

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.09.008

风力发电机组气动不平衡振动监测研究*

李学平,卓沛骏,罗勇水,周民强
(浙江运达风电股份有限公司,浙江 杭州 310012)

摘要:针对大型风电机组气动不平衡故障的安全监测问题,对风电机组在气动不平衡故障时表现出的振动特性进行了理论研究,对风电机组在气动平衡和不平衡时机舱不同位置的轴向和横向振动进行了测试。根据测试结果提出了一种基于风轮1P转频振动的在线监测与保护系统,实时监测风轮1P转频振动有效值幅值,采用时间累积的延时报警策略以防止误报。研究表明:气动不平衡故障时风轮1P转频振动幅值明显增大,且轴向的振动变化相比横向振动更加明显;所提出的在线监测系统故障断路响应迅速、可靠性高,对保障风电机组稳定安全运行,促进叶片监测诊断技术发展具有重要意义。

关键词:风力发电机组;气动不平衡;1P振动;在线监测与保护

中图分类号:TH113.1;TK83

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)09-0944-05

Vibration monitoring on aerodynamic asymmetry of wind turbine

LI Xue-ping, ZHUO Pei-jun, LUO Yong-shui, ZHOU Min-qiang
(Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the problem of on-line monitoring of aerodynamic asymmetry fault, the vibration characteristics of the wind turbine under such fault were analyzed. Both the axial and lateral vibration at different positions in the nacelle with and without aerodynamic asymmetry fault were measured. A rotor aerodynamic asymmetry on-line monitoring and protection strategy was further proposed based on the 1-P vibration of the wind turbine. The effective value and amplitude of the 1-P vibration can be monitored by this system in real time and a delayed alarm strategy was utilized to avoid false alarm. The results indicate that the 1-P vibration significantly increases under rotor aerodynamic asymmetry fault, and the axial vibration changes compared to the lateral vibration are more obvious. Furthermore, the on-line monitoring system has fast response speed and high reliability, which is of great significance to the safe operation of the wind turbine and development of blade damage diagnosis technology.

Key words: wind turbine; aerodynamic asymmetry; 1P rotational frequency; on-line monitoring and protection

0 引言

近年来,随着风电装机容量的逐渐增大,搭建可靠的在线故障诊断及状态监测系统成为提高风电场发电效益的有效手段^[1]。

常年运行过程中,风电机组长期处于交变载荷作用下,非常容易出现各种故障破坏^[2]。平衡的风轮可以有效防止机组早期的疲劳故障,给机组提供一个可靠的运行环境^[3]。而风轮不平衡故障会影响传动链

及整个结构的安全运行,为了防止风电机组产生严重失效问题,有必要在问题显现的初期对机组故障状态进行监测与保护^[4]。

风轮不平衡故障主要分为质量不平衡与气动不平衡。质量不平衡主要来源于制造上的误差,而随着现代桨叶制造和质量控制技术的发展,实际运行中的风轮质量不平衡故障较少。气动不平衡比较常见,主要来源于桨叶安装误差、叶片气动外形改变(例如桨叶裂纹)、对风误差等原因。国内外对风轮不平衡故障

收稿日期:2017-10-30

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904005)

作者简介:李学平(1985-),男,浙江嘉兴人,工程师,主要从事风电机组状态监测和故障诊断技术工作方面的研究。E-mail:lixp@chinawindey.com

的诊断提出了很多方法,包括分析机组振动的时域与频域信号^[5-7]、传动链的扭振^[8]、监测发电机功率^[9]、定子电流信号等^[10-11]。这些方法,从理论和实验室实验的角度,检测了风轮不平衡时的各种反馈信号,对于故障的在线监测有一定实际意义。

本文将对风轮产生气动不平衡故障时的受载情况进行分析,从理论层面讨论当桨距角存在安装误差时,不平衡载荷对机组振动的影响,利用 GH Bladed 软件模拟该故障下机舱的振动情况,并通过现场实验,对比不同风速下风轮平衡与不平衡时机舱内不同位置的振动情况。

