

风电机组叶轮气动不平衡对机组的影响 分析研究

王潇晨 唐 亮 张 磊

(山东电力工程咨询院有限公司)

摘要：风电机组长时间运行后不可避免会出现叶轮气动不平衡，叶轮作为风机获取风能的主要部件，其工作状态直接影响整机的发电效率和可靠性。叶轮不平衡分为气动不平衡和质量不平衡，质量不平衡问题通常在叶片出厂通过配重可以得到严格控制，除非叶片结冰、断裂等特殊情况。然而气动不平衡直接对机组产生严重影响，本文分析叶轮气动不平衡对机组载荷、振动，发电量产生的影响。

关键词：风电机组；叶轮不平衡；气动载荷；影响分析

2024.09.DQGY 9

0 引言

近几年，我国陆上、海上风力发电机组快速发展，随着风电机组容量的不断增加，叶片越做越长，扫风面积、重量和转动惯量也随之增加，其次老旧机组运行时间越来越长，叶轮气动不平衡现象尤为突出，叶轮不平衡故障会严重影响风电机组运行稳定，这也将引起风电行业的广泛关注。叶轮不平衡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。因此研究论证机组叶轮不平衡对机组的影响尤为重要。

国内外一些学者对叶轮不平衡故障的诊断进行了研究。文献 [1-2] 采用基于振动和频谱分析的方法来诊断叶轮不平衡故障；文献 [3] 提出利用风力机的轴转矩

和频谱分析的方法来监测和诊断叶轮不平衡故障；文献 [4] 利用发电机的电功率来诊断风电机组的叶轮故障。华北电力大学的邓雁敏^[5]通过对永磁直驱发电机建立仿真模型，分析了质量不平衡故障对发电机发电特性的影响，得到质量不平衡故障频率，从理论上分析了其与风轮转频的关系，提供了故障诊断的参考依据。风电机组在制造生产时产生误差带来的叶轮不平衡，对机组齿轮箱、主轴、塔架造成直接威胁，直接影响到整机载荷及寿命^[6-7]。文献 [8] 采用振动频谱分析的方法，用来诊断叶轮不平衡问题，结合仿真对控制器测试，该方法用于减小风轮的不平衡载荷虽然有限，但是效率比较低，不具备普遍性。文献 [9] 分析了机组叶轮质量不平衡，在理论上推导叶轮不平衡故障对发电机电功率信号中夹杂的叶轮旋转分量，并进行仿真。

1 叶轮不平衡分析

叶片受力主要是由叶轮惯性和空气给叶片的推力。叶轮在旋转过程中，叶片会产生旋转惯性力，也就是离心力，力的方向为旋转轴向外，如图 1 所示。离心力表示为：

$$dP_r = \rho \omega^2 r S(r) dr \quad (1)$$

式中， ρ 为叶片材料密度， kg/m^3 ； $S(r)$ 为叶片位置截面积， m^2 ； ω 为叶轮角速度， rad/s 。

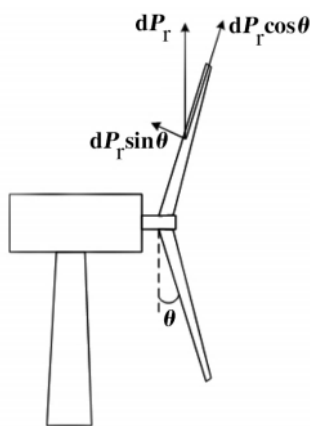


图 1 风机叶片受力示意图

叶片倾斜方向和扫风平面之间的夹角为 θ ，离心力由横纵两个分量合成，纵向分量为 $dP_r \cos \theta$ ，横向分量 $dP_r \sin \theta$ 。纵向分量为叶片延伸指向，横向分力为垂直叶片受力的方向。

当风吹向叶片表面时，叶片的迎风面和背风面产生压力差。迎风面所受压力远大于叶片背风面的压力，能够形成向上的合力。根据叶素理论，所受的气动力表示为：

$$dF_r = \frac{1}{2} \rho C_r v^2 c dr \quad (2)$$

式中， C_r 为气动系数； c 为弦长， m ； ρ 为气流流入流密度， m/s 。

当三支叶片桨距角不一致，或迎风面存在偏差，导致三支叶片受力不一样，使得机组叶轮载荷不均匀。

2 叶轮不平衡快速检测方法分析

市面已经投入应用方式有两种，一种为激光测量仪检测的方法，采用高频脉冲激光设备对准叶片两个截面，通过叶片运转扫描固定照射的激光脉冲，实现对叶片表面外形的扫描记录，记录一定时间的扫描数据，可解析出塔顶振动，使用 100kHz 以上的远距离高速脉冲激进行叶片运行扫描，准确记录叶片表面状态，测量时设备位于地面，无须操作风机，测量时间短，误差精度低于 $\pm 0.1^\circ$ ，能够控制在标准要求的角度偏差内，其他方法则很难确保到这个精度，如图 2 所示。

