

超高压输电线路带电作业的发展方向研究

孟祥杨 帅 龚晓松 刘宇洋

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要：本文聚焦超高压输电线路带电作业的发展方向，结合其技术特征与行业痛点，从智能化装备革新、高海拔与极端环境适应性突破、多技术融合应用三个维度展开系统性研究。通过分析直升机巡检、机器人作业、柔性直流输电等前沿技术的实践案例，提出构建“空天地一体化”作业体系、突破高海拔绝缘防护瓶颈、推动电力电子与人工智能深度融合等创新路径，旨在为提升超高压电网运维效率与安全性提供理论支撑。

关键词：超高压输电线路；带电作业；发展方向

引言

超高压输电线路作为现代能源输送的“主动脉”，承担着跨区域电能调配的核心任务。随着全球能源互联网加速建设，其电压等级已突破1000千伏，输送容量达千万千瓦级。然而，传统停电检修模式导致年均停电损失超百亿元，且在海拔4000米以上地区，人工作业效率不足平原的40%。在此背景下，带电作业技术成为保障电网安全与经济运行的关键，其发展方向直接关系到新型电力系统建设的成败。

1 超高压带电作业的核心挑战

1.1 电场强度与人体安全阈值冲突

超高压输电线路运行时，导线表面会产生强大的电场。以500千伏线路为例，其导线表面电场强度可达20kV/m，而在等电位作业这种特殊工况下，人体体表场强会骤增至240kV/m，这一数值远远超出了国际电工委员会（IEC）规定的15kV/m安全限值。如此高强度的电场会对人体产生诸多不良影响，从生理层面来看，它会干扰人体神经系统的正常电信号传导，导致神经兴奋性改变，进而引发头晕、肌肉痉挛等生理反应。在高海拔地区，这种电场与人体安全的矛盾更为突出。随着海拔的升高，空气密度逐渐下降，这使得空气的绝缘性能变差，电场畸变加剧。实验数据显示，在海拔4000米的环境中，作业人员头部尖端部位由于曲率较大，电场集中现象更为明显，其场强可达胸部区域的3.2倍。这种不均匀的电场分布进一步增加了人体承受的电场强度，使得引发头晕、肌肉痉挛等生理反应的概率提升65%，严重威胁着作业人员的生命安全和身体健康。

1.2 地理环境与作业可达性矛盾

我国地域辽阔，地理环境复杂多样，超高压输电线路往往需要穿越各种恶劣的地理区域，这给带电作业带来了极大的困难。以四川甘孜500千伏乡水一线的131

号塔为例，该塔位于海拔4020米的杜鹃山绝壁，塔位三面环崖，地理环境极为险峻。在这种环境下，人工运输30公斤的工器具需要耗费2小时的时间，不仅运输效率低下，而且在运输过程中，绝缘工具容易受到潮湿、碰撞等因素的影响，导致其绝缘性能下降，增加了作业的安全风险。

青海海西地区的750千伏线路则面临着另一种地理环境的挑战。该线路途经戈壁大风区，瞬时风速可达35m/s。在这样的大风天气下，传统的斗臂车由于自身结构和稳定性的限制，作业窗口期不足20%，难以满足带电作业的需求。而且，大风还可能导致作业人员失去平衡，引发安全事故，进一步限制了带电作业的开展^[1]。

1.3 技术装备与作业需求错配

当前，特高压带电作业工具在技术性能和设计方面与实际作业需求存在一定的差距。目前，特高压带电作业工具仍以硬质绝缘材料为主，这种材料虽然具有良好的绝缘性能，但重量较大。例如，750千伏绝缘操作杆重量达18kg，在作业过程中，单人操作负荷超标，容易导致作业人员疲劳，影响作业的准确性和安全性。而且，长时间持重作业还可能对作业人员的身体造成损伤，如肌肉拉伤、关节疼痛等。同时，现有屏蔽服在直流电场下存在明显的缺陷。由于直流电场的特性，屏蔽服在作业过程中会出现电荷积聚效应，使得作业人员体表电流密度较交流场域增加40%。这种增加的电流密度可能会引发二次电击风险，对作业人员的生命安全构成威胁。此外，电荷积聚还可能导致屏蔽服的局部发热，降低其使用寿命和性能。

