

Key Points and Practical Research on Safety Control of “Human-Machine Collaboration” Operations in Substation Operation and Maintenance Work

Weixin Du Zhenjun Yan Mireda Wukaili Bo Sun Jinbao He

State Grid Kuitun Power Supply Company, Kuitun, Xinjiang, 833699, China

Abstract

With the advancement of the “dual carbon” goals and the acceleration of smart grid construction, substation operation and maintenance is gradually transforming from “manual dominance” to “human-machine collaboration”. While this transformation significantly enhances operation and maintenance efficiency, it also brings about safety hazards such as ambiguous human-machine responsibility definition, equipment reliability risks, and insufficient personnel operation adaptability. This article distills the core points of safety control from five dimensions: organizational management, technical support, personnel capabilities, process norms, and emergency response. It verifies the effectiveness of the control system through actual cases and proposes optimization countermeasures for challenges such as technology integration, skill iteration, and dynamic risks, providing theoretical and practical references for the safe implementation of human-machine collaborative operations in substation operation and maintenance.

Keywords

Substation operation and maintenance; Human machine collaboration homework; safety control

变电运维工作中“人机协同”作业的安全管控要点与实践研究

杜伟新 闫振军 米热·达吾开力 孙博 何金宝

国网奎屯供电公司, 中国·新疆 奎屯 833699

摘要

随着“双碳”目标推进与智能电网建设加速, 变电运维逐步从“人工主导”向“人机协同”转型, 该转型在显著提升运维效率的同时, 也带来人机责任界定模糊、设备可靠性风险及人员操作适配性不足等安全隐患。本文从组织管理、技术保障、人员能力、流程规范及应急处置五个维度提炼安全管控核心要点, 结合实际案例验证管控体系有效性, 并针对技术融合、技能迭代及动态风险等挑战提出优化对策, 为变电运维人机协同作业的安全开展提供理论与实践参考。

关键词

变电运维; “人机协同”作业; 安全管控

1 引言

变电运维作为保障电网安全稳定运行的核心环节, 其作业质量直接决定电力供应可靠性, 传统运维模式依赖人工完成巡检、倒闸操作及故障处理等任务, 普遍存在劳动强度大、作业效率低及安全风险高等问题^[1]。近年来, 随着人工智能、物联网及机器人技术在电力领域的深度渗透, “人机协同”逐步成为变电运维转型的核心方向。然而, 人机协同作业打破传统运维单一安全管控逻辑, 新增了人机交互、设备可靠性及数据安全等多重风险维度。基于此, 本文将对变

电运维工作中“人机协同”作业的安全管控要点与实践展开相关研究。

2 变电运维人机协同作业的安全管控核心要点

2.1 组织管理: 明确责任边界, 完善制度体系

组织管理作为人机协同作业安全管控的基础支撑, 核心在于通过“责任矩阵+制度规范”解决人机责任模糊问题。

首先需要构建清晰的人机责任矩阵, 依据不同作业场景划分责任边界, 坚守“机器负责执行、人员负责决策”的核心原则, 例如在巡检作业中, 机器承担数据采集责任以保障数据完整性与采集精度, 人员则承担数据审核与异常处置责任, 负责复核异常点、判断故障等级及制定处理方案^[3], 在操作作业中, 机器负责指令执行并保障动作准确性与应急

【作者简介】杜伟新(1970-), 男, 中国陕西米脂人, 从事电力运维研究。

闭锁功能有效,人员负责指令审核与监护,确保指令合规性、实时监控机器状态及执行紧急停机操作。

同时需要完善制度规范体系,制定《人机协同变电运维作业规程》《人机协同设备管理办法》等文件,明确作业流程、设备管理及责任追究三大核心内容,其中作业流程需规定人机协同作业的事前审批、事中执行与事后复盘环节,如巡检前审核机器人路径、操作前验证指令五防合规性,设备管理需明确机器定期检测、维护及报废标准,如无人机每飞行100小时进行电池性能检测、智能机器人每季度校准执行机构精度,责任追究则需建立“人机双追溯”机制,通过操作日志与机器运行数据定位事故责任主体,涵盖人员误操作、机器故障及制度漏洞等情形。

2.2 技术保障: 强化设备可靠性, 构建交互安全屏障

技术保障是降低设备风险、实现人机安全交互的关键,需聚焦设备选型、实时监控及防误闭锁三个层面构建防护体系。

在设备选型环节,需优先选用符合国家能源局《智能变电设备技术要求》的产品,重点考核环境适应性、功能兼容性及安全防护能力三项指标,其中环境适应性要求机器耐受变电站高温、高湿、强电磁干扰环境,如巡检机器人防护等级不低于IP65、无人机具备抗10级大风能力,功能兼容性要求设备支持与现有SCADA系统、状态监测系统的数据互通以避免“数据孤岛”,安全防护能力要求操作机器人具备“双重闭锁”功能、AI诊断系统预留“人工复核接口”,防止误操作与算法偏差引发风险。

