

带电作业在智能电网建设中的技术创新与实践探索

代述伟 张德军

攀枝花供电公司 四川攀枝花 617000

摘要：智能电网正迅速朝着信息化、自动化、互动化方向推进，其对供电可靠性、提高能效以及适应新能源并网的需求越发迫切。作为保障电网“无中断运行”的核心技术，带电作业是推动智能电网精益化运维的关键依托。伴随5G、AI和电力领域深度融合，带电作业在智能装备、多维度感知、智能决策等领域达成了突破性创新，在输电线路检修、城市配网维护、极端环境应急等场景实操中成效明显。因此，系统梳理带电作业的技术创新路径与实践感悟，对完善智能电网运维体系、减少停电产生的损失、助力新型电力系统的搭建有重要意义。

关键词：智能电网；带电作业；技术创新；实践案例

在“双碳”目标驱动下，中国智能电网行业已进入高速发展期，2025年市场规模预计突破1200亿元，其中配电自动化、智能电表等细分领域呈现爆发式增长，而用电环节在整体市场结构中占比高达42.7%，成为智能化改造的核心阵地。用电阶段的高负荷密度、新能源并网后的功率起伏，另外城市电网“不停电”的民生期盼，给传统带电作业在安全、精准及协同方面提出严峻挑战，人工操作效率较低、强电磁环境风险高、与智能调度系统数据失去关联等问题凸显。借助5G+边缘计算实现带电作业设备低时延控制，基于AI的带电作业让特高压线路自主巡检与缺陷修复得以实现，多维度感知技术搭建“人员-设备-环境”实时监控网，这些创新技术已在多地10kV配网智能接火、青藏高原输电线路应急检修项目中得到落实，实现作业效率提升30%以上，供电可靠性突破99.99%这道大关，成为破除智能电网运维痛点、促进“双碳”目标落实的关键途径。

一、带电作业概述

带电作业是指在高压电气设备上不停电进行检修、测试的一种作业方法^[1]。带电作业不仅要在高压电气设备带电情况中完成检修、测试、维护及故障处理等核心工作，还需要把“零停电”当作核心目标，兼顾作业安全和电网运行的稳定性，其核心要求有严格的绝缘防护体系、精准的操作控制模式及实时的风险预判。在智能电网建设的背景下，带电作业已逐步从“人工主导”过渡到“人机协同、智能管控”模式：采用集成绝缘监测、定位导航、数据传输等功能的智能仪器，结合采用5G、AI等技术，促成作业流程的自动化规划、设备状态的实

时掌握以及风险的提前警示。其适用场景囊括特高压输电线路绝缘子更换、10kV配网智能接火、高海拔或寒冷这些极端环境线路抢修等，能切实应对新能源并网后的负荷波动、城市电网高可靠性需求等挑战，成为智能电网“不间断运维”体系内保障供电连续性、削减停电损失的关键技术支撑。

二、带电作业在智能电网建设中的关键技术创新

（一）智能装备与工具创新

智能装备及工具创新为带电作业契合智能电网自动化需求提供核心支撑，聚焦于“减人、提效、保安全”实现升级。绝缘装备冲破传统被动防护的束缚，如集成温湿度、电场强度传感器的智能绝缘杆，可即时采集作业期间绝缘层状态的数据，经由物联网上传到智能电网监测平台，防范绝缘失效的潜在风险；自适应绝缘平台可根据电网电压实时动态调整绝缘距离，符合不同电压等级的作业场景要求。辅助工具一起升级，智能工器具管理系统采用RFID这一技术，实现绝缘手套、验电器等工具定位、寿命预警以及状态的追溯，杜绝因工具老化引发的安全事故，全面推动智能电网“少人化”运维落实。

（二）感知与监测技术创新

感知及监测技术的创新为带电作业增添“全维度感知”能力，切合智能电网“实时化、精准化”的运维要求。就设备状态感知而言，采用超声波和特高频的联合监测手段，可抓取带电设备的局部放电信号，区分绝缘老化、接触不良这样的缺陷类型，数据采集的频次是每秒1次，为智能电网设备的健康状态评估给出依据。

作业环境感知涉及风速、温湿度、电场分布等核心参数，如在作业现场投放的微型气象站，可实时传送环境数据，若风速超过5级，会自动触发作业暂停预警，应对环境存在的风险。人员状态监测凭借智能安全帽，将心率传感器、北斗定位模块与语音交互功能集合在一起，可对作业人员的生理状态与位置进行实时监测，要是心率出现异样或超出范围，及时向后台发出警报。

