

Research on Advanced Maintenance and Repair for Off-shore Wind Farms Based on Fault Prediction Techniques

Hongtao ZENG¹, Xiangyang LI¹, Jinsong FENG², Bin LIU³

¹School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan, China

²Data Xiangtan Power Generation Co., Ltd., Xiangtan, China

³Hunan Huaihua Electric Power Bureau, Huaihua, China

Email: zenghongtao@hotmail.com

Abstract: Offshore wind farms are limited by its own environmental conditions, so their maintenance and repair are difficult problems on the development of offshore wind energy. Fault prediction, maintenance and repair plan technologies integrated into the offshore wind turbine and wind power technologies in this paper. And its condition monitoring and failure prediction of the main method is studied, introduced an integrated hardware and software required to complete the wind power technology offshore wind power plant based on the state of maintenance and repair strategy. Finally, an application examples of condition monitoring and fault prediction used in wind power generation is introduced, its architecture and the corresponding hardware and software has been designed, it provides a full solution for carrying out advanced maintenance and repair for offshore wind farms based on fault prediction Techniques.

Keywords: offshore WEC; condition monitoring; maintenance; vibration

基于故障预报的海上风电场先进维修技术研究

曾洪涛¹, 李向阳¹, 冯劲松², 刘斌³

¹武汉大学动力与机械学院, 武汉, 中国, 430072

²大唐湘潭发电有限责任公司, 湘潭, 中国, 411102

³湖南省怀化电业局, 怀化, 中国, 418000

Email: zenghongtao@hotmail.com

摘要: 海上风电场受自身环境条件的限制, 维护和检修问题是大力开发和利用海上风能的难点问题。本文将故障预报、维修计划技术集成到海上风力发电机和风力发电技术领域, 研究了其状态监测和故障预报的主要方法, 介绍了如何集成所需的硬件和软件到风力发电领域中从而完成海上风电场的基于状态的维修策略。最后, 针对状态监测和故障预报技术在风力发电领域的实际应用案例, 给出了系统的设计架构, 进行了相应的硬件和软件方案设计, 为开展基于故障预报技术的海上风电场先进维修提供了解决方案。

关键词: 海上风力发电机; 状态监测; 维修; 振动

1 引言

由于可能出现长达几个月的恶劣天气情况, 常常使到达海上风电场开展维护工作变得十分困难, 因此必须对海上风电机组采用新的维修策略。新的维修策略应该减少针对每个风机的检修人员, 并保证维修费用在合理的范围内。本文提出的基于状态的维护策略,

既满足了当前的检修需求, 又立足于建立长期维护服务的必需的信息。

实际风力发电机的运行状态详细的测量和监测数据及其负荷循环变化的知识是建立基于状态的维修策略的基础。因此, 这些信息必须提供给风电场运行人员, 制造商和维修服务提供商。通过观察当前风力发电机的状态的发展趋势, 在故障萌芽的早期, 就发现机械零件可能的缺陷。采集代表风力发电机整体健康状况数据到数据库中, 这些数据也能表征出风机零部

中央高校基本科研业务费专项资金资助(2010年武汉大学青年教师资助项目)

件结构中的薄弱环节，这将优化风力发电机运行的技术性和经济性指标。

维修策略的提高取决于基于有效的故障预测算法的状态监测系统(CMS)。虽然风力发电机组的设计工艺及其控制技术正日趋成熟，并且已经达到了较高的技术标准，但是仍然有较大的发展潜力，尤其是用于海上风场的大尺寸大容量的风机。

包含综合故障检测算法的自主在线状态监测系统能够在早期预警机械和电气的缺陷，以防止主要部件的失效，并可明显降低对其它部件的影响。在能检测到许多缺陷时，有缺陷的部件仍然能处于运行状态。因此，必须制定及时的检修计划，可以不立即实施维修。这尤其是对于由于恶劣的天气条件(风暴，涨潮…)而使维修措施不得不推迟几个星期的海上风电场是很重要的。

另外，状态监测也会发现诸如结冰或海上风电场风塔振荡等极端的外部状况，并可以触发适当的控制措施以防止电站部件受到破坏。采用这种方式，可以显著降低海上风力发电机组的整体维护成本和时间，并且延长具有特殊组件载荷的状态监测系统维护间隔期。

