

文章编号 2095-0020(2010)06-0328-06

# 风力发电机组状态监测系统与故障诊断方法研究现状

谢 源, 焦 斌

(上海电机学院 电气学院, 上海 200240)

**摘 要:** 为保证风力发电机组可靠稳定运行,降低机组的维护成本,最有效的办法是监测风力发电机组的运行状态。对于已经出现故障的部件,及时分析状态监测系统采集的部件信息,利用一定的分析手段和方法,可快速有效地诊断出导致故障发生的具体零部件,缩短排除故障的时间,降低损失。对于故障出现前部件的早期退化,通过对状态信息变化的分析,可提前预测故障,为部件的维护提供明确指导。阐述了风力发电机组状态监测系统及故障诊断方法研究的现状。

**关键词:** 风力发电; 状态监测; 故障诊断

**中图分类号:** TM 315.07 **文献标识码:** A

## State of the Art of Condition Monitoring System and Fault Diagnosis Methods of Wind Turbine

XIE Yuan, JIAO Bin

(School of Electric, Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to ensure the reliable and stable operation and decrease the maintaining cost of wind turbine, most effective method is monitoring the condition of wind turbine. For assemblies with failure, we can analyze assemblies' information from condition monitoring system with some analysis means and methods. It can rapidly diagnose specific components that induce failures. It also accelerates the speed of troubleshooting and reduces loss by failures. For the early degradation before failure, it can be detected according to analyzing condition information. So we can predict failures in advance. It gives clear guidance for assemblies maintaining. We introduce state of the art of condition monitoring system and fault diagnosis methods of wind turbine.

**Key words:** wind turbine; condition monitoring; failure diagnosis

据全球风能理事会(GWEC)统计,1996—2009年全球风力发电产业年平均增长达到25%<sup>[1]</sup>。世界风能协会(WWEA)2009年度报告指出,截止2009年年底,全球风力发电机组发电

收稿日期: 2010-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(60801048);上海市高校选拔培养优秀青年教师专项基金项目(sdj09001);上海市闵行区科委项目(2010MH075);上海市教育委员会重点学科资助(J51901)

作者简介: 谢源(1978-)男,讲师,博士,专业方向为自动化。E-mail: xiey@sdju.edu.cn

Copyright © 2010 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量占全球电力消耗量的2%;预计到2020年,全球装机总量将是2009年的10倍<sup>[2]</sup>。至2009年我国已连续4年保持了装机容量比上一年度翻番的发展速度,总装机容量已近26 GW,总装机容量居世界第2位,当年新增装机容量超过13.8 GW,列世界第1位<sup>[2]</sup>。

风力发电行业的快速增长导致了风力发电机组运行维护费用持续增长,对于陆上型风力发电机组,运行维护成本占单位电价的10%~15%,对于离岸型风力发电机组,其比例接近25%~30%<sup>[3]</sup>。降低机组的运行维护成本有2种途径:①提高风力发电机组的质量;②采用有效的在线状态监测系统和合理的故障诊断方法。

影响风力发电机组质量的因素包括设计、制造、安装等多个方面,需要不断地反馈和改进。而风力发电机组的正常使用寿命为20年,在机组漫长的运行使用期间应实时监测运行状态,及时分析状态参数,准确判断故障或隐患,合理安排维护方案,才能保证风力发电机组长期稳定可靠的运行。

## 1 风力发电机组结构

从外形上来看,风力发电机组主要由风轮、机舱、塔筒和基础等部分组成<sup>[4]</sup>。目前,市场上主流的大型兆瓦级风力发电机组分为双馈型风力发电机组和直驱型风力发电机组。商业运行的机组绝大部分是双馈型的风力发电机组(见图1)。

