

基于声表面波传感的风电场电缆接头监测技术研究

缪祥平 李林波 谭佑文

华电(云南)新能源发电有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i4.6298

[摘要] 随着全球对清洁能源需求的增长,风电场的安全高效运行备受关注。电缆接头作为风电场电力传输关键部位,易受环境因素影响而故障频发,传统监测技术存在诸多局限。本研究聚焦基于声表面波(SAW)传感技术的电缆接头监测方法。深入剖析SAW传感原理,定制化设计传感器,构建无线无源监测系统,优化智能数据处理,完成系统集成与验证并持续改进。实验及实践表明,该技术能实时监测电缆接头关键参数,提升故障诊断及时性准确性,有力保障风电场运行可靠性,推动可再生能源产业发展。

[关键词] 声表面波传感; 风电场; 电缆接头; 监测技术

中图分类号: X924.2 **文献标识码:** A

Research on wind farm cable joint monitoring technology based on acoustic surface wave sensing

Xiangping Liao Linbo Li Youwen Tan

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

[Abstract] With the growth of the global demand for clean energy, the safe and efficient operation of wind farms has attracted much attention. As a key part of power transmission in wind farm, cable joint is susceptible to environmental factors and frequent faults. Traditional monitoring technology has many limitations. This study focuses on the cable joint monitoring method based on the acoustic surface wave (SAW) sensing technology. Analyze SAW sensing principle, customized design of sensors, build wireless passive monitoring system, optimize intelligent data processing, complete system integration and verification and continuous improvement. The experiment and practice show that this technology can monitor the key parameters of cable joint in real time, improve the timeliness and accuracy of fault diagnosis, effectively guarantee the reliability of wind farm operation, and promote the development of renewable energy industry.

[Key words] acoustic surface wave sensing; wind farm; cable connector and monitoring technology

风电场作为可再生能源的重要组成部分,其运行稳定性与安全性至关重要。电缆接头作为电力传输的关键部件,其运行状态直接影响风电场的整体性能。然而,由于环境因素与材料特性的限制,电缆接头易出现故障,导致电场非故障停机与设备损坏。因此,开发一种高效、可靠的电缆接头监测技术显得尤为重要。SAW传感技术因其高灵敏度、无线无源与长寿命等特点,在电缆接头监测中具有显著优势。

1 SAW传感技术原理

声表面波(Surface Acoustic Wave(SAW))传感技术核心原理基于压电材料压电效应和声表面波传播特性。压电材料(如石英、铌酸锂)受机械应力时,内部晶格结构形变,致使正负电荷中心相对位移,产生表面电势差(压电效应正效应)。反之,表面施加电场时,电场力使晶体结构形变产生机械振动,形成声表面波(压电效应逆效应)。

叉指换能器(Interdigital Transducers(IDTs))是SAW传感器关键部分,经微纳加工技术置于压电基片表面。IDTs电极呈叉指状交错排列,施加射频电信号后,相邻电极间形成周期性变化电场,作用于压电基片表面使质点周期性振动,激发声表面波。声表面波传播特性(波速、振幅、相位等)受外界物理量(温度、压力、应变等)影响^[1]。

基于弹性力学和压电学理论,声表面波传播速度与压电基片材料参数(弹性常数、压电常数、密度等)及外界物理量密切相关。如温度变化时,压电基片晶格常数改变,影响声表面波传播速度,特定温度范围内二者呈近似线性关系。压力和应变监测同理,基于其对材料参数和声表面波传播特性影响。

深入理解该原理对优化SAW传感器设计至关重要。例如,依据不同压电材料特性选择合适基底材料,可提升传感器对特定物理量敏感度^[2]。石英稳定性高,适用于温度变化大环境。铌酸

锂机电耦合系数高,对微弱物理量变化响应灵敏。设计时需综合考虑风电场实际工况,权衡材料利弊以精准适配基底材料(如表1所示)。

表1 SAW传感器性能参数表

参数名称	符号	数值 / 范围	单位	备注
压电材料	-	石英 / 铌酸锂	-	依风场区域工况,选适配基底保障性能
工作频率	f	96~433	MHz	适配风场电磁环境,平衡传输距离与抗干扰
温度测量范围	T	-40~120	℃	覆盖风场全温况,捕捉极端温变
温度测量精度	ΔT	±0.5	℃	严控测量误差,支撑故障精准判别
灵敏度	S	2~5	kHz/℃	敏锐响应温差,捕捉早期隐患信号
无线读取距离	d	≥50	m	契合风场布局,减少读取设备投入
响应时间	t	≤100	ms	快速反馈温变,助力实时运维决策
使用寿命	L	≥10	年	匹配风场设备周期,降低运维成本

