

海上风电场电气设备故障诊断与预测性维护

姬晓东, 陈子祥, 权智杰
海洋石油工程股份有限公司, 天津 300450

摘 要 : 本文概述了海上风电场电气设备故障诊断与预测性维护的理论基础, 包括电气设备故障诊断方法、预测性维护技术及相关算法和模型。随后, 分析了海上风电场电气设备的故障类型及原因, 并探讨了基于信号处理、机器学习和数据驱动的故障诊断方法。同时, 阐述了海上风电场电气设备的预测性维护策略, 包括基于状态的维护和基于寿命预测的维护等。本文旨在为海上风电场电气设备故障诊断与预测性维护提供一种有效的方法和手段, 以降低故障率, 提高设备可靠性和风电场的运行效率, 为我国海上风电场的稳定发展提供技术支持。

关 键 词 : 海上风电场; 电气设备; 故障诊断; 预测性维护; 状态监测

Fault Diagnosis and Predictive Maintenance of Electrical Equipment in Offshore Wind Farms

Ji Xiaodong, Chen Zixiang, Quan Zhijie
Offshore Oil Engineering Company Limited, Tianjin 300450

Abstract : This paper summarizes the theoretical basis of electrical equipment fault diagnosis and predictive maintenance for offshore wind farms, including electrical equipment fault diagnosis methods, predictive maintenance technology and related algorithms and models. Then, the fault types and causes of electrical equipment in offshore wind farms are analyzed, and fault diagnosis methods based on signal processing, machine learning and data-driven are discussed. At the same time, the predictive maintenance strategies of electrical equipment in offshore wind farms are described, including maintenance based on state and maintenance based on life prediction. This paper aims to provide an effective method and means for the fault diagnosis and predictive maintenance of electrical equipment in offshore wind farms, so as to reduce the failure rate, improve the reliability of equipment and the operating efficiency of wind farms, and provide technical support for the stable development of offshore wind farms in China.

Keywords : offshore wind farm; electrical equipment; fault diagnosis; predictive maintenance; condition monitoring

引言

随着全球能源需求的不断增长和环境保护的日益重视, 可再生能源的开发和利用受到了广泛关注。在众多可再生能源中, 风能作为一种清洁、可再生的能源, 具有巨大的发展潜力。其中, 海上风电场凭借其更高的风速和更稳定的运行条件, 成为了风能开发的重要方向。然而, 海上环境复杂恶劣, 电气设备故障频发, 且维护成本高昂。因此, 开展海上风电场电气设备故障诊断与预测性维护研究具有重要的现实意义。

电气设备是海上风电场正常运行的关键组成部分, 其状态的良好与否直接影响到整个风电场的发电效率和稳定性。然而, 海上风电场的运行环境恶劣, 设备易受到盐雾、湿度、温度等多种因素的影响, 导致设备故障频发。此外, 海上风电场的维护成本高昂, 一旦设备发生故障, 将会给风电场带来巨大的经济负担。因此, 开展海上风电场电气设备故障诊断与预测性维护研究, 提高设备的可靠性和降低维护成本, 对于海上风电场的稳定运行和可持续发展具有重要意义。

一、海上风电场电气设备故障诊断与预测性维护理论基础

(一) 电气设备故障诊断方法

海上风电场是一个动态系统, 其状态会随着风力发电情况而

不断变化, 要求其中的电气部分有较高的可靠性。^[1]海上风电场的电气设备面临盐雾腐蚀、高湿度和温度波动等挑战, 增加了故障风险。为确保稳定运行, 需采用故障诊断方法(FdM), 包括信号处理(如傅里叶变换、小波变换)和人工智能(如机器学习算法)。通过传感器收集数据, FdM方法提取状态特征, 建立故

