

输电线路舞动及微风振动分析

苏志龙 徐 亮

内蒙古超高压供电公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要: 输电线路舞动与微风振动威胁电网安全。舞动因不均匀覆冰导线在特定风况下空气动力不稳定产生,受气象、线路结构、地形地貌影响,会导致导线断股等危害;微风振动由微风致导线背风面涡流引发共振,受风速等因素影响,会造成导线疲劳等问题。防治舞动可改进设计、安装防舞装置、加强监测预警;防治微风振动可安装防振锤、采用阻尼线、优化维护,以降低风险,保障电网运行。

关键词: 输电线路; 舞动; 微风振动

引言

在电力系统中,输电线路承担电能传输重任,其安全稳定运行极为关键。但运行中常受舞动和微风振动威胁。舞动属低频大振幅自激振动,微风振动为稳定微风引发的共振。二者会损害输电线路本体,影响变电站等设备,甚至导致大面积停电,给国民经济造成重大损失。所以深入研究其产生机理、形成条件与影响因素,探索防治措施,对保障电网安全稳定运行意义重大。

1 输电线路舞动分析

1.1 舞动产生机理

输电线路舞动是一种低频、大振幅的自激振动现象,其产生主要是由于覆冰导线在特定的风况作用下,空气动力的不稳定所引发。当导线表面覆冰不均匀时,在一定的风速和风向条件下,气流会在覆冰导线周围形成不对称的空气动力^[1]。这种不对称的空气动力会使导线产生升力、阻力和扭矩,当这些力达到一定程度且满足特定条件时,导线就会发生舞动。从流体力学角度来看,不均匀覆冰改变了导线的截面形状,使得气流流经导线时的绕流特性发生变化,进而产生不稳定的空气动力。新月形覆冰是最容易引发舞动的覆冰形状之一,其独特的形状导致气流在导线上下表面的流速差异较大,从而产生较大的升力,促使导线舞动。

1.2 舞动形成条件与影响因素

(1) 气象条件是影响输电线路舞动的关键因素。其中,风速和风向起着决定性作用。通常,当风速在4-25m/s范围内,风向与导线轴向夹角在30°-90°之间时,容易引发导线舞动。此外,气温、湿度和降水等条件也与舞动密切相关。在气温较低(一般在-5℃-5℃)、湿度较大且伴有降水的天气条件下,导线容易形成覆冰,增加了舞动的可能性。在冬季的雨雪天气后,若紧接着出现适宜的风速和风向,输电线路舞动的概率会显著提高。

(2) 输电线路的结构参数对舞动也有重要影响。档距大小是一个关键因素,较大的档距会使导线的柔性增加,在相同的风力作用下更容易发生舞动。此外,导线的直径、张力以及悬挂方式等参数也会影响舞动特性。一般来说,导线直径越大、张力越高,舞动的可能性相对降低;而不同的悬挂方式(如单联悬挂、双联悬挂等)对导线的稳定性也有不同影响。(3) 地形地貌对输电线路舞动有显著的影响。在开阔平坦的地形(如平原、湖面等),气流较为稳定且风速较大,容易满足舞动的气象条件;而在山区,复杂的地形会改变气流的方向和速度,形成乱流和涡流,虽然在某些情况下可能抑制舞动,但在特定的地形条件(如垭口、峡谷等)下,气流会加速并形成稳定的风向,反而更容易引发舞动。

1.3 舞动造成的危害

输电线路舞动会对线路本体造成严重破坏。剧烈的舞动会使导线承受巨大的张力和应力,导致导线断股甚至断线。舞动还会使绝缘子串发生摆动、碰撞,造成绝缘子损坏,降低绝缘性能。此外,金具在舞动过程中会受到反复的拉力、冲击力作用,容易出现磨损、松动甚至脱落,影响线路的连接稳定性。舞动对变电站、换流站等电力设备也会产生不利影响。当舞动的导线与变电站内的电气设备安全距离不足时,可能引发短路故障,损坏变压器、断路器等设备,导致电力系统停电事故。此外,舞动还可能对在线监测设备、通信设备等造成干扰和损坏,影响设备的正常运行和电力系统的监控管理。大规模的输电线路舞动会严重威胁电网的安全稳定运行。舞动可能导致线路跳闸、解列,造成局部地区停电,影响社会生产和居民生活。在严重情况下,还可能引发连锁反应,导致大面积停电事故,给国民经济带来巨大损失。