（三）控制与决策技术创新

控制与决策技术创新推动带电作业从依靠经验驱动转变为依靠数据驱动，适应智能电网“协同化、智能化”的控制要求。智能路径规划借助数字孪生技术，构建含有设备参数、地形特征、作业流程的虚拟场景，模拟作业轨迹，结合实时探测到的障碍物数据，实时动态优化路径走向。风险预警与决策系统把历史故障数据、设备状态数据与环境数据融合在一起，使用大数据算法去评估作业风险等级，AI模型会自动拿出3套以上作业方案，标记出各方案的时间成本以及安全系数，供运维人员选拣，就像针对配网的带电检修，可预先判定负荷转移的时长，推荐最恰当的停电替代方案^[2]。多设备协同控制的环节还可再进一步升级，如无人机带电巡检与地面机械臂操作的协同控制，运用5G+边缘计算达成两者数据毫秒级交互，机械臂可依据无人机实时传回的设备缺陷位置坐标，自动校正夹持角度及操作力度，减少人工操控出现的误差。针对电网突发故障的应急管控决策，系统可获取电力调度实时数据，当作业区域突然出现负荷波动，自动重置作业步骤的优先级，如先完成导线接头紧固工作，再处理次要缺陷。决策系统还可采用“数字员工”辅助机制，借助模仿运维人员过往操作习惯，提升方案推荐逻辑的合理性，让新手迅速匹配上合适的作业策略，降低因经验差别引发的决策失误^[3]。

三、带电作业在智能电网中的实践探索案例

（一）输电线路领域的实践应用

输电线路作为智能电网跨区域能源传递的核心通道，带电作业实践把重点放在特高压、复杂地形场景的技术适配。以±800kV特高压直流输电线路绝缘子替换项目举例，该线路路过山区以及跨江区域，人工实施作业时遭遇地形险峻、电场强度高达300kV/m等难题。作业前借助数字孪生技术搭建线路虚拟模型，模拟作业轨迹，避开导线防震锤、间隔棒这类障碍；作业时凭借5G+边缘计算达成数据实时传输，后台可远程监视操作的过程。此实践较传统的人工作业而言，把单次绝缘子更换的时

长从8小时缩减到3.5小时，作业人员不用走进强电磁区域，安全风险降低了95%，同时把数据同步上传至智能电网状态监测系统，更新线路设备的健康档案，为后续的预防性运维提供凭据，保障特高压线路年输送电量稳稳达到500亿千瓦时以上^[4]。

（二）配电网领域的实践应用

配电网直接连接用户，带电作业实践把“提升供电可靠性、适配高密度负荷”作为核心。以某一线城市10kV配网智能带电接火项目作为典型案例，该城市核心区配网负荷密度高达8MW/km²，采用传统人工方法带电接火需停电2-3小时，影响到周边商户与居民的用电。实际操作中引入双臂协同配电带电作业设备，其装配了视觉定位模块以及力矩传感器，可精准判定导线、线夹的位置，自主做好剥线、压接、接线等操作。该设备又搭载了智能故障自检模块，能实时对接线压力、绝缘电阻等关键参数进行监测，若出现压接不牢等状况，会立即停机报警，避免接火故障引发线路出现跳闸。作业期间做到“零停电”，每次接火时长控制在1小时范围内，较传统途径，停电影响减少90%以上，周边200多户商户、1200多个居民的用电未被干扰。设备自动把接火数据上传至配网调度云平台，与电网负荷监测系统开展联动，实时更新区域负荷分布图谱，后续针对该区域新增进来的分布式光伏并网点开展接火，可直接借助历史数据优化作业方案。

（三）极端环境下的带电作业实践

极端环境下带电作业实践聚焦点为“突破环境制约、保障电网韧性”，以青藏高原高海拔寒冷地区输电线路检修作为典型案例。该区域线路海拔在4000米以上，最低气温降至-35℃，因空气稀薄，绝缘性能下降，而冻土区地形呈现出复杂状态，人工去检修的话难度大、风险高。实践中针对性创新技术方案：采用耐寒性能的锂电池与低温润滑脂，保证机械臂在寒冷环境中灵活运转；把绝缘装备升级为抗缺氧款式，向绝缘层中添加特殊填料，阻止高海拔环境中绝缘强度衰减^[5]。为应对高海拔强紫外线引起的设备老化效应，作业机械臂的外壳采用抗UV的复合涂层工艺，使用寿命达到传统设备的2倍之长；采用高精度的北斗定位系统，纠正高海拔地区GPS信号的偏差，使机械臂操作定位精度维持在±2mm的界限内，防止由于定位误差触及相邻导线。单次线路检修的时长从传统人工检修的12小时缩短到6小时，检修人员不用长时间在低温缺氧的环境中工作，体力消耗降低