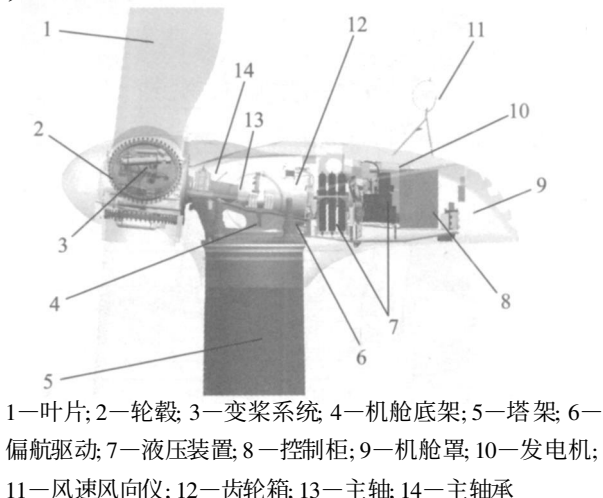


图1 风力发电机组结构图

Fig. 1 Structure of wind turbine

风轮为风能吸收部分,它包括叶片、轮毂和变桨系统。风推动风轮的叶片转动,把风能转化为机械能,而轮毂把获得的机械能传递给机舱中的传动链系统。机舱内有风力发电机组的传动链系统、发电机和电气控制系统。对于双馈型风力发电机组,其传动链系统按照能量传递的顺序依次为主轴、齿轮箱和高速轴。主轴和轮毂连接,轮毂的转动带动了主轴的同速旋转;齿轮箱具有增速作用,能将主轴的低速提升到机组能够正常发电的高速,故齿轮箱输入端是低速轴,输出端是高速轴。高速轴高速旋转驱动双馈发电机工作,双馈发电机发出的电通过塔筒底部的变流器装置调节后送入电网系统。塔筒是机舱和风轮的支撑,它把机舱和风轮固定在离地面数十米以上的高空,便于风力发电机组获取足够的风能。塔筒底部内有变流器装置和主控系统塔底柜,这2个电气系统控制着整个风力发电机组的运转和发电,是风力发电机组的大脑和神经中枢。依靠上述关键部件,再加上其他一些辅助的电气和机械部件,就构成了完整的大型兆瓦级风力发电机组。

## 2 风力发电机组状态监测系统

大型兆瓦级风力发电机组的故障主要集中在齿轮箱、发电机、低速轴、高速轴、叶片、电气系统、偏航系统、控制系统等关键部件<sup>[5]</sup>。这些关键部件若发生故障将造成风力发电机组停机。由于风电场多建于远离城市的偏远地区或近海区域,交通不便,再加上风力发电机组处于高空,故对风力发电机组的维护非常困难;若需吊至地面做故障诊断、维修或更换,则需花费更大的人力和物力,维护成本可能会达到数百万人民币。

迫于不断降低风力发电机组运行和维护成本的需求,基于在线状态监测系统的维修方案的应用越来越广泛。常规的风力发电机组状态监测系统(见图2)可在风力发电机组运行过程中实时监控各关键部件的运行状态,根据监测数据和状态类型,及时诊断部件存在的问题和隐患,检测非正常工作的零件或分析出现早期故障症状的零件,进而预测将来何时会出现何种故障;根据诊断结果及时采取处理措施,防止造成严重损失,提高风

力发电机组运行可靠性、使用效率和使用寿命。在风力发电机组的实际状态监测过程中, 齿轮箱、轴系、发电机、叶片、电气系统、控制系统、偏航系统和变桨系统成为重点关注的对象。现针对不同的部件来介绍状态监测系统的原理和实施方案。

