

Research on Key Technologies for Wind Load Resistance Design of Ultra-High Voltage Line Structures

Dongguang Zhang

China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Affected by the diverse terrain conditions, significant regional climate differences and the continuous expansion of the scale of line crossing in China, wind load has become one of the important external factors restricting the structural safety of ultra-high voltage lines. Based on the construction practice of ultra-high voltage projects in high wind speed areas, complex terrain areas and extreme meteorological conditions in recent years, the wind-load resistance design of line structures has gradually formed a technical system characterized by engineering measurement, parameter correction and structural adaptability optimization. Based on the actual situation of China's ultra-high voltage line structure engineering, this paper systematically sorts out and analyzes the composition characteristics of the line structure, the intrinsic value of wind load resistance design, and the key application points of key technologies, with the aim of providing operational technical references for subsequent engineering design and offering an engineering-level thinking foundation for the continuous improvement of wind load resistance design methods for ultra-high voltage line structures.

Keywords

Power; Ultra-high voltage; Line structure; Wind load design; key technology

特高压线路结构抗风载设计关键技术研究

张东光

中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000

摘要

受中国地形条件多样、气候区域差异显著以及线路跨越尺度不断扩大的影响, 风载已成为制约特高压线路结构安全的重要外部作用因素之一。结合近年来特高压工程在高风速区域、复杂地形区以及极端气象条件下的建设实践, 线路结构抗风载设计逐步形成了以工程实测、参数修正和结构适应性优化为特征的技术体系。本文立足中国特高压线路结构工程实际, 对线路结构组成特征、抗风载设计内在价值及关键技术应用要点进行系统梳理与分析, 以期为后续工程设计提供可操作的技术参考, 并为特高压线路结构抗风载设计方法的持续完善提供工程层面的思考基础。

关键词

电力; 特高压; 线路结构; 抗风载设计; 关键技术

1 引言

特高压输电线路作为国家级生命线工程设施, 它的破坏会给国民经济的建设和人民生活的安定造成巨大损失。近年来, 由于极端天气影响以及中国电力建设不断增加, 特高压线路结构抗风载设计备受瞩目^[1]。基于此, 本文将就特高压线路结构抗风载设计关键技术展开探讨, 以供参考。

2 特高压线路结构概述

特高压线路结构是指支撑中国超高压(交流 ≥ 1000

kV或直流 ± 800 kV)输电线路的杆塔、横担、导线及相关构件的整体体系, 在工程结构设计中必须综合考虑电气间隙、机械强度、风载和环境因素等多重约束条件, 其本质是确保特高压线路在运行期满足稳定性、耐久性与安全性的承载体系。特高压输电塔作为主要承载构件, 一方面承受导线自重、冰荷载等基本静力荷载, 另一方面在我国多样气候与复杂地形条件下需重点考虑风振动力荷载和风致振动响应, 特别是风载与塔体自振频率可能发生共振所引发的动力效应, 必须通过风振系数、随机振动理论等方法在设计中加以量化分析并合理布置截面构件以增强抗风能力。与常规500 kV及以下线路相比, 特高压线路杆塔高度、跨度、横担长度显著增加, 使得整体结构刚度增大、扭转及弯曲振型更复杂, 这对材料选择、节点连接及整体稳定性提出了更高要求。特高压线路结构设计还需结合国标规范对各种荷载组合进

【作者简介】张东光(1984-), 男, 中国安徽人, 本科, 高级工程师, 从事特高压线路工程, 铁塔, 基础等结构设计研究。

行审核,以保证在极端工况下的静力稳定和耐久运行。

3 特高压线路结构抗风载设计价值

从特高压输电线路工程实践看,线路结构抗风载设计的核心价值在于保障线路在复杂风环境下的结构安全、运行稳定与长期可靠。特高压线路具有杆塔高、跨距大、导线张力高、结构体系复杂等特点,风荷载往往成为控制塔身强度、整体稳定及构件尺寸的重要因素。若抗风载设计考虑不足,容易在强风或持续大风条件下引发塔身位移增大、构件内力异常、连接节点疲劳加剧等问题,直接影响线路安全运行。在我国特高压线路建设中,线路往往跨越高原、山地、峡谷及沿海等多风区域,风场条件差异明显。通过合理开展抗风载设计,可结合区域基本风速、地形地貌特征及杆塔高度变化,对风压分布进行针对性取值,使风荷载计算结果更贴近实际工况。这不仅有助于准确控制塔身主材、斜材及横担构件的受力水平,还能有效降低风致变形对导线安全间隙和绝缘配置的影响。此外,从工程经济与维护角度看,合理的抗风载设计能够减少因风害导致的抢修频次与构件更换需求,降低全寿命周期内的运维成本^[2]。

