

架空地线悬垂绝缘子串倾斜监测系统及其监测报警装置研究

龚晓松 杨 帅 孟 祥 刘宇洋 雷云春

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：本文聚焦架空地线悬垂绝缘子串倾斜监测系统及其监测报警装置展开研究。通过分析倾斜成因与危害，阐述监测系统设计与关键技术，包括传感器选型、数据采集与传输、数据处理与分析方法。同时，介绍监测报警装置的功能实现与优化策略，并通过实际案例验证系统有效性，为保障架空输电线路安全运行提供理论与技术支持。

关键词：架空地线；悬垂绝缘子串；倾斜监测；监测报警装置

引言

架空输电线路作为电力传输的关键基础设施，其安全稳定运行对电力系统的可靠性至关重要。悬垂绝缘子串作为架空地线的重要支撑与绝缘部件，在长期运行过程中，受自然环境因素（如风偏、覆冰、地震等）和机械载荷变化的影响，易出现倾斜现象。悬垂绝缘子串的倾斜会导致导线与杆塔之间的电气间隙减小，增加闪络风险，严重时可能引发线路跳闸、杆塔倒塌等事故，对电网安全构成严重威胁。

1 悬垂绝缘子串倾斜成因与危害分析

1.1 倾斜成因

悬垂绝缘子串的倾斜主要受风偏、覆冰、机械振动等因素影响。风偏是导致绝缘子串倾斜的主要因素之一，当强风作用于导线和绝缘子串时，会产生水平风荷载，使绝缘子串发生偏转。覆冰环境下，导线表面形成的冰层会增加导线的重量和风阻面积，导致绝缘子串承受的垂直和水平载荷增大，进而引发倾斜。此外，导线舞动、地震等机械振动也会对绝缘子串的连接金具造成疲劳损伤，降低其机械强度，增加倾斜风险。

1.2 倾斜危害

悬垂绝缘子串的倾斜会带来多方面的危害。从电气安全角度看，倾斜会导致导线与杆塔、横担等部件之间的电气间隙减小，降低线路的绝缘水平，增加闪络事故的发生概率。在覆冰条件下，倾斜还可能引发冰闪现象，进一步威胁线路安全。从机械结构角度分析，长期倾斜会使绝缘子串的连接金具承受不均匀应力，导致金具疲劳断裂，甚至引发绝缘子串脱落等严重事故。此外，倾斜还会影响导线的弧垂和张力分布，加速导线的老化，缩短线路使用寿命。

2 监测系统设计与关键技术

2.1 系统总体架构

监测系统主要由前端传感器模块、数据采集与传输模块、数据处理与分析模块以及监测报警装置组成。前端传感器模块负责实时采集绝缘子串的倾斜角度、风速、风向、温度等参数；数据采集与传输模块将传感器采集的数据进行预处理后，通过无线通信网络传输至数据处理与分析模块；数据处理与分析模块对接收到的数据进行存储、分析和处理，判断绝缘子串的倾斜状态，并将结果发送至监测报警装置；监测报警装置根据分析结果发出相应的报警信号，提醒运维人员及时处理^[1]。

2.2 传感器选型与布置

2.2.1 倾斜传感器

倾斜传感器是监测系统的核心部件，其性能直接影响到倾斜角度测量的准确性。常用的倾斜传感器包括加速度计、陀螺仪和倾角传感器等。加速度计通过测量重力加速度在传感器坐标系中的分量来计算倾斜角度，具有成本低、响应速度快等优点。然而，它的精度受加速度干扰影响较大，例如在设备振动或受到外力冲击时，测量结果可能会出现偏差。陀螺仪则通过测量角速度来积分得到倾斜角度，能够实时反映绝缘子串的动态倾斜变化。这对于监测导线舞动等动态情况下的倾斜非常有用。但是，陀螺仪存在积分误差累积问题，随着时间的推移，测量误差会逐渐增大，需要定期进行校准。倾角传感器结合了加速度计和陀螺仪的优点，采用先进的算法对测量数据进行融合处理。它具有高精度、高稳定性和抗干扰能力强等特点，适用于对倾斜角度测量精度要求较高的场合。在实际应用中，应根据监测需求和成本预算选择合适的倾斜传感器。

2.2.2 气象传感器

气象传感器用于采集环境气象参数，为分析绝缘子串倾斜成因提供辅助数据。风速传感器通常采用风杯式或超声波式原理。风杯式风速传感器通过风杯的旋转速

度来测量风速,具有结构简单、成本低等优点,但在低风速时测量精度较低。超声波式风速传感器则利用超声波在空气中的传播速度与风速的关系来测量风速,具有测量精度高、响应速度快等优点,但成本相对较高。风向传感器则通过风向标或超声波阵列等方式确定风向。风向标是一种传统的风向测量设备,通过风向标的指向来确定风向,简单直观。超声波阵列风向传感器则利用超声波在不同方向上的传播时间差来测量风向,具有测量精度高、不受机械磨损影响等优点。温度传感器用于测量环境温度,可采用热电阻或热电偶等类型。热电阻温度传感器基于电阻随温度变化的原理来测量温度,具有测量精度高、稳定性好等优点,广泛应用于工业领域。热电偶温度传感器则利用热电效应来测量温度,具有测量范围宽、响应速度快等优点,适用于高温环境的测量^[2]。

