

# 风力发电机组旋转机械的故障诊断技术分析

## Analysis of Fault Diagnosis Technology of Rotating Machinery of Wind Turbine

邓彦杰

Yanjie Deng

国家电投集团宁夏能源铝业中卫新能源有限公司 中国·宁夏 中卫 755000

State Power Investment Group Ningxia Energy Aluminum Zhongwei New Energy Co., Ltd., Zhongwei, Ningxia, 755000, China

**摘要:** 风力发电机组涉及较多旋转机械部件, 内部结构复杂, 一旦出现故障, 会直接影响风力发电机组安全性与稳定性。论文介绍了风力发电机工作原理及旋转机械结构特点, 分析了风力发电机组旋转机械常见故障类型, 介绍了振动信号分析法、故障特征信号提取、润滑油油液分析等故障诊断技术, 并结合实例分析了故障诊断技术的实际应用, 以期风力发电机组旋转机械的故障诊断提供参考。

**Abstract:** The wind turbine involves many rotating mechanical components, and the internal structure is complex, once the failure occurs, it will directly affect the safety and stability of the wind turbine. How to identify faults accurately and quickly and deal with them is a hot topic in related fields. This paper introduces the working principle of wind turbine and rotating mechanical structure, analyzes the wind turbine rotating machinery, introduces the vibration signal analysis, fault characteristic signal extraction, lubricating oil oil analysis, and analyzes the practical application of fault diagnosis technology, in order to provide a reference for wind turbine rotating machinery fault diagnosis.

**关键词:** 风力发电机组; 旋转机械; 故障诊断技术

**Keywords:** wind turbine; rotating machinery; fault diagnosis technology

**DOI:** 10.12346/etr.v4i11.7303

## 1 引言

随着现代科学技术的进步, 风力发电在社会生产及人们中得到了广泛的应用, 促进了中国电力企业发展。但随着风力发电应用范围的扩大, 其弊端也逐渐暴露, 部分电厂利用风力发电过程中旋转机械发生故障, 对电力生产产生了一定的影响, 若未能及时诊断并排除故障, 将会诱发一系列连锁事故<sup>[1]</sup>。

中国风力发电起步晚, 在发电机组旋转机械故障诊断方面相对落后, 这将直接制约中国风力发电长效发展, 因此积极探索旋转机械故障诊断技术, 及时排查机组内部安全隐患, 保障风力发电可靠性与安全性至关重要。

## 2 风力发电机工作原理

风力发电主要指的是借助风力带动风车叶片旋转, 在增速机作用下提升旋转速度, 以促进发电机发电的过程。该过程经过了两次能量转化, 一次为风能向机械能的转化, 另一次为机械能向电能的转化。根据风力发电机组旋转形式的不同,

可以分为垂直轴旋转与水平轴旋转两种类型, 前者风轮旋转轴与地面或气流方向保持垂直, 后者则是与风向保持平行。目前, 中国所用的风力发电机组大部分为水平轴旋转, 常见有双叶式、三叶式或多叶式, 无论哪种风力发电机组都离不开主轴、轴承、轮毂、变桨距系统、齿轮等部件。

## 3 风力发电机组旋转机械常见故障类型

风力发电机转动链在传递机械能时主要采用的旋转形式, 在运行中不可避免会产生振动, 长时间持续振动所产生的荷载会导致旋转机械出现疲劳, 导致转动机械遭到破坏, 引旋转机故障, 以下介绍了风力发电机组旋转机械常见的故障, 对其故障原因进行总结。

### 3.1 主轴故障

作为风力发电机组的核心零部件, 风机主轴一方面对风轮的悬重具有支撑作用, 另一方面能够传递动力。主轴在向增速箱传递风轮扭矩的过程中, 容易出现故障。常见包括以

【作者简介】邓彦杰(1992-), 男, 中国宁夏固原人, 本科, 助理工程师, 从事电力系统自动化研究。

下几种类型:

①轴不平衡。具体表现为质量不平衡、突发性不平衡、渐发化不平衡,以质量不平衡最为常见,多数是由于加工误差、材料不均或装配偏差等所致,另外腐蚀也会导致质量不平衡,当出现这种故障后,极易发生共振,若频率过大,将直接导致主轴断裂<sup>[2]</sup>。

②轴弯曲。风力发电机旋转机械的轴弯曲故障很大程度上与荷载有关,若在工作期间或制造过程中受到较大荷载,轴发生变形、弯曲,会使得齿形出现不同程度误差,严重者会引起冲击振动,影响到整个传动系统,诱发严重故障。

③轴颈磨损。当润滑油中存在较多的杂质,或温度过高,或轴径接触轴承,都会导致轴径磨损的发生,该故障会引起设备老化,影响设备使用年限。

### 3.2 叶片故障

风力发电机实现风能向机械能的转化很大程度上依赖叶片,因此叶片的正常运行也是保障风力发电的重要因素。若叶片材料未达到相应的标准,或在安装方面出现差错,未能按照相关要求规范安装,抑或叶片长时间运行进入疲劳状态,将会导致叶片外表弯曲及偏移,可见叶片转动磨损,受压过大、疲劳运行均会对叶片使用寿命产生影响。

