

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107596

基于变分模态分解的风力发电机组 叶轮不平衡检测方法*

刘楠

(重庆工业职业技术学院 重庆 401122)

摘要: 叶轮不平衡在风力发电机组运行的过程中是不可避免的,长期运行则会直接影响风力发电机组的可靠性,降低风电机组的寿命。针对风力发电机组叶轮不平衡故障的非线性和非稳定性等问题,传统的频域变换频谱分析方法存在一定的局限性,因此,研究了一种基于变分模态分解的叶轮不平衡故障的检测方法。结合风电场实际运行数据进行对比分析,该方法可以把复杂的多信号分解成若干个调幅调频信号,并能有效提取出故障特征,与传统频域变化频谱方法进行对比有较大优势。研究表明,叶轮气动不平衡故障会造成风轮1P纵向振动明显增大,且随着安装桨距角的偏差越大轴向振动幅值越大。

关键词: 风力发电机组;质量不平衡;气动不平衡;变分模态

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

The method of detecting unbalance of the wind turbine rotor based on variation mode decomposition

Liu Nan

(Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401122, China)

Abstract: The unbalance of the wind turbine rotor is unavoidable during its operation, and it will affect its reliability and reduce its lifetime for a long time. Aiming at the problem that the non-linearity and instability of unbalance of the wind turbine rotor, the traditional frequency domain transform spectrum analysis method has certain limitations. Therefore, studies a method for detecting unbalance of the rotor based on variation mode decomposition. Combined with the actual operating data of the wind farm for comparative analysis, this method can decompose the complex multi-signal into several signals, and can effectively extract the fault characteristics. Compared with the traditional frequency domain variation method, it has a great advantage. The results indicate that the rotor aerodynamic unbalance will cause the 1P vibration significantly increase, and the greater of the deviation of the pitch angle, the greater the axial vibration changes.

Keywords: wind turbine; mass unbalance; aerodynamic unbalance; variation mode decomposition

0 引言

风能,一种最为广泛的清洁可再生能源,已成为全球可再生能源中最具发展价值和利用机会的重要组成部分,也是推动能源低碳经济的核心力量。随着风力发电近几年的强劲发展和不断进步,风电行业也受到了越来越多行业的关注。在全球范围内,随着风力发电机组在陆上和海上的大量装机,其安全性势必引起人们的高度关注^[1]。由于风电机组实际运行环境的恶劣,以及风电机组在装备制造过

程中的复杂设计、制造工艺和现场安装技术复杂等众多问题,容易导致风电机组发生不同程度的故障。同时,风电机组叶片长时间外露,其表面会产生磨损、腐蚀、结冰或裂纹等现象;叶片表面粗糙度变化等均会导致叶片不平衡。由此看来,叶轮不平衡故障是会严重影响风电机组运行稳定,同时影响发电效率的一种故障^[2],该问题会影响传动链、塔筒及风电机组整个结构的安全运行,对风电机组的运行产生诸多危害:运转噪音大、振动大、轴承温度升高寿命短、齿轮箱与轴承寿命减短、基础松动变形关键零部件损伤,威胁

收稿日期:2021-08-16

* 基金项目:重庆市教育委员会科学技术研究计划体外反搏装置治疗效果最优控制方法研究(KJQN201903201)项目资助

风电机组的安全运行。如果迟迟不解决该故障或变得愈加严重,这对于风电机组的可靠性、安全性都会有很大威胁,风电机组使用寿命和发电效率也会受到一定程度的影响,影响风电机组功率曲线。为避免上述问题的发生,有必要对风电机组运行状态进行监测,将故障扼杀在问题发生初期。但现有的基于振动信号的监测振动方法,一般是在机组某些位置加装大量的高精度传感器^[3]进行检测和预防。文献[4]中基于光学相干断层成像来检查叶轮的裂纹情况,文献[5]基于光纤光栅应力传感器分析叶轮的形变,文献[6]基于稳定的风速模型进行故障特征频率的提取,但是并未考虑实际动态湍流风速情况。上述方法不仅成本高,安装复杂,同时对于传感器精度要求较高,另外,由于风电场往往运行环境多变,天气突发状况较多难以预测,使得风机故障信号具有非线性,这就导致风机的早期故障特征频率难以提取,使得风机可靠性和稳定性更是无法保证。