2 技术策略

2.1 SAW传感器定制化设计

2.1.1基底材料的优化选择策略

材料的合理选择是构建高性能 SAW 传感器的首要环节。石英和铌酸锂作为压电材料中的佼佼者,各自具有独特的物理化学特性,使其成为传感器基底材料的有力候选者。石英晶体结构高度稳定,在风电场复杂多变的温度环境下,能够有效抵御热变形对声表面波传播特性的干扰,确保长期稳定监测^[3]。同时,其卓越的化学稳定性使其能够在风电场恶劣的化学环境中保持性能稳定。铌酸锂则凭借较高的机电耦合系数,在微弱信号检测方面表现出色,为早期故障诊断提供了可能。设计人员需综合考虑风电场不同区域的实际工况,运用先进的勘查和分析技术,权衡二者利弊,实现基底材料的精准适配。例如,在温度变化剧烈且腐蚀性介质较少的区域,石英材料可能是更优选择。而在对微弱信号检测要求较高且温度相对稳定的区域,铌酸锂材料则更具优势。

2.1.2 IDTs及反射栅的精密构建技术

IDTs的制作工艺对传感器性能影响深远。电极参数的细微变化都会对声表面波的激发和传输产生显著影响。在电极宽度方面,过窄会导致电阻增大,引发信号衰减和发热问题。过宽则会使电场分散,降低质点振动能量。间距的不合理设置同样会引发电场干涉,导致波的频散。通过有限元声学模拟软件,构建微观电场-声场耦合模型,进行虚拟实验优化,是确保IDTs性能的关键。反射栅结构的设计则需严格遵循声学干涉和反射原理,通过精确计算反射栅位置和几何尺寸,结合声学阻抗匹配技术,确保声表面波的精准反射,提高测量数据的准确性。例如,在设计反射栅时,需要根据传感器的工作频率和期望的反射效率,精确调整反射栅的金属层厚度和材质电导率,以实现最佳的声学

阻抗匹配^[4]。

2.1.3温度敏感薄膜的精准优化方案

温度敏感薄膜是实现温度监测的核心部件,其工作原理基于热膨胀调制声表面波。在薄膜材料选择上,需深入研究材料热物理特性,寻找与压电基片声速温变曲线协同性最佳的材料。制备工艺方面,采用原子级精度的沉积技术,对薄膜厚度进行精细调控,并通过多元合金共沉积和元素掺杂改性优化成分。经过多轮实验验证和性能测试,确保传感器在全温区和重点温段达到卓越性能指标(如表2所示)。例如,在选择温度敏感薄膜材料时,要考虑其热膨胀系数在不同温度范围内的变化规律,确保与压电基片的声速温变特性相匹配,以实现高精度的温度测量^[5]。

表2 SAW传感器温度监测性能指标

性能指标	数值
温度分辨率	±0.1℃
线性度	99.50%
测量范围	-40℃ - +60℃
长期稳定性	±0.2℃/ 年

2.2无线无源监测系统设计

无线无源监测系统由SAW传感器、无线读取器、通信模块和数据处理中心协同构成,旨在实时监测电缆接头状态^[6]。

SAW传感器安装于电缆接头关键部位,如导体连接及绝缘层与护套交接处等,其无线无源特性优势显著。无需外部电源,依靠无线读取器射频信号激励工作,安装维护便捷,不受电源布线约束,且降低成本与故障率,实现全方位监测。

无线读取器集射频发射、接收与信号调理功能于一体。发射模块依传感器谐振特性精确调控输出功率和频率,抵御风电场电磁干扰,保障声表面波可靠激发。接收模块采用低噪声、高性能混频器和滤波器,增强微弱回波捕获能力,精确解调还原信息,具备高灵敏度与选择性。

通信模块依据风电场布局和传输需求灵活组网。广域分散型风电场借助4G/5G蜂窝网络高速率、广覆盖优势,实现海量数据实时远程传输,满足集中监控。局部复杂电磁或短距离场景,Wi-Fi或LoRa专网以高稳定性和抗干扰性确保可靠传输,如风机机舱内用Wi-Fi专网保障短距通信,风机群与监控中心间靠4G/5G网络实现远程传输^[7]。

2.3智能数据处理与分析

在智能数据处理与分析环节,为保障监测数据的高准确性,运用了小波变换与经验模态分解相结合的创新信号去噪方法。小波变换基于信号频率特性自适应地分解信号,精准去除噪声频段系数。经验模态分解把复杂信号拆解为多个本征模态函数,有效剔除高频噪声模态,二者协同大幅提升了信号质量。实际应

