

高压输电线路带电作业技术研究与应用探讨

高乔林 王永博 徐安文

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 650200

摘要：高压输电线路带电作业是保障电网稳定运行的关键技术。它分等电位、地电位和中间电位作业三类，依托绝缘和电场屏蔽原理保障安全。其关键技术包括绝缘防护、安全距离控制及作业工具与设备研发。应用中需考虑不同电压等级、复杂环境，并规范作业流程与质量控制。然而，带电作业也面临技术难题、安全风险及人才匮乏等挑战。为此，需加大技术研发投入、构建安全管理体系、加强人才培养与队伍建设，以推动带电作业技术不断进步。

关键词：高压输电线路；带电作业；绝缘防护；安全距离；作业技术；应用策略

引言：在电力行业高速发展的当下，高压输电线路的稳定运行至关重要。带电作业作为保障电网持续供电、减少停电损失的关键技术，凭借其独特优势在电力作业中占据重要地位。它涵盖等电位、地电位和中间电位等多种作业方式，依托绝缘与电场屏蔽原理保障安全。不过，面对不同电压等级、复杂环境，以及技术、安全、人才等方面的挑战，需掌握关键技术、明确应用要点并采取有效对策，以推动带电作业技术不断进步。

1 高压输电线路带电作业技术概述

1.1 带电作业的定义与分类

高压输电线路带电作业是一项极具挑战性与专业性的电力作业形式，它指的是在带电的设备或线路上开展检修、维护、测试等一系列工作，旨在最大程度减少停电时间，保障电网的稳定运行。依据作业人员与带电体的距离以及所采用的作业方式，可将其细致划分为等电位作业、地电位作业和中间电位作业三类。在等电位作业里，作业人员借助绝缘装置进入带电体，使自身与带电体维持相同电位后开展作业；地电位作业时，作业人员处于大地电位，利用绝缘工具对带电体实施操作；中间电位作业处于两者之间，作业人员借助绝缘工具处于高于地电位却低于带电体电位的中间状态进行作业^[1]。

1.2 带电作业的优势与意义

带电作业具有极为突出的优势与深远意义。其最为显著的特点是能够在电力线路持续带电的状态下完成检修、维护等各项工作，无需中断供电。这一特性极大地提升了供电的可靠性，有效减少了因停电给社会生产生活带来的经济损失，充分保障了广大用户的正常用电需求。而且，带电作业避免了电力设备频繁启停，降低了设备在启停过程中产生的损耗，延长了设备使用寿命，提高了设备运行效率。此外，通过带电作业，工作人员能够及时察觉并处理线路中存在的隐患，将故障扼杀在

萌芽状态，进而提升电力系统的整体安全性与稳定性，对推动电力行业朝着可持续方向稳健发展起着至关重要的作用。

1.3 带电作业的基本原理

带电作业的核心基本原理主要围绕绝缘与电场屏蔽两大关键方面展开。绝缘原理方面，借助性能优良、质量可靠的绝缘工具，如绝缘杆、绝缘梯等，以及完备的绝缘防护用具，像绝缘服、绝缘手套等，在作业人员与带电体、接地体之间构建起一道坚实有效的隔离屏障。这一屏障能够阻断电流的传导路径，从根源上杜绝作业人员触电事故的发生，为作业安全提供基础保障。电场屏蔽原理则是利用导电性能极佳的屏蔽服等装备，凭借其良好的导电性，将作业人员体表所承受的电场强度大幅降低，直至处于安全范围之内，从而确保作业人员在高电场环境中能够安全作业。此外，在带电作业过程中，必须严格且精准地控制作业人员与带电体、接地体之间的安全距离，以此确保电场和电流不会对人体造成任何伤害，保障作业顺利、安全开展。

2 高压输电线路带电作业关键技术

2.1 绝缘防护技术

绝缘防护技术作为带电作业安全的关键核心保障，涵盖绝缘工具与绝缘防护用具两大关键板块。绝缘工具，像绝缘杆、绝缘梯等，对性能要求极为严苛，不仅需要具备卓越的电气绝缘性能，以有效阻隔电流传导，保障作业人员安全，还应有足够的机械强度，能承受作业过程中的各种外力作用，且要具备良好的耐老化性能，确保在长期使用及复杂环境下性能稳定。其材质多选用环氧树脂玻璃纤维复合材料，该材料能较好地满足上述性能需求。绝缘防护用具则主要包括绝缘服、绝缘手套、绝缘鞋等，它们可在人体与带电体或接地体之间形成可靠隔离屏障。在使用前，必须对绝缘工具和防护用