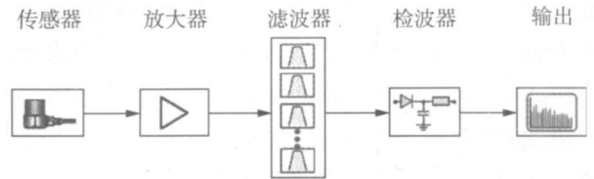


图2 风力发电机组状态监测系统  
Fig. 2 Condition monitoring of wind turbine

2.1 齿轮箱及轴系状态监测系统

风力发电机组的传动链包括齿轮箱、高速轴和低速轴。齿轮箱与轴系在恶劣环境下工作, 损坏率非常高。齿轮箱是风力发电机组中的升速部件, 其故障占风力发电机组总故障 1/3 左右。齿轮箱按照传统类型可分为圆柱齿轮箱、行星齿轮箱及它们互相组合起来的齿轮箱; 按照传动的级数可分为单级和多级齿轮箱; 按照转动的布置形式又可分为展开式、分流式及混合式等。齿轮箱容易产生故障的零部件主要有输入输出轴承、轴和齿轮。对齿轮箱的状态监测主要采用振动信号监测、润滑油监测、温度信号和扭矩信号检测等方法。唐新安<sup>[6]</sup>提出了一种齿轮箱状态监测系统方法, 即在齿轮箱的 8 处轴承附近的壳体上分别采集振动数据, 如图 3 所示。图中, ①~⑩是加速度传感器安装的位置, 以采集齿轮箱运行过程中的振动数据, 实时监测齿轮箱的运行状态, 因为振动信号可从一个方面反映齿轮箱运行状态。文献 [7] 中同时监测齿轮箱和润滑油冷却系统, 使用几类传感器分别监测齿轮箱轴承温度、油泵润滑油温度、冷却风扇高速和低速模式 2 路数字信号。文献 [8] 中通过分析传动部件的机械载荷, 对轴系扭矩进行检测。

外国研究者倾向于将由齿轮箱和轴系组成的传动链作为整体来研究。英国杜伦大学彼特教授的研究团队<sup>[9-10]</sup>利用一套 50 kW 的测试系统对传动链状态监测进行了研究, 通过监测风轮转速装置及安装在齿轮箱上的加速度计和扭矩传感器来

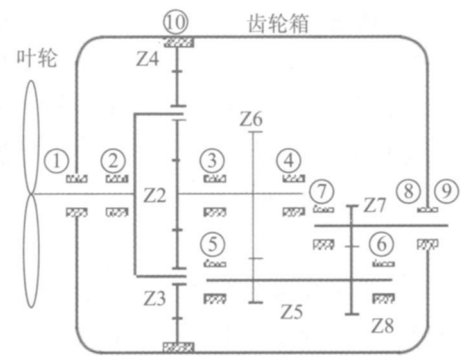


图3 齿轮箱状态监测系统  
Fig. 3 Condition monitoring system of gearbox

监测传动链的工作情况。德国 ISET 研究机构<sup>[11-15]</sup>采用了图 4 的传动链监测方案实现对齿轮箱、轴系和发电机运行状态的监测。其中: ①号传感器为距离传感器, 用于风轮测量绝对位置; ②~④号传感器为低频加速度计, 用于测量风轮转动传导过来的振动; ⑤和⑥号传感器为频响范围很宽的振动传感器, 用于测量轴承和齿轮的振动。瑞典 KTH 皇家工学院的研究小组<sup>[16]</sup>采用 ISET 的监测系统, 并同时进行润滑油分析来完成状态监测, 通过离线采样润滑油, 测量油的粘度、含水量、颗粒杂质和添加剂的变化等监测传动链系统的运行状态。国内一些研究者则把传动链和发电机作为整体分析对象, 采用 8 个加速度传感器分别采集主轴、齿轮箱和发电机不同部位的振动信号, 实现这 3 个部件运行状态的监测<sup>[17]</sup>。