考虑到实际运行成本和业主的利益最大化,风电场运行的机组往往只会在少数几个机舱位置安装振动传感器,实际测量得到的数据往往受到风速、风向、转速以及发电机功率等因素影响,导致检测结果准确性较低。

因此,研究一种快速便捷,且检测准确度较高的叶轮不平衡检测方法,对于提高机组的稳定性、安全性和可靠性具有重要意义,相较于常用的频域分析方法直接分析,但并不能提取出有效故障特征频率,因此,本文提出一种基于变分模态分解叶轮不平衡检测方法,对于故障特征的提取有较大优势,并结合现场实际运行环境,对不同工况进行分析,根据分析结果,验证文中所述方法的有效性。

1 叶轮不平衡机理分析

风电机组叶轮不平衡主要包括叶轮质量不平衡和叶轮气动不平衡。下文分别对上述两种情况进行逐一剖析。

1.1 叶轮质量不平衡机理分析

因为某些原因导致叶轮的 3 支叶片质量分布不均,该情况就称为叶轮质量不平衡。这种现象主要是由于叶片工艺、安装技术或叶片材质分布不均等原因引起的;另外,由于叶片承受的交变载荷易引起疲劳、损伤、裂纹等现象,基于风电机组长期运行在恶劣的室外环境,往往会有灰尘、异物、积雪、覆冰的进入,种种上述现象都会引起叶轮质量的不对称。

考虑到在理想条件下,将叶轮质量不平衡等效为叶片上有 3 个质量相同的虚拟质量块^[7],并且均以角速度 ω_w 旋转,如图 1 所示。

考虑到在叶轮不平衡故障时,虚拟质量块 m 随叶轮周期性变化就称为叶轮转频 $1P^8$ 。在旋转过程中虚拟质量块离心水平方向受力如式(1)所示。

$$F_m = m\omega_w^2 R \sin(\omega_w t + \phi_w) \quad (1)$$

式中: R 为距轮毂距离, ω_w 为叶轮角速度, ϕ_w 为叶轮初始角度。由式(1)分析可知,气动转矩并没有受到水平方向离

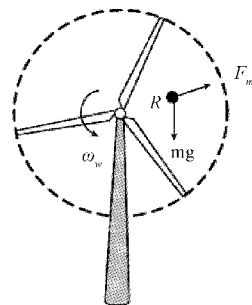


图 1 叶轮质量不平衡示意图

心力的影响。但虚拟质量块的重力矩却影响风电机组输出转矩。风电机组输出的机械转矩 T_w 如式(2)所示。

$$T_w = T_{w0} + mgR \sin(\omega_w t + \phi_w) \quad (2)$$

式中: T_{w0} 为气动转矩。

1.2 叶轮气动不平衡机理分析

当叶轮的 3 支叶片的气动力受力不均匀时,会引发叶轮气动不平衡故障^[9]。而造成气动不平衡故障的常见原因主要有:由于生产制造、现场安装或控制误差等造成 3 个叶片的桨距角不同,或其中一个叶片与其余两个叶片不同;或由于叶片表面覆冰、积雪、异物等原因也会产生气动不平衡故障;3 支叶片变桨不同步或变桨执行累计误差;叶片气动外形变化;传动链对中误差;偏航误差等等众多因素都会引起气动不平衡故障的发生。

气动不平衡故障不仅仅会使得机组振动过大,还会引起塔筒等载荷增大,甚至影响发电量,导致业主收益损失。叶轮在随风进行周期性旋转时,不同角度的叶素受力如图 2 所示。图中 F_T 表示平行于叶轮旋转平面的切向气动力, F_N 表示垂直于叶轮旋转平面的轴向气动力^[7]。

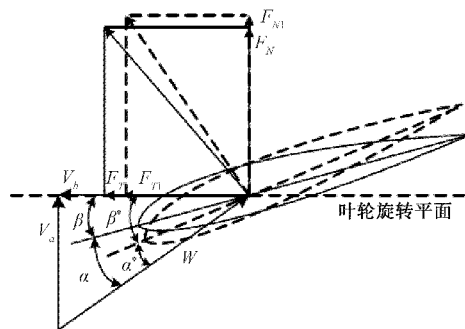


图 2 不同角度叶素受力情况

当叶轮处于气动平衡时,此时 3 个叶片桨距角都为 β ,3 个叶片受力均相等。但若其中一支叶片桨距角与其他两支有差别,如图 3 虚线部分所示,其中一支叶片桨距角变化为 β^* ,攻角变化为 α^* ,此时该叶片 F_{T1} 和 F_{N1} 也与其他两支叶片不同,从而导致叶轮气动不平衡故障的发生。