用中,该联合去噪法能有效滤除风电场内复杂电磁干扰、机械振动等噪声源,提高监测数据信噪比,为后续精确分析筑牢根基^[8]。

构建温度测量模型依赖大量实验数据。于不同温度条件下开展实验,测量声表面波传播参数,借助多元线性回归、神经网络等算法拟合数据确定模型系数,确保模型可依据传感器输出精准反演温度,测量精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内。比如在实验室模拟风电场温度变化范围,获取多组不同温度下声表面波传播参数数据,用神经网络算法训练优化,建立高精度温度测量模型,使其能适应风电场实际运行的温度变化。

采用滑动窗口技术和统计假设检验方法进行实时与历史数据比对。滑动窗口动态截取近期数据计算统计特征,与历史数据统计阈值对比,通过序贯概率比检验等手段降低误报率,结合传感器网络拓扑结构准确定位故障接头,提升故障诊断及准确性。实际监测时,若实时数据与历史数据统计特征差异显著,系统立即预警,经分析传感器网络拓扑结构迅速确定故障接头位置,为运维人员提供精确故障信息,助其及时修复。此智能数据处理与分析流程为风电场电缆接头监测提供坚实保障^[9]。

2.4 系统集成与验证

在系统集成与验证阶段,需充分结合风电场实际情况,以保证整个监测系统的有效性与可靠性。于系统集成时,依据风电场实际布局及电气架构展开科学规划。传感器依据电缆接头故障率分布和重要性等级合理布置,像故障率高或处于关键电力传输路径的接头,优先安置高精度传感器,以此确保重点部位能被有效监测。无线读取器挑选在信号佳、电磁干扰小之处安装,通过射频电缆或光纤与通信模块稳固连接,保障数据可靠传输至数据处理中心,同时考虑风机分布、地形地貌等因素,合理规划通信网络与数据传输路径^[10]。

2.5 持续优化与迭代

随着风电场运维工作的不断深入和技术的持续发展,建立动态反馈机制至关重要。通过收集运维数据,深入挖掘潜在问题,针对性地进行优化改进。例如,若发现特定区域传感器故障率较高,应详细分析原因,从封装结构和安装工艺等方面进行改进。在软件方面,密切跟踪机器学习算法发展趋势,定期升级数据处理模型,增强系统智能诊断能力。在硬件方面,关注新型材料和芯片技术突破,适时引入新技术,全面提升系统整体性能,确保监测技术始终保持先进性和可靠性,适应风电场不断变化的运维需求^[11]。

3 结论

本研究成功构建了一套基于SAW传感技术的风电场电缆接头监测技术体系。从深入剖析SAW传感原理入手,通过精心定制传感器、合理构建监测系统、强化智能数据处理以及持续优化迭代,形成了一套切实可行的解决方案。经实验及实际应用验证,该系统性能高效稳定,实现了对电缆接头温度等关键参数的无线无源实时监测,为风电场电缆接头的安全运行提供了有力保障。展望未来,随着相关技术的不断进步与创新,该监测技术有望在风电运维领域得到更广泛深入的应用,进一步推动风电场运行可靠性与经济性的提升,为可再生能源产业的可持续发展贡献重要力量。

[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]张国清,韩永江,王振秋,等.电缆接头缺陷在线监测技术研究[J].电工技术,2023,(19):114-117+122.
- [3]李飞.某风电场35kV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.
- [4]邓凯,苗付贵,陶霏韬,等.风电场35kV电缆中间接头故障分析[J].电工技术,2023,(17):176-179.
- [5]张雨婷,李策,孔飞飞,等.基于ZigBee的电缆接头压接缺陷监测系统[J].传感器与微系统,2023,42(05):87-90.
- [6]张晓新,张兴磊,林峰,等.基于SAW的电缆接头内部测温天线研究[J].压电与声光,2023,45(02):178-182.
- [7]崔柏乐,王文,金晶,等.热声转换的声表面波电压传感机制[J].声学学报,2023,48(01):112-118.
- [8]方春华,周国锐,汪晋豪,等.RFID电缆中间接头无线无源湿度监测[J].中国测试,2024,50(02):46-53.
- [9]宋心雨,金浩,董树荣,等.用于声表面波高温传感应变传递的过渡层薄膜[J].压电与声光,2022,44(06):851-853.
- [10]张海鹏,宋岸峰,于仲华,等.地下电缆安全运行在线监测技术的研究[J].电脑编程技巧与维护,2022,(08):172-175.
- [11]冯保才,张相飞,刘国静,等.配电变压器电缆接头温升无线无源监测系统[J].变压器,2022,59(07):38-42.

作者简介:

缪祥平(1991--),男,汉族,云南省宣威市人,大学本科,中级工程师,研究方向:新能源发电技术。