

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.01.009

兆瓦级风电机组传动链振动远程在线测试

黄华清¹, 杜雪松¹, 刘华朝¹, 柏厚义², 朱才朝¹

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆望江工业集团公司, 重庆 400071)

摘要: 传动链作为风力发电机组的主要部分, 工作在柔性塔架支撑、风向和载荷多变等恶劣的环境下, 其振动特性好坏直接影响风机可靠性和使用寿命, 成为风电机组最薄弱环节。论文基于 SKF 的 WindCon 智能采集系统, 以某兆瓦级风力发电机组为例, 在正常运行和启、停工况下对传动链的振动进行远程在线检测, 得到传动链在各运行工况下的振动特性, 并揭示其动态特性变化规律。测试结果表明传动链振动较为复杂, 主要表现为系统低频扭转振动和弯、扭、摆构成的复合振动, 传动链中主轴、齿轮箱等振动频率主要由转频和各级齿轮啮合频率尤其是高速级齿轮啮合频率构成, 并存在被转频调制现象。

关键词: 风力发电机组; 传动链; 振动特性; 远程在线测试

中图分类号: TK83

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2015)01-0068-06

Remote on-line vibration test for multi-megawatt wind turbine

HUANG Huaqing¹, DU Xuesong¹, LIU Huachao¹, BAI Houyi², ZHU Caichao¹

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China;

2. Chongqing Wangjiang Industry Co., Ltd., Chongqing 400071, P.R.China)

Abstract: As the key components of the wind turbine transmission, wind turbine drivetrain is always working under the complex and time-varying conditions, like flexible tower supporting, variable wind and changing load. Thus drivetrain is no wonder the weakest part for the wind turbine and its vibration characteristics determine the reliability and operating life of the wind turbine. This paper proposes a remote on-line test method for drivetrain vibration based on an intellectual monitoring unit named WindCon. The vibration characteristics of the commonly used multi-megawatt wind turbine are summoned through analyzing the collected data in different working conditions. The wind field results show that the vibration of drivetrain is relatively complex, and it's mainly manifested as a combination vibration of torsion, bending, and waving. Main frequencies of vibration of mainshaft, gearbox, and other parts in drivetrain are gear meshing frequencies and shaft rotating frequencies of each transmission stage especially high speed stage, and are accompanied by rotating frequencies modulation.

Key words: wind turbine drivetrain; wind field operation; vibration characteristics; remote online test

自 2000 年以来全球风电总装机容量年均增长率达 24%, 风能发展前景十分广阔^[1]。然而恶劣的外部工况以及复杂的内部激励使得风机的重要机械组成部分——风机传动链故障多发, 严重阻碍了风机连续运行, 大大降低了风机可靠性, 缩短了风机使用寿命, 增加了风能行业的成本^[2-3]。因而对风机传动链的动态特性的研究至关重要^[4-6]。

收稿日期: 2014-09-20

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAA01B05); 重庆市重点攻关资助项目(cstc2014yykfB90003)。

Supported by National Key Technology Program(2012BAA01B05); The Key Science and Technology Projects Fund of Chongqing(cstc2014yykfB90003).

作者简介: 黄华清(1990-), 男, 主要从事机械工程领域方向研究, (Tel)18883882498; (E-mail) hqhuang@cqu.edu.cn。

目前风机传动链动态特性研究主要有 3 个方式:理论建模、试验台测试、风场测试^[7]。朱才朝等建立齿轮—传动轴—箱体系统耦合非线性动力学模型,分析了系统内部激励作用下风机传动链核心部件——风电齿轮箱的动态特性,研究了轮齿修形、柔性销轴对风电齿轮箱动态特性的影响^[8-10]。董文斌等对载荷下风机传动链基于时域的齿轮接触疲劳进行分析^[11]。Nejad 分析了风机传动链风载下齿轮的长期疲劳损伤与可靠性^[12]。

Jan Helsen 等利用 13.2 MW 背靠背风电齿轮箱试验台对风机传动链理论模型结果进行验证对比分析^[13]。美国可再生能源实验室 NREL 采用一系列状态监测手段在试验台上对风机传动链的动态特性进行了相关研究^[14]。

风场测试同样是风机传动链动态特性研究不可缺少的环节。试验台测试不能完全替代风机现场测试,试验实验不仅不能完全模拟风场复杂多变的风况,而且风机传动链支撑刚度与试验台差别较大。但是由于风机多位于高山、滩涂、戈壁等人迹罕至地区,风机现场运行时的动态特性实验收到了有很因素的约束。因此开展对兆瓦级风力发电机组传动链动态特性实时在线检测的研究,具有重要工程实用价值。