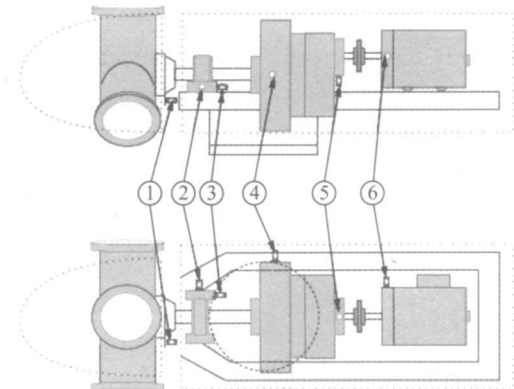


图4 传动链状态监测系统  
Fig. 4 Condition monitoring system of drive train

2.2 发电机状态监测系统

风力发电机组的发电机是通过转子的旋转,

把机械能转变为电能的机电设备。对发电机的状态监测可从机械和电气两方面来考虑。文献[18]中利用一套11 kW的小型风力发电设备作为监测对象,通过测量转子与定子电流、定子电压、转子转速和定子绕线温度5个参数来实现对发电机的状态监测。对于发电机容易出现的定子匝间短路问题,可通过测量定子三相电流<sup>[19-20]</sup>和轴泄露电流<sup>[21]</sup>来进行监测。而双馈型风力发电机滑环的运行状态可通过监测转子电流来实现<sup>[22]</sup>。文献[23]中结合双馈发电机的电流信号和控制信号来监测发电机的状态。Wilkinson等人<sup>[10]</sup>通过对电流、电压和转子扭矩的测量,结合对传动链的监测建立了一个风力发电机组整体状态监测系统。国内有学者认为<sup>[24]</sup>,在测量发电机电压、电流、频率、风速和扭矩外,还应测量大气压力和大气温度,以完成对发电机更加全面的状态监测。

### 2.3 叶片状态监测系统

风力发电机组的叶片是整个机组中最昂贵的部件,也是最容易受到损坏的部件。由于叶片裸露在空中,最容易被雷电击中,产生致命的伤害,文献[25]中提出利用光纤传感网络来测量闪电造成的破坏,从而实现对叶片的监测。文献[26]中通过测量发电机端的电压和电流,计算出功率来监测叶片的状态。惯性传感器可用于探测线性加速度或角速度,由此可测量叶片损坏对模态动力学的变化<sup>[27]</sup>。

### 2.4 其他部件状态监测

目前,风力发电机组的控制系统、变桨系统、偏航系统、加热系统、冷却系统等普遍采用控制器为核心的电气系统,其部件自身带有若干传感器,以监测自身的工作状态和外部环境,故无需额外增加设备来获取上述电气系统的工作信息。

## 3 风力发电机组故障诊断方法

状态监测是诊断风力发电机组已经产生故障的有效途径,而故障诊断则可预测机组将来会产生的故障或分析故障早期的方法。在基于状态监测的风力发电机组维护策略中,采用各种行之有效的故障诊断方法,可分析出部件故障早期的存在,避免或降低未来故障产生造成的损失。

### 3.1 频谱分析的方法

目前,频谱分析是风力发电机组故障诊断最常用的方法,尤其在对振动信号<sup>[11]</sup>和功率信号<sup>[26]</sup>分析方面,通常对采集到的数据进行傅里叶变换,得到信号的频域谱,从频率的异常变化来诊断机组的故障<sup>[6]</sup>。

### 3.2 人工智能方法

风力发电机组故障原因复杂,其故障征兆、故障原因和故障机理之间存在着极大的不确定性,故许多学者希望通过人工智能的方法来诊断机组的故障。文献[28]中引入了一种用单层前向神经网络对数据进行快速分类绘制故障与非故障分界线的方法,该方法能很好地根据实时数据判断风力发电机电力电子装置的故障。文献[29]中分析了风力发电机组故障与征兆间的模糊关系,形成了模糊故障诊断规则,建立了风力发电机组模糊故障诊断自适应修正数学模型。文献[7]中提出了一种智能预测维护系统,该系统考虑来自不同传感器的实时信息和其他来源的信息,从看似正常的行为中诊断出异常。文献[30]中介绍了风力发电系统故障诊断专家系统的结构及实现原理,特别提出了数据库的奇偶编号、推理机的模糊推理判断及学习机制的机械学习,以增强故障诊断专家系统的智能性。