4 特高压线路结构抗风载设计关键技术研究

4.1 基于区域风环境特征的设计风参数取值

在特高压线路结构抗风载设计中,基于区域风环境特征进行设计风参数取值需以工程可实施性为出发点,首先应系统整理线路沿线及邻近区域不少于三十年的气象观测资料,对年最大风速、瞬时极值风速及主导风向进行统计拟合,并结合平原、丘陵、山地与峡谷等典型地形单元,分析地形收敛、抬升及下垫面粗糙度变化对风速分布的影响,在此基础上对气象站基本风速进行分区修正,避免直接套用单一控制值导致局部风载失真。其次,针对特高压线路塔高大、导线悬挂高度范围宽的特点,应结合工程区地表类别和实际塔型高度,采用分层风速廓线参数确定方法,对近地层与高空风速梯度进行区分处理,并在结构计算中反映风速随高度递增的实际规律,从而保证塔身不同受风高度段风荷载取值的连续性与合理性。再次,对于位于沿海台风影响区或内陆强对流活动频繁区域的线路工程,应在常规设计重现期基础上,引入区域极端风速统计结果,对控制风速取值进行针对性修正,同时结合线路走向与塔位暴露条件,合理区分顺线路与横线路风作用情形,以避免统一放大系数带来的不必要偏差。最后,在设计风参数最终确定阶段,应结合既有特高压线路运行期的结构响应、构件受力及检修记录,对计算风载水平进行工程校核,通过对比分析实际受风表现与设计假定之间的差异,适度修正相关参数取值范围,使设计风参数在安全性与经济性之间保持工程上可接受的平衡^[3]。

4.2 塔身结构整体抗风稳定性分析与构造优化

在特高压线路塔身结构抗风载设计中,首先需基于工程实测风速资料与规范设计风参数,采用三维空间杆系模型

对塔身整体进行受力分析,通过线性与几何非线性计算相结合的方式,系统识别风荷载由横担向塔腿传递的力流路径,重点关注主材受压稳定与斜腹杆协同受力状态,在此基础上对整体计算模型进行多工况复核,以排除局部失稳对整体稳定的不利影响。其次,在明确主要受力构件后,应结合中国特高压铁塔常用塔型,对塔身几何布置进行针对性调整,通过优化主材倾角、控制塔身收分比例及调整腹杆布置密度,使各高度区段轴力分布更加均衡,减少下部塔段受压集中现象,同时避免因构造变化引起的附加弯矩放大,从而实现抗风稳定性的结构层面优化。再次,针对塔身沿高度方向风致响应差异明显的特点,应在塔顶、横担根部及塔腿连接区段采取局部加强措施,通过提高节点连接刚度、合理配置加密腹杆及控制节点偏心,限制风载作用下的侧移与扭转发展,并确保构件间变形协调,防止因局部柔化导致整体稳定储备降低。最后,在构件选型与截面配置阶段,应结合风致内力包络结果,对主材和关键腹杆的截面尺寸与壁厚进行分级控制,重点保证受压构件的长细比满足稳定要求,同时在稳定验算中引入不利初始缺陷假定,对典型设计工况下的整体稳定系数进行复核,确保塔身结构在设计风载条件下保持可靠的整体抗风稳定状态。

4.3 导线—塔结构风荷载协同作用分析

特高压线路结构抗风载设计中,导线—塔结构风荷载协同作用分析应作为整体结构计算的重要组成部分。首先,在模型建立阶段需采用导线与塔身共同参与受力的空间分析模型,将导线自重、风压、覆冰修正风载以及张力随风速变化的非线性特征同步纳入计算,并通过实际工程中常用的分段等效方法合理模拟导线在悬垂线状态下对塔身产生的连续分布作用,从而避免单独计算塔身而低估塔柱与横担内力的情况。其次,在风致偏移分析中应结合线路走向与主导风向关系,对导线横向位移引起的附加水平分力进行分解处理,将其沿塔身高度按连接点位置进行分布施加,并在计算中同步修正横担及塔柱构件的受压稳定条件,防止将导线风载简化为塔顶集中荷载而导致塔身弯矩分布失真。再次,在大跨越及强风区段需重点考虑导线振动与塔结构响应的耦合效应,通过工程实践中常用的提高初张力控制精度、优化悬垂比及限制档距不均匀度等手段,减弱风振作用下导线动荷载向塔身传递的幅值,并在静力计算中引入适度放大系数反映风振影响,确保结构响应评估偏于安全。最后,在综合分析结果基础上,应对塔身关键受力节点如横担与塔柱连接、斜材交汇节点及基础以上首段塔柱进行针对性校核,重点检查其在导线与塔结构协同受力状态下的承载裕度与转角协调条件,并结合特高压工程常用的节点构造形式适当调整连接板厚度与螺栓布置,使节点变形与整体受力模式保持一致。

