

风力发电机组旋转机械的故障诊断技术研究

赵海波

国家电投集团江苏海上风力发电有限公司 江苏盐城 224000

摘要: 近几年来, 风力发电作为一种清洁的可再生能源已被世界各国广泛采用, 风电机组作为风电机组的核心设备, 其可靠性直接影响着风电机组的经济效益和稳定的能源供给。然而, 受恶劣自然环境及高负荷工况影响, 风电机组长期运行易发生多种机械故障。如果不能及时发现、处理这些故障, 轻则造成设备的损坏、停机, 重则可能引发安全事故。因此, 深入研究风电机组旋转机械故障诊断技术具有重要意义。

关键词: 风力发电机组; 旋转机械; 故障诊断

对风电机组进行故障诊断是十分必要的, 不仅可丰富和发展风电机组故障诊断理论, 为风电机组的设计、制造与维护提供理论指导。还可以将故障诊断技术应用于风电机组, 可提高风电机组运行可靠性, 提高经济效益, 减少设备故障率, 减少维修费用, 延长机组使用寿命。将为提高风电机组的安全运行提供理论基础和技术支撑, 具有重要的理论和实际意义, 为当前相关领域热议课题。

一、风力发电机组旋转机械的常见故障

(一) 轴承故障

风力发电机主轴是传递机械能的关键部件, 轴的弯曲变形是其常见故障, 轴弯曲一般由载荷分配不均或制造误差引起。一般情况下, 轴的弯曲度不能超过0.05毫米/米, 超过这个标准将会引起整个系统的振动^[1]。疲劳断裂为长期反复循环应力作用所致, 根据应力寿命曲线(S-N曲线), 风机主轴一般设计使用寿命为20年, 而在实际运行中, 部分主轴可能在10年左右发生疲劳断裂。这一现象在风速为12米/s时特别容易发生, 如某风区8年内出现明显的疲劳开裂现象。

(二) 齿轮箱故障

风电机组齿轮箱是风电机组中的关键部件, 齿轮的磨损、断裂、齿轮啮合不良是其主要故障, 齿轮磨损一般由润滑不良或超负荷运转造成。某风电场1.5 MW风电机组运行3年后, 齿轮箱齿轮磨损严重, 齿面粗糙度Ra2.5 μm , 超出生产厂家推荐的1.6 μm 。齿轮啮合不良可能是由装配误差或制造公差造成的, 引起变速箱的振动及噪声, 某风电场2 MW机组检测到齿轮箱振动加速度为20 mm/s^2 , 超出设计值15 mm/s^2 , 为保证齿轮箱正常工

作, 需对齿轮啮合位置进行重新标定。

(三) 发电机故障

发电机的故障主要表现为绕组的短路和不稳定的磁场, 线圈短路一般是由绝缘材料老化, 电压波动或外部因素引起的。某风电场3 MW机组运行4年, 发现定子绕组绝缘电阻降至10 $\text{M}\Omega$ 以下, 低于20 $\text{M}\Omega$ 安全限值, 立即停机检修, 发现多处绝缘层烧损^[2]。磁场不稳定性是由永磁体退磁、绕组不均引起的, 引起发电机输出电压波动, 影响电网稳定运行。某2 MW风电机组运行时, 其输出电压出现3 Hz波动, 超出设计值2 Hz, 为稳定输出, 需对其进行磁场再调和绕组再分配。

(四) 叶片故障

风机叶片裂纹是一种常见的机械故障, 产生裂纹的原因主要有材料的疲劳, 环境的腐蚀, 以及加工过程中的缺陷。特别是在风速变化较大的区域, 叶片受力波动大, 容易发生裂纹扩展。某风电场2.5 MW风电机组运行2年后, 叶片根部产生微裂纹, 超声检测发现裂纹深度达8毫米, 超出生产厂家推荐的3毫米警戒线, 为了防止裂纹进一步扩展而导致叶片损坏, 必须马上停车修理或更换。此外, 寒区叶片覆冰问题尤为突出, 不仅会导致叶片重量增加、转动不平衡, 而且会降低气动效率和发电量。从北欧风电场得到的数据表明, 在冬季, 结冰会使发电效率降低15%左右。