2.2.3 传感器布置

传感器的布置应充分考虑绝缘子串的结构特点和受力情况。倾斜传感器应安装在绝缘子串的中心位置或靠近挂点处,这样可以更准确地测量绝缘子串的整体倾斜角度。如果安装在偏离中心的位置,可能会因为绝缘子串的不均匀变形而导致测量误差。气象传感器应安装在杆塔顶部或绝缘子串附近的无遮挡位置,确保能够真实反映环境气象条件。如果气象传感器被遮挡,测量得到的风速、风向等数据可能会不准确,从而影响对绝缘子串倾斜成因的分析。

2.3 数据采集与传输技术

2.3.1 数据采集

数据采集模块负责对传感器输出的模拟信号进行采样、量化和编码,转换为数字信号后进行存储和传输。为保证数据采集的准确性和实时性,应采用高精度的模数转换器(ADC)和高速微处理器。高精度的ADC可以将模拟信号转换为更精确的数字信号,减少量化误差。高速微处理器则可以快速处理采集到的数据,提高数据采集的效率。同时,应合理设置采样频率和量化位数。采样频率过高会增加数据量,对数据传输和存储造成压力;采样频率过低则可能会丢失重要的信息。量化位数的选择也会影响数据的精度,量化位数越高,数据的精度越高,但也会占用更多的存储空间^[3]。因此,需要根据实际需求和系统性能进行权衡,选择合适的采样频率和量化位数。此外,数据采集模块还应具备数据缓存功能,以防止数据丢失。在网络故障或数据传输拥堵的情况下,数据可以暂时存储在缓存中,待网络恢复正常后再进行传输。

2.3.2 数据传输

数据传输模块采用无线通信技术将采集到的数据传输至远程监控中心。常用的无线通信技术包括GPRS、4G/5G、LoRa等。GPRS和4G/5G技术具有传输速度快、覆盖范围广等优点,适用于对数据传输实时性要求较高的场合。例如,在需要实时监测绝缘子串倾斜状态的情况下,GPRS和4G/5G技术可以快速将数据传输到监控中心,以便运维人员及时做出决策。然而,这些技术的运营成本较高,需要支付一定的通信费用。LoRa技术则具有低功耗、长距离、抗干扰能力强等特点,适用于偏远地区或对功耗要求较低的监测场景。在偏远山区的输电线路监测中,LoRa技术可以通过较低的功耗实现长距离的数据传输,减少电池更换的频率,降低运维成本。在实际应用中,可根据监测区域的特点和需求选择合适的无线通信技术,或采用多种技术混合组网的方式提高数据传输的可靠性和稳定性。

2.4 数据处理与分析方法

2.4.1 数据预处理

数据预处理是数据处理与分析的重要环节,主要包括数据清洗、滤波和归一化等操作。数据清洗用于去除采集数据中的噪声、异常值和重复数据,提高数据质量。在实际采集过程中,由于传感器故障、环境干扰等原因,数据中可能会存在一些错误或异常值,这些数据会影响后续的分析结果。通过数据清洗,可以将这些不良数据剔除,保证数据的准确性和可靠性。滤波算法可采用均值滤波、中值滤波或卡尔曼滤波等方法,进一步消除数据中的随机噪声。均值滤波是将一定时间窗口内的数据取平均值作为当前时刻的数据,这种方法简单易行,但会平滑掉数据中的一些细节信息。中值滤波则是将一定时间窗口内的数据按大小排序,取中间值作为当前时刻的数据,它可以有效地去除脉冲噪声。卡尔曼滤波是一种基于状态估计的滤波算法,它可以根据系统的状态方程和观测方程,对系统的状态进行最优估计,适用于动态数据的滤波处理。归一化处理则是将不同量纲的数据转换到统一的量纲范围内,便于后续的数据分析和处理。例如,倾斜角度和风速的单位不同,量纲也不同,直接进行比较和分析会比较困难。通过归一化处理,可以将它们转换到相同的范围内,如 $[0, 1]$ 或 $[-1, 1]$,使数据具有可比性。

