

风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析

陈鑫 李林波 谭佑文

华电(云南)新能源发电有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6296

[摘要] 风电场作为新能源的重要组成部分,其集电线路电缆接头的状态监测对于确保电力输送的安全稳定至关重要。本文通过提出了一种基于声学声表面波传感技术的监测解决方案,该方案能够实时监测电缆接头的运行温度、局放参量以及环境温湿度参数,当存在状态异常时,可及时提供预警,避免事故扩大。通过对该监测方案的可靠性分析,证明了其在提高风电场集电线路电缆接头状态监测准确性、降低维护成本、延长电缆使用寿命等方面的显著优势。

[关键词] 风电场; 集电线路; 监测

中图分类号: TM925.11 文献标识码: A

Reliability analysis of condition monitoring of cable connector in wind farm

Xin Chen Linbo Li Youwen Tan

Huadian (Yunnan) New Energy Power Generation Co., LTD

[Abstract] As an important part of new energy, the condition monitoring of wind farm is very important to ensure the safety and stability of power transmission. In this paper, a monitoring solution based on acoustic acoustic surface wave sensing technology is proposed, which can monitor the running temperature of cable connector, local discharge parameters and environmental temperature and humidity parameters in real time. When the state is abnormal, it can provide early warning in time to avoid the expansion of accidents. Through the reliability analysis of the monitoring scheme, it proves its significant advantages in improving the accuracy of the state monitoring, reducing the maintenance cost and extending the service life of the cable.

[Key words] wind farm; collector line; monitoring

随着新能源产业的快速发展,风电场作为清洁能源的重要来源,其建设和运营的安全稳定性日益受到关注。集电线路作为风电场电力输送的关键环节,其电缆接头的状态监测对于保障电力输送的连续性和安全性具有重要意义。但由于风电场环境的特殊性,电缆接头易受温度、湿度、机械应力等多种因素的影响,导致接头松动、绝缘击穿等故障频发,给风电场的稳定运行带来严重威胁。因此,开展风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析,对于提高风电场的安全运行水平具有重要意义。

1 风电场集电线路电缆接头状态监测技术

在风电场集电线路电缆接头状态监测中,声表面波(SAW)传感技术是声学传感技术中的一个重要分支,SAW是一种能量集中在表面传播的弹性波,具有极低的传播速度和极短的波长。SAW传感技术的原理是基于压电效应,即压电晶体在受到外力作用时会产生电极化,从而在晶体两端表面产生电荷,反之,当压电晶体受到外电场作用时,也会发生形变^[1]。SAW传感器通常由压电晶体、金属叉指电极等组成,当射频电场作用于金属叉指电极时,通过逆压电效应激发SAW,而当SAW传播到接收器时,又通过压

电效应将SAW转换为射频电场,从而实现信号的传输和检测。SAW技术具有超小型化、灵活性、抗辐射能力强、温度稳定性高以及高灵敏度等特点,因此被广泛应用于温度、压力、湿度、气体浓度等物理量的测量中。

2 风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析

2.1 可靠性评估指标

风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析,关键在于确立一套可靠性评估指标,其中监测系统的准确性、稳定性以及响应速度构成了核心评估要素,如表1所示。准确性指的是监测系统能够精确无误地反映电缆接头的实际状态,包括温度、湿度、绝缘电阻等关键参数的测量精度。稳定性则强调监测系统在长期运行过程中,其性能参数的波动范围小,能够持续稳定地提供监测数据。响应速度则是指监测系统从检测到异常状态到发出警报或采取相应措施的时间间隔,该指标对于及时预防和处理电缆接头故障至关重要^[2]。通过对这些可靠性评估指标的深入分析,能够全面评估风电场集电线路电缆接头状态监测系统的性能,为风电场的稳定运行提供有力保障。

表1 风电场集电线路电缆接头可靠性评估指标

可靠性评估指标	描述	细化内容
准确性	监测系统精确反映电缆接头实际状态的能力	温度测量精度：（如±1℃） 湿度测量精度：（如±5%RH） 绝缘电阻测量精度：（如±10%） 其他关键参数测量精度（如电压、电流等）
稳定性	监测系统在长期运行过程中性能的稳定性	性能波动范围：（如温度范围±0.5℃，湿度范围±3%RH等） 长期运行稳定性测试：（如连续运行1年内） 环境适应性：高温、低温、高湿、低湿等
响应速度	监测系统从异常状态到采取措施时间间隔	异常状态检测时间：（如≤1秒） 警报发出时间：（如≤5秒） 采取措施时间：（如≤10秒，系统识别异常、发出警报应对措施） 响应速度测试：在不同异常状态下