2 状态监测系统

2.1 数据采集硬件

状态监测系统的监测和故障预报功能是基于具有鲁棒性的连续测量传感器设备的，同时采用现代数字信号处理方法进行典型故障征兆的在线评估。图 1 所示是一个典型的用于水平轴风力发电机的传感器配置。

现代风力发电机技术主要是针对旋转的部件。因此，借助于先进的状态监测设备和故障预报算法，测量组件外壳振动和结构振荡将会为特征值的计算提供数据。图 1 所示的传感器配置能实现在转子轴的轴向和横向两个方向上的振动测量。通过使用在垂直塔轴前面和后面的两个横向传感器，就可以实现对机舱扭转振荡的测量。

风力发电机特征值的监测来自两个不同类型的传感器。使用静态加速传感器来测量转子在极低的频率转动时产生的机舱振荡，即以 0 Hz 为截止频率。图 1 标明了安装在②、③和④号位置的传感器。

图 1 中⑤和⑥标明了变速箱和发电机振动传感器的位置。这些传感器工作频率范围从 1Hz 到 20000Hz，

主要用来测量轴承和齿轮产生的振动。使用感应式位移传感器(图 1 中的①)测量到的转子的绝对位置，需要做相敏窄频带的分析，这是一个专门进行信号处理的 FFT 算法。

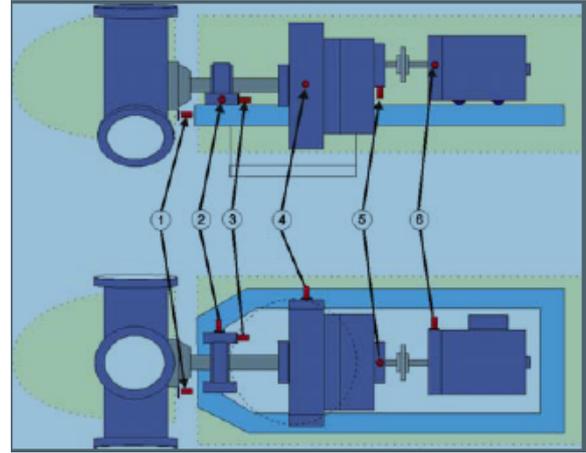


Figure 1. Condition monitoring sensor configuration for horizontal axis wind energy converters

图 1: 水平轴风力发电机状态监测传感器设置

这些传感器可以用胶座安装在每个平整的表面上。所需要的面积大概是 5cm^2 。低频加速度计安装在机舱的支撑架上。振动感测器很方便的安装在靠近轴承防尘圈的地方，甚至在风力发电机竖起来之后，整个系统的安装都非常容易完成。如果在施工阶段集成状态监测系统的话，就会更显著降低成本。

2.2 故障预测算法

现代的风力发电机通过测量诸如主轴的旋转速度、功率、发电机温度等参数具备了一定的基本故障监控功能。有些电站还能实现远程控制和运行数据的远程传输。

状态监测系统和故障预测算法计算得到平均值和标准偏差等统计值，通过执行一个学习模式来自动确定预警和警报级别。这些标准都是通过将权重因子作为参数平均值和标准偏差计算得来的。学习结束后，如果必要的话，这个参数可由操作人员进行修改。故障检测使用标准的分类程序以及先进模糊技术综合来自不同的测量方法的信息。通过这些方法进行综合，故障检测和分类的可靠性将会显著提高。

除了以上所描述基本的监控功能外，状态监测和故障预报系统还有测量和在线评价零部件振动和结构

振荡来进行补充。从这个系统中，可以获取机组状态的详细诊断。一些故障，如转子叶片的不平衡或疲劳、偏航系统或桨距的偏移、变速箱轴承和齿轮齿的磨损或即将出现的裂纹，可以在初期阶段探测到。

2.2.1 全面整体运行特征

为了获得一切风力发电机性能下降造成缺陷的诊断信息，例如从提高转子叶片表面粗糙度、结冰或发电机系统的故障，就需要对功率特性进行持续的监视。为了达到这一目的，从机舱测量风速是一个很好的选择[1]，因为这个测量仅仅是基于功率相对变化的特点而不是基于机组的标称功率曲线。利用风速表的构造，风速的测量不需要安装任何附加传感器。

