

文章编号:1006-1355(2016)05-0160-04

基于 SCADA 数据的风力发电机组振动监测与分析

成立峰, 万书亭, 绳晓玲

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 风机在实际运行时, 受风特性和控制策略、制造安装误差等因素影响经常出现振动超限报警甚至停机等问题。通过风特性建模, 以及提取风电场海量的 SCADA 数据, 运用数据修正等统计方法对 SCADA 数据中蕴含的丰富内容进行分析, 研究了风速统计平均值、湍流强度以及风轮转速统计平均值对风机振动的影响关系。结果表明, 相关各量对风机振动的影响差异明显。可为风电场 SCADA 数据分析、风机运行状态评估及现场维护等提供有益参考。

关键词: 振动与波; 风力发电机组; 风电场; SCADA 数据; 振动监测; 湍流

中图分类号: TM6

文献标识码: A

DOI 编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2016.05.033

Monitoring and Analysis of Wind Turbine Vibration Based on SCADA Data

CHENG Li-feng, WAN Shu-ting, SHENG Xiao-ling

(College of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University,
Baoding 071003, Hebei China)

Abstract : Wind turbines often suffer from a series of engineering issues such as vibration overruns and turbine downtime etc. due to the wind characteristic change, unsuitable control strategy, manufacturing and installation errors and so on. In this paper, the wind characteristic model is established and the SCADA data of the wind farm is extracted. Then, using the statistical methods such as data correction, rich contents of the SCADA data are analyzed. The influence of the statistical mean value of wind speed, turbulence intensity and the statistical mean value of rotor speed on the wind turbine vibration is studied. The results indicate that the influences of these factors on wind turbine vibration are quite different. The results provide a useful reference for wind farm SCADA data analysis, wind turbine operation assessment and on-site maintenance etc.

Key words : vibration and wave; wind turbines; wind farm; SCADA data; vibration monitoring; turbulence

风力发电是目前世界上发展最快的新能源产业, 大中型风电场建设技术日趋成熟。数据采集与监控系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)作为远程连接每台风机及主控机房的综合监控系统^[1], 应用已非常普遍, 技术成熟, 具有远程

控制与参数调节、数据采集与存储以及报警等诸多功能, 是风电场建设的重要组成部分^[2-3]。

风机运行过程中, SCADA 系统会以较低的采样频率(如每 10 分钟)采集记录风机数据。由于采样频率低, SCADA 数据通常被忽视, 其中蕴含的丰富内容被闲置或丢弃, 没能得到充分认识和利用。其实, 海量的 SCADA 数据中记录了风机多种类型的运行数据: 有些数据可直接反映风机的运行状态, 有些数据则可转换成反映风机性能的特征曲线, 利用价值巨大^[4-7]。

本文根据 SCADA 数据低频采集、海量存储的特点, 以中国某风场为例, 对若干台机组的 SCADA 数据进行了采集和调用。通过进行数据筛选和修正、数据相关性分析等方法, 分析了风机振动状态的相关特征, 研究了机组振动产生的原因, 可为风电场 SCADA 数据分析、风机运行状态评估及现场维护等提供参考。

收稿日期: 2016-03-31

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014XS82);
河北省自然科学基金资助项目(E2015502008)

作者简介: 成立峰(1981—), 男, 河北省定州市人, 博士研究生, 研究方向为风力发电机组运行特性、故障诊断与控制策略。

E-mail: clf2001_0@163.com

通讯作者: 万书亭(1970—), 山西省长子县人, 男, 教授, 博士生导师。

E-mail: 13582996591@139.com

通讯作者: 绳晓玲(1982—), 女, 河北省无极县人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为风力发电机组信号检测与故障诊断。

1 风电场及SCADA系统模型

1.1 风特性及建模

风是风力发电的源动力,风特性决定了风电场的类型和优劣。风特性主要包括风速和风向,都具有随机性和间歇性。

风速模型是风电场建模的重要部分,最常见的风速分布模型是Weibull分布,如式(1)

$$P_w(v_0) = 1 - \exp[-(v_0/C)^k] \quad (1)$$

式中 $P_w(v_0)$ 为累积概率函数; v_0 为风速; C 为Weibull分布函数的尺度参数; k 为Weibull分布函数的形状参数^[8]。

Weibull风速分布模型侧重对风能资源进行统计,它描述了风速在10 min或更长时间内的平均值。现在最常采用平均风速和湍流分量叠加的风速模型:以一定时间尺度内的风速均值为基准,用湍流分量对其变化进行修正。

