

有关高压输电线路铁塔组立施工技术的研究

叶扬 田巍

北京电力工程有限公司, 北京 100071

[摘要]在当前工业化进程不断推进、电力需求持续增长的情况下,高压输电线路是电力能源输送的重要通道,其建设质量对于电网安全以及经济民生有着重要影响。铁塔组立属于线路工程里技术复杂程度较高且安全风险较为突出的一个关键环节,其施工技术水平会直接影响到工程是否能够顺利实施以及能否实现长效运行。本研究针对铁塔组立施工所起到的核心作用、发展历程以及现行技术标准进行了全面系统的梳理,对整体组立和分段组立、起重机吊装、倒装法施工还有高强螺栓连接校准等关键技术要点展开了深入细致的剖析,并且围绕复杂地形下的运输组装、塔体垂直度的控制、极端气候的应对以及高空作业的安全等施工难点及其相应的风险防控策略也做了详尽的探讨。与此还从前瞻性角度出发,提出将智能化监测融入其中、大力推广模块化预制、对机械化装备予以升级以及强化绿色施工等方面的技术创新与优化路径。

[关键词]高压输电线路; 铁塔组立; 施工技术

DOI: 10.33142/aem.v7i7.17409

中图分类号: TM758

文献标识码: A

Research on the Construction Technology of High Voltage Transmission Line Tower Assembly

YE Yang, TIAN Wei

Beijing Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing, 100071, China

Abstract: With the continuous advancement of industrialization and the sustained growth of electricity demand, high-voltage transmission lines are an important channel for power energy transmission, and their construction quality has a significant impact on power grid safety and economic livelihood. The assembly of iron towers is a key link in line engineering with high technical complexity and prominent safety risks. Its construction technology level will directly affect whether the project can be implemented smoothly and whether it can achieve long-term operation. This study provides a comprehensive and systematic review of the core role, development history, and current technical standards of tower assembly construction. Key technical points such as overall and segmented assembly, crane lifting, inverted construction, and high-strength bolt connection calibration are thoroughly analyzed. Detailed discussions are also conducted on construction difficulties and corresponding risk prevention strategies, including transportation and assembly in complex terrains, control of tower verticality, response to extreme weather conditions, and safety during high-altitude operations. Furthermore, from a forward-looking perspective, we propose technological innovation and optimization paths such as integrating intelligent monitoring, vigorously promoting modular prefabrication, upgrading mechanized equipment, and strengthening green construction.

Keywords: high voltage transmission line; tower assembly; construction technology

引言

当前,随着工业化水平的提升,以及人们生产和生活对电力资源需求的逐渐增加,电力系统运作压力增大。要确保系统整体稳定运行,应有效落实电力工程设计施工,合理采用施工材料、技术等,以此减小工程风险系数,增加工程经济效益。高压输电线路铁塔组立施工技术是一种非常重要的技术,对于高压输电线路的正常运行具有非常重要的作用,所以为了保证高压输电线路能够正常运行,在进行高压输电线路施工时,相关施工单位必须要加强对这一技术的研究和分析,只有这样才能保证高压输电线路能够正常运行。但是,在进行高压输电线路施工时,会出现各种问题和困难,针对这些问题和困难进行分析和解决不仅有助于我国电力企业的未来发展,而且有利于我国经济快速发展。

1 高压输电线路铁塔组立施工概述

1.1 铁塔组立在输电工程中的核心作用

铁塔于整条线路而言,是物理上的支撑点,也是力学方面的承载核心所在。铁塔的空间位形精度、结构连接强度以及整体稳定性,会对导地线的安全悬挂距离产生影响,同时也会对线路的绝缘配合效能起到作用,甚至还会关系到整个电网系统在面临极端天气或者故障冲击情况下的韧性表现情况。毫不夸张地讲,铁塔组立的质量,构成了高压输电工程生命周期里的第一道十分坚实的防线,其施工的过程,可以说是输电建设项目当中的“脊梁塑造工程”。