具开展严格的绝缘性能检测与机械性能试验,只有各项指标均满足作业要求,方可投入使用。此外,在作业过程中,要格外留意避免绝缘物品受到碰撞、刮擦等损伤,防止其绝缘性能降低,从而切实保障带电作业的安全可靠进行。

2.2 安全距离控制技术

安全距离控制技术是带电作业中保障人员生命安全的核心关键所在,其涵盖最小安全距离、组合间隙等重要参数。最小安全距离指的是作业人员在开展带电作业时,与带电体之间必须严格维持的最小空间间隔,此距离能有效防止因空气间隙被击穿而引发放电事故,是保障人员安全的基本防线。组合间隙则主要应用于等电位作业场景,是作业人员与接地体和带电体之间形成的串联间隙,对作业安全起着关键作用。安全距离的精准确定需综合考量电压等级、气象条件、电场强度等多方面因素。在实际作业过程中,作业人员要借助专业测量工具进行精确测量,并严格遵循既定的安全距离规定。同时,可利用绝缘操作杆、绝缘平台等设备,辅助控制作业人员与带电体之间的距离,全方位确保带电作业的安全可靠进行。

2.3 作业工具与设备研发

随着带电作业技术的持续革新与进步,对作业工具和设备提出了更为严苛且多元的要求。新型作业工具的研发需着重聚焦于轻便、高效、安全等关键特性。比如,致力于研发高精度的绝缘操作工具,通过优化工具的结构设计与材料选用,提升其在复杂作业场景下的操作精准度和作业效率,减少因操作误差带来的安全风险。同时,设计智能化的检测设备也至关重要。这类设备能够实时、精准地监测线路运行状态以及作业环境参数,如温度、湿度、电场强度等,并将数据及时反馈,为作业人员制定科学的作业决策提供有力的数据支撑。此外,还需不断加大对带电作业机器人技术的改进力度。借助先进的机器人技术,让机器人替代人工执行高风险作业任务,不仅能有效降低作业人员的劳动强度,更能显著减少安全风险,全面提升带电作业的自动化与智能化水平^[2]。

3 高压输电线路带电作业的应用要点

3.1 不同电压等级下的作业应用

不同电压等级的输电线路,其带电作业在技术要求与作业方式上呈现出显著差异。在较低电压等级的输电线路,像110kV、220kV线路,地电位作业和中间电位作业应用颇为广泛。作业人员借助绝缘工具,在地面或绝缘平台上,对线路进行相对简单的检修与维护工作,

如更换绝缘子、处理导线损伤等。而对于超高压(如500kV、750kV)和特高压(1000kV及以上)输电线路,因其电场强度极高、作业风险巨大,等电位作业方式成为主流。在此类作业中,需配备更为完备的绝缘防护和屏蔽措施,如全方位的屏蔽服、高性能的绝缘工具等,以保障作业人员安全。同时,超高压和特高压线路作业对作业人员的技术水平和操作规范要求极为严格,作业人员必须经过专门且系统的培训和考核,只有熟练掌握相关技术和规范,才能参与此类高风险作业。

3.2 复杂环境下的作业应对

在复杂环境条件下开展带电作业,会面临重重挑战,像高温、低温、大风、雨雪等极端气象条件,以及山区、跨江跨河等特殊地形环境,均会给作业带来极大困难。在恶劣气象条件下,作业团队需密切关注天气动态,依据天气变化灵活调整作业计划,精准挑选适宜的作业时机。同时,要着重加强对绝缘工具和设备的防护,例如在高温环境下,防止绝缘材料因过热加速老化;在雨雪天气中,避免绝缘工具受潮导致绝缘性能大幅下降。面对特殊地形环境,则要结合实际因地制宜制定科学的作业方案,采用特殊的作业设备和方法。比如,对于山区或跨江跨河等难以接近的线路,可借助直升机进行带电作业,利用其灵活性和可达性,有效解决地形复杂带来的作业难题,保障在各类复杂环境下都能安全、高效地完成带电作业任务。

3.3 作业流程与质量控制

规范的作业流程与严格的质量控制,是确保带电作业安全有序推进并达成预期效果的关键所在。作业前期,必须开展全面且细致的现场勘查工作,精准掌握线路的运行状况、设备健康水平以及作业环境的复杂程度等关键信息,以此为依据制定出科学合理、切实可行的作业方案,明确作业步骤、安全措施和技术要求。作业过程中,作业人员需严格依照操作规程精准操作,强化彼此间的配合与沟通,确保每一个动作都符合安全标准。作业结束后,要对作业质量展开全面、严格的检查与验收,仔细核查线路隐患是否得到彻底处理,设备是否恢复正常运行状态。此外,还应建立完善的作业质量追溯机制,对作业过程中的各个环节进行详细记录和深入分析,通过不断总结经验教训,持续优化作业流程,进而提高作业质量和管理水平,为带电作业的长期稳定开展提供坚实保障。

