

基于状态监测的高压输电线路全生命周期运维模式研究

何洪程

南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650220

摘要: 本文聚焦基于状态监测的高压输电线路全生命周期运维模式, 阐述了状态监测技术体系, 包括技术概述、关键监测技术原理与应用及多源数据融合技术, 接着划分全生命周期阶段并分析各阶段特征与成本。因此, 构建运维模式, 涵盖总体框架设计、状态评估与预警方法、运维决策优化以及实施与管理。研究表明, 该模式可实时掌握线路状态, 科学制定运维决策, 优化资源配置, 降低全生命周期成本, 提升线路运行可靠性与安全性。

关键词: 高压输电线路; 状态监测; 全生命周期管理

引言: 高压输电线路作为电力系统的关键环节, 其安全稳定运行至关重要。传统运维模式多依赖定期巡检与事后维修, 存在滞后性与局限性。随着传感器、数据分析等技术的发展, 状态监测技术为线路运维带来新契机。基于此, 研究基于状态监测的高压输电线路全生命周期运维模式, 综合考虑线路从规划到退役各阶段特点, 整合多源数据, 实现精准运维, 对保障电力系统可靠运行、降低运维成本、提高经济效益具有重要意义。

1 高压输电线路状态监测技术体系研究

1.1 状态监测技术概述

状态监测技术是通过对接高压输电线路的关键设备和部件进行实时监测, 获取其运行状态参数, 如温度、振动、绝缘性能等, 并利用数据分析方法判断设备的健康状况, 预测故障发展趋势的技术。该技术具有实时性、准确性和预见性等特点, 能够为运维决策提供科学依据。状态监测技术的发展经历了从单一参数监测到多参数综合监测、从离线监测到在线监测的演变过程。目前, 常用的状态监测技术包括电气监测、机械监测、环境监测等。电气监测主要监测线路的电气参数, 如电流、电压、绝缘电阻等; 机械监测主要关注线路的机械性能, 如张力、弧垂、振动等; 环境监测则对线路周围的环境因素进行监测, 如温度、湿度、风速、覆冰等。

1.2 关键监测技术原理与应用

1.2.1 绝缘子污秽监测

绝缘子污秽是导致高压输电线路闪络事故的重要原因之一。绝缘子污秽监测技术主要通过测量绝缘子表面的泄漏电流、等值盐密等参数来评估绝缘子的污秽程度。泄漏电流监测是在绝缘子串上安装电流传感器, 实时监测泄漏电流的大小和变化趋势。当泄漏电流超过设定阈值时, 系统发出预警信号, 提示运维人员及时进行清扫或更换绝缘子。等值盐密监测则是通过采集绝缘子

表面的污秽样本, 在实验室中测量其等值盐密值, 以确定绝缘子的污秽等级^[1]。

1.2.2 导线温度监测

导线温度是影响输电线路输送能力的重要因素。当导线温度过高时, 会导致导线的机械强度下降、弧垂增大, 甚至引发断线事故。导线温度监测技术通常采用光纤光栅传感器或无线温度传感器, 将其安装在导线上实时监测导线温度。通过与导线载流量模型相结合, 可以根据导线温度实时调整输电线路的输送功率, 实现线路的动态增容, 提高输电效率。

1.2.3 杆塔倾斜监测

杆塔倾斜会影响输电线路的安全运行, 可能导致导线间距不足、绝缘子损坏等问题。杆塔倾斜监测技术利用倾角传感器或全球定位系统(GPS)实时监测杆塔的倾斜角度和位移。当杆塔倾斜超过规定限度时, 系统立即发出报警信息, 运维人员可以及时采取措施进行校正, 避免事故的发生。

1.3 多源数据融合技术

高压输电线路状态监测涉及多种监测技术和大量的监测数据, 不同来源的数据具有不同的特点和信息含量。多源数据融合技术能够将来自不同监测设备的数据进行综合处理和分析, 提取更有价值的信息, 提高状态监测的准确性和可靠性。多源数据融合技术主要包括数据预处理、特征提取、数据融合和决策判断等步骤。数据预处理是对原始监测数据进行清洗、滤波和归一化处理, 去除噪声和异常值, 提高数据质量。特征提取是从预处理后的数据中提取能够反映设备状态的特征参数, 如时域特征、频域特征等。数据融合是将提取的特征参数进行融合处理, 采用加权平均、模糊综合评判、神经网络等方法, 得到更准确的状态评估结果。决策判断是根据数据融合的结果, 结合预设的阈值和规则, 判断设