1 兆瓦级风电机组传动链结构及传动原理

风机可以分为水平轴风机和垂直轴风机,目前工业所用风机以水平轴式风机为主,其常见的传动链布置有:模块化传动,集成式传动,部分集成式传动以及直驱传动。目前风能领域通常采用模块化传动链结构。工业领域最常用 3 点支撑模块化传动链布置如图 1 所示。

风驱动叶片将风能转化为机械能,通过主轴、增速齿轮箱和发电机,将机械能转化为电能。增速齿轮箱作为风机传动链的关键变速部件,传动系统较为复杂。图 2 某兆瓦级风机传动链中齿轮箱传动原理图,由一级行星和两级平行轴传动构成,第一级 LSS 行星传动由齿圈、行星轮、行星架和太阳轮轴组成,齿圈固定,行星架输入,太阳轮输出,太阳轮轴通过花键与 ISS 的主动轮相连接。ISS 和 HSS 均为平行级,功率由大齿轮传递给小齿轮,将行星架输入的低转速转化为 HSS 输出端高转速输出。

风机传动链中机械刹车一般布置在高速轴端,由一个刚性盘组成,刚性固定于刹车轴上,由固定在轴上的制动器进行制动;联轴器采用弹性联轴器;发电机通过支架固定在机舱上;整个传动链由主轴和齿轮箱 2 个扭力臂 3 点支撑在机舱上,机舱由塔架支撑在地面上。

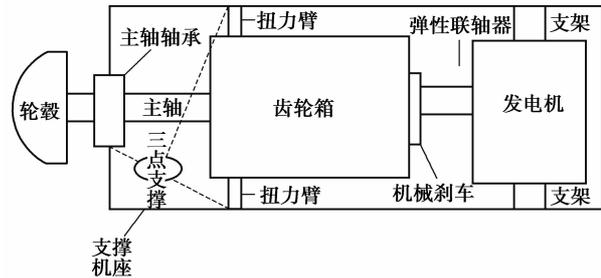
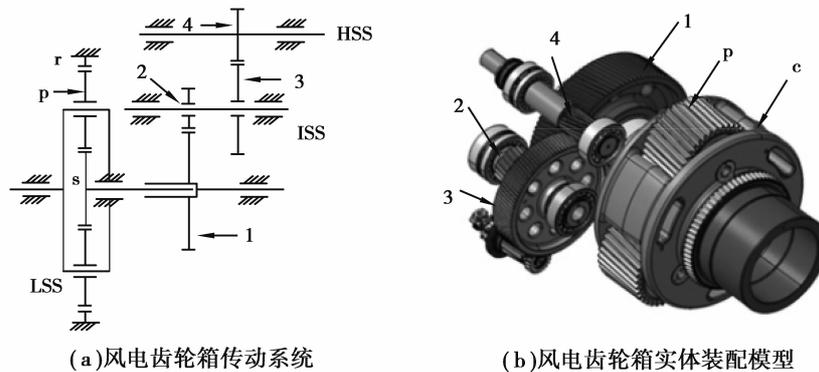


图 1 水平轴风机传动链结构原理图

Fig.1 Structural principle of horizontal axis wind turbine drive train



注:P.行星轮;r.内齿圈;s.太阳轮;1.中间级主动轮;2.中间级从动轮;3.高速级主动轮;4.高速级从动轮;LSS.低速级;ISS.中间级;HSS.高速级。

图 2 风电齿轮箱结构原理图

Fig.2 Structural principle of wind turbine gearbox

2 兆瓦级风电机组传动链远程在线测试方法

基于 SKF WindCon^[15] 系统建立风机传动链振动状态测试系统如图 3 所示,系统主要由信号采集模块、信号远程传送模块、信号在线测试模块和数据库模块组成。信号采集模块主要由传感器、信号线、信号采集单元组成。由于风机传动链振动频响范围较宽,且机舱环境复杂且狭小,为方便安装与拆装,选择振动加速度传感器。同时风电机组安装在数十米的高空,通过柔性搭架支撑,传动链振动高频成分衰减较快,风机叶片转速通常在 17~22 r/min。因此在传动链主轴支撑、支撑机座及塔架上选用低频三向加速度传感器,频响