2 输电线路微风振动分析

2.1 微风振动产生机理

输电线路微风振动是由于稳定的微风垂直吹向导线时,在导线背风面产生交替变化的涡流,这些涡流对导线产生交替变化的冲击力,当冲击力的频率与导线的固有频率接近时,就会引发导线的共振,从而产生微风振动^[2]。从振动理论角度来看,这是一种典型的受迫振动现象。在实际运行中,风速一般在0.5-10m/s时容易产生微风振动。由于微风在自然界中较为常见,因此微风振动是输电线路运行过程中持续存在的一种现象。

2.2 微风振动形成条件与影响因素

(1) 风速是影响微风振动的首要因素。如前所述,当风速在0.5-10m/s范围内时,容易产生稳定的涡流,引发导线微风振动。在这个风速区间内,风速的大小会影响振动的频率和振幅。一般来说,随着风速的增加,振动频率会有所提高,振幅也会相应增大。(2) 导线的自身特性对微风振动有重要影响。导线的直径、单位长度质量、张力以及固有频率等参数都会影响微风振动的特性。较细的导线、较小的单位长度质量和较低的张力会使导线更容易发生微风振动,且振动频率较高;而导线的固有频率与涡流冲击力频率的匹配程度直接决定了是否会发生共振以及振动的剧烈程度。(3) 地形和环境因素也会影响微风振动的发生和强度。在开阔地带,气流较为平稳,微风振动相对较为规律;而在有障碍物(如建筑物、树木等)的区域,气流会受到扰动,微风振动的特性会变得复杂。空气湿度、温度等环境因素也会对微风振动产生一定影响,例如湿度较大时,空气的粘滞性增加,可能会在一定程度上抑制微风振动。

2.3 微风振动造成的危害

长期的微风振动会使导线承受交变应力,导致导线金属材料发生疲劳。随着时间的推移,导线会逐渐出现断股现象,降低导线的机械强度和导电性能。一旦导线断股达到一定程度,就可能引发断线事故,严重影响输电线路的安全运行。微风振动会使导线与金具之间产生相对运动和摩擦,导致金具磨损。金具的磨损会降低其连接强度和稳定性,增加金具损坏和脱落的风险。磨损产生的金属碎屑还可能影响绝缘子的绝缘性能,引发其他故障。微风振动的持续作用会加速输电线路各部件的老化和损坏,缩短线路的使用寿命。频繁的维修和更换部件不仅增加了维护成本,还会影响电力系统的供电可靠性。

3 输电线路舞动及微风振动的防治措施

3.1 舞动防治措施

3.1.1 改进线路设计

在改进线路设计方面,前期规划对预防舞动至关重要。路径选择上,应优先避开开阔平原、湖面等易形成

稳定强风的区域,以及垭口、峡谷等气流加速的特殊地形。以某北方地区输电线路工程为例,原设计路径需穿越一片宽阔湖面,经评估舞动风险较高后,将线路调整至丘陵地带绕行,成功降低舞动隐患。在塔型设计与档距优化上,减小档距可增强导线稳定性,如将档距从常规的400米缩短至300米,导线柔性显著降低。采用非圆截面导线,其独特的外形可扰乱气流,减少升力产生;表面带凸起的导线能破坏覆冰形态,降低舞动概率。加强型金具通过优化结构与材质,可承受更大应力,保障线路连接稳固。

3.1.2 安装防舞装置

在改进线路设计方面,前期规划对预防舞动至关重要。路径选择上,应优先避开开阔平原、湖面等易形成稳定强风的区域,以及垭口、峡谷等气流加速的特殊地形。以某北方地区输电线路工程为例,原设计路径需穿越一片宽阔湖面,经评估舞动风险较高后,将线路调整至丘陵地带绕行,成功降低舞动隐患。在塔型设计与档距优化上,减小档距可增强导线稳定性,如将档距从常规的400米缩短至300米,导线柔性显著降低。采用非圆截面导线,其独特的外形可扰乱气流,减少升力产生;表面带凸起的导线能破坏覆冰形态,降低舞动概率。加强型金具通过优化结构与材质,可承受更大应力,保障线路连接稳固。安装防舞装置是防治舞动的关键技术手段^[3]。失谐摆形似钟摆,通过调整自身质量与摆长,改变导线固有频率,使其远离舞动激发频率,在多条高海拔易覆冰线路应用中,有效抑制了舞动发生。偏心重锤安装于导线上,其不对称结构在舞动时产生阻尼力,消耗振动能量,大幅减小舞动振幅。相间间隔棒将相邻导线隔开,限制相对运动,防止导线在舞动中相互缠绕碰撞,在多回同塔架设线路中发挥了重要作用。