根据动量-叶素理论,对叶轮气动不平衡进行受力分析^[10],可以发现整个叶片上在 F_{TC} 、 F_{NC} 、 T_C 和 M_C 的作用下,叶轮主轴旋转中心被影响了^[11],如图 3 所示,从而机舱

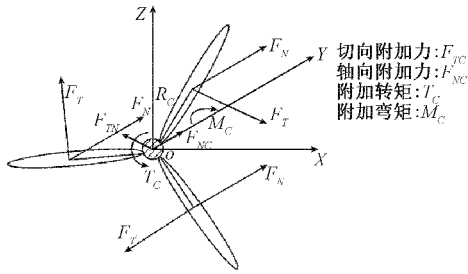


图 3 叶轮气动不对称受力分析

和塔筒都会引起不同程度的抖动,而 3 支叶片所受的气动力和气动转矩同时也被影响了产生了波动,该波动的频率等于叶轮的转频 1P,根据上述分析可得叶轮输出的气动转矩 T_w ,如式(3)所示。

$$T_w = T_{w0} - T_{Cg} + T_{im2} \sin(\omega_w t) \quad (3)$$

式中: T_{w0} 为叶轮平衡情况下 3 支叶片的气动力累加之和,转矩幅值用 T_{im2} 表示; ω_w 表示角速度^[8]。

根据风电机组的基本工作原理可知,风能利用系数在桨距角 = 0° 时最大,当桨距角增大时,会减小风能吸收,即风能利用系数降低^[12],随之气动转矩影响较大,最终影响发电功率。根据式(3)可知,在叶轮气动转矩发生周期性变化时,转速也会存在周期性变动,该周期性波动频率即为 1P。若其中一支叶片桨距角与其他两支叶片不一致出现偏差时,叶轮轴向推力和切向力会发生变化^[13]。随着气动转矩的降低,输出功率同时也被影响。

通过以上对叶轮的详细受力分析,叶轮质量不平衡和气动不平衡故障均会引起风电机组不同程度的振动,但是引起机组横向振动较为明显的主要是叶轮质量不平衡故障,而引起风电机组纵向振动较为明显的则主要是叶轮气动不平衡故障。因此,为了在早期发现叶片是否处于气动不平衡故障,可以基于监测叶轮转频 1P 的方法,从而保证风电机组安全、稳定、可靠的运行,继而保证发电效率和业主发电最大收益。

2 叶轮不平衡诊断方法

2.1 输入数据需求

- 1) 获取风机的机 X、Y 方向的振动加速度信号。
- 2) 获取风电机组环境温度值。

2.2 振动频谱分析—VMD 算法

振动频谱的分析基于变分模态分解分析 VMD 算法。VMD 算法可以同时把复杂的多信号分解成若干个单分量的调幅调频信号,是一种可处理非平稳、非线性信号的自适应信号处理方法。VMD 主要是基于迭代寻找变分模型每个信号的最优解,从而确定每个模态函数的中心频率和带宽^[14],最后每个信号的频带被自适应地分离,以获得 K 个模态函数。采用如下方法对各模态进行分析:

- 1) 将分解得到的各模态采用希尔伯特黄方法进行变换计算。

- 2) 调整模态的中心频率需引入指数项,改变模态的频谱到基带上。

- 3) 估计调制带宽,对调制过程中提取的信号采用 H_1 、高斯平滑两种方式。

基于上述方法得到了变分约束问题,为了得到模型的最优解,这里引入二次惩罚函数项。二次惩罚因子 α 和 Lagrange 乘 λ ,扩展后的 Lagrange 表达式如式(4)所示^[15]。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \|\partial_t [\delta(t) + \frac{j}{\pi t} * u_k(t)] e^{-j\omega_k t}\|_2^2 +$$

$$\|f(t) - \sum_k u_k(t)\|_2^2 + [\lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t)] \quad (4)$$

其中, $\omega_k(t)$ 为 $u_k(t)$ 的瞬时频率, $\delta(t)$ 为 Dirac 分布, * 代表卷积, $k = 1, 2, \dots, K$, $f(t)$ 表示原始信号。