障诊断模型，如支持向量机、随机森林、神经网络，以及数据驱动方法如聚类分析和主成分分析。这些方法提高设备可靠性和效率，保障风电场稳定运行。

（二）预测性维护技术

预测性维护技术（PdM）在海上风电场的电气设备管理中至关重要，它通过先进的传感器技术收集温度、振动、电流等数据，并利用统计分析、机器学习、人工智能等算法分析这些数据，以实时监测设备状态并预测未来潜在的故障风险。这有助于工程师制定和执行最佳维护计划，以减少停机时间，延长设备寿命，并降低维护成本。

二、海上风电场电气设备故障类型及原因分析

（一）故障类型

海上风电场的电气设备可能遭受多种故障，包括电气故障（如电缆和绝缘问题）、机械故障（如轴承和齿轮箱损坏）、传感器和监测设备故障（影响数据收集）、环境因素引起的故障（如盐雾和湿度导致的性能下降），以及人为错误（如安装和维护失误）。^[2]这些故障可能由过载、短路、磨损、环境侵蚀等多种因素引起，需要通过综合的预测性维护和故障诊断策略来预防和解决。

（二）故障原因

海上风电场的电气设备在运行中可能遭遇由电气、机械、环境、人为、设计和制造缺陷，以及老化和疲劳等多种因素引起的故障。电气故障包括过载、短路、绝缘老化和接触不良等；机械故障涉及轴承、齿轮箱、叶片等问题；环境因素如盐雾、湿度、温度变化和自然冲击影响设备性能；人为错误如安装、维护和操作失误也是故障原因；设计和制造缺陷，以及设备老化和疲劳也会导致故障。通过综合管理策略和技术手段，可以降低这些故障风险，确保风电场的稳定运行。

三、海上风电场电气设备故障诊断方法

（一）基于信号处理的故障诊断方法

海上风电场的电气设备故障诊断依赖于信号处理技术，这些技术包括傅里叶变换、小波变换和希尔伯特-黄变换等。^[3]通过传感器收集电流、电压、温度和振动等数据，信号处理技术能够提取反映设备状态的特征，如通过傅里叶变换分析频率成分，小波变换揭示局部特征，以及希尔伯特-黄变换提取非线性特征。这些方法帮助识别设备的正常运行状态和潜在故障，提高故障诊断的准确性和可靠性。

（二）基于机器学习的故障诊断方法

海上风电场的电气设备易受海洋环境的影响，因此故障诊断至关重要。这包括使用传感器收集电流、电压、温度和振动等数据，然后通过信号处理技术（如傅里叶变换、小波变换、希尔伯特-黄变换）提取特征。结合人工智能算法（如支持向量机、随机森林、神经网络）和数据驱动方法（如聚类分析、主成分分

析），可以建立故障诊断模型，预测设备状态。^[4]此外，基于物理模型的故障诊断方法通过比较模型预测和实际数据来检测故障。这些方法共同确保海上风电场的可靠性和效率。

（三）基于数据驱动的故障诊断方法

为确保海上风电场的稳定运行，研究电气设备故障诊断方法至关重要。这些方法依赖于对运行数据的监测和分析，结合信号处理技术如傅里叶变换、小波变换和希尔伯特-黄变换来提取设备状态特征。人工智能算法（如支持向量机、随机森林、神经网络）和数据驱动方法（如聚类分析、主成分分析）用于建立故障诊断模型。基于物理模型的故障诊断方法通过比较模型预测和实际数据来检测故障。这些综合方法提高海上风电场的可靠性和效率。

四、海上风电场电气设备预测性维护策略

（一）维护策略概述

海上风电场的电气设备预测性维护策略通过实时监测和数据分析优化维护计划，旨在减少停机时间、延长设备寿命和降低维护成本。该策略依赖于传感器技术收集温度、振动、电流等数据，利用统计分析、机器学习和人工智能等算法建立预测模型，评估设备健康状况和预测故障风险。^[5]维护决策的制定和执行基于预测模型结果，以延长设备寿命、减少停机时间和降低维护成本。实际应用中，需考虑设备类型、运行环境和维护历史，与制造商、运维团队和数据分析专家合作制定策略。