达60%。该方案实施后,青藏高原该区域输电线路年均故障次数从8次降到2次以下,保障了沿线3个牧民聚居点与2座100MW光伏电站的稳定供电,令电站年发电利用率上升3%,检修数据同样被归入电网极端环境运维数据库,为后续冰川、荒漠等区域的带电作业提供技术参考方面的借鉴。

四、带电作业在智能电网建设中面临的挑战与未来发展趋势

(一) 面临挑战

带电作业适配智能电网建设,需要解决以下关键问题。从技术角度看,我国高端设备的自主可控水平较低,高精度视觉传感器和核心控制芯片仍然依靠国外,这不但导致了生产成本的提高,而且也面临着供应链的风险。在高强度的电磁环境中,器件的稳定性受到限制。此外,由于带电作业系统与智能电网调度和运行监控系统之间存在着信息交互不畅、多源异构等问题,很难实现运行和维护的闭环。从技术融合适配的角度看,数字孪生离不开“装置-环境-人员”全要素数据支撑,但智能电网多源数据的实时同步存在延迟现象,复杂工况期间,仿真模型与实际场景的偏差偏大,动态校准难度高、成本高。AI大模型依赖大量优质数据开展工作,不过带电作业极端工况以及罕见故障的数据积累量少,而且电网核心数据的隐私保护和模型训练的数据需求之间存在矛盾,易对智能决策效果形成约束。绿色化转型的阶段中,环境友好型绝缘材料的成本相对偏高,与现有作业设备的兼容适配性欠佳,低能耗智能装置处在强电磁环境的情境下,无法兼顾续航能力以及运行稳定性。基于分布式能源场景的考量,现有的带电作业设备便携性欠佳,而且分布式能源的波动现象增加了作业时负荷调控的困难,可能影响操作的安全性以及电网暂态稳定性。

(二) 发展趋势

“深度融合智能电网技术、拓展应用边界”是今后带电作业的发展方向。在技术上,将数字孪生深入到带电工作情景中,建立“装置-环境-人员”的全要素仿真模型,进行运行仿真推演和风险预测。人工智能的大模型能够赋予各个阶段的智能决策能力,通过对大量运行数

据的学习,能够自动产生最优化的维修计划,乃至对其进行自动化的故障检测和维修。绿色化与高效化成为重要方向,环境友好的绝缘材料和低能耗的智能装置将逐渐取代常规的生产装置,以满足“双碳”的要求;多学科交叉融合加快,在高强度电磁干扰条件下,实现量子通信,实现高精定位,提高操作的准确性^[6]。在应用场景上,带电作业将向新型电力系统延伸,针对虚拟电厂和微电网等分布式能源的接入点,研究针对分布式能源网络的荷电监测和维修方法,以提升智慧电网的运营水平。

结语

综上,带电作业作为智能电网“不间断运维”的核心技术,在智能装备、感知监测、控制决策及作业模式上的创新,已切实攻克传统运维的痛点,在输电、配网及极端环境的实践中有效提高供电可靠性与作业效率。尽管现阶段依旧面临高端装备国产化不足、跨系统数据融合存在困境等挑战,但随着技术持续革新与标准体系完备,带电作业将进一步同数字孪生、AI大模型实现深度融合,更高效地支撑新型电力系统搭建,为达成“双碳”目标与保障能源安全筑牢技术根基。

参考文献

- [1]白翔飞,李佳蔚,于泽洋,等.复杂作业场景下配网不停电综合检修技术研究与应用[J].农村电气化,2025,(07):37-40.
- [2]刘展.高压配电线路带电作业数字化安全距离检测方法研究[J].河南科技,2025,52(13):20-23.
- [3]孙赵.带电作业与智能调度控制系统的分析[J].集成电路应用,2024,41(12):272-273.
- [4]谢锋桦.智能电网下带电更换低压用户电能表的作业研究[J].中国信息界,2024,(07):29-31.
- [5]周焱.10kV配网带电作业中的技术难题与解决方案[J].电力设备管理,2024,(17):14-16.
- [6]邱海枫,王志银.一种配网带电作业的智能调度应用方法研究[J].自动化应用,2021,(11):121-123.