在实时监控环节,需构建“边缘计算+云平台”的监控架构,边缘端在变电站部署节点实时处理人机交互数据,如机器人位置、操作指令及设备状态,发现异常如机器人偏离路径、指令错误时100ms内触发告警并闭锁机器动作,云端通过电力调度云平台存储历史数据,利用大数据分析优化人机协同策略,如调整巡检频次、优化机器人路径,实现数据驱动的安全管控。

在数据安全防护环节,需采用“加密传输+分级存储+访问控制”三重措施,数据传输采用国密SM4算法加密避免篡改,数据存储按敏感度分级,设备状态数据存储于本地加密服务器、操作日志同步上传云端备份,访问控制建立“角色-权限”对应机制,仅允许运维负责人、操作人及监护人访问相关数据,防止越权操作。

2.3 人员能力: 提升技能适配性, 强化安全意识

人员作为人机协同的“管控核心”,需通过培训、认证及文化三重路径提升综合能力。

构建分层培训体系需要针对运维负责人、操作人、监护人等不同岗位设计差异化内容,基础层面向全员培训人机协同作业风险、基本操作流程及应急处置常识,如无人机禁飞区域、机器人故障停机步骤,专业层面向操作人员深度培训机器原理与高级操作技能。

推行资质认证制度要建立“人机协同运维资质”认证体系,人员需通过理论考试与实操考核方可上岗,理论考试涵盖规程制度、机器原理及风险点识别,占比40%,实操考核模拟巡检异常判断、操作指令审核及机器故障处置等场景,如“无人机发现绝缘子破损后人员复核与处置方案制定”,占比60%。

强化安全文化建设可以通过案例警示与经验分享提升人员安全意识,每月组织安全例会剖析人机协同事故案例,如机器人操作指令错误导致的隔离开关误动,总结教训,每季度开展“人机协同安全之星”评选,鼓励人员提出安全优化建议,如改进机器人操作界面、优化巡检路径。

2.4 流程规范: 实现全周期管控, 降低过程风险

流程规范是确保人机协同作业“标准化、可追溯”的关键,需要覆盖事前、事中、事后全周期构建管控机制。

事前阶段需开展风险评估与方案制定,风险评估采用JSA方法识别人机交互风险,如“机器人倒闸操作”需评估“指令错误”“机器人卡涩”“人员监护不到位”等风险并制定防控措施,方案制定需明确作业范围、人机分工、时间节点及应急措施,如巡检方案标注无人机飞行路径、重点监测设备及人员复核点位。

事中阶段需强化执行监督与过程记录,执行监督采用“双人监护”模式,一人负责操作机器或下发指令,一人负责监控作业过程,发现异常立即叫停,过程记录通过“电子作业票+视频监控”实现全程追溯,电子作业票记录人机操作步骤、时间及责任人,视频监控留存作业过程,便于后续复盘。

事后阶段需落实复盘总结与持续优化,作业结束后24小时内召开复盘会,分析作业中的问题如机器数据采集偏差、人员复核延迟,制定整改措施,每季度汇总复盘结果,更新作业规程、培训内容及机器参数,如调整AI诊断系统阈值、优化机器人巡检频次。

2.5 应急处置: 构建人机协同预案, 提升响应效率

应急处置是应对突发风险的最后防线,需要建立“人机联动”的应急体系。

第一要制定专项应急预案,针对机器故障、人员失误、外部灾害三类场景明确处置流程,在机器故障场景中^[2],若巡检机器人导航失灵,人员需立即远程停机并启用备用机器人或人工巡检,若操作机器人卡涩,人员需触发机械闭锁并联系检修人员处理,人员失误场景中,若人员误下发指令,机器需自动触发指令闭锁,人员立即撤销指令并复核,若人员监护不到位,监控系统发出告警且运维负责人介入处置,在外部灾害场景中,若暴雨导致变电站积水,机器人自动返回安全区域,人员启动防水措施并暂停户外人机协同作业。

第二需定期开展应急演练,每月开展1次桌面演练,每季度开展1次实战演练,模拟上述应急场景,考核“人员响应速度”“机器闭锁有效性”“处置方案合理性”,如模

拟“无人机巡检时突发大风失控”场景，考核人员1分钟内远程停机、判断坠落风险区域及协调现场处置的能力。

第三要建立应急资源库，储备备用机器设备如备用巡检机器人、无人机电池，应急工具如机器人检修工具、紧急停机按钮，同时建立供应商应急响应机制，确保机器故障时4小时内获得技术支持。