2.2 可靠性分析方法

风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析，需采用多种方法以确保评估的全面性和准确性。解析法通过分析影响电缆接头状态的各种因素，如温度、湿度、机械应力等，建立数学模型来评估监测系统的可靠性。模拟法则通过模拟电缆接头在实际运行中的各种可能情况，如极端天气条件、负载变化等，利用蒙特卡罗法等统计方法评估监测系统的性能^[3]。此外，基于马尔科夫链的分析方法也是一种有效的可靠性分析方法，该方法根据电缆接头状态转移的概率矩阵，预测未来一段时间内接头状态的变化趋势，从而评估监测系统的预警能力和故障处理能力。这些方法各有优劣，应根据风电场的实际情况和监测系统的特点选择合适的分析方法，以确保可靠性分析的准确性和有效性。

2.3 可靠性分析实例

风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析，通过实际应用案例的介绍，可以更加直观地展示分析过程和结果，并提出可靠性提升措施及效果。以某风电场为例，该风电场采用了先进的电缆接头状态监测系统，对集电线路中的电缆接头进行实时监测，该系统基于声学传感技术，能够准确测量电缆接头的温度、局放参量以及环境温湿度等关键参数，当检测到异常状态时，系统会立即发出警报，并提示运维人员采取相应的处理措施^[4]。在可靠性分析过程中，首先对该系统的准确性进行验证，通过与实际测量数据的对比，发现监测系统的误差率极低，能够准确反映电缆接头的实际状态。其次，评估系统的稳定性，在连续监测中，系统的性能参数波动范围很小，表现出极高的稳定性。最后，测试系统的响应速度，在模拟故障测试中，系统能够在几秒钟内检测到异常状态并发出警报，响应速度非常快。根据可靠性分析结果，提出以下可靠性提升措施，一是优化监测系统的算法，进一步提高测量精度和稳定性。二是加强系统的维护和管理，定期对监测设备进行巡检和校准，确保设备处于良好状态^[5]。三是建立完善的故障预警和应急处理机制，当系统检测到异常状态时，能够迅速启动应急预案，减少故障对风电场运

行的影响。实施这些可靠性提升措施后，风电场的电缆接头故障率明显降低，运维成本也得到了有效控制。同时，由于监测系统的准确性和稳定性得到了进一步提升，风电场的整体运行效率也得到了显著提高。这一实际应用案例充分证明了风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析对于确保风电场稳定运行的重要性。

3 风电场集电线路电缆接头状态监测的挑战与解决方案

3.1 监测环境复杂性的挑战

风电场集电线路电缆接头状态监测面临的挑战之一是监测环境的复杂性，由于风电场通常占地面积广阔，电缆接头分布极为分散，不仅增加了监测工作的难度，也对监测系统的覆盖范围和通信能力提出了更高要求^[6]。每个电缆接头所处的位置和环境条件都可能有所不同，如有的位于高山之巅，有的则深埋于地下，还有的可能暴露在极端气候条件下，如强风、高温、严寒、潮湿等。这种分散性和环境多样性给监测设备的选型、安装、调试以及后续的维护管理带来了巨大挑战。而风电场在运行过程中，电缆接头会受到各种工况条件的影响，如负荷电流的波动、机械应力的变化、环境因素（如温度、湿度、腐蚀等）的侵蚀等。这些工况条件的变化不仅会导致电缆接头性能下降，还可能引发安全隐患。因此，监测系统需要具备高度的灵敏度和准确性，能够实时捕捉这些变化，并对其进行有效分析和预警，以便运维人员及时采取应对措施，避免故障的发生或扩大。为了应对这些挑战，应研发适应性强、可靠性高的监测设备，能够在各种复杂环境下稳定运行，准确反映电缆接头的状态信息。同时，建立完善的监测网络，利用先进的通信技术，实现电缆接头状态的远程实时监测和数据分析。并且还应加强对运维人员的培训和管理，提高其专业技能和应急处理能力，确保在监测到异常情况时能够迅速响应，能够有效保障风电场的安全稳定运行。

3.2 监测技术应用的挑战

风电场集电线路电缆接头状态监测的挑战与解决方案中，由于电缆接头位于风电场的关键位置，其状态监测需要高精度的传感器和可靠的数据传输技术，以确保数据的准确性和实时性^[7]。然而，目前市场上可用于此类监测的成熟技术有限，且往往存在成本高昂、适应性差等问题，这限制了监测技术的广泛应用。在监测设备的安装与维护方面，风电场通常覆盖广阔的区域，电缆接头分布分散，这增加了设备安装的难度和成本。并且由于风电场环境恶劣，如强风、沙尘、低温等，监测设备易受损，需要定期进行维护和检修，以确保其长期稳定运行，这些要求维护人员具备较高的专业技能和丰富的经验，增加了运维成本。此外，由于电缆接头状态监测产生的数据量巨大，且数据类型多样，包括温度、湿度、振动等，而如何有效处理这些数据，提取有用信息，并进行准确的分析和诊断，是当前面临的技术难题。随着风电场规模的扩大和智能化水平的提高，对监测数据的处理速度和分析精度也提出了更高的要求^[8]。针对这些挑战，解决方案包括研发更先进的监测技术，提高设备的可靠性和适应性，优化设