### 3.3 小波分析的方法

小波分析具有多分辨(也称多尺度)的特点。在高频率的部分频段能放大尺度,具有很好的频率分辨性;在低频率的部分频段能缩小尺度,具有很好的时间分辨性和对信号的自适应性<sup>[31]</sup>。文献[32]中用小波分析处理风力发电机组发电机的输出功率,来获取特殊频率组件和典型故障的数据。文献[33]中采用基于小波的自适应滤波器来获取与故障相关的频率,这样风力发电机组在任何固定转速或变化转速下,故障特征都能够被提取。

## 4 发展趋势

随着全世界风力发电产业,特别是海上风力发电产业的快速发展,风力发电机组的状态监测系统将会变得越来越重要。对于如何提高风力发

发电机组的寿命,降低机组的维护成本,制造商提高风力发电机组的质量是一种解决办法;但对于风电场运行商而言,更行之有效和主动的方式是研究机组的故障诊断方法和手段。就目前的技术而言,对叶片的状态监测和故障诊断仍然是困扰整个行业的难解之题,这将成为本领域今后重点研究的对象之一。

当前,风力发电机组状态监测研究的重点是对旋转机械(包括主轴承、齿轮箱、发电机3大部件)振动情况的研究,如采集点布置、信号分析等。对于发电机部件,也有很多专家从电信号和振动信号2个方面深入研究发电机的工作状态。对于消除外部干扰对部件状态信号的影响,实现信号的盲源分离,将成为风力发电机组状态监测的未来研究方向之一。在故障诊断方面,人工智能和小波分析等在其他领域取得广泛成功的方法也越来越受到研究者的关注,未来这些理论和算法同样会在风力发电机组故障诊断领域得到更加深入的应用。此外,如何在故障产生前及时准确地预测可能产生的危害,提前处理故障诱因将成为另一个普遍关注的主题。

#### 参考文献:

- [1] Global Wind Energy Council. Global wind 2009 report [EB/OL]. (2010-03-01) [2010-08-12]. <http://www.gwec.net/index.php?id=167>.
- [2] World Wind Energy Association. World wind energy report 2009 [EB/OL]. (2010-03-10) [2010-08-12]. [http://www.windea.org/home/index.php?option=com\\_content&task=view&id=266&Itemid=43](http://www.windea.org/home/index.php?option=com_content&task=view&id=266&Itemid=43).
- [3] Rademakers L, Braam H, Zaaijer M B, et al. Assessment and optimisation of operation and maintenance of offshore wind turbines [C]// Proceedings of the European Wind Energy Conference & Exhibition. Madrid: [s. n.], 2003: 1-5.
- [4] 姚兴佳,宋俊. 风力发电机组原理和应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 18.
- [5] 谢源,强珏贤. 大型兆瓦级风力发电设备状态监控系统研究 [J]. 上海电机学院学报, 2009, 12(4): 271-275.
- [6] 唐新安. 600 kW 风力发电机组故障诊断 [D]. 呼和浩特: 新疆大学, 2006: 22.
- [7] Garcia M C, Sanz Bobi M A, Del Pico J. SIMAP: Intelligent system for predictive maintenance application to the health condition monitoring of a wind turbine gearbox [J]. Computers in Industry, 2006, 57(6): 552-568.
- [8] 郭靖. 风力发电机组轴系扭矩测试系统的研究与应用 [D]. 呼和浩特: 新疆大学, 2007: 19-26.
- [9] Wilkinson M R, Tavner P J. Condition monitoring of wind turbine drive trains [C]// Proceedings of the International Conference of Electrical Machines. Chania, Crete, Greece: [s. n.], 2006: 1-5.
- [10] Wilkinson M R, Spinato F, Tavner P J. Condition monitoring of generators & other subassemblies in wind turbine drive trains [C]// IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives 2007. Cracow, Poland: IEEE, 2007: 388-392.
- [11] Caselitz P, Giehardt J, Kewitsch R. Advanced condition monitoring system for wind energy converters [C]// Proceedings of the European Wind Energy Conference 1999. London, UK: James & James (Science Publishers) Ltd., 1999: 63-66.
- [12] Caselitz P, Giehardt J. Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction techniques [C]// Proceedings of the World Wind Energy Conference and Exhibition. Berlin, Germany: [s. n.], 2002: 1-4.
- [13] Caselitz P, Giehardt J. Fault prediction techniques for offshore wind farm maintenance and repair strategies [C]// Proceedings of the European Wind Energy Conference 2003. Madrid: [s. n.], 2003: 1-6.
- [14] Caselitz P, Giehardt J. Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(2): 253-261.
- [15] Caselitz P, Giehardt J. Condition monitoring and fault prediction in large wind turbines [EB/OL]. [2010-08-15]. [http://www.iset.uvirkassel.de/osmr/osmr\\_publicdownload.html](http://www.iset.uvirkassel.de/osmr/osmr_publicdownload.html).
- [16] Lucente M. Condition monitoring system in wind turbine gearbox [D]. Stockholm, Sweden: KTH.