3 人机协同作业安全管控的实践案例

以某省电力公司220kV城东变电站“机器人+人工”倒闸操作协同项目为例，验证安全管控要点的有效性，该变电站2023年推行人机协同倒闸操作初期，存在机器兼容性差、人员操作不熟练等问题，实施管控体系后成效显著。

组织管理层面，制定《城东变电站人机协同倒闸操作规程》，构建责任矩阵，明确机器人负责“断路器分合、隔离开关操作”，人员负责“指令审核、实时监护、应急停机”，成立专项小组每月开展责任落实检查。技术保障层面，选用具备双重闭锁功能的智能操作机器人，部署边缘计算监控节点实时监控机器人动作与指令，统一机器人与SCADA系统数据接口解决兼容性问题，采用SM4算法加密操作指令防止数据篡改。人员能力层面，开展3期专项培训覆盖20名运维人员，内容包括机器人操作、指令审核及应急处置，推行资质认证且18人通过考核上岗，每月分享倒闸操作案例强化安全意识。流程规范层面，采用JSA风险评估制定操作方案，明确“指令双人审核→机器人预演→实时监控→操作后复核”四步流程，通过电子作业票与视频监控记录过程。应急处置层面，制定《机器人倒闸操作应急处置预案》并开展演练，储备1台备用机器人及2套紧急停机装置，与供应商签订4小时应急响应协议。

实施后6个月内，该变电站倒闸操作误操作率为0，机器故障发生率从15%降至3%，未发生人机协同相关安全事故，单组倒闸操作时间从40分钟缩短至25分钟，效率提升37.5%，人员高空作业、带电环境暴露次数减少60%，同时通过复盘优化机器人操作界面与培训内容，形成可复制的管控经验。

4 人机协同作业安全管控的挑战与优化对策

尽管现有管控体系在实践中取得成效，但随着技术迭代与电网复杂度提升，仍面临三大核心挑战，需要针对性提出优化对策。

第一，技术融合深度不足。当前多设备协同如无人机+机器人+AI系统存在“数据壁垒”，无人机红外数据与机

器人机械特性数据无法实时融合导致AI诊断延迟，且部分老旧变电站设备无法接入智能监控系统，人机协同覆盖范围受限。为此需推动行业标准统一，制定《变电运维人机协同设备数据接口规范》强制要求设备支持标准化接口，开展老旧变电站智能化改造加装数据采集模块与边缘计算节点实现“新老设备协同”，构建“人机协同数据中台”整合多设备数据支持实时分析与决策。

第二，人员技能迭代滞后。AI、机器人技术更新快如新一代巡检机器人具备自主避障与AI自主诊断功能，而现有培训多为“定期集中培训”无法实时覆盖新技术，部分年长运维人员存在“技术畏难”情绪。对策上可以建立“线上+线下”持续培训体系，线上通过“微课”“虚拟仿真”平台实时更新新技术操作教程，线下开展“师带徒”实操培训，推行“技术激励机制”对掌握新技术的人员给予绩效奖励，开发“智能辅助系统”通过语音提示与风险预警简化操作流程。

第三，动态风险管控难度大。电网负荷波动、极端天气如台风、暴雪会改变作业风险，如夏季高温缩短机器人电池寿命、冬季覆冰影响无人机稳定性，而现有风险评估多为“事前静态评估”。为了应对该挑战需要引入AI动态风险预警系统，基于天气、负荷、设备状态等实时数据预测风险等级并自动调整管控策略，建立“跨部门协同机制”与气象部门、调度中心实时共享数据提前预判外部风险，推行“弹性作业计划”根据风险等级动态调整人机协同作业安排。

5 结语

变电运维“人机协同”是智能电网发展的必然趋势，其安全管控需突破传统“单一人工管控”思维，构建“组织—技术—人员—流程—应急”五位一体的体系，通过明确责任边界解决人机分工模糊问题，依托技术保障降低设备与数据风险，借助人员能力提升强化管控核心，凭借流程规范实现全周期追溯，依靠应急处置筑牢最后防线，且实践案例已验证该体系能有效降低事故率、提升作业效率。

参考文献

- [1] 卢月丽. 变电运维现场作业过程中的安全管控[J]. 中文科技期刊数据库(全文版) 自然科学, 2018(10):409-410.
- [2] 杨峰, 赵永兰. 分析变电设备运检的运维及检修一体化管控要点[J]. 中文科技期刊数据库(全文版) 工程技术, 2020(10):120-121.
- [3] 王冠杰. 智能巡检机器人在变电运维工作中的运用[J]. 通信电源技术, 2024, 41(17):50-52.