（二）基于状态的维护（CBM）

海上风电场的电气设备基于状态的维护（Condition-Based Maintenance, CBM）是一种以设备实际状态为依据的维护策略。这种维护策略的核心在于实时监测设备的运行状态，并根据设备的状态信息来制定维护计划，以保证设备的可靠性和延长设备的使用寿命。

1. 实时监测：通过安装传感器和监测设备，可以实时收集设备的运行数据，如温度、振动、电流、电压等。这些数据反映了设备的实际运行状态，有助于工程师及时了解设备的性能和潜在的故障风险。^[6]

2. 数据分析：基于收集到的实时数据，可以使用各种数据分析工具和算法进行处理和分析，以揭示设备的状态和性能趋势。例如，可以应用统计分析、机器学习、人工智能等方法来预测设备的未来状态和潜在的故障风险。

3. 维护决策：根据数据分析的结果，工程师可以制定相应的维护计划，确定维护的最佳时机和内容。这有助于工程师在设备出现故障之前采取措施进行修复或更换，从而减少停机时间，延长设备的使用寿命。

4. 降低维护成本：与传统的定期维护相比，基于状态的维护（CBM）可以根据设备的实际状态来制定维护计划，避免不必要的维护和更换，从而降低维护成本。

5. 提高设备可靠性：通过实时监测和数据分析，可以及时发现设备的潜在故障风险，并采取相应的措施进行修复或更换，从

而提高设备的可靠性和稳定性。

在实际应用中，基于状态的维护（CBM）需要考虑设备的类型、运行环境、维护历史等因素。通过与设备的制造商、运维团队和数据分析专家合作，可以制定出适合特定设备的基于状态的维护（CBM）策略。

（三）基于寿命预测的维护

海上风电场的电气设备基于寿命预测的维护是一种维护策略，它通过分析设备的运行数据和维护历史，预测设备的剩余使用寿命，并据此制定维护计划。这种维护策略旨在延长设备的使用寿命，减少停机时间，并降低维护成本。

1. 数据分析：通过收集设备的运行数据和维护历史，可以利用数据分析工具和算法进行分析，以揭示设备的性能趋势和潜在的故障风险。^[7]例如，可以应用统计分析、机器学习、人工智能等方法来预测设备的未来状态和剩余使用寿命。

2. 寿命预测：根据数据分析的结果，可以预测设备的剩余使用寿命，并据此制定维护计划。这有助于工程师在设备达到其预期寿命之前采取措施进行修复或更换，从而延长设备的使用寿命。

3. 维护决策：根据寿命预测的结果，工程师可以制定相应的维护计划，确定维护的最佳时机和内容。这有助于工程师在设备出现故障之前采取措施进行修复或更换，从而减少停机时间，延长设备的使用寿命。^[8]

4. 降低维护成本：与传统的定期维护相比，基于寿命预测的维护可以根据设备的实际状态来制定维护计划，避免不必要的维护和更换，从而降低维护成本。

5. 提高设备可靠性：通过寿命预测和维护决策，可以及时发现设备的潜在故障风险，并采取相应的措施进行修复或更换，从而提高设备的可靠性和稳定性。

（四）预测性维护实施流程

海上风电场的电气设备预测性维护实施流程是一种基于设备状态监测和数据分析的维护策略，旨在优化设备的维护计划，减少停机时间，延长设备寿命，并降低维护成本。^[9]在海上风电场的电气设备管理中，预测性维护实施流程的应用能够帮助工程师更好地了解设备的运行状态，提前发现潜在的故障风险，并采取相应的措施进行修复或更换，以确保设备的可靠性和稳定性。

