力破坏),系统立即上报故障并保持闭锁状态,杜绝非授权开启。

锁具闭锁可靠性可通过量化模型分析:假设单个锁具的失效模式主要分为电气失效与机械失效,且两类失效相互独立,则其平均故障间隔时间(MTBF)可通过各部件失效率 λ_i 计算得出:

$$MTBF_{lock} = \frac{1}{\lambda_{total}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (1)$$

其中, λ_{total} 为锁具总失效率, λ_i 代表控制芯片、驱动线圈、感知传感器、机械传动部件等第*i*个子部件的失效率。通过选用军品级元器件并优化冗余设计,单锁具MTBF可提升至不低于10万小时。

2.2 多模态状态感知融合技术

安措状态的精准判断依赖多传感器信息融合技术,每个智能终端集成三路互补感知通道,实现状态监测无死角:

高精度双稳态门磁传感器:可分辨门缝间隙变化小于0.5毫米,精准识别屏柜门“全开”“全闭”“虚掩”三种状态,杜绝门体状态误判。

微型广角摄像头:精准对准屏柜内部关键压板、空开区域,通过图像识别算法自动校验“压板已退出”“电源已断开”等核心安措项的实际状态,并与指令要求进行实时比对。

无线射频识别(RFID)读卡器:与运维人员电子身份牌绑定,实现“人员—权限—屏柜”三元验证,确保仅授权人员可在指定时间内对特定屏柜执行现场应急解锁操作。

感知数据在就地控制单元完成预处理与融合分析,采用D-S证据理论算法对不同传感器的置信度信息进行加权融合,最终输出屏柜安措状态的可信结论,综合判断准确率可提升至98%以上。

表1 智能终端核心传感器性能指标

传感器类型	关键性能指标	设计目标值	备注
自适应电磁锁	闭锁保持力	≥ 800 N	防止非授权开启
自适应电磁锁	平均故障间隔时间	$\geq 100,000$ 小时	基于可靠性模型
双稳态门磁	状态分辨精度	< 0.5 mm	区分虚掩与全闭
微型摄像头	图像识别准确率	$\geq 99.3\%$	针对压板、空开状态
融合判断系统	综合状态判断准确率	$\geq 98\%$	多传感器信息融合后

3 软件算法与安全逻辑

3.1 基于二次设备共性平台的软件架构

装置核心控制软件构建于自主可控的二次设备共性平台之上,该平台提供统一的实时操作系统内核、标准化软件开发环境与规范化数据通信接口,确保软件的高可靠性、可维护性与可扩展性。应用软件采用模块化设计,核心模块包括:通信管理模块,遵循IEC 61850等电力标准规约,实现各层级间的数据交互与指令传输;安全防误模块,内嵌变电站“五防”逻辑库,可在线校核安措票的操作顺序与完整性;设备驱动模块,实现对各类硬件终端的统一管理与精准控制;数据存储模块,全程记录操作日志与设备状态快照,满足安全审计与追溯要求。

3.2 安措操作的全过程闭环防误逻辑

系统搭建“生成—预演—执行—复核—归档”全流程闭环防误逻辑体系。智能成票与可视化预演环节,依据作业计划自动关联对应屏柜电子图纸及历史安措记录,辅助生成标准化安措票;执行前在集控层开展三维可视化预演,模拟操作步骤,由系统自动完成逻辑冲突校验。多因子认证与顺序强制控制环节,执行指令需通过操作员、监护人双因子身份认证;指令下发至站端控制层后,本地防误逻辑执行二次校核;操作严格遵循“请求—校验—执行—反馈”闭环流程,按预定顺序推进,例如确认前一屏柜“失灵启动压板”退出后,方可操作关联屏柜“跳闸出口压板”。AI增强型风险预警环节,依托云端分析层历史数据训练AI风险预警模型,识别安措实施异常模式,若检测到保护屏柜完成安措布置后关联在线监测数据异常波动,即便操作符合规范,系统也主动发出预警,提示运维人员重点核查。