风速10 min统计平均值由式(2)得到

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2} \quad (2)$$

式中 \bar{V} 为风速10 min统计平均值; \bar{v}_x 为横向风速时程平均值; \bar{v}_y 为纵向风速时程平均值。

湍流强度是描述大气湍流运动特性的特征量,它描述了风速的时域和空域变化程度。湍流强度越大,风速波动越大,气流不稳,风轮所受气动载荷变化越大。其数学定义是风速标准偏差与平均风速之比,如式(3)所示

$$I_T = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (3)$$

式中 I_T 为湍流强度; σ 为风速10 min统计标准偏差。

1.2 风场SCADA系统及数据修正模型

风电场配置模型根据实际需求一般分为三个层次:本地监控、中央监控和远程监控。如图1所示。所含信息主要有:风速、温度、气压等风场环境信息;风电机组、升压站、气象站等设备的定位及拓扑结构信息;本地及远程通信连接等。

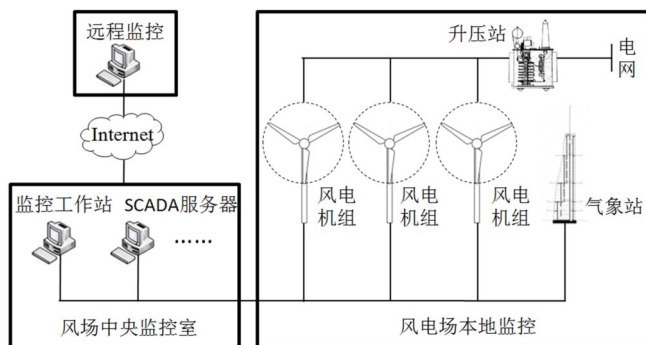


图1 风电场配置拓扑结构

针对风机正常运行时的机组振动问题,利用SCADA系统历史数据的查询功能,采集调用了风场气象数据(风速、风向、湍流强度、气温等)和机组运行数据(有功功率、无功功率、驱动方向振动、非驱动方向振动、叶轮转速等)用于本文分析。为了使分析结果正确、可靠,必须对原始数据进行筛选,对于测试阶段以及故障停机和人工停机等工况下的数据要予以剔除。

因受风速、湍流、气温、气压以及空气密度、湿度等自然环境的影响,经筛选后的数据还要经过必要的修正,对相关量作标准化处理,如式(4)和式(5)

$$\bar{\rho} = \frac{\bar{B}}{R_0 \bar{T}} \quad (4)$$

$$V_n = \bar{V} \left(\frac{\bar{\rho}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (5)$$

式中 $\bar{\rho}$ 为空气密度10 min统计平均值; \bar{B} 为气压10 min统计平均值; \bar{T} 为气温10 min统计平均值; R_0 为干燥气体常数; V_n 为标准化风速。

2 数据源

文中算例风电场地处中国中部丘陵地带,地形高低起伏,表面植被繁茂,湍流强度很大。受季风气候影响,风资源呈季节性变化,春冬两季风速较大,夏秋两季风速较小;同时风速的日变化规律也比较明显,日出后风速开始缓慢增大,至中午达到最大后又缓慢减小,晚间风速维持在相对较小的水平;年有效风能密度均值约为100 W/m²,年有效风速时长约3 000 h。该风电场装机容量为40 MW,装机类型为2 MW变速恒频双馈异步风力发电机组,详细参数见表1。

表1 2 MW风力发电机组参数

机组参数	数值
叶片数	3
风轮直径/m	93
额定功率/kW	2 000
切入风速/m·s ⁻¹	3
切出风速/m·s ⁻¹	20.0
额定风速	10.5
最大风能利用系数	0.500 422
最佳叶尖速比	8.7
额定转速/r·min ⁻¹	16
轮毂中心高度/m	80
额定转矩/kNm	1 250