图2所示是一个600 KW的失速型风力发电机的功率特性。圆圈代表制造商所给出的功率曲线。这些点源于两次五分钟的测量。功率 P 和风速 V_w 为平均值。外面的细线是绝对的报警界限，由状态监测系统的系统应用程序决定。里面的细线是报警界限经验值。学习过程是通过测量的 $P(V_w)$ 值分类来完成。报警界限值的带宽由组平均值结合代表组的标准偏差一起计算出来。

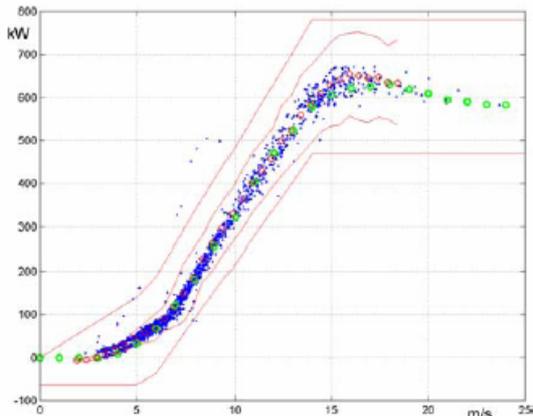


Figure 2. Measured power characteristic of a 600 kW WEC.

图2: 600KW 风力发电机实测的功率特性.

2.2.2 变速箱和轴承的故障检测

全局特征值，如轴承条件单位和峰值(在时间信号上峰值除以均方根值)，提供有关变速箱和轴承的总体健康状况。如果这个值呈上升趋势，就可以利用包络曲线分析对轴承的附加诊断检测。这种曲线分析主要是利用高频谐振来评估特定的故障频率。使用模糊分类器对振幅谱频率峰值和故障数据的变化趋势进行了连续地评估，从而产生可靠地触发警报。

经过一个学习阶段，报警界限通过均值和测量特征值的标准偏差计算出来。在监测阶段，平均值可以通过检查报警界限得到。如果连续有5个值超过限值，就会触发警报。

先进的算法将会进一步加强状态监测系统的信号处理功能，如齿啮合带频率频谱分析特别适合变速箱的故障诊断，用这个算法能计算被齿啮合振幅所平分的边带上整个光谱能量(均方根值)。如果齿轮的齿性能下降，边带上的能量和这个比值就会上升。

2.2.3 转子的故障检测

检测转子不平衡(例如质量不平衡、空气动力不对称、偏航错位等)的方法是基于发电机低频振荡的频谱分析的。对这些由发电机转子产生的机舱振动的分析已经被证明对检测和区分转子故障状态是非常有用的。通过频谱分析得到的特征值比较复杂，包括实部和虚部，可以看成是一个向量，其振幅和相位对某些故障情况的诊断都具有重要的意义。

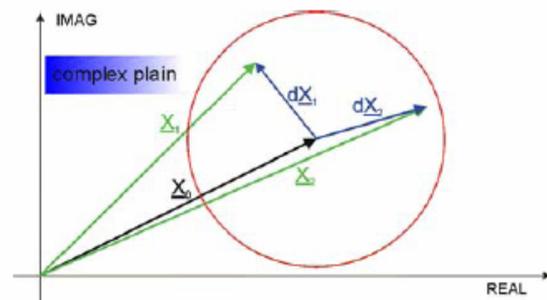


Figure 3. Monitoring of a vector characteristic value.

图3 向量特性值的监测原理.

如图3为了同时监控振幅和相位，报警界限是由一个圆圈周围的 X_0 向量表示。报警限的超出值，是经过计算实际测量差动向量(X_1, X_2)得到的。这个圈子限制下，将检测到伴随恒定幅值(dX_1 微分向量)的相位变化以及没有的振幅偏差没有显著相偏移(dX_2)。

基于上述算法，本文设计了风力发电机的状态监测系统，并在实验室进行了初步测安装试。

- 通过比较平均风速和电功率输出(5分钟平均值),来连续监测功率特性作为风力发电机状态的总体代表参数值
- 齿轮箱和发电机振动监测(齿轮箱齿轮, 轴承等)
- 风塔摆动分析(轴向, 横向和扭转)涉及到转子