VMD 对信号的具体分解过程如下:

- 1) 将 $\{u_k^1\}$ 、 $\{\omega_k^1\}$ 、 λ_k^1 和 n 的值初始化等于 0。
- 2) 定义 $n = n + 1$, 执行循环过程。
- 3) 定义 $k = 0$, $k = k + 1$, 当 $k < K$ 时,执行内层前两个循环,分别更新 $\{u_k\}$ 和 $\{\omega_k\}$ 如式(5)所示。

$$u_k^{n+1}(\omega) = \frac{(f(\omega) - \sum_{i < k} u_i^n(\omega) - \sum_{i > k} u_i^n(\omega) + \lambda^n(\omega))}{1 + \alpha(\omega - \omega_k^n)^2} \quad (5)$$

同时,将模态函数中心频率的求解问题转换到频域进行分析,如式(6)所示。

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |u_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |u_k^{n+1}(\omega)|^2 d\omega} \quad (6)$$

更新 λ 为:

$$\lambda^{n+1}(\omega) \leftarrow \lambda^n(\omega) + \tau [f(\omega) - \sum_k u_k^{n+1}(\omega)] \quad (7)$$

- 4) 判断是否满足迭代停止条件:

$$\sum_k \frac{\|u_k^{n+1} - u_k^n\|_2^2}{\|u_k^n\|_2^2} < \epsilon \quad (8)$$

直至满足上述特定条件,整个过程结束,输出得到若干个 IMF 分量;否则,则继续重复步骤 3)~4)。

2.3 不平衡检测及判断规则

根据上述模态分析结果,制定如下叶轮不平衡检测及判断规则。

步骤 1: 基于运行数据,采用变分模态分解分析 VMD 算法进行振动频谱分析,确定风机运行的 IMF1 分量频率。

步骤 2: 确定正常运行风电机组 IMF1 分量的幅值。

步骤 3: 同时对其加速度二次积分,得到振动幅值。

步骤 4: 根据振动幅值,确定额定风速下的不平衡阈值。

步骤 5: 对运行风电机组的振动加速度进行滤波,并与不平衡阈值对比。

步骤 6: 为避免出现虚警,影响最终统计结果,对报警数量计数,当报警数量超过不平衡阈值为准则,确定是否处

于叶轮不平衡。

步骤 7:进一步判断,当 X 方向的幅值大于 Y 方向的幅值,确定为叶轮质量不平衡;当 Y 方向的幅值大于 X 方向的幅值,确定为叶轮气动不平衡。