3.1.3 监测与预警

监测与预警系统为线路安全运行提供了实时保障。借助风速传感器、张力传感器以及振动传感器,可实时采集风速、风向、导线张力和振动数据。在某山区输电线路部署的监测系统,能在风速达到舞动临界值前,通过算法分析提前发出预警。结合气象部门的精准预报,运维人员可提前对线路进行巡检,加固金具、调整设备参数,将舞动风险扼杀在萌芽状态。视频监控技术可直观呈现线路舞动情况,为后续故障分析和防治措施优化提供依据。

3.2 微风振动防治措施

3.2.1 安装防振锤

安装防振锤是最直接有效的防治手段。防振锤通过

内部重锤与钢绞线的相互作用,将导线振动能量转化为自身机械能并耗散。在实际应用中,需依据导线规格、张力及运行环境精准选型。在大跨越输电线路中,因导线张力高、跨度大,常选用FR-6D型防振锤,其较大的质量与阻尼特性,能有效应对高频振动;而在常规线路中,FDZ-4型防振锤凭借轻量化设计与良好的通用性成为首选。安装数量与位置也需科学计算,一般遵循“档距越大、数量越多”原则,档距400米的线路通常需安装2-3个,且要避开导线振动波节位置,确保防振锤充分发挥作用。在输电线路防振工作中,借助无人机搭载激光雷达扫描,能快速获取线路三维数据,精准定位防振锤安装点,这一创新举措大幅提高了安装效率,缩短了施工周期,同时显著增强了防振效果,保障了线路安全稳定运行。

3.2.2 采用阻尼线

阻尼线作为一种柔性防振装置,通过与导线协同振动实现能量耗散。其由高柔韧性钢绞线制成,两端固定于导线,中间呈波浪状悬挂。在某沿海输电线路改造中,采用12米长阻尼线,搭配优化后的线夹间距(约1.5米),成功将振动幅值降低60%以上。阻尼线的设计需综合考虑线路参数与振动特性,长度过短难以覆盖全频段振动,过长则会增加线路荷载;线夹间距过大易导致阻尼线与导线脱离,过小则影响能量传递效率^[4]。近年来,输电线路防振领域迎来新突破,新型复合材料阻尼线正逐步投入应用。它突破传统材料局限,兼具轻质高强与高阻尼特性。轻质高强使其安装便捷且不增加过多线路负荷,高阻尼特性则能高效耗散导线振动能量。凭借这些优势,新型复合材料阻尼线显著提升了输电线路的防振性能,为保障电网稳定运行增添了有力保障。

3.2.3 优化线路运行维护

优化线路运行维护是防治微风振动的长效保障。定期巡检采用“人工+智能”双模式,人工巡检侧重近距离观察导线磨损、金具松动等细节,而搭载高清摄像头与红外热像仪的巡检机器人,则能对线路进行24小时不间断监测,精准识别导线温度异常、振动频率突变等隐患。导线张力调整是关键环节,张力过高会加剧振动,过低则可能引发弧垂过大问题。某山区线路通过安装张力在线监测装置,实时调整张力至标准值 $\pm 5\%$ 范围内,使微风振动损伤率下降40%。清理线路走廊内的树木、广告牌等障碍物,可有效改善气流环境,减少湍流引发的振动。某城郊线路清理周边50米范围内的高大树木后,微风振动频次明显降低。

结束语

输电线路舞动与微风振动对电网安全稳定运行威胁显著,二者产生机理和影响因素各异,危害不容忽视。针对舞动,可通过改进线路设计、安装防舞装置、强化监测预警等举措防治;对于微风振动,安装防振锤、采用阻尼线、优化运行维护等方法有效。实际应用中,要结合线路实际与环境选防治措施。未来,期待技术进步带来更高效智能的防治手段,保障输电线路稳定运行,为电力系统可靠供电筑牢根基。

参考文献

- [1] 栾俊清,赵拥华,谢沛林,等.输电线路舞动及微风振动分析[J].电力系统装备,2025(1):126-128.
- [2] 贾国栋.长距离输电线路风致振动光纤监测方法研究[D].山西:太原理工大学,2023.22-24.
- [3] 李仕洵.架空线路微风振动能量回收装置研制与实验研究[D].吉林:东北电力大学,2024.15-19.
- [4] 刘瑞,刘耘成.架空输电线路防舞动措施[J].东北电力技术,2015,36(12):47-50.