不对称以及转子和风塔的固有特征频率

- 其他的特定的故障检测任务，例如有关液压，发电机温度等等都可以很容易的增加。

评价变速箱和轴承状态的先进方法，如包络曲线的光谱分析法或边带齿啮合频率分析法，都是目前故障诊断领域研究的热点问题。

3 海上状态监测系统应用

由于安装在风电场的海上风力发电机的典型性，必须要搭建基于网络的状态监测系统，如图 4 所示，选用以太网作为硬件标准，该技术已经在大量的风电场广泛使用。基于光纤通道，可以通过全面的传输速率性能高达 100Mbit/s 远距离完成高度可靠的连接。

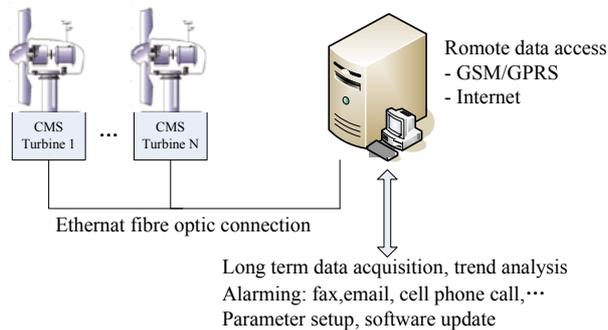


Figure 4. LAN configuration for CMS in offshore wind farms
图 4 海上风电场状态检修系统局域网设置

比较风力发电机在相同的健康状况下运行情况从而优化海上风电场的故障分类。由风电场服务器（如风速）提供冗余测量将用于改善整体风电场性能，例如最大限度地减少因单个风力发电机的风速计故障导致的运营亏损。

新一代的数兆瓦级的海上风力发电机组，轮毂中心点高度可能达到 100m，维护和更换缺点零部件的费用都会大大增加。采用先进的预知性维护和维修策略对于风力发电机的经济成本运行是必不可少的。另一方面，由于布线的接地和更高的成本高，每单位兆瓦

海上风力发电机投资成本将远高于陆上，这将导致资本和保险费用相应上升。保险公司也要求必须建立状态监测系统以减少损害的事件和相应的成本风险以保障投资收益。

4 结论

由于状态监测和故障预报技术能提高机组运行可靠性和可用性，它将是未来世界能源技术非常有前途的选择，并可能成为风电场项目在沿海地带经济可行的先决条件。风机状态监测系统安装测试结果表明，这些系统可以很容易地在不同类型和型号的风力发电机上集成，今后的研究将集中在将故障预报数据集成到数据中来完成整个海上风电场的基于状态的维修策略上。

References (参考文献)

- [1] P. Caselitz, J. Giebhardt, M. Mevenkamp, M. Reichardt, Application of condition monitoring system in wind energy converters[J]. Proceedings of the ewec'97, Dublin, pp.579-582
- [2] Jiang Dongxiang, Huang Qian, Hong Liangyou, The system development for the wind power generators vibration detection and intelligent diagnosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 9 (27) :31 - 35(Ch)
蒋东翔,黄乾,洪良友,等. 风力发电机组振动检测与智能诊断系统开发[J]. 振动与冲击, 2008, 9 (27) :31-35.
- [3] Hameed Z, Hong Y S, Cho YM, et al. Condition monitoring and fault detection of wind turbines and related algorithms[J]. Renewable & Sustainable Energy Review s, 2007, 34 (5): 327-331.
- [4] P. Caselitz, J. Giebhardt, Advanced condition monitoring for wind energy converters, Proceedings of EWEC'99, Nizza
- [5] Mc Arthur, Booth S D J, Mc Donald C D, et al. An agent based anomaly detection architecture for condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1675-1682.
- [6] P. Caselitz, J. Giebhardt, Advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction techniques, Proceedings of the World wind energy conference and exhibition, Berlin ,2-6 Jul 2002
- [7] Chen Changzheng, Liang Shumin, Fault diagnosis for megawatt wind generator[J]. Journal of Shenyang University of Technology. 2009, 31 (13): 277-280(Ch)
陈长征, 梁树民. 兆瓦级风力发电机故障诊断. 沈阳工业大学学报[J]. 振动与冲击, 2009, 31(13): 277-280.
- [8] Tang Xinan, Xie Zhiming, WANG Zhe, et al. Fault diagnosis of gearbox for wind turbine [J]. Noise and Vibration Control, 2007, 2 (1): 120-124. (Ch)
唐新安,谢志明,王哲,等. 风力机齿轮箱故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2007, 2 (1): 120-124.