步骤 8:针对叶轮覆冰的情况,结合采集的环境温度值,确定是否是属于覆冰不平衡。

叶片不平衡具体检测方法和判断规则如图 4 和 5 所示。

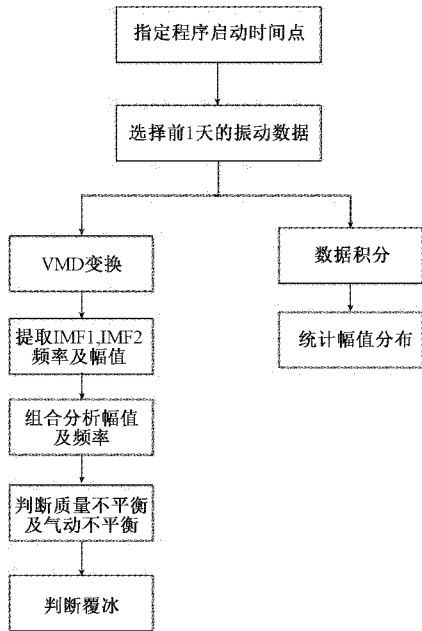


图 4 叶片不平衡检测流程

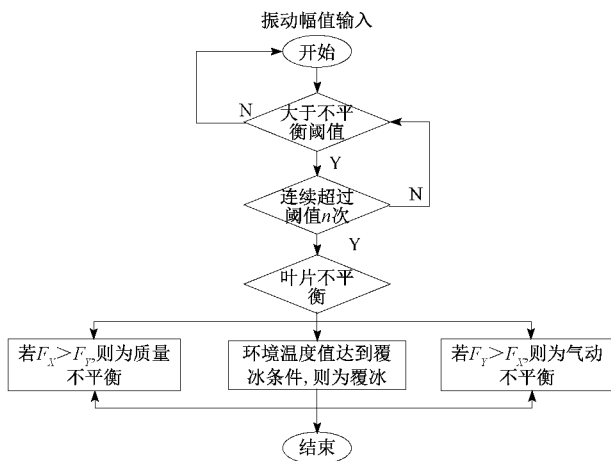


图 5 叶片不平衡判断流程

3 实验数据分析

本研究选取张北某风电场 3.4 MW 机型一台机组进行现场实地测试,研究风电机组叶轮质量不平衡和叶轮气动不平衡的影响,并采集风电场不同工况的数据,进行分析。机组主要信息如表 1 所示。

表 1 机组信息

信息名称	信息内容
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 200
并网转速/(r·min ⁻¹)	800
叶片长度/m	140
额定功率/MW	3.4
塔筒共振频率/Hz	0.272 7
传动链固有频率/Hz	1.81
塔筒	90M 全钢塔筒

当风电机组处于正常运行状态时,即风电机组不存在不平衡的情况,此时记录该状态下的运行数据。此后,改变其中任意一支叶片的安装桨距角,使其与其他叶片分别偏差 1°、3°、5°,并分别采集数据;之后,改变其中任意两支叶片安装桨距角,使其与其他两支叶片分别偏差 1°、3°和 5°,以上各情况数据采集时风电机组发电功率均需在 50%~80% 负载时采集,每次数据采集至少持续 10 min。采集上述不同情况下的机组数据进行详细分析。

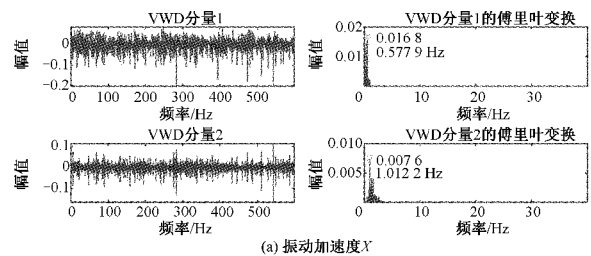
为了突出 VMD 算法可以同时把复杂的多信号分解成若干个单分量的调幅调频信号,并能有效提取出故障特征的优势,因此实验过程中特采取常用的频域 FFT 变换频谱分析方法进行实验对比,具体实验结果具体如表 2 所示。

表 2 FFT 变换频谱分析

测试条件	X-方向振动	Y-方向振动
1#、2#叶片偏差 1°	(0.018 0, 0.578 Hz)	(0.211, 0.293 Hz)
1#、2#叶片偏差 3°	(0.027 7, 0.144 Hz)	(0.029, 0.014 Hz)
1#、2#叶片偏差 5°	(0.025 1, 0.29 Hz)	(0.035, 0.175 Hz)
1#叶片偏差 1°	(0.018 5, 0.272 Hz)	(0.031 2, 0.018 2 Hz)
1#叶片偏差 3°	(0.033 1, 0.272 Hz)	(0.065 7, 0.181 Hz)
1#叶片偏差 5°	(0.026 5, 0.268 Hz)	(0.093 9, 0.178 1 Hz)
3 叶片同步	(0.020 1, 0.272 Hz)	(0.017 1, 0.545 Hz)

