

振动信号分析与处理方法在风电机组故障诊断中的应用

牟宣霖

国家能源投资集团(济南)新能源有限责任公司河口分公司

摘要: 本文从风电机组的结构、工作原理、常见故障、振动分析与处理方法等方面进行了分析和阐述,并简要介绍了行业内的一些故障诊断成熟方案,并展望了基于传统振动技术与大数据、人工智能等新技术相互融合发展技术趋势。

关键词: 风力发电; 振动; 状态监测; 故障诊断

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-627X.2022.05.224

引言

风电机组属于大型机电一体化旋转设备,由叶片、轮毂、主轴、齿轮箱、发电机、机舱、塔筒、控制装置等组成的旋转机械将叶片捕捉到风能转换成电能,风电机组一般可分为水平轴风电机组和垂直轴风电机组两类,由于垂直轴风电机组属于非主流机型,而大型兆瓦级水平轴风电机组又可以分为双馈型风电机组、直驱型风电机组、半直驱风电机组,其中双馈型风电机组是目前国内运行数量最多的风电机组,其结构较为复杂,如图1所示为双馈型风电机组主要组成部件的示意图,其中,叶片是获取风能的装置,主要由叶片和变桨系统构成;主轴是风电机组传动系统的主要部件之一,其主要作用是将转化成机械能的风能传递至齿轮箱;齿轮箱的作用就是增速,利用低速机械带动高速发电机转动,齿轮箱的高速轴通过联轴器直接与发电机相连,带动发电机工作;发电机部分由发电机及其附属设备构成,安装在塔筒支撑的机舱内,上述部件也是能量传递过程的主要承载部件,其设计寿命通常情况下是20年。

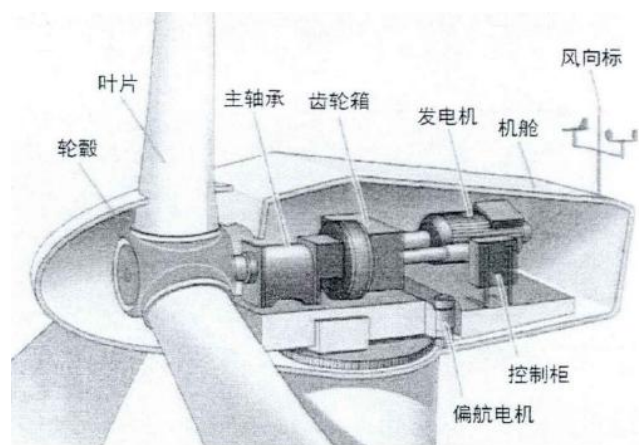


图1 双馈型风电机组

我国幅员辽阔,风力资源分布极其不均衡,陆上风能资源密集区主要分布在内蒙古、甘肃、新疆等西北和

吉林、辽宁等东北地区,海上风能资源密集区主要分布在东南沿海地区,机组常年工作在诸如低温、风沙、冰雪、高温、高湿、高盐等环境条件下,对机组性能及安全性具有更高的要求,同时风速、叶片载荷和风轮转速等变化范围大,进而导致风机转子不平衡,出现共振等现象,加之机组结构和运行的复杂性不可避免地会出现机械故障,电气电磁故障等影响机组安全运行的事件,有鉴于此,对于机组进行安全方面的监测就显得极为必要和重要。在目前的风电行业中,虽然对主轴、齿轮箱、发电机等高频旋转部件的振动监测已经有相对成熟的方案,但基于振动信号的方案具有成本高和施工工艺复杂,且分析时并没有考虑传感器的失效;同时振动信号具有较低的信噪比,不利于诊断风机早期潜在故障。

一、风电机组常见故障

1. 主轴故障

主轴是连接风轮、齿轮箱和发电机的重要部件,包括低速轴和高速轴。当轴承损坏或磨损时,会导致风电机组产生不平衡的力矩,从而引起风电机组的振动,常见的主轴故障有诸如轴承不对中、轴不平衡、轴弯曲等,出现上述问题时,轴承转动就会不平衡,如果不加于处理,这种振动状态如一直持续,则会导致机组振动异常。

2. 齿轮箱故障

齿轮箱故障主要包括齿轮故障和轴承故障两种,齿轮故障主要为断齿、齿面疲劳等;轴承作为齿轮箱的关键部件,容易出现磨损、点蚀、胶合、裂纹、断齿以及表面剥落等故障;当齿轮箱出现故障时,也容易导致风电机组的异常振动。

3. 轴承故障

轴承是整个发电机的关键零件,在润滑不充分、异物或者水分侵入、腐蚀、过载等都极易造成轴承的损坏,即使是在正常的工作和维护的情况下,长时间的运

转也易使轴承出现过度磨损、疲劳剥落等故障。

4. 发电机故障

发电机是风电机组机械能转换为电能的核心部件，运行工作状态影响整个机组发电效率。常见的故障可以分为机械故障和电气故障。电气故障有定子、转子绕组故障。机械故障有轴承故障、齿轮故障、转子故障、转子质量不平衡等。