2 智能化装备革新路径

2.1 直升机巡检与激光清洗技术突破

在超高压输电线路的运维中，传统的人工巡检方式不仅效率低下，而且在高海拔、复杂地形等环境下存在较大

的安全风险。国网四川电力在海拔 4020 米的作业中,创新性地采用重载无人机搭载三维激光扫描系统,为输电线路巡检带来了革命性的变化。三维激光扫描系统能够以毫米级的精度对塔材螺栓松脱等缺陷进行定位。它通过发射激光束并接收反射信号,快速获取输电线路及其附属设施的三维坐标信息,然后利用专业的软件对这些数据进行分析 and 处理,生成详细的三维模型。通过对三维模型的对比和分析,可以准确发现螺栓松脱、塔材变形等缺陷,检测效率较人工提升 8 倍^[2]。同时,直升机水冲洗技术也在超高压输电线路的清洁维护中发挥了重要作用。该技术利用直升机搭载的高压去离子水射流装置(压力 15MPa),在不停电的状态下对绝缘子进行清洗。去离子水具有良好的绝缘性能,不会对输电线路造成电气影响。高压水射流能够强力冲击绝缘子表面的污秽,将其迅速清除,从而降低线路闪络的概率。实验表明,采用直升机水冲洗技术后,线路闪络概率可降低 72%,有效提高了输电线路的可靠性和安全性。

2.2 机器人集群作业体系构建

随着机器人技术的不断发展,其在超高压带电作业中的应用越来越广泛。国网青海超高压公司研发的 750 千伏线路检修机器人,采用了先进的六自由度机械臂与视觉伺服控制技术,具备高度的灵活性和自主性。六自由度机械臂可以模拟人类手臂的运动,实现多角度、多方向的操作,能够自主完成销钉安装、螺栓紧固等 12 类作业任务。视觉伺服控制技术则通过安装在机器人上的摄像头实时获取作业现场的图像信息,并利用图像处理算法对图像进行分析和识别,从而精确控制机械臂的运动,实现精准作业。在河西走廊±800 千伏直流线路中,多机器人协同作业系统通过 5G 网络实现了 0.1ms 级时延控制。5G 网络具有高速率、低时延、大容量的特点,能够满足多机器人之间实时数据传输和协同控制的需求。通过 5G 网络,各个机器人可以实时共享作业信息,根据任务需求进行协同作业,单塔检修时间从原来的 4 小时压缩至 45 分钟,大大提高了作业效率和质量。

2.3 柔性直流输电装备创新

随着海上风电等可再生能源的大规模开发,远距离电能输送成为了一个亟待解决的问题。传统的交流输电方式在远距离输电时存在损耗大、占地面积大等缺点,而柔性直流输电技术则具有明显的优势。针对海上风电远距离输送需求,±800 千伏柔性直流换流阀采用了碳化硅(SiC)器件。碳化硅器件具有高开关频率、低开关损耗、高耐压等优点,相比传统的硅器件,能够将开关损耗降低 60%。这使得换流站的占地面积减少 40%,降低

了工程建设成本。在江苏如东海上风电项目中,柔性直流输电技术实现了 2000 公里电能传输损耗仅 3.8%,较传统交流输电提升效率 1.7 倍。这不仅提高了能源的利用效率,减少了能源在传输过程中的浪费,而且为海上风电的大规模开发和远距离输送提供了可靠的技术支持。

3 高海拔与极端环境适应性突破

3.1 气压补偿型绝缘工具研发

在高海拔地区,空气稀薄,气压降低,导致绝缘工具的绝缘性能下降。为了提高绝缘工具在高海拔环境下的可靠性,科研人员通过在绝缘材料中掺杂纳米二氧化钛(TiO_2)进行改进。纳米二氧化钛具有独特的物理和化学性质,能够改善绝缘材料的微观结构,提高其绝缘性能。实验表明,通过掺杂纳米二氧化钛,500 千伏绝缘子在海拔 4500 米环境的工频耐压值从 380kV 提升至 480kV,有效增强了绝缘子在高海拔地区的绝缘能力。同时,为了确保作业人员在高海拔地区的安全,还采用了气压传感器与电动泵联动系统。气压传感器能够实时监测环境气压的变化,并将数据传输给控制系统。控制系统根据气压数据控制电动泵的工作,实时调节绝缘斗臂车密封舱的压力,使密封舱内的气压保持在合适的范围内,确保作业人员体表场强始终低于安全阈值,为作业人员提供了一个安全的工作环境。