2.4.2 倾斜状态判断

倾斜状态判断是监测系统的核心功能之一。可采用阈值判断法和模型预测法相结合的方法来判断绝缘子串的倾斜状态。阈值判断法根据绝缘子串的设计允许倾

斜角度设置阈值,当测量得到的倾斜角度超过阈值时,判定为倾斜故障。这种方法简单直观,易于实现,但阈值的设置需要根据实际情况进行合理确定,如果阈值设置过大,可能会漏判一些潜在的故障;如果阈值设置过小,则可能会产生误报警。模型预测法则通过建立绝缘子串的力学模型,结合实时采集的气象参数和机械载荷数据,预测绝缘子串的倾斜角度,并与实际测量值进行对比分析,提高倾斜状态判断的准确性和可靠性。力学模型可以考虑绝缘子串的材料特性、结构形式、受力情况等因素,通过数值模拟或理论分析的方法建立。通过模型预测,可以提前发现绝缘子串的倾斜趋势,为运维人员提供更多的决策时间。

2.4.3 故障预警与决策支持

基于数据处理与分析结果,系统可实现故障预警和决策支持功能。当监测到绝缘子串出现倾斜故障时,系统应及时发出预警信号,并将故障信息(如倾斜角度、发生时间、位置等)发送至运维人员的移动终端或监控中心。运维人员可以根据这些信息迅速定位故障位置,了解故障的严重程度。同时,系统还可根据故障的严重程度和发展趋势,提供相应的处理建议,如加强巡检、安排检修计划等,为运维人员提供决策支持^[4]。

3 监测报警装置的功能实现与优化策略

3.1 功能实现

监测报警装置主要包括报警显示、声音报警、短信报警和远程控制等功能。报警显示功能通过液晶显示屏或LED指示灯实时显示绝缘子串的倾斜状态和报警信息,方便运维人员现场查看。液晶显示屏可以显示更详细的信息,如倾斜角度、历史数据曲线等;LED指示灯则可以通过不同颜色的灯光来表示不同的状态,如正常、预警、报警等,简单直观。声音报警功能在检测到倾斜故障时发出响亮的警报声,提醒周围人员注意。警报声的音量和频率可以根据故障的严重程度进行调整,以引起运维人员的足够重视。短信报警功能则通过GSM/GPRS模块将报警信息以短信的形式发送至预设的手机号码,实现远程报警。运维人员即使不在现场,也能及时收到报警信息,及时采取措施。远程控制功能允许运维人员通过监控中心或移动终端对监测报警装置进行远程配置和控制,如设置报警阈值、查询历史数据等。这样,运维人员可以根据实际情况灵活调整监测参数,提高监测系统的适应性和灵活性。

3.2 优化策略

为提高监测报警装置的可靠性和实用性,可采用以下优化策略。一是采用冗余设计,增加关键部件的备份,如采用双电源供电、双通信模块等,提高系统的容错能力。双电源供电可以确保在其中一个电源出现故障时,系统仍能正常工作;双通信模块则可以在一个通信模块出现故障时,自动切换到另一个通信模块,保证数据的正常传输。二是优化报警算法,根据不同的应用场景和需求,合理设置报警阈值和报警策略,避免误报警和漏报警的发生。例如,在风速较大的地区,可以适当提高倾斜角度的报警阈值,以减少因风偏引起的误报警;在重要线路或关键部位,可以设置更严格的报警策略,确保及时发现潜在的故障隐患。三是加强人机交互设计,采用简洁直观的操作界面和友好的交互方式,提高运维人员的使用体验。操作界面应设计得简单易懂,方便运维人员进行操作和设置;交互方式可以采用触摸屏、按键等多种形式,满足不同用户的需求。四是定期对监测报警装置进行维护和校准,确保其性能稳定可靠。定期维护可以检查装置的硬件是否损坏、软件是否正常运行;定期校准可以保证传感器的测量精度,提高监测数据的准确性。

结束语

未来,随着物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展,悬垂绝缘子串倾斜监测系统将朝着更加智能化、自动化、集成化的方向发展。例如,可结合深度学习算法对监测数据进行深度挖掘和分析,实现故障的智能诊断和预测;利用无人机巡检技术对监测系统进行定期校准和维护,提高监测精度和可靠性;将监测系统与其他线路监测设备进行集成,构建全面的输电线路状态监测平台,实现对输电线路的全方位、实时监测和管理。

参考文献

- [1]廖林宏.高压输电线路绝缘子的选型和应用[J].现代工业经济和信息化,2021,11(08):167-169.
- [2]贾培亮.架空输电线路绝缘子掉串故障分析[J].现代工业经济和信息化,2017,7(21):87-88.
- [3]黄敏光.架空输电线路绝缘子掉串故障研究[J].科技创新与应用,2013(31):38-39.
- [4]刘纯,唐远富,欧阳克俭,等.±800kV输电线路预绞式悬垂线夹断裂分析[J].湖南电力,2017(02):46-50,63.