4.4 风致振动控制与风振抑制装置设计

风致振动控制与风振抑制装置设计核心在于四个方面:

第一,针对特高压输电线路铁塔高度大、整体刚度高而自振频率偏低的特点,在抗风载设计中通常将风致振动控制重点放在塔身上部及横担受力集中的关键位置,通过动力分析确定主控振型后布置调谐质量阻尼装置,质量块与阻尼单元参数依据设计风速下的响应计算结果进行匹配,并结合现场安装条件对连接节点进行加强处理。第二,在导线系统风振抑制设计中,结合特高压线路跨距大、张力高及风场变化明显的实际情况,工程上以防振锤为主、阻尼线为辅进行配置,通过分段计算导线自振频率范围,合理选择防振锤质量和臂长,并控制安装位置与间距,使其覆盖主要振动频带,同时在大跨越区段布置阻尼线以增强能量耗散效果,施工过程中严格控制夹具安装质量^[4]。第三,针对绝缘子串在横风条件下易产生摆振的问题,抗风载设计中通常通过结构配置与附加阻尼相结合的方式控制,在满足电气性能要求的前提下优化绝缘子串长度和形式,并在必要位置设置摆动阻尼或限位构件,以降低风致摆幅和附加内力,同时对金具及连接部位进行受力校核,避免风振控制措施引入新的结构隐患。第四,在整体风振控制设计中强调塔、线、绝缘子体系的协同考虑,通过统一的风场参数和动力模型分析各组成部分的响应特征,协调各类风振抑制装置的参数与布置方式,防止局部控制不足或过度,结合运行维护经验对装置状态进行定期检查和必要调整,使风致振动控制措施与线路长期运行条件保持一致。

4.5 基于工程反馈的抗风载设计校核与修正

在特高压线路结构抗风载设计中,基于工程反馈的校核与修正应以运行期实测信息为基础展开,工程实施后需在典型风区、迎风跨越段和高塔位布设长期观测点,对塔身顶部与关键节点位移、主要受力杆件应变以及连接构件状态进行持续记录,尤其关注强风过程中的累积响应与卸载恢复特征,并通过规范化整理形成可用于设计比对的基礎数据集。依托上述运行数据,应将实测响应与原设计计算结果进行逐项对照分析,重点检查设计风荷载取值、风向组合假定及构件内力分配与实际表现之间的偏差,对偏差集中部位开展受力路径复核,判断其来源是风参数偏保守、结构简化假设不足,还是节点刚度取值不合理,从而明确可调整的设计控制因素^[5]。基于比对结论,在后续设计修正中应优先针对偏差

稳定且具有重复性的参数进行调整,如在相同地形条件下修订局部风压分布系数,优化塔身分段受力模型中构件刚度匹配关系,并对高应力连接节点的计算模型进行细化,使修正措施具有工程可复制性而非个案处理。进一步在新建特高压线路设计阶段,应系统引入已投运工程的成熟反馈成果,将相似风环境与结构型式下的实测响应区间作为设计校核参考,对关键塔型和典型跨距进行针对性复核,避免单纯依赖规范下限取值造成设计与实际脱节,同时保证不同工程之间技术尺度的连续性。通过在设计与运行之间形成稳定的信息回流机制,可逐步积累不同区域、不同塔型在强风条件下的真实响应特征,使抗风载设计校核由单次验证转变为持续修正过程,并在工程实践中不断完善特高压线路结构抗风载设计的适用方法体系。

5 结语

综上所述,随着中国特高压输电工程规模的持续扩大,线路结构所面临的风环境条件日益复杂,抗风载设计已成为保障工程安全的重要技术环节。通过系统梳理特高压线路结构特征,并结合中国工程实践对抗风载设计关键技术进行深入分析,可以看出,科学合理的抗风载设计需要在风参数取值、结构布置及工程反馈等多个层面协同推进。只有将设计方法与实际运行经验紧密结合,才能不断提升特高压线路结构在复杂风环境下的适应能力。未来,在既有技术体系基础上持续开展工程验证与技术完善,将有助于进一步提高中国特高压线路结构抗风载设计的工程可靠性与实践适用性。

参考文献

- [1] 李智旺,周鹏.特高压输电线路工程的“三跨”区段施工技术研究[J].模型世界, 2025(3).
- [2] 郭磊磊.探究特高压输电塔线体系的抗风可靠度[J].今日自动化, 2020.
- [3] 李伟鹏,郑君安,翁兰溪.荆门-武汉特高压交流线路工程设计优化与创新[J].中国电力企业管理, 2025(6).
- [4] 王涛,张智航,李正良,等.特高压双柱悬索拉线塔风灾风险评估[J].中国电机工程学报, 2025(15).
- [5] 刘乾.导线对输电塔线体系风致响应的影响[J].电气开关, 2021, 059(005):99-101.