1.2 施工技术发展历程与现状

铁塔组立技术历经了从早期单纯依靠人力绞磨以及抱杆这样的原始阶段开始,一路艰难地向前迈进,其发展过程伴随着国家工业实力以及工程机械化方面取得的进

步,发生了翻天覆地的变化。如今,大吨位的起重机、专用悬浮抱杆、动力伞展放导引绳等现代化装备已成为主流。尽管如此,面对西部高山峻岭、东部河网沼泽等复杂地形以及越来越严格的环保生态要求,施工技术仍持续面临新的挑战^[1]。根据中国电力企业联合会 2024 年度报告,机械化施工在平原丘陵地区的应用覆盖率已达 85%以上,但在山地及特殊地形区域,这一比例仍徘徊在 60%左右。

1.3 技术标准与规范化要求

要想让铁塔实现“立得住、立得稳、立得久”这一目标,最为关键的保障因素就在于严格遵循那些国家以及行业所制定的强制性标准体系。这里所说的强制性标准体系,其核心是以 GB 50233《110kV~750kV 架空输电线路施工及验收规范》还有 DL/T 5342《750kV 架空送电线路铁塔组立施工工艺导则》等标准作为代表的。这些标准针对铁塔施工的诸多环节都规定了极为严格的要求,比如在铁塔基础复测方面、构件进场检验方面、组立过程控制方面等等,像螺栓紧固力矩、法兰间隙、塔身倾斜率以及最终的质量验收等这些环节,全都设定有非常严格的技术指标以及操作流程方面的规定,这些规定可以说是施工活动当中绝对不可以跨越的“技术红线”。

2 铁塔组立施工关键技术分析

2.1 整体组立与分段组立技术对比

整体组立技术需要很强的起重能力,一般在开阔且平坦的地方使用,因为吊车作业半径容易得到保障。这项技术的优势是把塔体在地上完成所有高精度组装和螺栓紧固后一次性吊装到位,能最大限度地减少高空作业量以及相关风险,尤其适合电压等级低、塔高适中或者地形能容纳大型机械操作的塔型。分段组立技术靠出色的地形适应性和灵活性,在山区、跨越区等受限空间里占主导地位,用悬浮抱杆、内拉线或外拉线抱杆系统,像搭积木一样从下往上逐段吊装、在空中对接。决策时通常会综合考量现场地形地质情况、可用设备资源、工程总体进度目标以及经济成本效益等因素。

2.2 起重机吊装技术要点

当采用起重机来开展吊装相关任务的时候,要想确保能够万无一失,那么关键之处就在于地基方面的处理务必要能够满足吊车所具有的巨大接地比压方面的要求。就吊点而言,其计算以及设置环节必须要经过极为严谨的力学方面的验算,唯有如此才能够避免塔材在被起吊的整个过程之中承受那种超出设计所允许范围的局部应力,进而防止出现那种不可逆转的变形损伤情况。吊臂的工作幅度以及起升高度都必须留出足够的安全裕度,从而能够有效应对各式各样的突发状况。特别是在多机抬吊这样一种工况之下,更是迫切需要建立起一套如同精密钟表一般精准的协同指挥系统,以此来切实保障各个吊点能够受力均衡且动作保持同步。国家能源局在 2025 年所发布的《电力

建设起重机械安全管理白皮书》当中清晰地指出,在近三年的输电工程项目里,由于起重机的地基出现失稳状况或者是在操作协调方面存在失误而引发的那些十分严重的险情,在吊装事故的总量当中所占的比例居然高达 38%之多。

2.3 倒装法施工流程与力学控制

倒装法属于一种颇为特殊的组立方式,它的操作流程是“先塔头、后塔腿”,这种方法在常规情况是很少见的。它尤其适合那种全高出百米,并且顶部结构极为复杂的特高跨越塔或者终端塔。其最为关键之处就在于会借助已经组立完成的上部塔体当作支撑点,凭借专用的液压提升装置又或者是大吨位卷扬机系统,把下部塔段从地面开始向上进行顶升或者提升操作,以此来达成“倒着生长”的效果^[2]。这种工艺对于临时拉线系统的布置角度以及预张力控制的要求近乎到了苛刻的地步,对于提升系统同步性的监测精度的要求也是非常之高的,对于结构临时状态的受力分析务必要做到精准无比,倘若稍有不慎,那么极有可能引发结构失稳方面的灾难性后果。