二、故障诊断技术的分类及应用

(一) 振动分析

振动分析主要是对振动信号进行采集, 并对其进行分析处理, 在对振动信号进行采集时, 必须选择合适的传感器。加速度传感器是一种广泛应用于宽频带、高灵

敏度的传感器。为保证检测信号能准确地反映设备的状态，应尽可能接近振动源，一般选在轴承座、机壳等关键部位。在实际应用中，传感器的安装位置及方位需根据具体机械结构及故障特点加以优化调整，为了精确地捕捉不同频率的振动信号，采集装置必须有较高的采样频率^[3]。根据奈奎斯特取样原理，取样频率至少要比最高取样频率高一倍，对于风电机组，在考虑运行频率及故障特征频率的基础上，一般选用10 kHz以上的采样频率。在对振动信号进行处理和分析时，要对信号进行去噪、滤波、归一化等预处理。常用的滤波方法有低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器等，根据故障特征频带的大小来选取。如果以轴承故障为检测对象，则带通滤波器可用于对轴承特征频段的信号进行分析。为提高信噪比，可将小波变换应用于图像降噪中。小波变换能有效地将振动信号中的噪声成分分离开来，可提高故障特征提取的准确性。信号进行预处理后进行信号分析，常用分析方法有时域分析法、频域分析法和时频分析法。在时域分析中，主要是利用统计参数（均值、峰值、峭度等）对振动信号进行分析。频域分析是利用傅里叶变换对时域信号进行频谱变换，并对各频率成分的能量分布进行了分析。对风电机组而言，采用频域分析方法能够反映出机组的机械故障特征。如齿轮故障，其主要特征是齿轮啮合频率和其谐波分量的反常增强。以短时傅立叶变换、小波分析等为代表的时频域分析方法，既能提供时频信息，又能对非平稳信号进行分析。如某风电机组齿轮箱，采用12 kHz采样频率，在齿轮箱轴承座上安装加速度传感器，对采集到的振动信号进行小波分析，对其进行消噪处理，再对其进行频域分析。从频谱分析可以看出，齿轮的啮合频率及其二次谐波和三次谐波分量明显增强，并伴有侧频带。进一步的时频分析结果表明，这些频率分量在运行过程中表现出明显的周期增强现象，并结合齿轮箱的结构及工作状态，可初步判定了齿轮的磨损故障。

（二）声发射技术

声发射技术作为一种无损检测手段，已在风电机组旋转机械故障诊断中得到了广泛的应用。声发射技术的基本原理就是利用应力释放出的高频率弹性波对故障源进行识别与定位。声发射信号的获取是从安装传感器开始的，风电机组的传感器一般安装在轴承座、电机壳体、齿轮箱等关键部位。为确保数据准确，传感器应尽可能接近故障源，并保证传感器与被测面紧密接触，频率响

应范围通常在100 KHz到1 MHz之间，以获取高频AE信号^[4]。目前最常用的传感器有压电型和光纤型两种，前者具有较高的灵敏度和较快的响应速度。在采集声发射信号时，需采用前置放大、滤波等方法对信号进行预处理，以消除环境噪声的干扰。前置放大器的增益一般为40分贝~60分贝，滤波器用来滤除低、高频率的噪音，以保证信号的信噪比。为保证高频信号的完整性，对采集到的原始声发射信号进行采集，并将其送至计算机作进一步的处理。可从时域、频域两个方面分析采集到的AE信号。时域分析方法主要有振幅分析、能量分析和同相轴计数等。其中，振幅分析法可用于确定声发射信号的强度分布，能量分析法能定量地确定声发射信号的总能量；在频域分析中，常用的方法是时将域信号变换为频域信号，并提取频率分量，对频谱进行分析，能够识别出相应的机械故障类型。如齿轮故障常在齿轮啮合频率及其倍频上产生显著的谱峰，而轴承故障在滚动体所经过的频率上也会产生特征谱。另外，可利用小波分析进行时频分析，小波变换能从不同的尺度上分析信号的多分辨特性，进而提取信号的暂态特征，通过对小波系数分布的分析，能够较好地识别出短时间内的突发性声发射事件，这对早期故障检测具有重要意义。如某风电机组故障，利用安装于齿轮箱的压电晶体传感器，可获得高频突发性AE信号。经过预放大、滤波处理，信号幅度可达100 mV，频域分析表明，在300 kHz附近有一个明显的谱峰。将小波分析与时频分析相结合，可发现在这一谱峰所对应的时刻，存在着大量的高能瞬变事件。进一步对其进行模态分析，发现其频谱成分及瞬态特征与齿轮疲劳裂纹有很好的一致性。

（三）电气信号分析

电信号分析法能有效识别系统隐患，对电流信号进行分析时，可根据电机运行电流的时频域特征，对各种机械、电气故障进行识别，通过对电流谱中的谐波分量进行分析，就能诊断出电机是否存在故障，如轴承损坏，转子不平衡，电磁干扰等。正常情况下，正常风电机组的谐波分量很小，但在故障时，谐波分量明显增多。以三相感应电机为例，在正常情况下，总电流谐波畸变率不能超过5%，而轴承失效时，总谐波畸变率可达10%以上，通过这些参数的比较，能够迅速地找到故障点，从而指导维修工作^[5]。如某风电机组在运行过程中发生异常振动，经频域分析发现，该机组在2倍供电频率（100 Hz）处有一个明显的峰值。进一步分析发现，这一频率

