

长距离原油输送管道电气系统安全运行保障研究

王刚(国家管网集团北方管道有限责任公司北京输油气分公司任丘作业区,河北沧州061000)

赵晓丽(国家管网集团北方管道有限责任公司北京输油气分公司沧州作业区,河北沧州061000)

摘要:长距离原油输送管道的电气系统是保障泵站和管道连续稳定运行的核心环节,其安全性直接影响输油效率、设备可靠性及环境安全。本文围绕管道电气系统的组成、运行特点及关键风险因素,分析了电气系统安全保障技术、规范要求及输油站场监测管理方法,以及智慧变配电系统建设与安全运行,为长输管道电气系统的安全运行提供了技术支撑与管理参考。

关键词:长输管道;电气系统;安全运行;风险防控

中图分类号:TE8

文献标识码:A

文章编号:1674-5167(2025)029-0139-03

Research on the Safe Operation Assurance of Electrical Systems in Long-Distance Crude Oil Transportation Pipelines

Wang Gang(National Pipeline Network Group Northern Pipeline Co., LTD Beijing Oil and Gas Transmission Branch Company Renqiu Work Area, Cangzhou Hebei 061000,China)

Zhao Xiaoli (Northern Pipeline Co., LTD., National Pipeline Network Group Beijing Oil and Gas Transmission Branch Company Cangzhou Work Area, Cangzhou Hebei 061000,China)

Abstract: The electrical system of long-distance crude oil transportation pipelines is the core link to ensure the continuous and stable operation of pumping stations and pipelines. Its safety directly affects the oil transportation efficiency, equipment reliability and environmental safety. This article focuses on the composition, operational characteristics and key risk factors of pipeline electrical systems, analyzes the safety guarantee technologies, regulatory requirements and monitoring and management methods of oil transmission stations for electrical systems, as well as the construction and safe operation of intelligent power distribution and transformation systems, providing technical support and management references for the safe operation of long-distance pipeline electrical systems.

Key words: Long-distance pipeline Electrical system; Safe operation; Risk prevention and control

长距离原油输送管道是国家能源供应的重要基础设施,其输油效率和安全性直接影响能源安全与经济发展。管道电气系统是泵站和阀门运行的核心支撑,但受地形复杂、设备老化、雷击和操作管理等因素影响,易发生故障,引发输油中断或安全事故。因此,研究长输管道电气系统的安全运行机制和风险防控技术,对提升管道运行可靠性和安全管理具有重要意义。

1 长距离原油输送管道电气系统安全运行基础

1.1 管道电气系统组成与运行特点

该长距离原油输送管道的电气系统由动力分配、仪表操控、通讯监控、防雷接地及防护设施等核心组件构成,供电系统向泵站、阀门及加热设施输送稳定电力,普遍应用双供电回路及关键设备冗余方案,确保故障时电源切换迅速可靠;泵站压力、流量、温度等参数的实时监控与自动调节由PLC或SCADA系统执行,保证管道输油稳定;系统采用光纤、无线及远程传输技术,实施运行状态数据采集及故障警报激活;防雷与接地系统针对雷击、电涌及静电风险,运用避

雷针、接地网及浪涌保护器等防护手段,保障人员和设备安全。该系统特点包括覆盖范围广、运行环境复杂、设备长期连续运行、与管道机械系统紧密耦合,因此对供电稳定性、监控精度及快速故障响应能力要求极高。

1.2 电气系统安全运行的关键风险因素

运行中的长距离原油输送管道电气系统承受诸多关键风险,设备老化与绝缘退化所诱发的短路及接地故障,高温、潮湿、冻融循环及腐蚀性环境对电缆与变压器等元件的可靠性造成不利后果,遭遇雷电、电涌等自然现象的瞬间冲击,运维管理不规范、巡检延后、数据监控缺陷及异常应对失误,也提升电气故障的频发几率^[1]。这些风险因素不仅可能导致泵站和阀门停机,还可能引发管道压力异常、油品泄漏甚至环境安全事故,对管道的连续稳定运行和整体安全构成重大威胁。

1.3 电气系统安全保障技术与规范要求

长距离输油管道电气系统安全,须综合实施设计规范、技术措施与管理规程,依照《通用用电设备配

电设计规范》、GB26859《电力安全工作规程线路电气部分》、GB26860《电力安全工作规程发电厂和变电站电气部分》等规范，部署双供电回路、关键设备冗余及UPS不间断电源系统，防止单一故障点对整体造成干扰；部署在线绝缘、温度监控及电流电压实时采集系统设施，实施故障早期预警程序，引入防雷接地与浪涌防护机制，减少外部电气冲击的潜在威胁；需构建周期性巡检与维护体系，对高风险设备与环境实施分级别监管，整合数据分析与预测性维护手段，维持设备长期稳定运行状态。通过规范化设计、先进技术和科学管理的结合，可有效降低电气故障概率，保障管道安全、高效输油。