2.4 高强螺栓连接与结构校准技术

铁塔结构的整体性以及刚度,全都依靠遍布塔身的数以万计的高强螺栓的可靠连接来维系。在施工的时候,务必要严格按照规定执行初拧和终拧的分步操作,要使用那种经过定期标定并且精度可靠的扭矩扳手或者转角法工具,以此来保证螺栓能够达到设计所规定的预拉力。法兰间隙需要用塞尺仔细地去检查一番,要将其控制在规范所允许的 $\leq 0.8\text{mm}$ 这样一个极为狭小的范围之内。在每一段塔体完成组立之后,或者是在整个铁塔完成整体组立之后,都必须马上使用高精度的经纬仪或者是全站仪来对塔身的垂直度以及根开尺寸进行复测校正,这可是确保铁塔能够完美“站立”起来的最后一道关卡,同时也是极为重要的一道质量把关之处。

3 施工难点与风险防控

3.1 复杂地形条件下的运输与组装

在地形极为险峻的陡峭山坡之上,在泥泞不堪且难以通行的水网稻田之中,又或者是在生态十分敏感的区域当中,要把塔材以及相关设备运送过去,这简直就像是一场异常艰难且充满挑战的战斗。很多时候,都得根据实际的地形情况来就地开辟出临时的便道,还得架设起轻型的索道系统,甚至有时候连直升机都要出动,靠它来进行空中吊运操作。而用于地面组装的平台,通常也得依据具体的地形状况来开展相应的工作,比如对山坡进行削坡处理,或者是在必要之处进行填筑操作,又或者是在搭建起专门的钢架平台^[3]。这个平台的平整程度以及稳定性能,会直接影响到后续高空组对作业时的安全保障情况以及作业精度的高低。秉持着绿色通道的理念,施工过程中要尽可能地去减少对地表的扰动,而在施工结束之后,生态恢复工

作的难度以及所需的成本,同样是不可以被忽视掉的重要方面。

3.2 塔体垂直度与结构稳定性控制

随着铁塔高度持续打破纪录,特别是在运用分段组立或者倒装法展开施工之际,高空风荷载、日照温差引发的变形以及组对误差累积等因素,对于塔体垂直度以及整体稳定性的影响力变得格外突出。全程动态监测务必要实施到位,在那些关键节点处,得借助测量仪器不断地去校核,并且要适时凭借对拉线张力或是法兰垫片做出细致调整的方式来纠偏。就结构稳定性分析来讲,不能仅仅着眼于最终的状态,还应当着重留意施工过程中每一个临界控制点的受力安全状况。

3.3 极端气候环境下的施工限制

像风速超过8级的那种强风,还有雷暴、冻雨、冰雪以及高温酷暑等这样极端的天气情况,对于铁塔组立施工而言,简直就是名副其实的“天敌”。这些极端天气一方面会直接给作业人员的生命安全带来巨大威胁,另一方面还特别容易致使吊装系统出现失控状况,或者让结构受力变得异常,又或者是使得测量数据产生严重的失真情况。所以,要想有效应对这类风险,那就必须建立起较为可靠的气象预警联动机制,同时还要制定出极为详尽甚至是再怎么详尽都不为过的应急预案,这里面要包含人员紧急撤离的具体路线安排、设备防风加固的相关措施以及雷击防护的具体方案等内容,并且还得储备数量充足的应急物资。

3.4 人员安全与高空作业防护

在铁塔组立作业期间,高空坠落以及物体打击这两种情况,一直都是出现频率颇高的致命风险所在。强制去推行全方位的防坠落系统,这里面囊括了牢固可靠的攀登自锁器、速差防坠器,还有带有生命线的水平安全网或者安全绳等装备,并且要确保所有从事高空作业的人员都能够正确地佩戴这些装备,而且要百分之百地系挂好安全带。对于进入到作业面下方的危险区域这一行为,得实行极为严格的管制举措。针对小型工器具以及螺栓垫片这类物品,也要采取相应的防掉落措施,像是使用工具袋、防坠绳等,另外还要实施规范且高效的安全监护制度。这些举措可以说是构筑起生命防线的最为关键的基石所在。从国家电网公司在2023年所统计的事故情况来看,只要能够正确地使用并且有效地系挂好安全带,那么高空坠落导致的死亡率就能够降低90%以上。