### 3.3 轴承故障

由于主轴在风力发电机组中承担着重要的作用,支持着主轴及风轮工作,因此本研究重点探讨的是主轴轴承的故障。目前主轴轴承结构常用类型见表1。轴承荷载轴向力、径向荷载大,若主轴、风轮出现异常,将会引起压力变化,增加轴承承载的力度。此时若润滑度达不到要求,很有可能会发生如下几种故障。

表1 风力发电机组主轴轴承结构类型

	调心滚子	单列圆锥滚子	双列圆锥滚子	三排圆柱滚子
轴向承载能力	极强	强	极强	极强
径向承载能力	普通(双向承载)	强(单向承载)	极强(双向承载)	极强(双向承载)
刚性	/	强	极强	弱
调心性	极强	弱	弱	弱
高速运载能力	普通	普通	普通	/

①磨损。主轴密封不良,部分杂物掺杂,再加上润滑不充分,容易对局部产生磨损,使得轴承表面变得粗糙,运行精度降低,同时在运行过程中会产生明显噪声,降低设备使用性能。

②塑性变形。若轴承静荷载过大,或受到冲击荷载的影响,会导致轴承工作状态下局部应力大于屈服极限,此时滚道、滚子接触面可见大小不一凹坑。

③疲劳剥落。在运行过程中,轴承内外圈道及滚动体周期性接触,过大的载荷会引起疲劳点蚀。此时若仍持续工作,

会使得点蚀进一步扩展,使得轴承金属表层出现剥落<sup>[3]</sup>。

④腐蚀与断裂。轴承内部若受到润滑油、水等的侵入,表面会出现锈蚀,此时若有较大的电流通过,会产生电火花熔融,出现电腐蚀,不仅影响精度,而且会出现运行故障。轴承疲劳运行或转速过快会导致表面出现裂纹,长此以往会发生断裂。

### 3.4 齿轮箱故障

齿轮箱作为风力发电机组重要的组成部分,能够将产生的动力传递至发电机,获得转速。齿面磨损是齿轮箱最为常见的故障类型,这是因为齿轮工作环境恶劣,长时间运行表面会出现磨损。另外,润滑油的磨粒、外界颗粒物残留在齿轮箱,也会导致齿面腐蚀、磨损,其次为齿面胶合,在重载低速转动状态下易发生冷胶合,高速运行下易发生热胶合,风力发电机主要以后者为主。在高速运行时若润滑度不够,会引起齿面接触点温度升高,当达到一定限度会使得油膜破裂。

### 3.5 发电机故障

目前,大部分风力发电厂将工作重心集中在清洁能源发电质量方面,忽略了发电机的养护。发电机是整个风力发电机组运作的重要保障,长时间发电运转会加剧发电机老化,影响发电机使用年限。

## 4 风力发电机组旋转机械的故障诊断技术

### 4.1 振动信号分析法

振动信号分析法在风力发电机组中的应用已经有多年的历史,已逐渐成熟,其利用传感器对振动位移、速度、加速度等相关信息进行采集,并对获得的数据予以分析、处理,进而对故障类型及方位进行判断。振动信号分析法主要包括时域分析、导频谱分析、包络分析等。时域分析主要优势为直观、便于理解,其通过对时域振动信号的分析能够对故障予以识别,信号中含有周期成分或瞬时脉冲效果更佳<sup>[4]</sup>。

频谱分析是针对一定频域分析原信号的分布情况,所提供的特征信息更为直观,可作为故障诊断重要依据。倒频谱分析是基于信号功率谱的分析,其能够对信号组成予以有效的识别,将其中周期成分提取,有效提取并识别故障特征。包络分析主要是针对信号的共振波形进行分析,在齿轮、轴承等故障诊断中应用居多。振动信号分析法流程如图1所示。

某风力发电厂对风电机组配置了CMS系统,将振动传感器布置于转动系统各部件,实施在线状态监测。风场某机组在运行过程中,出现了发电机自由端轴承振动增加现象,可以发现最大达到了 $30\text{m/s}^2$ ,期间CMS系统出现持续预警。风力发电机组轴承型号为SKF6326/C3,其故障特征频率对应系数如表2所示。

从CMS中提取了一段实测信号,对其波形、频谱进行分析,采样频率设置为 $25.6\text{KHz}$ 。该信号状态下,发电机转速为 $1172\text{转}/\text{min}$ ,转频为 $19.56\text{Hz}$ ,此时发电机组运行整体上为低速、轻载。振动信号波形呈现出明显随机