1 气动不平衡理论分析

三叶片产生彼此不同的气动行为可导致风轮的气动不平衡故障。在这种情况下,不同的叶片产生的推力是互不相同的。

不同攻角的叶素受力情况如图 1 所示。

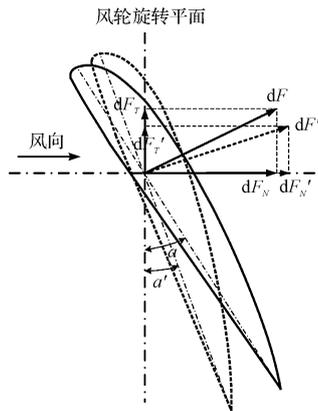


图 1 不同攻角的叶素受力情况

本研究截取叶片某弦面,以桨距角安装误差为例,分析叶片处于不同气动条件下力学行为的差异。在合成气流影响下,该截面处所受升力和阻力的合力为 dF 。将 dF 分别分解为平行和垂直于风轮旋转平面的旋转切向力 dF_T 和轴向推力 dF_N 。因为安装原因,某故障叶片的桨距角 α' 小于设计桨距角 α ,其轴向推力 dF'_N 大于正常叶片的轴向推力 dF_N ,而其旋转切向力 dF'_T 却小于正常叶片。

风轮平面受力分析如图 2 所示。

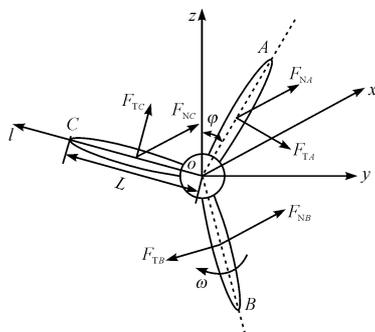


图 2 风轮平面坐标设定及受力分析

坐标设置如下:垂直于地面方向为 z 方向,水平方向为 y ,机组轴向为 x 。将叶片视为刚体,其叶片上受到的旋转切向力和轴向推力可表示为:

$$F_T = \int_0^L dF_T \quad (1)$$

$$F_N = \int_0^L dF_N \quad (2)$$

式中: L —叶片长度。

设 R 为叶片合力点距叶根的长度,则有:

$$R = \frac{\int_0^L l dF}{F} \quad (3)$$

风轮受到 3 个轴向推力以及 3 个切向力的作用,切向力产生扭矩和弯矩:

$$T_x = F_{TA}R_A + F_{TB}R_B + F_{TC}R_C \quad (4)$$

$$M_z^T = F_{TA}d\cos(\omega t + \varphi) + F_{TB}d\cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) +$$

$$F_{TC}d\cos\left(\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (5)$$

$$M_y^T = F_{TA}d\sin(\omega t + \varphi) + F_{TB}d\sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) +$$

$$F_{TC}d\sin\left(\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (6)$$

式中: d —风轮与塔架之间的净空距离; T_x —一切向力在 yz 平面产生的扭矩; M_z^T —一切向力在 xy 平面产生的弯矩; M_y^T —一切向力在 xz 平面产生的弯矩。

轴向推力产生的弯矩可表示为:

$$M_z^N = F_{NA}R_A\sin(\omega t + \varphi) + F_{NB}R_B\sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) +$$

$$F_{NC}R_C\sin\left(\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (7)$$

$$M_y^N = F_{NA}R_A\cos(\omega t + \varphi) + F_{NB}R_B\cos\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right) +$$

$$F_{NC}R_C\cos\left(\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (8)$$

式中: M_z^N —一轴向力在 xy 平面产生的弯矩; M_y^N —一轴向力在 xz 平面产生的弯矩。

在正常情况下,三叶片具有相同的气动特性,即 $F_A = F_B = F_C, R_A = R_B = R_C$,则风轮向传动链输出稳定的扭矩, xy 和 xz 平面内的弯矩也都为 0。但当出现如图 1 所示的情况时,即其中一片叶片出现桨距角误差,其轴向推力和切向力大小发生改变。其中,扭矩的减小会造成输出功率的损失。此外,在上述平面内将产生弯矩,且随着风轮转动发生交变,频率即为风轮的转频,引发机舱内规律的风轮转频 1P 振动,由于气动不平衡对轴向推力的影响更大,故往往造成机舱内轴向振动较横向更为显著。为了在早期就能及时发现故障情况,