2 输油站场电气系统监测与运行管理

2.1 输油站场电气监测技术及数据应用

输油站场区域，电气监测系统是泵站与阀门稳定运作的坚实后盾，构成输油安全管理之核心支柱，实施高精度电流、电压及功率监测方案，可以实时掌握泵站负荷波动和电源异常，识别出负载、过载或短路迹象，系统迅速响应警报并启用备用路径，有效防止设备停运及输油流程的中断，持续跟踪电缆及变压器绝缘电阻的数值变化，可以预兆局部老化及潜在泄漏迹象，综合温度及湿度监测数据，可精确评估设备健康状态，为运维实践提供科学支撑。

数据的深度应用使监测技术真正转化为决策支持和风险防控能力，通过分析泵站各台泵的参数曲线与历史故障记录，可以识别负荷异常波动迹象，前瞻性洞察机械与电气故障的潜在隐患，实施运行策略的改进，以延长设备的使用周期，数据融合与智能分析还可实现跨站点异常关联监测，遭遇站场电压波动情形，利用管网电气网络模型，可迅速筛选受影响的下游泵站，协助现场人员实施有针对性的检查与防护工作，将监测数据转化为安全运行动态防护的支撑体系，加强长输管道系统的可靠性及应急应对能力。

2.2 电气系统对输油作业安全的支撑作用

电气系统对输油作业安全的首要支撑作用体现在保证泵站及关键设备的连续稳定运行。通过高可靠性供电系统，包括双回路电源、UPS及备用发电机组，电气系统可以在外部电网故障或短时停电时，实现泵站主泵、阀门及控制系统的无缝切换，确保输油作业不中断。例如，双母线与自动切换开关（ATS）能够在主电源故障发生后快切时间0.1s内完成切换同时UPS对PLC和SCADA控制回路提供最少两小时不间断供电，使关键控制逻辑始终在线，从而避免因电源中断引发的管道压力波动、水锤或输油中断事故^[2]。

其次，电气系统通过智能化监测与诊断技术提升

设备安全保障能力。在线绝缘监测、母线电流/电压分析、变压器DGA、温升及振动监测等手段，可以实时评估设备健康状态，及时发现潜在故障。例如，当泵站主变的温升超过设定阈值或绝缘电阻下降至安全下限时，系统可自动触发预警并采取减载、切换备用泵或停泵措施，从而防止事故扩大。电机状态分析（MCSA）和振动趋势分析能够识别早期机械异常，为维护决策提供科学依据，减少计划外停机和安全风险。

最后，电气系统通过自动化保护与联锁机制实现作业过程的综合安全控制。安全仪表系统（SIS）可根据泵站预设的进出站压力值、输油泵进、出口压力设定值及储油罐的高低液位值等自动执行泵停、站场隔离及阀门闭锁等操作；火焰、烟雾和可燃气检测器与ESD系统联动，能够在火灾或泄漏事件发生时快速切断相关电源和管道流量。

2.3 输油站场电气管理与风险防控机制

系统化分层构建输油站场电气安全及风险防控体系，保障设备运行及作业安全，在组织管理层面，建立细致的电气作业规范与责任约束机制，对站场电气设备进行三级分类，划分为关键、重要及普通三个等级，对各级设备实施差异化的巡检周期、维护方案及应急处理机制。

主变压器、泵站主电机及UPS系统作为关键设备，日检、月度红外扫描测温、季度绝缘性能测试、年度负载试验；日常用电设施诸如照明与辅助风机，每周巡检为主轴，采用数字管理解决方案，电子化保存巡检与维护日志，实现责任追溯和数据分析，为风险识别提供可靠依据，应于站场构建应急应对机制，实施电气故障快速识别、备用电源切换及泵站联动控制，落实“故障—隔离—恢复”的闭环作业流程，有效降低停输及事故风险系数。

在技术与制度结合的防控机制上，应将监测、预测、预防及控制措施有机结合，对电气系统实施实时监控，涵盖绝缘检测、母线电流电压分析及设备温升与振动数据的采集过程，对关键设备健康状态进行实时评估，依托历史运行数据，构筑故障预测模型，实施预防性维护程序。

系统对电缆局部放电、母线电压异常或泵站负荷波动超出阈值现象进行自动监测，可自动触发预警和保护动作，执行备用回路转换、减载及停泵操作，并记录事件供后续分析，结合防爆与接地管控手段，构建站点间联动控制与管道安全隔离体系，防止局部异常扩散至系统其他模块，实施“分级治理—实时监控—预测预防—快速响应”的立体化防控措施，大幅减少