在同样的实验条件下,采用变分模态分解 VMD 算法对信号进行分解,得到 VMD 算法的各分量分解结果,如图 6~12 所示。

为方便分析结果,根据以上 VMD 分量 1 和 VMD 分量 2 的傅里叶变换分别进行轴向和纵向分析,将不同情况的结果整理得到如表 3 所示。



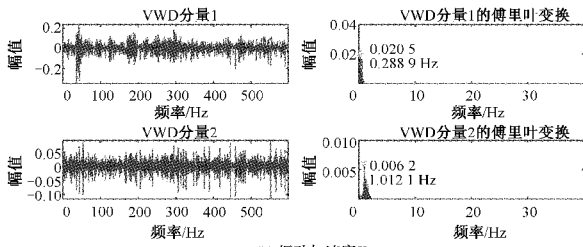


图 6 1#、2#叶片偏差 1°

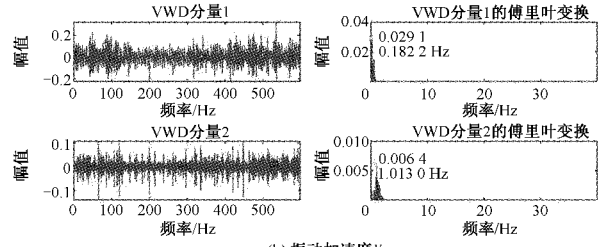


图 9 1#叶片偏差 1°

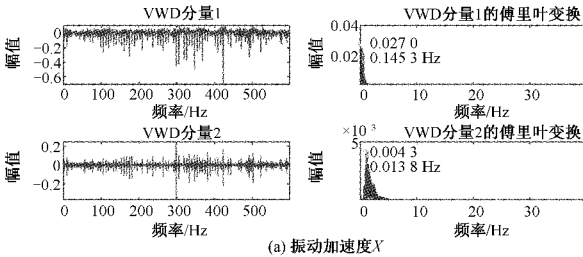


图 7 1#、2#叶片偏差 3°

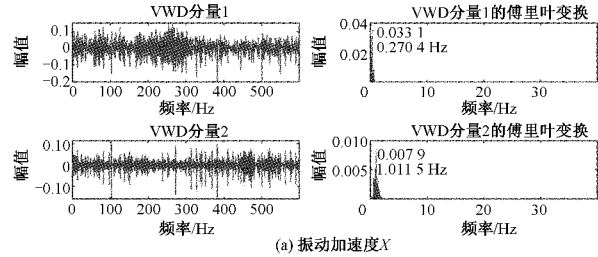


图 10 1#叶片偏差 3°

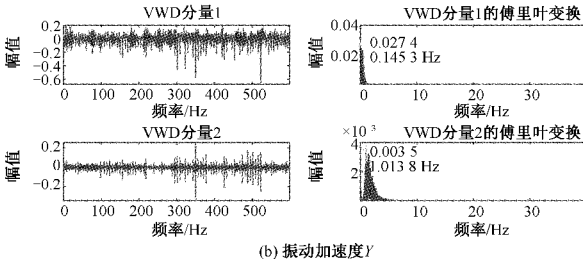


图 8 1#、2#叶片偏差 5°

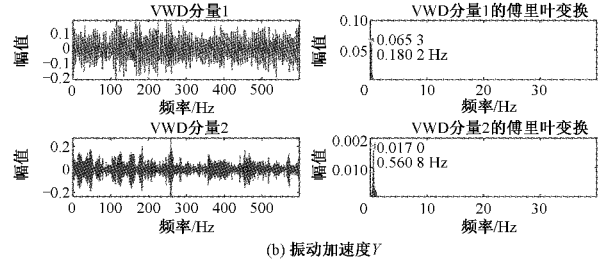
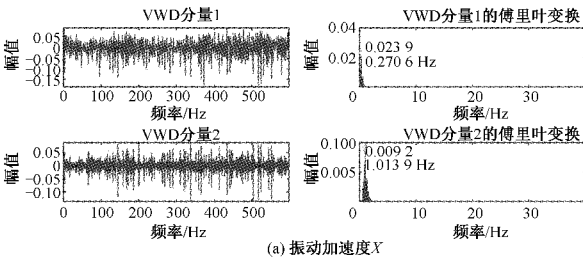
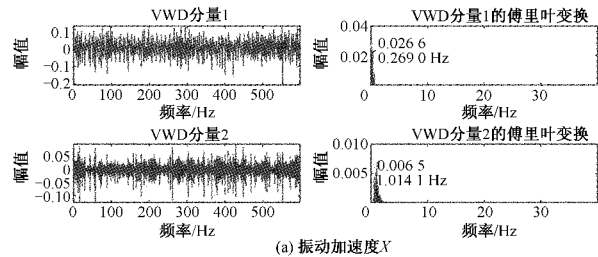