监测风轮转频 1P 振动是识别风轮气动不平衡的可行方法。

本文用 Bladed 软件模拟了一台 2.5 MW 风电机组,风速为 5 m/s,在某一叶片桨距角存在 5° 安装误差时机舱内的振动情况。

仿真结果如图(3,4) 所示。

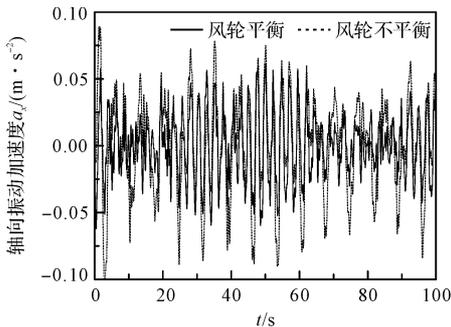


图 3 风轮平衡与不平衡对机组轴向振动的影响

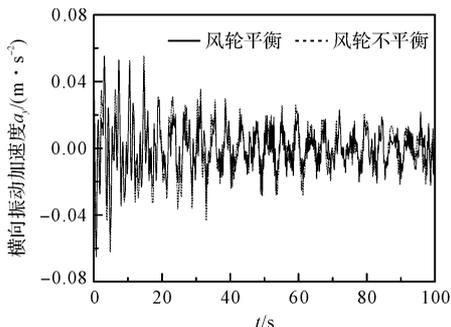


图 4 风轮平衡与不平衡对机组横向振动的影响

由图 3 明显可见:当风轮不平衡时,轴向振动加速度明显增加,而图 4 中横向加速度在风轮不平衡时增加并不明显。仿真结果表明:风轮不平衡能加剧机组的振动,并且对轴向振动影响较横向振动更大。

为了验证理论分析的结果,本文将通过现场实验的方法获取更多有意义的数据。

2 现场实验与分析

本研究对某风场一台 2.5 MW 风电机组进行现场测试,探讨风轮气动不平衡对机舱内振动的影响,并和理论仿真结果进行对比分析。

机组基本技术参数如表 1 所示。

表 1 机组基本技术参数

参数类型	参数大小
额定功率/kW	2 500
额定风速/(m · s ⁻¹)	11
控制方式	变速变桨
轮毂高度/m	80
桨叶长度/m	48.8
风轮转速/(r · min ⁻¹)	8.75 ~ 14.4(0.146 Hz ~ 0.24 Hz)

当机组处于正常运行状态时,即风轮不存在气动不平衡故障(此处不考虑风切变及叶片表面粗糙等情况),记录在不同风速条件下机舱内的振动情况。此后,改变其中一根叶片安装桨距角,使其与其他叶片存在 5° 的偏差,同样,在不同风速条件下运行一段时间,记录振动数据。机舱内加速度传感器测点具体安装位置为:主轴承座位置,主轴下方机架位置以及机舱尾部位置。将一个时间段连续的风速进行四舍五入取整,即 X m/s 风速下的测量结果为 X ± 0.5 m/s 风速段测量结果的平均,统计不同风速条件下机舱内各测点的振动情况。测试结果表明:无论是风轮平衡还是不平衡,主轴承座、主轴下方和机舱尾部各测点振动平均值几乎相同,考虑现场传感器走线等问题,后期均使用机舱尾部实验数据进行分析。

风速为 5 m/s 时,平衡与不平衡状态时机舱轴向振动频谱如图 5 所示。

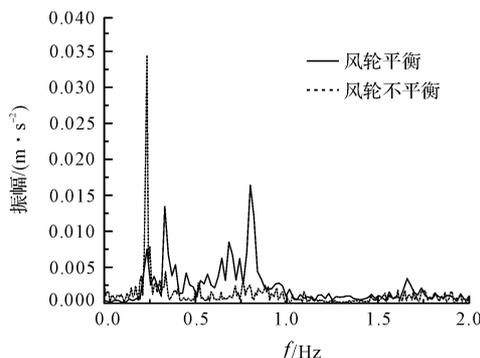


图 5 气动不平衡前后机舱轴向振动频谱

由图 5 可见:不平衡状态下风轮 1P 转频成分幅值明显增大,约为平衡状态下的两倍。此外,平衡状态下 2 Hz 以内的低频成分较多,当机组风轮产生气动不平衡时,机舱内的振动频率成分变得较为单一,基本集中在转频处附近。