1. 状态监测：通过安装传感器实时监测设备的运行状态，收集运行数据。这些数据反映了设备的实际运行状态，有助于工程师及时了解设备的性能和潜在的故障风险。

2. 数据分析：对收集到的数据进行处理和分析，以识别设备的状态和性能趋势。这包括应用统计分析、机器学习、人工智能等算法和技术，以及与其他数据分析工具的结合，以提高数据分析的准确性和可靠性。

3. 预测模型：利用算法和技术建立预测模型，通过分析历史数据来预测设备的未来状态和潜在的故障风险。这些模型可以帮助工程师制定相应的维护计划，确定维护的最佳时机和内容。

4. 维护决策：根据预测模型的结果，制定相应的维护计划，确定维护的最佳时机和内容。这包括制定维护计划、安排维护团队、采购维护材料等。

5. 维护执行：按照维护计划进行维护操作，包括修复或更换故障部件，以确保设备的可靠性和稳定性。^[10]在维护过程中，需要确保维护操作的安全性和有效性，避免对设备造成进一步损害。

6. 维护记录：记录维护操作的结果和经验，以便后续分析和改进。这包括维护记录、故障报告、维护成本分析等。

五、结束语

本论文深入研究了海上风电场电气设备的故障诊断与预测性维护，探讨了设备在恶劣海洋环境中面临的挑战，如盐雾腐蚀、湿度、温度波动等，这些因素增加了故障风险，强调了故障诊断的重要性。详细介绍了故障诊断方法，包括信号处理技术如傅里叶变换、小波变换、希尔伯特-黄变换，以及人工智能算法如支持向量机、随机森林、神经网络，这些方法能够提取设备状态特征，建立故障诊断模型，预测设备状态。同时，讨论了预测性维护技术在电气设备管理中的重要性，它通过实时监测和数据分析预测设备未来状态和潜在故障风险，优化维护计划。本研究为海上风电场提供了理论支持和实践指导，通过故障诊断与预测性维护技术的结合，提高了海上风电场的可靠性和效率，促进了其稳定运行和可持续发展。未来的研究将进一步探讨这些技术的融合、优化和改进，以实现更智能化和高效的管理。

参考文献

- [1] 李锦基. 海上风电场风力发电机运行维护策略研究 [J]. 光源与照明, 2022, (12): 222-224.
- [2] 刘明敏; 陈彬; 刘军涛; 孙珂; 田伟辉; 高岩. 海上风电场发电能力后评估及影响因素分析 [J]. 西北水电, 2023(02): 91-95.
- [3] 杜剑强, 仲俊成, 李斌, 等. 中国海上风电发展现状与展望 [J]. 油气与新能源. 2023, 35(3). DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.03.001.
- [4] 刘景禄. 海上风电场建设与船舶通航安全研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2020(07): 27-28.
- [5] 黄永堤, 吴占友, 郝斌. 海上风电场运维一体化平台的开发应用研究 [J]. 中国设备工程, 2024, (03): 62-64.
- [6] 王建国. 海洋物探技术在海上风电场勘察中的适用性研究 [J]. 新城建科技, 2024, 33(01): 111-113+117.
- [7] 朱永飞, 马佳星, 李子航, 等. 海上风电场布局协同优化算法 [J]. 船舶工程, 2024, 46(01): 22-29. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2024.01.04.
- [8] 刘思轶, 吴垠峰, 曹建喜. 海域宽带融合通信系统在海上风电场运行监测中的应用 [J]. 中国水运 (下半月), 2024, 24(01): 39-41.
- [9] 张文鹏. 海上风电场运维监测方法研究 [J]. 地矿测绘, 2023, 39(04): 28-32. DOI: 10.16864/j.cnki.dkch.2023.0054.
- [10] 陈卫文, 吴维棉. 海上风电场交通安全预警系统升级改造 [J]. 中国海事, 2023, (12): 47-49. DOI: 10.16831/j.cnki.issn1673-2278.2023.12.015.