分量的增大往往与转子的不平衡有很大关系。经检修、动平衡后,故障得以消除,表明采用电流信号分析法进行故障诊断是有效的。电压信号分析是电力系统运行过程中的一个重要环节,通过对电压波形变化的监测,可以发现电力系统是否出现异常状况。电压不平衡,谐波畸变,瞬间电压波动,可能是潜在的故障。如电压不平衡通常由两相负荷不对称或线路故障引起。一般情况下,三相电压不对称度应控制在2%以内。在实际应用中,如某风电机组在运行过程中频繁跳闸,分析其电压信号,发现其电压波形存在明显的暂态尖峰,多为电网暂态扰动或内部开关设备故障所致。经检查发现,该机组主开关装置接触不良,造成暂态电压突波频发,更换故障元件后,故障解决,使机组恢复正常运转。

(四) 热成像技术

热成像技术以其非接触、实时、全场的优势,在风电机组旋转机械故障诊断方面表现出了明显的优势。该方法利用红外辐射对被测物体表面的红外辐射进行检测,得到温度场分布图像,进而识别出温度异常区。红外中波(3-5 μm)、长波长(8-14 μm)波段,可准确获取目标物辐射信息,并以热成像的方式呈现。

利用红外热成像技术对旋转机械零件的温度异常进行识别与分析。风电机组的齿轮箱、轴承、电机等转动部件在运行过程中,由于摩擦、润滑或机械损伤等原因,会产生异常高温现象,利用红外热成像技术,能够快速识别出高温区域,并判断出故障的位置和程度。如风电齿轮箱故障诊断,齿轮箱作为风电机组的核心部件,其工作状态对整机性能及寿命有重要影响。利用热成像技术实时监测齿轮箱运行状态,获得了齿轮、轴承温度场分布图像。齿轮箱内的齿轮、轴承磨损、润滑不充分,都会引起表面温度的急剧上升^[6]。利用FLIRT640热成像技术,对某大型风电机组的齿轮箱进行了实时监测,可发现齿轮表面温度超过90 $^{\circ}\text{C}$ (一般不超过70 $^{\circ}\text{C}$)。经过进一步的检查,可发现这是由于机油污染造成的润滑不良,可更换润滑油,齿轮维修后,温度恢复正常。另外,可利用红外成像技术对风机电动机进行故障诊断,电动机线圈及轴承过热往往是电动机出现故障的早期迹象。利用热像技术,可对电机绕组、轴承等部件的温度变化进行监控,并及时发现故障。如某风电机组例行巡检时,技术人员利用热成像技术发现,机组绕组局部温升高达

105 $^{\circ}\text{C}$,超出绕组绝缘耐温等级(等级B为130 $^{\circ}\text{C}$ 、F等级为155 $^{\circ}\text{C}$)。经详细检查,确定为局部短路造成的线圈过,及时更换绕组,可使电动机恢复正常工作,避免了因绕组损坏而造成的重大事故。另外,可利用红外成像技术对风电机组轴承进行故障诊断,轴承是旋转机械中的核心部件,它的工作状态直接关系到设备的稳定与使用寿命。实时监测轴承温度,能及时发现轴承磨损、润滑不良等问题。如对某风电机组轴承进行日常监测时,发现其轴承表面温度持续升高,达80 $^{\circ}\text{C}$ 以上,超出正常工作温度(60~70 $^{\circ}\text{C}$)。经进一步检测,发现轴承磨损严重,及时更换后,轴承温度恢复正常,可避免因轴承损坏而造成的严重后果。

结束语

综上所述,对风电机组旋转机械进行故障诊断是当今能源领域的一个重要课题。将先进的传感技术、数据分析方法和人工智能算法相结合,可有效提高设备故障诊断的准确率和时效性,以达到缩短设备停工期,减少维护费用,延长设备寿命的目的。未来,随着大数据、物联网等技术的深入发展,故障诊断系统的智能化、自动化程度越来越高,对新能源可持续发展具有重要意义。在此基础上,通过不断的研发与创新,实现高效可靠的风电系统,促进全球能源结构优化与环境保护进程。

参考文献

- [1] 袁政. 风力发电机组偏航减速器故障分析与处理[J]. 价值工程, 2023, 42(36): 141-143.
- [2] 张建福, 沈锋, 吴洋. 基于FTA的风力发电机组液压系统故障分析及解决方案[J]. 节能, 2023, 42(12): 108-110.
- [3] 陈皓阳. 声振信号分离提纯的风力发电机故障诊断方法研究[J]. 自动化仪表, 2023, 44(12): 42-47.
- [4] 李玥, 杨竣辉. 风力发电机组的非侵入式机械故障检测与诊断[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(06): 248-254.
- [5] 蓝瑛, 吴治坚. 风力发电机组状态监测和故障诊断技术的应用研究[J]. 应用能源技术, 2023, (11): 38-42.
- [6] 程维. 风力发电机组旋转机械的故障诊断技术研究[J]. 模具制造, 2023, 23(11): 241-243.