- Royal Institute of Technology, 2008: 43-51.
- [17] 王之华. 基于 LabVIEW 的大型风力发电机组旋转机械的状态监测系统设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 33-35.
- [18] Popa L M, Jensen B B, Ritchie E, et al. Condition monitoring of wind generators [C]// Conference Record of the Industry Applications Conference 2003, 38th IAS Annual Meeting. [S. l.]: INSPEC, 2003, 3: 1839-1846.
- [19] Lu Q F, Cao Z T, Ritchie E. Model of stator inter turn short circuit fault in doubly fed induction generators for wind turbine [C]// 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. [S. l.]: IEEE, 2004, 2: 932-937.
- [20] Williamson S, Djurović S. Origins of stator current spectra in DFIGs with winding faults and excitation asymmetries [C]// 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Miami, FL: IEEE, 2009: 563-570.
- [21] Albizu I, Tapia A, Saenz J R, et al. On-line stator winding fault diagnosis in induction generators for renewable generation [C]// Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2004: 1017-1020.
- [22] Würfel M, Hofmann W. Monitoring of the transmission properties of the rotor slip ring system of doubly-fed induction generators [C]// 2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. San Antonio, TX: IEEE, 2005: 295-299.
- [23] Casadei D, Filippetti F, Stefani A, et al. Experimental fault characterization of doubly fed induction machines for wind power generation [C]// International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Taormina: IEEE, 2006: 1281-1286.
- [24] 高雪峰, 王涛, 沈炳耘, 等. 离网型风力发电机性能测试系统概述[J]. 中国农机化, 2006(2): 79-81.
- [25] Kramer S G M, Leon F P, Appert B. Fiber optic sensor network for lightning impact localization and classification in wind turbines [C]// 2006 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Heidelberg: IEEE, 2006: 173-178.
- [26] Tsai C S, Hsieh C T, Huang S J. Enhancement of damage detection of wind turbine blades via CWT-based approaches [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 776-781.
- [27] Sørensen B F, Lading L, Sendrup P, et al. Fundamentals for remote structural health monitoring of wind turbine blades a preproject [M]. [S. l.]: Risø National Laboratory, 2002.
- [28] 张晓波, 张新燕, 王维庆. 用神经网络对风力发电中电力电子故障分析 [J]. 华东电力, 2008, 36(7): 16-18.
- [29] 任腊春, 张礼达. 模糊理论在风力发电机组故障诊断中的应用 [J]. 能源技术, 2006, 27(5): 210-212, 215.
- [30] 郭洪澈. 风力发电系统的故障诊断专家系统设计 [J]. 节能, 2002(7): 36-38.
- [31] 金嘉琦, 关新, 单光坤. 小波理论在风力发电机振动监测中的应用 [J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(5): 520-524.
- [32] Watson S J, Xiang B J, Yang Wenxian, 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.
- [33] Yang Wenxian, Tavner P J, Crabtree C J, et al. Research on a simple, cheap but globally effective condition monitoring technique for wind turbines [C]// 18th International Conference on Electrical Machines. Vilamoura: IEEE, 2008: 1-5.