4 技术创新与优化路径

4.1 智能化监测技术的应用

无人机巡检已经从单纯的能够从空中俯视的“眼睛”逐步发展成为能够搭载激光雷达、高清变焦镜头以及红外热像仪等设备的多面手,它能够高效地完成诸如塔材缺陷的自动识别、螺栓紧固状态的筛查以及导线接点的测温等一系列的任务^[4]。借助物联网技术的智能传感器被预先埋

设在关键的螺栓节点或者主材之上,可以实时且动态地监测这些部位的应力应变状态、振动特性以及环境的温湿度情况,并且通过无线网络把所收集到的海量数据传送到云端平台,进而开展大数据分析,以此达成对结构健康状态的在线评估以及早期的预警功能。北斗/GNSS高精度定位技术在针对大型吊装设备的姿态监控以及塔体空间位形的实时测量等方面展现出了极为突出的应用潜力。

4.2 模块化预制组件的推广

把传统的散件组装模式改为在工厂的严格环境当中,把多个标准节段或者整个塔腿/塔身预先组装成为大型模块化单元,借助严密的工装来确保尺寸精度,在完成大部分螺栓紧固以及防腐涂装之后再整体运输到现场,这种“工厂化制造、模块化运输、积木式安装”的模式,可大幅减少现场高空作业量,缩短工期,提高质量一致性。中国电力科学研究院预测,到2025年,模块化施工在特高压及重点工程中的渗透率有望达到35%。

4.3 机械化施工装备升级方向

研发能更好适应山地以及沼泽地形的起重设备和索道运输系统,该设备要轻型化、吨位大且智能化,这是目前急需做的事情。引入那种能够自动感知吊装时重量、幅度还有风速,并且有防撞功能的智能起重机控制系统,去开发适合超大型或者异形塔段吊装的自适应吊具,大力推广遥控操作技术在危险区域作业当中的运用,这些都能够明显提高作业的安全边界以及效率。

4.4 绿色施工与生态保护措施

从设计阶段便着手优化塔位以及施工道路方案,尽可能地利用已有的通道或者临时用地,以此来最大程度地降低对林木的砍伐程度以及地表的剥离范围。在施工期间,要对油污、噪音以及扬尘等方面加以严格管控,同时将剥离出来的表土进行妥善收集并予以保护,等工程完工之后再将其高质量地回覆到原处。积极推广采用那些可降解的环保型临时设施材料。特别是在生态较为敏感的区域,要努力去探索并且应用各类生态修复新技术,比如客土喷播技术、生态袋护坡方法等,从而加快施工创面自然愈合的进程,达成电力建设和绿水青山和谐共生的良好局面。

5 结束语

究其根本而言,高压输电线路铁塔组立施工属于一门将精密力学计算、大型结构吊装、极端环境应对以及前沿技术创新相互融合起来的综合性工程技术。在建设环境变得日益复杂且质量安全要求也在不断提升这样的形势之下,只有秉持着标准先行、技术为要、安全筑基以及创新驱动这些核心原则,同时在对现有的关键技术有着深刻的理解并且能够熟练地加以掌握的基础之上,积极主动地去拥抱智能化、模块化以及绿色化的发展潮流,不断地去攻克像复杂地形运输组装、超高结构精准定位以及极端气候风险应对等这些较为顽固的难题,才能够促使我国高压输

电线路建设的整体水平以及核心竞争力得以持续不断地提升。在未来所开展的探索当中,必定会继续着重围绕着怎样能够让钢铁巨人更加安全、更加高效、更加智能、更加友好地巍然屹立于大地之上这一方面来展开相关的研究与实践工作。

[参考文献]

- [1]彭桐棣,曾琳.探究 35kV 高压输电线路导线架设施工及技术要点[J].电气技术与经济,2023(9):363-365.
- [2]张姝婷.临近水文站河道内高压输电线路铁塔施工技术[J].中国科技信息,2024(6):64-66.
- [3]范佳媛,赵星伊,黄纪刚,等.基于系留气球的整体立塔技术仿真研究和真型试验[J].机械,2025,52(1):1-7.
- [4]王秀峰,李志.小型座地摇臂抱杆机械化组塔施工工艺研究[J].工程技术研究,2024,9(20):105-107.

作者简介:叶扬(1995.8—),男,毕业院校:北京航空航天大学,所学专业:工程管理专业,当前就职单位:北京电力工程有限公司,职务:工程管理专责,职称级别:助理工程师。