5. 其他常见故障

叶片作为机组捕捉风能的关键部件，多数的叶片均具有展向长、弦向短、柔韧性好等方面的特点，是一种较容易产生振动的部件，其运行的稳定性直接影响机组整体运行质量，机组在运行期间，叶片正常情况下所受的交变荷载及位移等呈周期性变化，然而由于容易受到剪切风、变桨、偏航等影响，加之极端天气下要承受冲击载荷作用，叶片所受载荷不平衡进而导致风电机组产生不平衡的力矩，从而引起风机的异常振动，发电机发电的质量和效率会明显下降。由于风电机组叶片长期暴露在风沙、冰雪、高温、高湿等恶劣环境条件下，其极易造成叶片出现开裂、脱皮、沙眼等破损，致使叶片运行过程中气动不平衡，从而导致风电机组的异常振动。

偏航作为风向跟踪系统，系统所承受的载荷更大，而偏航电机故障、间隙增大故障、定位不准、偏航齿圈磨损和偏航齿轮故障等均可能造成风电机组的异常振动，威胁风力发电机机组的运行安全。

塔筒故障主要是结构损坏故障，例如，塔筒裂纹、被腐蚀等。这些问题主要与塔筒结构、安装过程以及风电机组所处的外部环境的因素相关。

二、风电机组振动信号分析与处理方法

振动频谱分析技术已经成为检测、维护、维修机械设备的重要手段，它以时域参数法、频谱分析法为核心，结合现代技术，可以有效地收集、整合、处理各种振动数据，从而精准地定位机械设备的故障点。通过对叶片、轴承、齿轮箱以及偏航系统的振动分析，我们可以更好地识别出其中的问题所在。根据傅里叶转换的概念，我们可以把这些部件的振动信息划分成基频、频率、相位等多个参数的总和。随着机组的不断变动，振动特性也随之改变，表现为信号畸变、频率变异、频谱变宽等，从而有助于更加精准地定位机组的故障。此外，因为风电机组的工作环境具有不稳定性，所以振动分析也需要考虑到此因素，因此，短期傅里叶转换、Wigner-Ville转换、希尔伯特-黄转换、局部平均分析、经验小波变换都被广泛地用来进行振动分析。

1. 振动信号时域分析方法与处理

时域振动信号分析方法包括均值、方差、均方差、波形指数、峭度以及相关分析，它们可以帮助我们更准确地诊断风电机组的故障。然而，由于风电机组的非稳态运行，这些方法的准确性较低，只能提供一般性的参考，无法准确地识别故障类型和定位，而且容易受到外界噪声的影响，因此，在进行大型机组故障诊断时，必须采用更加精准的统计方法，以获取更多的数据。我们需要更先进的信号处理技术来提高效率。

2. 振动信号的频域分析与处理

频域分析可以帮助我们了解信号的分布状态，它可以通过幅值谱、包络谱、功率谱、功率谱密度、倒频谱、高阶谱以及全息谱来反映出信号的真实性质，这些都可以为我们的故障诊断带来极大的便利。傅里叶变换技术可以帮助我们获得准确、可靠、可靠的数据，尤其是对于处理复杂多样性较差的旋转机械，如风电机组，它可以利用傅里叶变换技术，对其发射和接收数据进行定期监测，及时发现和识别异常情况，进而进行及早发现和发现和处理。

3. 振动信号的时频分析与处理

时频分析是一种用于研究信号的有效方法，它将时间和频率的分布函数结合起来，以更加精确地捕捉信号的局部特征。这种方法不仅可以检测出信号在时域内的频率分布，还可以检测出不同频段内的时间序列分布情况。STFT是一种广泛使用的时频分析方法，它把不平稳的信号转换为一系列短暂的平稳信号，这些短暂的信号可以通过在时间空间中添加窗口来表示，并且可以通过一系列的平移参数来覆盖整个时间空间。

4. 希尔伯特-黄变换与处理

HHT一般包含经历模式解释和希尔伯特谱解析两种重要内容。经历模式解释是剖析非稳定信息的一个有效手段。该方式是首先用EMD将待解析信息自满足分解成多少个本征模态函数Intrinsic mode function, IMF), 而后通过Hilbert转换并获取各个IMF的瞬时频带及瞬时幅度，使用Hilbert谱进行时频解析，并进行诊断的方法。对比其他方式，经历模式解释是一个自满足处理方式，在风力发电机的诊断中运用普遍。但经验模态分解方面缺少数学理论上的支持，同时在解释流程中会形成数据的模态混叠、端点效应等问题，严重负面影响了其在故障诊断中的广泛应用。