备的健康状态，并发出相应的预警信息。

2 高压输电线路全生命周期阶段划分与特征分析

2.1 全生命周期概念与阶段划分原则

高压输电线路全生命周期是指从线路的规划、设计、建设、运行到退役的整个过程。全生命周期管理强调在整个过程中综合考虑成本、性能、可靠性等因素，实现全过程的优化管理；阶段划分原则应根据线路的不同发展阶段的特点和需求，将全生命周期划分为若干个阶段，以便于对每个阶段进行有针对性的管理和决策。一般来说，高压输电线路全生命周期可以划分为规划阶段、设计阶段、建设阶段、运行阶段和退役阶段^[2]。

2.2 全生命周期各阶段特征分析

2.2.1 规划阶段

规划阶段是高压输电线路全生命周期的起始阶段，主要任务是根据电力需求预测、电网发展规划等因素，确定线路的走向、规模和建设时机。该阶段的特征是决策的不确定性较大，需要考虑多种因素的影响，如地理环境、社会经济发展、政策法规等。规划质量的好坏将直接影响线路后续各阶段的成本和效益。

2.2.2 设计阶段

设计阶段是根据规划要求，进行线路的电气设计、结构设计、机械设计等工作。该阶段的特征是技术要求高，需要综合考虑多种技术参数和标准，确保线路的安全可靠运行。设计方案的合理性将直接影响线路的建设成本和运行维护成本。

2.2.3 建设阶段

建设阶段是将设计方案转化为实际工程的过程，主要包括基础施工、杆塔组立、导线架设等工作。该阶段的特征是施工难度大、工期长、受外界因素影响较多，如天气、地质条件等。建设质量的好坏将直接影响线路的使用寿命和运行安全性。

2.2.4 运行阶段

运行阶段是高压输电线路全生命周期中最长的阶段，主要任务是对线路进行日常运行维护、状态监测和故障处理，确保线路的安全稳定运行。该阶段的特征是运行环境复杂多变，线路设备会受到各种自然因素和人为因素的影响，如雷击、风偏、外力破坏等。运行维护成本占全生命周期成本的比例较大。

2.2.5 退役阶段

退役阶段是指线路因达到设计寿命、技术升级或电网规划调整等原因，停止运行并进行拆除处理的阶段。该阶段的特征是需要考虑线路设备的回收利用和环境保护问题，合理安排拆除计划和资源处置方式，降低退役

成本。

2.3 全生命周期成本分析

全生命周期成本是指高压输电线路在全生命周期内所发生的全部费用，包括规划成本、设计成本、建设成本、运行维护成本和退役成本等。对全生命周期成本进行分析有助于优化资源配置，降低总成本，提高线路的经济效益。规划成本主要包括市场调研、可行性研究、规划编制等费用；设计成本包括设计咨询、图纸设计、设计审查等费用；建设成本包括设备购置、工程施工、监理等费用；运行维护成本包括巡检、检修、试验、状态监测、备品备件等费用；退役成本包括设备拆除、回收处理、场地恢复等费用。通过对全生命周期成本的分析，可以发现不同阶段的成本构成和影响因素，采取相应的措施进行成本控制。例如，在规划阶段合理确定线路规模和建设时机，避免过度投资；在设计阶段优化设计方案，降低建设成本和运行维护成本；在运行阶段加强状态监测和预防性维护，减少故障发生，降低维修成本^[3]。

3 基于状态监测的高压输电线路全生命周期运维模式构建

3.1 运维模式总体框架设计

基于状态监测的高压输电线路全生命周期运维模式总体框架包括状态监测层、数据分析层、决策支持层和执行层四个层次。状态监测层是运维模式的基础，通过安装各种监测设备，实时采集高压输电线路的运行状态数据，如电气参数、机械参数、环境参数等，并将数据传输到数据分析层。数据分析层对采集到的状态监测数据进行预处理、特征提取和数据融合，利用数据分析算法和模型评估线路设备的健康状态，预测故障发展趋势，为决策支持层提供科学依据。决策支持层根据数据分析层的结果，结合全生命周期管理理念和运维策略，制定运维决策方案，如巡检计划、检修计划、备品备件采购计划等，并将决策信息传递给执行层。执行层负责实施运维决策方案，组织运维人员进行巡检、检修、试验等工作，及时处理线路故障和缺陷，确保线路的安全稳定运行。同时，将运维执行情况反馈给决策支持层，以便对运维决策进行调整和优化。