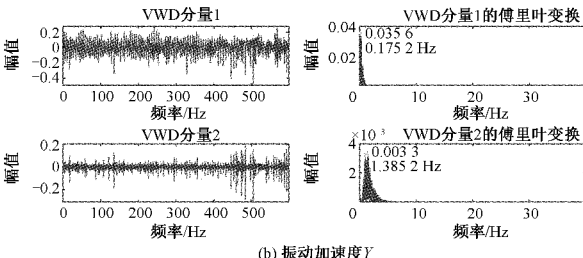
图 11 1#叶片偏差 5°



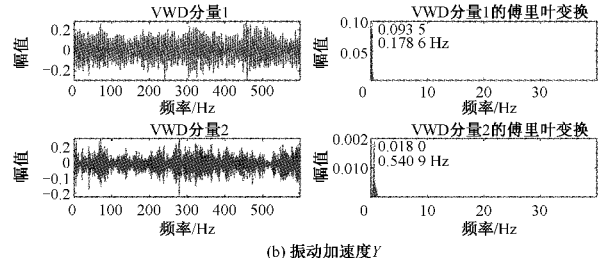
(a) 振动加速度 X



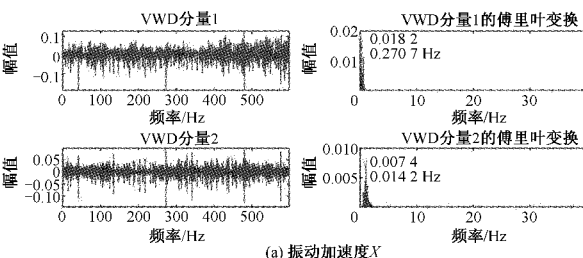
(a) 振动加速度 X



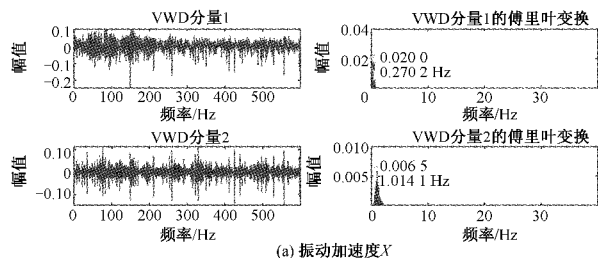
(a) 振动加速度 X



(a) 振动加速度 X



(a) 振动加速度 X



(a) 振动加速度 X

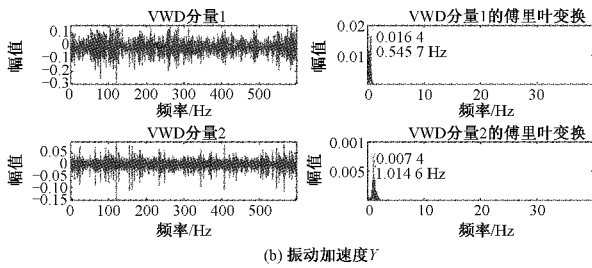


图 12 3 叶片同步

基于上述分析结果,可以看出采用常用的频域 FFT 变换频谱分析只能直接分析出故障信号如表 2 所示,但是却

无法提取出故障特征频率。但是,通过本文所述方法基于变分模态分解 VMD 变换分析结果如表 3 所示,可以提取出 IMF1 低频噪声分量和 IMF2 高频噪声分量故障特征频率。根据上述实验结果,可以得到风电机组不同叶片安装桨距角存在偏差的情况下,振动加速度 X 的振动峰值出现在 0.27 Hz 附近,振动加速度 Y 的振动峰值出现在 0.18 Hz 附近,正好应对风电机组的塔筒共振频率 0.272 Hz 和传动链固有频率 1.81 Hz,偏差角度在 1°、3°、5° 的情况下,可以发现,振动加速度 Y 的振动峰值大于振动加速度 X 的振动峰值;在各种偏差角度情况下,振动加速度 Y 的振动峰值随着偏差角度值增大,上述分析结果于前文理论研究结果基本一致。

表 3 变分模态分解各分量分析

测试条件	X-方向振动-IMF1	X-方向振动-IMF2	Y-方向振动-IMF1	Y-方向振动-IMF2
1#、2#叶片偏差 1°	(0.016 8,0.577 9 Hz)	(0.007 6,1.012 2 Hz)	(0.020 5,0.288 9 Hz)	(0.006 2,1.012 1 Hz)
1#、2#叶片偏差 3°	(0.027 0,0.145 3 Hz)	(0.004 3,1.013 8 Hz)	(0.027 4,0.145 3 Hz)	(0.003 5,1.013 8 Hz)
1#、2#叶片偏差 5°	(0.023 9,0.270 6 Hz)	(0.009 2,1.013 9 Hz)	(0.035 6,0.175 2 Hz)	(0.003 3,1.385 2 Hz)
1#叶片偏差 1°	(0.018 2,0.270 7 Hz)	(0.007 4,1.014 2 Hz)	(0.029 1,0.182 2 Hz)	(0.006 4,1.013 0 Hz)
1#叶片偏差 3°	(0.033 1,0.270 4 Hz)	(0.007 9,1.011 5 Hz)	(0.065 3,0.180 2 Hz)	(0.017 0,0.560 8 Hz)
1#叶片偏差 5°	(0.026 6,0.269 0 Hz)	(0.006 5,1.014 1 Hz)	(0.093 5,0.178 6 Hz)	(0.018 0,0.540 9 Hz)
3 叶片同步	(0.020 0,0.270 2 Hz)	(0.006 5,1.014 1 Hz)	(0.016 4,0.545 7 Hz)	(0.007 4,1.014 6 Hz)