该风场SCADA系统记录监测到的某时段机组数据包括时间、风速、风向、湍流、发电量、功率、风轮

与发电机转速、风机振动加速度等各类参数总计有218个。经统计处理,得到的风速、湍流强度和风向玫瑰图等风况数据如图2、图3和图4所示。

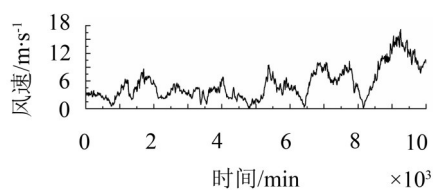


图2 风速

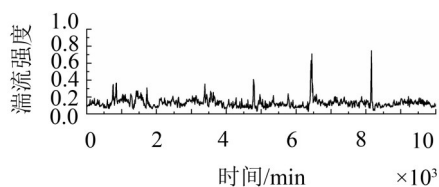


图3 湍流强度

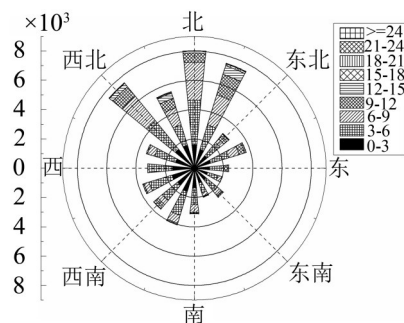


图4 风向玫瑰图

3 风机振动监测与分析

根据机组SCADA系统采集到的机组运行数据,得到了机组驱动方向与非驱动方向的振动加速度曲线,如图5所示。

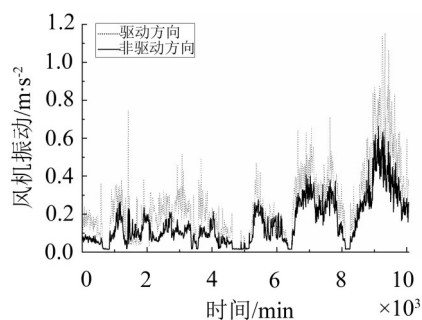


图5 风机振动加速度曲线

可以看出,机组的振动加速度幅值随风机运行的时间历程波动明显,通过大量的SCADA数据监测和分析,风速、湍流、风轮转速是造成机组振动的主要影响因素。

3.1 平均风速对风机振动的影响

平均风速的波动使风轮所受的气动载荷也发生

波动:在风轮旋转平面内,产生变化的气动转矩;而在轴向上,产生变化的俯仰载荷。

图6为经数据修正和标准化后的散点图,揭示了风速10 min平均值与风机振动的影响关系。可以看出,随着平均风速的增大,机组在驱动方向和非驱动方向上的振动加速度均随之增大,但振动加速度的统计均值变化率不同,驱动方向的振动变化率较大,非驱动方向的振动变化率较小,即驱动方向的振动对平均风速的变化更加敏感。在低风速段,驱动方向与非驱动方向的振动幅值相差不大,加速度散点彼此混叠在一起;而在高风速阶段,尤其是高于额定风速以后,加速度散点分离的趋势非常清晰,驱动方向的振动加速度明显高于非驱动方向。

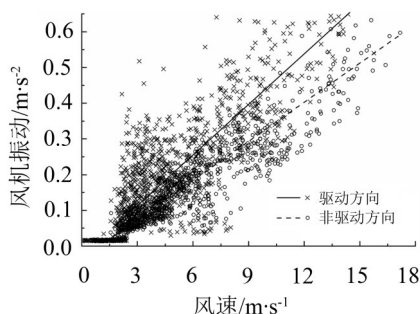


图6 平均风速对风机振动的影响

可见,平均风速波动引起的交变载荷是风机振动的主要激励源,也是导致风机振动幅值波动的重要因素。

3.2 湍流对风机振动的影响

湍流反映了风速的波动,湍流强度越大,气流波动越大,风速越不稳定。风机运行时,由于湍流的存在,风轮所受的气动载荷变成了交变载荷,并通过整条传动链以变化的弯矩和推力的形式作用在机组上。

图7是湍流分量对风机振动的影响散点图。可以看出,随着湍流强度的增大,机组在驱动方向和非驱动方向上的振动加速度逐渐增大,但振动加速度的统计均值变化率相差很大。湍流分量较小时,机组在两个方向上的振动加速度散点基本混叠在一起,驱动方向的振动略大;当湍流分量较大时,两个方向的振动加速度散点渐趋分离,驱动方向的振动明显大于非驱动方向。与平均风速对风机振动的影响相似,驱动方向的振动对湍流强度的变化更加敏感。

尽管风轮可以通过风机控制系统进行变桨和偏航,但湍流与风向的多变以及控制策略、硬件本身的误差等带来的影响使得风轮所受的俯仰弯矩以及偏航力矩始终交变存在,进而加剧机组的振动。因此,