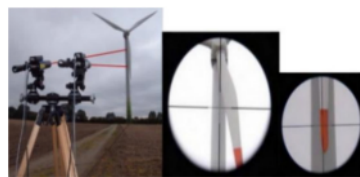


图 2 激光检测叶轮不平衡示意图

基于叶片视频净空的叶轮不平衡测试系统使用高质量的数字单镜头相机和大焦距变焦镜头进行光学测量为另一种检测方法。通过图像处理程序，从提取的叶尖位置和相关塔架位置确定塔架净空的像素值。利用相关数学公式和风机相关参数计算出叶尖在塔筒上的投影点，能够精确计算出机组运行状态下净空变化值。利用三支叶片的净空变化情况获取机组叶轮不平衡状态及相关分量。

地面实施的叶片净空检测手段具有天然的便捷性和精准性，在固定坐标系下可以方便有效地测得叶片净空结果，保证了较高的分辨率和精度，并且方便易操作，在不同机组和环境下可以重复使用。系统原理图如图 3 所示，通过将摄像机放置到塔底的正下方，向上拍取叶片运行的视频，通过计算标记的叶尖投影点到叶尖点之间的距离，可以获得实时净空结果。



图3 视频检测叶轮不平衡示意图

叶片塔架净空监测和叶轮不平衡监测采用机器视觉技术，净空图像识别系统是用于监测风力发电机组塔架净空距离的系统。该系统可以实时监测到风机塔架净空距离以及变化趋势。可以根据客户的要求设置报警阈值，当净空距离超过报警值时，该系统会通过主控进行机组控制。基于机器视觉技术加红外技术能够实时监测塔架净空和叶轮不平衡。

3 叶轮不平衡对机组的影响

3.1 叶轮不平衡对机组振动的影响

风轮不平衡机组引发的机组及大部件振动是又一重要影响，前期的仿真分析结果显示，气动不平衡引发某 2.XMW 机组的振动包括机舱沿风向振动，机舱横向振动，机舱扭转方向振动等。振动会造成明显的齿轮箱前后窜动，机舱左右强烈摇晃，偏航制动位置窜动。机组不平衡振动对比如图 4 所示。

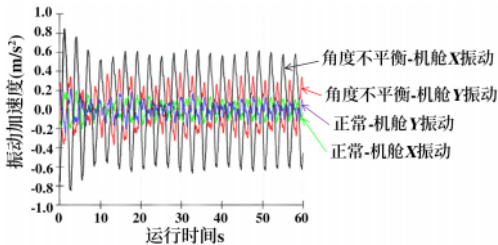


图4 机组不平衡振动对比

从图中可以看出，叶片不平衡导致塔顶机舱横向（增大 2 倍）和前后两个方向的振动明显增大，尤其是前后方向振动（增大 4 倍）。

对某存在气动不平衡问题的 1.XMW 机组进行校准前后机舱加速度的实测发现气动不平衡导致 X 方向加速度影响显著。频谱分析对比如图 5 所示。

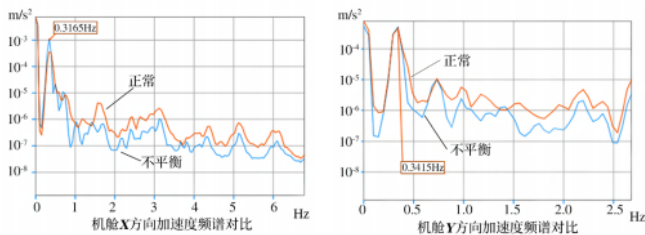


图5 频谱分析对比

本课题将通过仿真和现场实测的手段对气动不平衡对长叶片高塔筒机组的振动影响进行深入研究。通过仿真研究不同方向和小大角度偏差下机组叶片、传动链、机舱、偏航和塔筒等部位的振动情况。同时，通过在叶片、齿轮箱、发电机低速轴、机舱和塔筒等部位部署加速度传感器，通过视频测振技术，测量塔筒在不同风轮不平衡水平下的形变振动差异。

3.2 叶轮不平衡对机组载荷的影响

风机传动链等大部件载荷的上升，是叶轮不平衡对风机的又一大威胁性影响。前期对某 1.X 机组在不同叶片偏差角度下进行极限和疲劳载荷仿真显示。

叶片角度偏差会导致轮毂中和塔底极限载荷显著增大，偏差 +2deg 时，轮毂载荷增大 11.7%，塔底载荷增大 18.8%，偏航载荷也上升 7.5%，如表 1 所示。

表 1 正 2 度载荷数据

关键载荷	0deg	+0.5deg	+1deg	+2deg
叶根 Mxy_max[Nm]	0.00%	-0.13%	-0.26%	-0.58%
叶根 Mz_max[Nm]	0.00%	-0.24%	-0.61%	-0.43%
轮毂 Myz_max[Nm]	0.00%	3.07%	5.98%	11.70%
偏航 Mxy_max[Nm]	0.00%	2.03%	3.84%	7.53%
塔底 Mxy_max[Nm]	0.00%	1.28%	2.79%	6.20%
塔底 Mz_max[Nm]	0.00%	5.00%	9.98%	18.80%