输油站场电气事故的潜在概率，保障长输管道输油作业的稳定性与安全状态。

3 智慧变配电系统建设与安全运行提升

3.1 智慧变电站的体系架构与功能实现

智慧变电站的建设以“采集数字化、接口标准化、分析智能化”为技术核心，通过先进传感、智能监测终端与一键顺控等手段，全面提升设备状态感知和运行控制能力。

在电气系统中，这种体系能够覆盖主设备和辅控系统，实现对温度、湿度、油位、局放、气体密度等关键运行参数的在线采集与实时传输，为输油电气设备提供全面的运行画像^[3]。通过边缘计算与数据融合，智慧变电站不仅能发现隐患，还能提前给出预警信号，大幅度降低了事故发生概率。

在功能实现上，智慧变电站注重人机交互与远程集中监控。借助智能巡视机器人、视频识别与AI分析，能够实现无人值班条件下的远程运维，既减少了现场作业风险，也提升了电网运检效率。同时，一键顺控与智能防误系统的结合，确保了操作流程的安全性和标准化，避免了误合闸、误拉闸等风险性操作，从而保障了输油作业的连续性和电气系统的本质安全。

3.2 智能高压设备与智能巡视系统的应用优化

智能高压设备的应用应以“传感—终端—总线—平台”的一体化架构为核心。在一次设备侧，针对变压器、GIS/GIL、断路器、避雷器、母线及电缆等配置多维度传感器，如光纤温度、DGA 在线气体分析、SF₆ 密度与微水、局放检测、无线测温与红外测温等；电量测量通过 LPIT+ 合并单元接入过程层，数据按 IEC61850 标准输出，并通过 GOOSE 实现毫秒级事件发布。

智能监测终端（IMT）负责数据采集与边缘诊断，完成滤波、工况补偿与特征提取，并结合 IEEE1588 时间同步将数据上送站控系统，同时具备传感器自检与自校功能，确保在高温、盐雾、电磁干扰等恶劣环境下的长期稳定运行，实现从设备异常感知到现场声光、视频联动与门禁控制的快速响应^[4]。

在线智能巡视系统采用机器人、摄像机、声纹监测装置等方式联合采集巡视数据，巡视数据包括可见光视频及图像、红外图谱、音频等。巡视类型包括例行巡视、特殊巡视、专项巡视、自定义巡视等 4 类。支持巡视主机接收主辅设备监控系统联动信号，联动摄像机、机器人执行相应联动策略，支持巡视过程中向主辅设备监控系统发送反向联动信号。支持与上级主站进行数据交互，接收主站下辅的巡视任务与远程控制请求，上报巡视结果及控制请求响应。

3.3 智慧运维与持续改进机制

智慧运维机制的核心在于“感知—诊断—决策—执行”的闭环协同。智能巡视不仅限于机器人与摄像头的可视化采集，还融合红外成像、超声波、声纹特征分析等多维感知手段，实现对设备温升、局放、异音、异味等隐性风险的实时捕捉。其生成的诊断报告可与历史数据库进行比对，自动完成趋势分析和健康指数评估，从而在故障初期就触发预警与联动措施，减少人工依赖和延迟决策，显著提升巡检效率与风险防控的前瞻性。通过这一机制，输油站场的电气系统能够实现出由“周期性被动检查”向“实时主动预防”的转变^[5]。

持续改进机制则通过数据驱动实现运营优化与智能演进。基于大数据平台与 AI 算法的长期积累，系统可建立设备寿命曲线与能效模型，识别出告警频繁、能耗异常或维护成本偏高的薄弱环节，进而提出差异化的优化措施，如强化关键设备冗余配置或实施能效改造。更重要的是，智慧变电系统应具备开放接口与模块化架构，以便快速集成 5G 通信、边缘计算与数字孪生等新兴技术，构建“虚实融合”的运维环境，实现模拟预测与实时决策相结合。

4 结束语

长距离原油输送管道电气系统是保障管道安全、稳定运行的关键。通过分析系统组成、风险因素及运行特点，结合在线监测、冗余供电、联锁保护和科学管理，以及智慧变配电系统建设与安全运行，可有效降低故障率、提升应急响应能力。未来，随着智能监控和预测性维护技术的发展，管道电气系统的安全运行将更加高效、可靠，为能源输送提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 张凯飞, 宋怡飞, 于爽. 关于输油站场的电气系统保护研究 [J]. 石油石化物资采购, 2019(10):93.
- [2] 朱明凯, 李鹏飞. 长输管道电气系统及输油站自动化应用 [J]. 中国化工贸易, 2025(6):133-135.
- [3] 张华. 智慧变电站体系构架设计与设备配置原则 [J]. 电力设备管理, 2024(4):138-140.
- [4] 王雪园. 长输重质原油管道 SCADA 系统设计与研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [5] 刘涛. 天然气长输管道 SCADA 系统设计及网络安全评估与强化 [J]. 仪器仪表用户, 2024(1):8-10.

作者简介：

王刚（1978—），男，汉族，北京丰台人，本科，三级工程师，综合维修工程师，研究方向：输油、电气。
赵晓丽（1979—），女，汉族，河北泊头人，大专，高级技师，综合维修工，研究方向：输油、电气。