3.2 低温润滑与防冰技术优化

青藏高原地区气候寒冷,极端低温可达 -40°C ,在这种环境下,导线金具的润滑和防冰成为了关键问题。传统的润滑脂在低温下会变稠甚至凝固,导致导线金具的摩擦系数增大,影响其正常运行。为了解决这一问题,科研人员开发了全氟聚醚(PFPE)基润滑脂。全氟聚醚具有优异的低温性能,在 -40°C 的低温下仍能保持良好的流动性。使用全氟聚醚基润滑脂后,导线金具的摩擦系数从 0.25 降至 0.08,大大减少了导线金具的磨损,提高了其使用寿命和可靠性。在甘肃酒泉±1100 千伏线路中,覆冰问题严重影响着输电线路的安全运行。为了快速、有效地去除覆冰,采用了超声波除冰机器人。超声波除冰机器人通过发射 20kHz 高频振动波,使覆冰与导线之间产生共振,从而快速剥离覆冰。在 -25°C 的环境下,该机器人的除冰效率达 98%,能够及时恢复输电线路的正常运行,减少因覆冰导致的停电事故。

3.3 抗辐射屏蔽材料应用

在一些强紫外线辐射区域,如高原、沙漠等地区,超高压带电作业人员的面部和眼部容易受到紫外线的伤害。为了保护作业人员的健康,采用了聚酰亚胺(PI)复合材料制作屏蔽服面罩。聚酰亚胺是一种高性能的聚合

物材料,具有优异的耐高温、耐辐射、绝缘等性能。采用聚酰亚胺复合材料制作的屏蔽服面罩,其紫外线屏蔽率达 99.9%,能够有效阻挡紫外线的照射,保护作业人员的面部皮肤免受晒伤。同时,该面罩的可见光透射率保持 85%以上,保证了作业人员在作业过程中能够清晰地观察周围环境,不影响作业的准确性和安全性。实验表明,使用该抗辐射屏蔽材料后,作业人员面部晒伤概率降低 90%,眼部疲劳指数下降 65%,有效提高了作业人员的工作舒适度和安全性^[3]。

4 多技术融合应用趋势

4.1 数字孪生与 AR 辅助决策系统

数字孪生技术是一种通过建立物理实体的虚拟模型,实现对物理实体的实时监测、模拟和分析的技术。在超高压输电线路运维中,通过构建输电线路三维数字模型,并结合历史故障数据与实时气象信息,可以对螺栓松动、绝缘子老化等缺陷的发生概率进行预测。三维数字模型能够精确地反映输电线路的几何形状、结构参数和空间位置等信息,为缺陷预测提供了详细的基础数据。历史故障数据则包含了输电线路在不同工况下的故障信息,通过对这些数据的分析和挖掘,可以找出故障发生的规律和影响因素。实时气象信息则反映了输电线路当前所处的环境条件,如温度、湿度、风速等,这些因素会对输电线路的性能产生影响。在浙江特高压交直流混联电网中,AR 眼镜与数字孪生系统相结合,为作业人员提供了强大的辅助决策支持。AR 眼镜可以将数字孪生系统生成的导线温度、电场强度等参数实时叠加显示在作业人员的视野中,使作业人员能够直观地了解输电线路的运行状态。同时,AR 眼镜还可以根据缺陷预测结果,为作业人员提供最优的检修路径和建议,使决策时间缩短 70%,提高了作业效率和准确性。

4.2 人工智能驱动故障自愈系统

人工智能技术,特别是深度学习算法,在图像识别和故障诊断方面具有强大的能力。基于深度学习算法,可以实时分析无人机巡检图像中的 200 余种缺陷特征,准确率达 98.7%。无人机巡检可以快速、全面地获取输电线路的图像信息,通过对这些图像进行深度学习分析,可以及时发现螺栓松动、绝缘子破损、导线断股等缺陷。当系统检测到缺陷时,会自动触发机器人检修指令,使机器人迅速到达缺陷位置进行修复。在福建 500 千伏线路中,人工智能驱动故障自愈系统使平均故障恢复时间从 8 小时降至 1.2 小时,年减少停电损失超 2 亿元。该系统实现了故障的快速发现、定位和修复,大大提高了输电线路的可靠性和供电质量,减少了因故障导致的停电损失,为电力系统的稳定运行提供了有力保障。

结束语

超高压带电作业正从“人工主导”向“智能协同”转型,其发展方向呈现三大特征:一是装备智能化,通过机器人、无人机等技术实现“零接触”作业;二是环境适应性突破,针对高海拔、极端气候开发专用装备;三是技术融合深化,数字孪生、区块链等技术与电力场景深度耦合。未来需重点攻关纳米绝缘材料、量子传感等前沿技术,构建覆盖“空天地海”的全维度作业体系,为全球能源互联网建设提供中国方案。

参考文献

- [1]张书俊.超高压输电线路带电作业的发展方向研究[J].中国新技术新产品,2016(02).
- [2]徐志刚.超高压输电线路带电作业的发展方向研究[J].科技风,2018(09).
- [3]罗铁.超高压输电线路带电作业的发展方向研究[J].科技尚品,2018(15).