叶片角度偏差会导致轮毂、偏航、塔架的疲劳

载荷显著增大，偏差 2deg 时，轮毂 My 和偏航 My 的等效疲劳载荷增幅超过 30%，如表 2 所示。

表 2 偏差 2 度载荷数据

关键载荷	0deg	+0.5deg	+1deg	+2deg
叶片 1 My[Nm]m=12	0.00%	1.13%	1.95%	1.13%
叶片 2 My[Nm]m=12	0.00%	1.87%	2.84%	5.01%
叶片 3 My[Nm]m=12	0.00%	1.76%	2.09%	2.82%
轮毂 My[Nm]m=3	0.00%	2.76%	9.69%	32.61%
偏航 My[Nm]m=3	0.00%	2.64%	9.40%	32.16%
塔底 Mz[Nm]m=3	0.00%	3.77%	6.63%	17.93%

本项目拟通过仿真计算叶片不同大小和方向的角度偏差对长叶片高塔筒风机各个部件的载荷影响，同时考虑弯扭耦合效应对气动不平衡风机的载荷影响。

除载荷仿真外，本项目还会选择典型机组，通过在叶片、主轴、塔筒等部位部署应变传感器，再结合有限元仿真模型，借由特定工况下的受载特点进行载荷标定，建立应变与关键部件弯矩值之间的传递系数，进而对存在气动不平衡的长叶片高塔筒机组进行载荷实测，研究不同偏差角度（包括有无偏差角度情况）下各部件的实际载荷差异。

根据疲劳载荷差异水平，评估不同偏差角度时，风轮气动不平衡对传动链、螺栓、塔筒等关键结构件寿命的影响水平。

3.3 叶轮不平衡对机组发电量的影响

气动不平衡问题对机组最重要的影响之一是会导致发电性能的下降。机组发电性能的下降主要受到两方面的影响，一方面是捕获风能减少，另一方面引发的振动耗散了部分风能转化的能量。在风能捕获能力方面，如叶片因角度差异导致其实际运行的最优桨角与理论最优桨角存在差异，则满发前叶片无法工作在最佳气动性能位置，导致 Cp 值下降，功率曲线较正常情况出现下榻，进而直接影响风机的发电量，如图 6 所示。

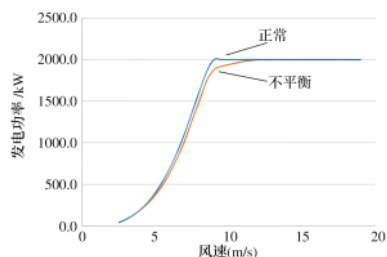


图 6 发电功率分析对比

此外，在一些特定攻角下，如叶片角度发生正偏差，会导致叶片不当的运行在失速区域，引发叶片和机组的失速振动，发电性能也会下降。

另一方面，从能量守恒的角度来看，是因为气动不平衡问题引发机组及大部件振动，振动本身会以热能和噪声和机械磨损内能等方式耗散能量，这导致风能到实际转化为电能的效率下降，进一步降低了机组的发电性能。

本项目拟通过模型仿真，现场风轮不平衡机组校准前、后的功率曲线对比测试等方法，研究气动不平衡问题对机组的气动性能和能量转化效率的影响，同时考虑长叶片高塔筒机组的叶片弯扭耦合效应对气动不平衡机组校准角度的影响。

4 结束语

通过风电机组运行不平衡分析，本文分析了叶轮不平衡受力分析，因受力引起，同时分析叶轮不平衡快速检测方法，主要是通过激光和视频检测的方式，最后分析叶轮不平衡对机组的影响，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。本文主要分析叶轮不平衡导致机组振动大、载荷增加、发电量降低三个方向，影响着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。因此研究论证机组叶轮不平衡对机组的影响尤为重要。

（下转第 21 页）

参考文献

- [1] 李辉, 赵猛, 赵斌, 等. 双馈风电机组关键传感器的故障诊断方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (6): 73-78.
- [2] Jiang D X. Theoretical and experimental study on wind wheel unbalance for a wind turbine[C]. World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference. Nanjing, China: IEEE, 2009: 1-5.
- [3] Gardels D J, Wei Q, Xiang G. Simulation studies on imbalance faults of wind turbines[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, USA: IEEE, 2010: 1-5.
- [4] 杨涛, 任永, 刘霞, 等. 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.
- [5] 邓雁敏. 叶轮质量不平衡下永磁直驱风力发电机特性分析 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [6] 廖明夫. 风力机设计理论与结构动力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2014.
- [7] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [8] 王晓东, 姚兴佳. 基于泛模型的风轮不平衡载荷控制 [J]. 太阳能学报, 2012, 33 (2): 215-220.
- [9] 杨涛, 任永, 刘霞, 等. 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.

(收稿日期: 2023-11-10)