4 高压输电线路带电作业面临的挑战与对策

4.1 技术难题与创新突破

随着输电线路电压等级持续攀升、电网结构愈发复

杂,带电作业正遭遇一系列严峻的技术难题。以特高压线路为例,其产生的强电场和高电压,对绝缘防护技术提出了近乎苛刻的要求,传统绝缘材料和防护装备在绝缘性能、耐久性等方面逐渐力不从心,难以有效保障作业人员安全。同时,复杂的线路结构和设备布局,让作业空间变得狭窄且操作难度大增,对作业工具和设备的适应性、灵活性形成了巨大挑战。为攻克这些难题,必须加大技术研发投入力度。一方面,深入开展新型绝缘材料的研究工作,致力于提升材料的绝缘性能和机械强度,以适应特高压环境;另一方面,创新作业工具和设备设计理念,开发出适用于复杂环境和特殊结构的作业装备。此外,还应积极加强智能化技术在带电作业中的应用,通过智能监测和控制系统,实现作业过程的精准把控,提升作业的安全性和效率^[3]。

4.2 安全风险与防控措施

带电作业因其特殊的工作性质,向来面临着较高的安全风险,涵盖触电风险、高空坠落风险以及设备故障风险等多个方面。触电风险可能源于绝缘失效、误入带电间隔等;高空坠落风险则与作业高度、安全防护措施不到位有关;设备故障风险涉及作业工具老化、质量问题等。为有效降低这些安全风险,需构建一套完善且严谨的安全管理体系。一方面,强化对作业人员的安全教育与培训,通过系统学习安全知识、案例分析等方式,提升其安全意识与操作技能。另一方面,严格执行安全操作规程,在作业现场安排专人进行安全监护,及时察觉并纠正不安全行为^[4]。此外,还应配备先进可靠的安全防护设备和应急救援装备,如全方位的屏蔽服、高性能的绝缘工具等,并制定详尽完善的应急预案,定期组织应急演练,切实提高应对突发事件的能力,全方位保障作业人员生命安全与设备稳定运行。

4.3 人才培养与队伍建设

带电作业作为一项技术门槛高、专业性极强的电力作业形式,对作业人员的综合素质与专业技能有着极为

严苛的要求。然而,当前带电作业领域专业人才匮乏,人才培养体系尚不完善,这在一定程度上阻碍了带电作业技术的进一步发展与应用。为有效加强人才培养与队伍建设,需从多方面着手。在高等教育和职业教育层面,应在高校和职业院校的相关专业中增设带电作业课程,构建系统、全面的教学体系,为行业输送专业技术人才。企业方面,要建立完善的培训机制,定期组织作业人员参与技术培训和技能考核,通过理论学习与实践操作相结合,提升作业人员的业务水平。此外,还应建立合理的激励机制,在薪酬待遇、职业发展等方面给予倾斜,吸引和留住优秀人才,从而打造一支具备高素质、专业化的带电作业队伍,推动带电作业技术持续进步。

结束语

高压输电线路带电作业技术是保障电网稳定运行的关键力量。从基本原理到关键技术,再到应用要点,每一环节都紧密相连、至关重要。面对技术难题、安全风险以及人才短缺等挑战,我们需积极创新突破,加大技术研发投入,构建完善安全管理体系,强化人才培养与队伍建设。通过持续努力,不断提升带电作业的自动化、智能化水平,提高作业安全性与效率。相信在未来,随着技术的不断进步与完善,高压输电线路带电作业技术将在保障电力供应、推动电力行业可持续发展中发挥更为重要的作用,为经济社会发展提供坚实的电力支撑。

参考文献

- [1]胡毅,刘凯,吴田,等.输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J].高电压技术,2021,40(11):3491-3499.
- [2]胡毅,刘凯,彭勇,等.带电作业关键技术研究进展与趋势[J].高电压技术,2021,40(7):1921-1931.
- [3]刘凯,吴田,刘庭,等. $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路的电位转移电流特性[J].高电压技术,2021,39(3):568-576.
- [4]何健元.配电线路运行维护措施研究[J].科技与创新,2021(08):131-132.