备安装和维护流程,降低运维成本,以及开发高效的数据处理和分析算法,提高监测数据的利用价值,能够实现对风电场集电线路电缆接头状态的实时监测和预警,提高风电场的运行效率 and 安全性。

3.3 解决方案探讨

风电场集电线路电缆接头状态监测面临着诸多挑战,针对这些挑战,应深入探讨分布式传感器技术的应用、数据分析算法的优化以及智能监控系统构建这三个方面。首先,分布式传感器技术的应用是提升监测效率与准确性的重要手段,由于风电场电缆接头分布广泛且环境复杂,传统的集中监测方式难以实现对所有接头的全面覆盖和实时监测^[9]。因此,引入了分布式传感器技术,通过在每个关键接头位置安装高精度传感器,可实现对电缆接头温度、湿度、振动等关键参数的实时监测。这些传感器通过无线网络与中央监控平台相连,能够实时传输监测数据,使运维人员能够远程掌握电缆接头的实时状态,及时发现潜在的安全隐患。其次,数据分析算法的优化是提高监测准确性和可靠性的关键,风电场电缆接头状态监测产生的数据量大且复杂,传统的数据分析方法难以满足实时性和准确性的要求。所以,需要采用先进的数据分析算法,如机器学习、深度学习等,对监测数据进行深入挖掘和分析。这些算法能够自动识别数据中的异常模式和趋势,提高故障预警的准确性和及时性,为运维人员提供科学的决策支持^[10]。最后,智能监控系统的构建是实现监测自动化和智能化的重要途径,结合分布式传感器技术和数据分析算法,构建了一套智能监控系统。该系统能够实时监测电缆接头的状态信息,自动进行数据分析和预警,并在发现异常情况时自动触发报警机制,通知运维人员进行处理。同时,该系统还支持历史数据查询、报表生成等功能,能够为运维人员提供全面的监测数据支持,有效提高了风电场的安全运行水平和运维效率。

4 结束语

风电场集电线路电缆接头状态监测的可靠性分析对于确保风电场的稳定运行至关重要。本文提出的基于声学表面波传感技术的监测解决方案,通过实时监测电缆接头的运行参数,能

够及时发现并预警潜在故障,为风电场的维护管理提供了有力支持。而随着新能源产业的不断发展,风电场集电线路电缆接头状态监测技术将不断得到优化和完善,为风电场的安全稳定运行提供更加可靠的技术保障。同时,积极关注新技术、新材料在风电场集电线路电缆接头状态监测中的应用,不断提高监测技术的准确性和可靠性,还能为新能源产业的可持续发展贡献力量。

【参考文献】

- [1]李飞.某风电场35kV集电线路跳闸分析及防范措施[J].电工技术,2023,(24):14-17.
- [2]武彦诚.35kV电缆接头击穿故障分析及处理[J].电世界,2021,62(04):13-15.
- [3]叶剑锋.35kV电缆接头故障分析及处理[J].中国地名,2019,(10):51.
- [4]张煜,徐嘉文,叶晨宸.配电网预制式中间接头的故障原因分析[J].集成电路应用,2023,40(07):248-249.
- [5]刘凤莲,薛志航,邓元实,等.220kV高压预制式电缆中间接头故障分析与处理[J].四川电力技术,2018,41(01):44-48.
- [6]李飞.某风电场35 kV电缆中间接头故障原因及防范措施研究[J].现代制造技术与装备,2023,59(09):186-188.
- [7]李启永,商东明,张圣涛,等.基于行波原理的35kV风电场集电线路故障在线监测[J].电气技术与经济,2023,(06):300-302+306.
- [8]张世雄.某风电场35kV风机集电线路塔上电缆头多次击穿原因分析[J].现代工业经济和信息化,2023,13(05):330-331.
- [9]杜雨晨.考虑风机影响的集电线路雷害风险评估与防护研究[D].合肥工业大学,2023.
- [10]杨慧,李秋翔.风电场35kV开关站开关跳闸原因分析及建议[J].电力安全技术,2023,25(04):48-51.

作者简介:

陈鑫(1992--),男,汉族,云南省昆明市人,大学本科,中级工程师,华电(云南)新能源发电有限公司,研究方向:新能源发电技术。