机舱轴向、横向振动平均值和最大值随着风速的变化情况如图(6,7)所示。

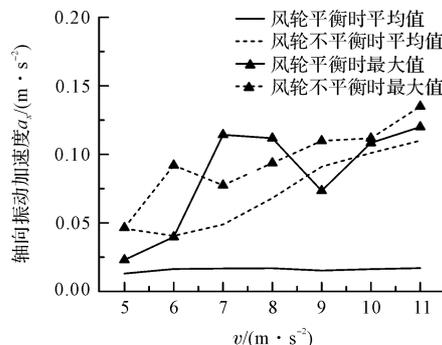


图 6 风轮平衡与不平衡状态下机组轴向振动随风速的变化

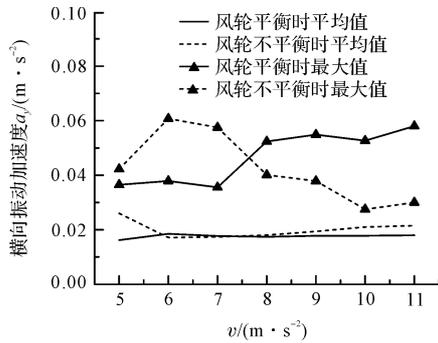


图 7 风轮平衡与不平衡状态下机组横向振动随风速的变化

由于现场测试条件下干扰因素较多,尤其是机组遇到阵风或者突然偏航等都会产生短时冲击振动信号,造成输出数据的偏差。由于单次现场试验条件的局限,所采集的最大值数据并不具备很强的代表性,也可以看出振动最大值随风速的变化没有特定的规律,因此本研究选用振动的平均值进行对比分析。图 6 中,风轮不平衡时其轴向振动平均值明显增大,约为平衡时的 3~5 倍,(随着风速(转速)增大不平衡更加显著),但从图 7 中可见横向的振动差别并不明显,该结论与理论仿真的结果较为一致。

上述研究结果表明:气动不平衡可引起机组轴向振动加剧,因此通过监测风轮转频 1P 轴向振动可以有效发现风轮是否存在气动不平衡故障,保证机组安全运行。

3 监测与保护

传统风轮不平衡诊断方法是人工通过振动频谱判定,这种后处理的方式其弊端是无法实现故障的实时监测。

本文通过在机组振动监测模块上增加监测风轮 1P 转频的功能,实现风轮气动不平衡的实时监测。当监测频率振动大于设定值时,延迟一定时间后,振动监测模块发出反馈信号给机组,使机组停机,同时向上位 PLC 发出风轮转频振动过大报警信号。监测系统与机组安全链互锁,报警信号联入安全链,一旦出现报警立即切断安全链使机组停机。

监测模块的工作流程如图 8 所示。

振动模块采集机舱内测点位置处的机组轴向振动加速度信号,通过 100 Hz 的低通滤波去除噪声和无用数据,并利用带通滤波器获取风轮 1P 频率下的机组轴向振动信号,并实时计算得到的振动有效值。实际应

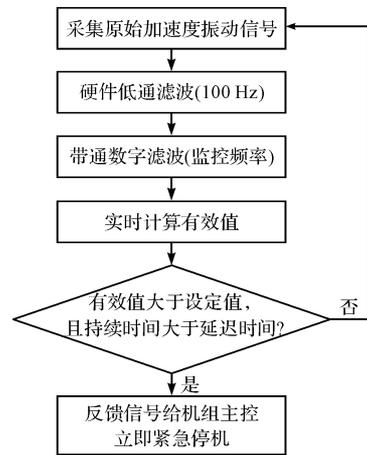


图 8 风轮不平衡实时监测与保护逻辑

用时,滤波器采用 Butterworth 滤波器,设置监测频率包含风轮 1P 转频,对本文中所测试的机组,监测频率设为 0.1 Hz~0.3 Hz。由于振动模块没有其他机组运行数据(功率、风速等)信号接入,不能判定机组处于何种状态,考虑到不平衡随风速增大更加显著,减少机组误报警,故机组在额定风速附近能报出风轮不平衡故障就满足在线监测要求。综合考虑,报警振动值设置在额定风速时不平衡振幅最大值处。