性,可见小幅度周期调幅,但未见明显故障冲击表现。在400~1000Hz与1400~2000Hz信号频谱可见边带成分,在频率间隔为95Hz时可见突出的边带成分。

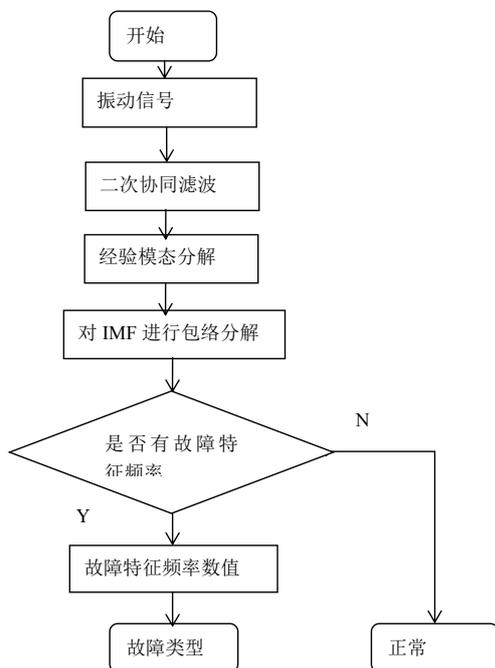


图1 振动信号分析法流程

表2 风力发电机组轴承故障特征频率系数

特征频率	FTF	BSF	BPFO	BPFI
频率系数	0.396	2.25	3.12	4.86

采用MED解卷积滤波法对振动信号进行处理,以强化振动信号故障冲击成分,获得时域波形及对应的频谱,经过MED处理,发现周期冲击成分明显增加,周期为0.01s。共振带除95Hz边带成分外,均格外明显,可帮助信号的包络分析。MED滤波处理前信号的峭度为2.72,小于3,提示信号中存在明显的随机成分问题,但无明显冲击性充分。经过MED滤波处理,信号峭度为5.89,提示信号的冲击成分增强明显。针对MED滤波处理前后的信号实施窄带包络分析,可以发现400~1000Hz包络谱图有61.3Hz峰值,即发电机轴承外圈故障通过频率,1400~2000Hz包络频谱图可见95.01Hz峰值,即轴承内圈故障通过率,提示风力发电机组轴承内外圈均发生故障。

根据诊断结果,维修人员加强对轴承振动的监测,在低风速停机时,开机检查发电机自由端轴承,确认轴承内外圈均出现了电腐蚀现象,内圈伴随轻微脱落,并对轴承予以更换,故障解除。

#### 4.2 模式识别方法

模式识别法是基于风力发电机组旋转机械故障分类的一种诊断方法,其属于机械学习范畴,包括非监督模式与有监督模式两种识别方法,前者往往又被称作是聚类分析,以往多在决策树聚类、k-临近距离判别基础上进行聚类分析,

之后发展为模糊算法聚类分析与遗传算法、粒子群算法。尽管上述方法在机械故障中已有一定的应用,由于通用性不强,且计算量大,对先前知识及经验有着较高的依赖性,未能广泛推广。近年来,支持向量机在风力发电机组故障诊断中得以应用,其是基于统计的故障诊断方法,利用内基函数非线性变换,使得输入控件变换至高维控件,对最优分类面进行求解,进而实现对故障的分类<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 润滑油液分析诊断技术

在诊断风力发电机组旋转机械故障时,依据其所使用的润滑油油液状态,也能够有效识别故障类型,明确故障部位,应用范围广。该技术可分为以下两种类型:

①油中微粒分析诊断。其应用光谱分析技术、铁谱分析技术,明确润滑油颗粒计数情况,通过对颗粒分布、大小等的观察与评估,明确故障类型及位置。

②油质分析诊断。采用润滑油油质检测仪,可检测出是否存在润滑油污染,明确油质是否合格,掌握其含水量,从而判断故障位置及部件磨损情况。

#### 4.4 设备状态在线监测技术

随着现代互联网信息技术的进步,风力发电机组在线监测诊断技术得到了空前的发展,其能够集信号采集、实时监测、在线诊断等多种功能为一体,实现对旋转机械故障的有效识别与诊断。在线监测系统监测内容包括温度、压力、振动信号、电信号等,将实时监测数据与事先设定值进行对照,若存在异常会发出警报,以便及时发现故障位置及类型,采取对应措施予以解决。不仅如此,在线监测技术下,还能够实现远程监控,通过网络登录风力发电机组系统,可对风机运行情况进行远程监测,实现诊断分析。

### 5 结语

综上所述,风力发电机组旋转机械系统结构复杂,易发生故障,且故障类型多样,应积极采取措施,合理应用故障诊断技术,对旋转机械故障现象予以及时有效的甄别与分析,最大限度上保障风力发电的安全性与稳定性,推动风电企业持续、健康发展。

#### 参考文献

- [1] 李刚,齐莹,李银强,等.风力发电机组故障诊断与状态预测的研究进展[J].电力系统自动化,2021,45(4):180-191.
- [2] 张琦,张强,刘志伟,等.大型风力发电机主轴轴承故障分析及预防方法[J].机械设计与制造工程,2022,51(8):127-130.
- [3] 黄宏臣,郭四洲,王子彦,等.加速度包络解调方法在风力发电机滚动轴承早期故障诊断应用研究[J].机械设计与制造,2022,373(3):251-253+257.
- [4] 王涛.振动分析和内窥镜检测在风力发电机组齿轮箱故障诊断中的配合应用[J].百科论坛电子杂志,2021(15):2632.
- [5] 樊帅,唐群先.基于AdaBoost-SAMME的风力发电机组变桨异常识别系统[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):31-40.