三、振动信号处理在风电机组中的故障诊断

通过对风电机组的叶片、轴承、齿轮箱、发电机以

及机舱的机械振动信号的预处理、特征提取，以及对故障特征的分析比较，我们可以准确地检测出机组的运行状况，并且可以及时发现异常振动，从而有效地识别和预警故障。

振动信号的预处理在风电机组的故障诊断中，振动信号含有大量的噪声，从混有噪声的振动信号中提取有效的特征信息是故障诊断的重要内容，而提取故障特征前对含噪的振动信号进行降噪处理是必须的。降噪方法的选择直接关系到故障特征提取的准确性与有效性。目前，在振动信号的消噪处理上研究最多的数字消噪方法主要是小波分解以及经验模态分解以及这两种方法与其他方法的组合改进大多数的噪音信号都不具备实际意义，因而它们和实际值之间的联系很少，因此，我们需要使用特定的相关函数来抑制它们。通过使用特定的分解技术，如小波分解和经典模式分解，我们能够从分解出的数据集中剔除那些与实际值无太大联系的信息，并通过重建这些数据集来提高抑制噪音的能力。除了传统的滤波降噪法，现在还有新兴的基于小波神经网络、模糊自组织神经网络、模糊集故障树、基于粗糙集的神经网络等等，传统的滤波降噪法仅在时域或频域分析，无法表述信号的时域局部性质，而新兴的基于神经网络的方法，算法比较复杂，计算量太大。

针对风电机组这种大型机电一体化旋转机械设备，例如，可以采用小波变换方法进行特征提取，因其在特征提取方面具有的多分辨率分析、时频局部化等特点，采用非均匀划分的时间和频率两个领域都有表征信号局部特征的能力，是一种窗口大小固定不变但形状可以改变的时频局部分析方法，它可以把振动信号的特性信息分配到不同尺度相对应的小波系数上，能有效处理非稳态、非线性的时频信号，在大型风电机组故障诊断中应用广泛，还可以采用集平稳子空间分析的信号分析和连续小波变换的方法，有效地提取了风电机组故障的特征，因各有优缺点，在此不在一一列举，仅作为参考，实践中应根据实际情况选择合适且适配的振动信号特征提取方法。

振动信号模式识别与故障识别的思路为分析风电机组的一类或多类信号，在时域、频域、时频域上构建一组高维的统计特征，用机器学习的方法进行特征的融合降维分类和可视化分析，进而实现对装备的故障诊断，诸如SACADA系统、CMS系统，主控系统等记录了数据量庞大、广泛多源、异构复杂的风电机组的运行状态参数和特征参数，形成了一个海量异构的数据池，如能找到

较佳的适合其数据结构、运行工况、工作环境等信息的数据挖掘方法，并基于人工智能技术的振动故障模式识别，例如将深度学习、机器学习、小波分析以及专家系统等这些成熟的技术广泛应用到风电机组振动监测和故障诊断中，是对于建立在传统的振动理论基础上的振动监测和故障诊断手段和方法是一种重要的补充，而如何实现海量异构数据的低成本存储，如何通过数据挖掘算法实现新故障特征识别与更新是该方法未来需面临的挑战，同时，作者认为，后期传统振动技术与新技术的相互融合，并在此基础上构建有效性、可靠性更高的振动监测技术是大势所趋，是对传统振动故障监测技术的重要补充，即弥补了由于环境噪声、信号本身等振动数据特征不明显等原因造成的无法进行识别和判定的早期微小的振动异常和故障的问题。不同的方法间在获得结论上可以进行相互的验证，对于后续系统持续优化和改进将起到很好的促进作用。

四、结论

本文针对风电机组振动监测及故障诊断技术现状进行了概要性的综述，虽然，风机振动监测及故障诊断技术取得了巨大的进步，但是，仍然有进一步完善的空间，如何利用现代非稳态信号处理方法中的短时傅里叶变换、小波变换、希尔伯特-黄变换对风电机组早期微弱的故障特征进行有效的提取，同时对提取到的不同类型、不同尺度、不同来源的数据进行有机统一并实现多源异构数据融合的故障诊断技术将是未来的一个研究的重点，要进一步研究不同信号、不同方法对风电机组监测有效程度，充分利用诸如SACADA系统、CMS系统，主控系统等记录的数据量庞大、广泛多源、异构复杂的运行状态参数和特征参数，采用传统振动技术与大数据、人工之智能技术的相互融合发展将是另一个研究的重点，相信随着技术的进一步融合发展，未来的风电机组振动监测技术将更加可靠和有效。

参考文献

- [1] 张世惠, 徐海峰等. 风力发电机组齿轮箱故障诊断. 中国太阳能学会风能专委会会论文集, 2022
- [2] 郭鹏, 徐明, 白楠等. 基于SCADA 运行数据的风电机组塔架振动建模与监测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 128-135.
- [3] 孙鹤旭, 孙泽贤, 林涛. 数据挖掘技术在风电机组故障诊断中的应用[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 81-85.