3.2 基于状态监测的状态评估与预警方法

状态评估是基于状态监测的高压输电线路运维模式的核心环节，其目的是准确判断线路设备的健康状态，为运维决策提供依据。常用的状态评估方法包括层次分析法、模糊综合评判法、神经网络法等。层次分析法是一种将复杂问题分解为多个层次，通过两两比较确定各层次元素相对重要性的方法。在状态评估中，可以将线

路设备划分为多个子系统,如绝缘子系统、导线系统、杆塔系统等,然后对每个子系统的状态指标进行评估,最后综合得出线路设备的整体状态评估结果。模糊综合评判法是利用模糊数学理论,对具有模糊性的状态指标进行综合评判的方法。该方法能够处理状态评估中的不确定性和模糊性问题,提高评估结果的准确性;神经网络法是一种模拟人脑神经网络结构和功能的人工智能方法,具有自学习、自适应和非线性映射等特点^[4]。在状态评估中,可以利用神经网络对大量的历史监测数据进行学习和训练,建立状态评估模型,实现对线路设备状态的实时评估;预警方法是根据状态评估结果,设定相应的预警阈值,当状态指标超过预警阈值时,系统发出预警信号,提示运维人员及时采取措施。预警阈值的设定应综合考虑线路设备的重要性、运行环境、历史故障数据等因素,确保预警的准确性和及时性。

3.3 全生命周期运维决策优化

全生命周期运维决策优化是在状态评估和预警的基础上,综合考虑全生命周期成本、可靠性、安全性等因素,制定最优的运维决策方案。运维决策优化可以采用数学规划、遗传算法、粒子群算法等方法。数学规划是一种在一定的约束条件下,寻求目标函数最优值的数学方法。在运维决策优化中,可以将全生命周期成本最低、可靠性最高等作为目标函数,将巡检周期、检修策略、备品备件储备量等作为决策变量,建立数学规划模型,求解最优的运维决策方案;遗传算法是一种模拟生物进化过程的优化算法,具有全局搜索能力强、适用于复杂问题求解等特点。在运维决策优化中,可以将运维决策方案编码为染色体,通过选择、交叉、变异等操作,不断优化染色体,最终得到最优的运维决策方案;粒子群算法是一种模拟鸟群觅食行为的优化算法,具有收敛速度快、易于实现等优点。在运维决策优化中,可以将每个运维决策方案看作一个粒子,通过粒子之间的信息共享和协作,寻找最优的运维决策方案。

3.4 运维模式实施与管理

运维模式的成功实施与高效管理,是保障基于状态监测的高压输电线路全生命周期运维模式顺畅运转、发

挥实效的核心所在。在具体实施阶段,首要任务是构建一套完善且严谨的运维管理制度与流程体系,清晰界定各部门及岗位的职责与权限边界,确保运维工作有章可循、规范有序,实现标准化作业。同时,要高度重视运维人员的能力提升,通过系统化、常态化的培训机制,全面提升运维人员的业务素质与专业技能,使其能够精准掌握状态监测技术,深入理解运维管理模式,从而准确评估线路设备的运行状态,在故障或缺陷出现时,能够迅速响应、高效处理。另外,建立运维管理信息系统至关重要,借助信息化手段,对状态监测数据、运维决策信息以及运维执行情况等进行全面、实时的管理,提升运维管理的效率与决策的科学性。不仅如此,还需积极拓展合作渠道,加强与设备制造商、科研机构等的深度合作与交流,及时引入前沿技术与先进理念,持续优化运维模式,推动运维水平不断迈上新台阶,为高压输电线路的安全稳定运行提供坚实保障。

结束语

基于状态监测的高压输电线路全生命周期运维模式,融合先进技术与全生命周期管理理念,实现了对线路状态的实时精准感知与科学运维决策。通过状态监测技术体系、多源数据融合技术,能及时发现线路潜在问题;全生命周期阶段划分与成本分析,为优化资源配置提供依据;运维模式构建确保了运维工作的高效开展。未来,随着技术不断进步,该模式将进一步完善,为高压输电线路安全稳定运行提供更可靠保障,推动电力行业可持续发展。

参考文献

- [1]白兴涛.基于多模态AI的输电线路作业安全实时监测系统研究[J].宁夏电力,2025,(04):39-45.
- [2]陈超.基于BIM+GIS的架空输电线路项目全生命周期管理[J].建筑机械化,2025,46(08):48-52.
- [3]杜勇奇,田自明,宿爱柏,等.基于大数据分析的高压输电线路故障监测系统研究[J].电气技术与经济,2025,(07):29-31.
- [4]魏楠,安春香,田莉.超高压输电线路优化设计与施工技术研究[J].电子元器件与信息技术,2024,8(11):184-186.