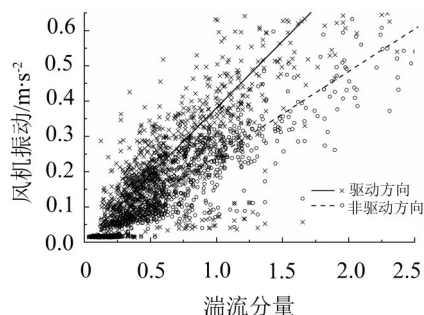


图7 湍流对风机振动的影响

湍流既是风机振动的主要激励源,同样也是风机振动幅值波动的重要因素。

3.3 风轮转速对风机振动的影响

风电机组传动链从前至后包括主轴、轴承、齿轮箱、联轴器、发电机等传动部件以及相应的支撑部件。气流驱动风轮带动整条传动链运转,而机械部件运转是风机振动的最直接的激励源。

图8是风轮转速统计均值对风机振动的影响散点图。

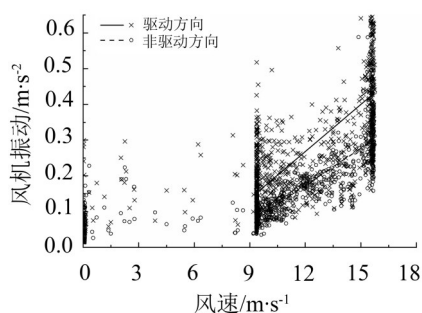


图8 风轮转速统计均值对风机振动的影响

可以看出,尽管该机组采用变速恒频发电技术,风轮以变速运行,但受风况等因素影响,风轮转速在切入转速9.4 r/min和额定转速16 r/min两个值较为集中,中间转速值与风速随机性密切相关。在切入转速和额定转速上,风机驱动方向和非驱动方向的振动加速度变化范围均很宽,很难判定转速与风机振动的关系,但统计发现,中间转速值对应的振动加速度统计均值变化率存在很大差异。说明机舱振动与风轮转速存在一定的相关性,但还有其他因素(如上述的风特性、机组控制参数变化、系统误差等)的影响耦合在其中不可忽略。

4 结语

本文通过建立风特性模型和SCADA数据修正模型,通过对某风场SCADA运行数据进行采集、筛

选、修正处理,研究了风速、湍流以及风轮转速对机组振动产生的影响。研究结果表明:

(1) 随着平均风速的增大,机组在驱动方向和非驱动方向上的振动加速度均随之增大,振动加速度的统计均值变化率不同。驱动方向的振动对平均风速的波动相对更敏感。

(2) 随着湍流强度的增大,机组在驱动方向和非驱动方向上的振动加速度幅值逐渐增大,振动加速度的统计均值变化率差异明显,驱动方向的振动对湍流强度的变化更加敏感。

(3) 风轮转速统计均值与机舱振动存在一定的相关性,但还有其他耦合因素的影响。

综上所述,平均风速的波动和湍流的存在是风机振动最根本最主要的激励源,不受任何其他因素的影响。而风轮转速对风机的振动虽有最直接的影响,但因传动系统(包括风轮、主轴、轴承、齿轮箱和发电机等)低速或高速运转受控于风的特性、控制系统参数以及机械硬件自身误差等因素,风轮转速与风机振动的关系复杂,耦合因素不可忽略。本文研究结果可为风电场数据分析、风机运行状态评估和现场维护等提供有益参考。

参考文献:

- [1] ZAHER A, MCARTHUR S D J, INFELD D G, et al. Online wind turbine fault detection through automated Scada data analysis[J]. *Wind Energy*, 2009, 12(6): 574-593.
- [2] 赵国群,徐劲松. 基于Web的风电场监控及信息管理系统的设计与研究[J]. *机电工程*, 2014, 31(12): 1623-1628.
- [3] WATSON S J, XIANG B J, YANG WEN-XIAN, et al. Condition monitoring of the power output of wind turbine generators using wavelets[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2010, 25(3): 715-721.
- [4] 刘永前,王飞,时文刚,等. 基于支持向量机的风电机组运行工况分类方法[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(9): 1191-1197.
- [5] 刘建勋,胡伟辉,林胜,等. 双馈式风力发电机减振系统的优化[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(3): 29-32.
- [6] 梁颖,方瑞明. 基于SCADA和支持向量回归的风电机组状态在线评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(14): 7-12.
- [7] WIGGELINKHUIZEN E J, VERBRUGGEN T W, BRAAM H, et al. Assessment of condition monitoring techniques for offshore wind farms[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2008, 130: 1004, 1-1004,9.
- [8] IEC 61400- 25, Communications for monitoring and control of wind power plants[S].