4 系统集成、测试与应用验证

4.1 系统集成与型式试验

完成所有硬件终端、站端控制主机与集控层软件的系统性

集成联调后,在国家电网电力系统二次设备技术与应用实验室等权威机构开展全面型式试验,试验项目覆盖特高压站特殊运行环境与安全要求,超越常规产品标准。开展电磁兼容性试验,模拟特高压站极强电磁干扰环境,验证系统性能与指令传输状态;开展极限环境适应性试验,在-25°C至+70°C宽温域、高湿度、高粉尘环境条件下,检测锁具机械性能及电子器件工作状态;开展网络安全渗透测试,模拟黑客攻击、指令伪造等恶意行为,检验系统网络防护能力及控制指令完整性、设备访问权限管控效果;开展百万次疲劳寿命测试,对锁具实施连续闭锁—解锁循环操作,验证其机械寿命能否匹配变电站长期运行需求(预计使用寿命≥15年)。

4.2 现场试点与效能评估

选取一座500kV枢纽变电站与一座±800kV换流站作为试点,覆盖保护屏、测控屏、故障录波屏等多种典型屏柜类型,开展为期6个月的现场应用验证。通过对比智能装置应用前后的核心作业指标,量化评估装置实际效能。

表2 智能安措装置现场试点应用效能对比

评估维度	传统人工模式	智能安措模式	效能提升
单屏柜平均布置时间	约 22 分钟	约 3 秒	提升约 440 倍
安措项漏执行率	统计约为 0.1%	0% (系统强制校验)	降至零
运维人员往返现场次数	至少 2 次 (布置、拆除)	0 次 (远程完成)	大幅降低劳动强度
全过程追溯能力	依赖纸质记录导致追溯起来非常困难	全数字化记录能够做到一键就可追溯	实现精准化的安全管理
应对复杂方式调整效率	耗时数小时,协调困难	方案直接在线进行快速地调整和执行	极大地增强了运行的灵活性

试点结果显示,此装置提升了安措作业效率和安全水平。其具备的“远程布控”特性让集控站人员能同时高效管控多个现

场安措状态,真正实现了“少人值守”“集中监控”的运维新模式。在试点期间,系统成功预警了2次因施工人员接近非工作区域屏柜引发的潜在风险,还通过远程语音广播及时制止,验证了其主动安全防御能力。

5 结语

研制特高压站二次屏柜智能安装布置装置是电力系统运维模式朝着数字化、智能化转型的一次突破性实践。本研究通过创新构建“端-边-云”协同架构攻克高可靠自适应锁具等关键技术,成功将抽象的安全规程转化成可远程精准执行的程序化操作,有效破解传统模式下作业风险高、效率低、管控难等核心痛点,为电网运检安全提供了坚实的技术保障。

[参考文献]

[1]李书勇.特高压混合多端直流实时数字仿真试验关键技术与应用研究[D].华南理工大学,2023.

[2]雷霄,常忠蛟,张进,等.巴西美丽山水电送出系统安措协控系统调试方案与现场试验[J].电网技术,2021,45(8):3332-3339.

[3]孔祥平,李鹏,高磊,等.基于深度学习的特高压直流控制保护系统可视化技术[J].电网与清洁能源,2020,36(02):29-37.

作者简介:

董浩博(1994--),男,汉族,河南漯河人,本科,助理工程师,研究方向:换流站运维。

张培忠(1989--),男,汉族,山东菏泽人,本科,工程师,研究方向:特高压交直流运维。

李建(1995--),男,汉族,河南上蔡人,本科,工程师,研究方向:特高压交直流运维。

陈臣(1996--),男,汉族,河南商丘人,本科,工程师,研究方向:换流站运维。

张玄哲(1993--),男,汉族,河南郑州人,本科,工程师,研究方向:换流站运维。