同时,为了防止振动突然冲击增大而导致误报,本研究采用延时报警方法,持续时间为累积时间,其原理如图 9 所示。

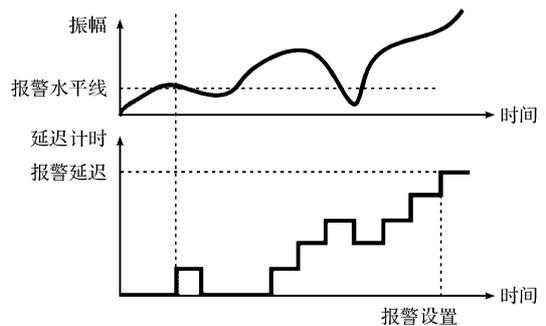


图 9 延时报警法效果示意图

当振幅超过报警线并持续一段时间后,延迟计时器进行一次计时;同样,当振幅小于报警线并持续一段时间后,计时器数值减小,直至计时器的数值达到报警要求才发出故障停机命令。

通过 Bladed 仿真机组在气动不平衡条件下的运行情况,机组风轮直径 100 m,额定功率 2 500 kW,风文件采用 dlc1.2 工况设定,得到机舱轴向振动加速度数据。采用文中提出的监测逻辑,报警准确率在 90% 以上,并已在 10 多个风场投入使用,取得了很好的效果。

4 结束语

为了更好地保障风电机组的安全运行,本文采用振动的方法监测风轮气动不平衡故障。理论分析表明:气动不平衡对机组转频 1P 振动影响最大;现场实验结果表明:机舱内不同位置的测点均能有效监测风轮转频 1P 振动,且机组处于气动不平衡时,轴向振动幅度变化明显,振动均值增大数倍,且随着风速增大而逐渐增加;而横向振动虽有所增加,但变化幅度不大。

根据现场实测数据,设计了在线监测系统,实时监测风轮转频 1P 振动,报警水平线设置在机组额定风速下不平衡振动振幅最大值处,并采用延时报警的方式以减少误报率;通过 Bladed 仿真验证了报警机制的高准确性。

参考文献 (References):

- [1] AMIRAT Y, BENBOUZID M E H, AL-AHMAR E, et al. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems[J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009,13(9):2629-2636.
- [2] MÁRQUEZ F P G, TOBIAS A M, PÉREZ J M P, et al. Condition monitoring of wind turbines: techniques and methods[J]. **Renewable Energy**, 2012,46(5):169-178.
- [3] NIEBSCH J, RAMLAU R, NGUYEN T T. Mass and aerodynamic imbalance estimates of wind turbines[J]. **Energies**, 2010,3(4):696-710.
- [4] CIANG C C, LEE J R, BANG H J. Structural health moni-

toring for a wind turbine system: a review of damage detection methods[J]. **Measurement Science and Technology**, 2008,19(12):122001.

- [5] JIANG D, HUANG Q, HONG L. Theoretical and experimental study on wind wheel unbalance for a wind turbine [C]. World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, Nanjing:IEEE,2009.
- [6] RAMLAU R, NIEBSCH J. Imbalance estimation without test masses for wind turbines[J]. **Journal of Solar Energy Engineering**, 2009,131(1):284-289.
- [7] ZHAO M, JIANG D, LI S. Research on fault mechanism of icing of wind turbine blades[C]. World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, Nanjing: IEEE, 2009.
- [8] GARDELS D J, QIAO W, GONG X. Simulation studies on imbalance faults of wind turbines [C]. Power and Energy Society General Meeting, Providence: IEEE,2010.
- [9] 杨 涛,任 永,刘 霞,et al. 风力机叶轮质量不平衡故障建模及仿真研究[J]. 机械工程学报,2012,48(6):130-135.
- [10] CASELITZ P, GIEBHARDT J. Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters [J]. **Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME**, 2005,127(2):253-261.
- [11] GONG X, QIAO W. Simulation investigation of wind turbine imbalance faults [C]. International Conference on Power System Technology, Hangzhou: IEEE,2010.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

李学平,卓沛骏,罗勇水,等. 风力发电机组气动不平衡振动监测研究[J]. 机电工程,2018,35(9):944-948.

LI Xue-ping, ZHUO Pei-jun, LUO Yong-shui, et al. Vibration monitoring on aerodynamic asymmetry of wind turbine[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018,35(9):944-948.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>