根据上述现场实际测量结果分析,在 3 支不同叶片安装桨距角角度存在偏差的情况下,会出现叶轮气动不平衡故障,这主要体现在振动加速度 Y 的振动峰值大于振动加速度 X 的振动峰值。

4 结 论

本文重点研究了一种基于变分模态分解的风力发电机组叶轮不平衡检测方法,通过对叶轮进行受力详细分析,可以得出叶片质量不平衡会造成机舱横向振动较为明显,叶片气动不平衡会造成纵向振动较为明显的结论,继而,可以通过风轮转频 1P 轴向振动的监测及时发现风轮是否存在气动不平衡。结合张北风电场实际运行数据,通过更改不同叶片的变桨角度,分别采集多时段风电机组运行数据,基于变分模态分解 VMD 变化分析可得,实时监测风轮 1P,叶片气动不平衡会造成纵向振动明显增大,且随着安装桨距角的偏差越大轴向振动幅值越大。后续研究中,可以进一步研究考虑风速的变化、湍流等因素对测试结果的影响,将有助于更精确的检测叶轮不平衡。

参考文献

[1] NIEBSCH J, RAMLAU R, NGUYEN T T. Mass and aerodynamic imbalance estimates of wind turbines[J]. Energies, 2010, 3(4): 696-710.
 [2] 刘琳, 郭鹏. 变速恒频风力机叶轮不平衡故障仿真研究[J]. 华电技术, 2018, 40(6): 1674-1951.
 [3] 崔双喜, 王维庆. 风力机独立桨距角鲁棒自适应跟踪控制[J]. 中国电力, 2015, 48(6): 14-19.
 [4] WERNICKE J, SHADDEN J, KUHN T S, et al. Field experience of fibre optical strain sensors for providing

real time load information from wind turbine blades during operation [C]. European Wind Energy Conference, 2004: 22-25.
 [5] DUNKERS J P. Applications of optical coherence tomography to the study of polymer matrix composites: Handbook of optical coherence tomography[M]. Marcel; Dekkar Inc., 2002.
 [6] 任永. 风力机叶轮不平衡故障建模与仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
 [7] 绳晓玲, 万书亭, 李永刚, 等. 基于坐标变换的双馈风力发电机组叶片质量不平衡故障诊断[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 188-197.
 [8] 方云熠, 曾喆昭, 王可煜, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪改进型积分滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019(13): 77-83.
 [9] 韩斌, 邓巍, 杨正华, 等. 风力机叶轮气动不平衡故障诊断方法[J]. 船舶工程, 2019(S1): 375-379.
 [10] 绳晓玲. 叶轮不平衡故障下双馈风力发电机运行特性分析及控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
 [11] 绳晓玲, 万书亭, 成立峰, 等. 基于转子电流的风电机组叶轮不对称故障分析[J]. 计算机仿真, 2018(6): 106-109.
 [12] 吴忠强, 庄述燕, 韩延光. 直驱永磁风电系统能量成形与最大风能捕获[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 344-351.
 [13] 尹诗, 侯国莲, 胡晓东, 等. 风力发电机组发电机前轴承故障预警及辨识[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 242-251.
 [14] 张妍, 韩璞, 王东风, 等. 基于变分模态分解和 LSSVM 的风电场短期风速预测[J]. 太阳能学报, 2018(1): 194-202.
 [15] 王晶. 基于 VMD 分解和小波阈值的语音信号去噪[J]. 软件导刊, 2017(10): 12-14.

作者简介

刘楠, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为智能控制技术研究。
 E-mail: lnldwr@163.com