范围为 0.2~1 000 Hz;在电机轴承座、齿轮箱轴承座及齿轮箱体部位处选用频响范围为 1~10 000 Hz 的三向加速度传感器^[15],传动链测点布置示意图如图 4 所示。

布置在传动链各关键部位的振动加速度传感器通过配套信号线将采集的信号传递至固定在机舱内的 WindCon 智能采集单元, WindCon 智能采集单元将模拟信号转化为数字信号,并对原始信号作初步的计算处理(如傅里叶变换)。采集及处理的数据以 GPRS 方式发射到 Internet 网络,完成数据的远程传送,监控主机利用 VPN(虚拟专用网络)路由器从 Internet 下载风场测试数据至数据库,从而完成风机的远程在线检测^[16]。

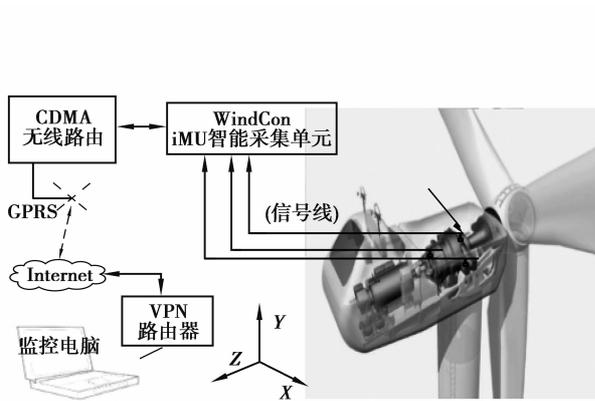


图 3 远程在线检测系统
Fig.3 Remote on-line testing system

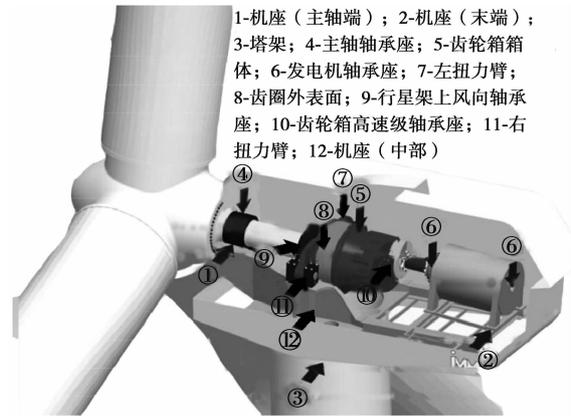


图 4 传动链测点布置示意图
Fig.4 A rangement for testing point in drive-train system

3 某 1.5 MW 风电机组传动链远程在线测试

对某 3 点支撑的 1.5 MW 风力发电机组传动链进行实时在线检测,传动链部分参数如表 1 所示,齿轮参数如表 2 所示,额定转速工况下部分特征频率如表 3 所示。

表 1 风机传动链部分参数

Tab.1 Part of coefficients of wind turbine drivetrain

名称	功率	启动风速	额定风速	切入风速
WT1	1.5 MW	6.6 m/s	10 m/s	6 m/s
发电机效率	齿轮箱效率	齿轮箱传动比	发电机类型	切出风速
≥97%	≥97%	104	异步双馈	25 m/s

表 2 风机传动链齿轮传动部分参数

Tab.2 Part of coefficients of wind turbine gearbox

WT1-齿轮箱	齿数	模数/mm	压力角/(°)	螺旋角/(°)	传动比
太阳轮	21				
行星级	行星轮	37	15	25	0
	内齿圈	95			5.52
中间级	主动轮	106			
	从动轮	21	11	20	10
高速级	主动轮	101			
	从动轮	27	7	20	10

表 3 风机传动链部分特征频率

Tab.3 Part of charecteristic frequencies of wind turbine drive train Hz

叶片转速/(r·min ⁻¹)	主轴转频	HSS 啮合	ISS 啮合	LSS 啮合
16.2	0.27	761	158	25.67
发电机转速/(r·min ⁻¹)	风速/m/s	发电机转频	太阳轮转频	ISS 转频
1691.1	10	25.78	1.49	7.53

$K_i, i=1,2,\dots,9$ 分别为叶片支撑刚度,轮毂支撑刚度,轮毂锁紧盘刚度,联轴器刚度,轴刚度,主轴轴承刚度,齿轮箱扭力臂支撑刚度,发电机转子轴承刚度,发电机定子支撑刚度,支撑机座刚度。 $C_i, i=1,2,\dots,5$ 分别为联轴器阻尼,发电机转子阻尼,主轴轴承阻尼,扭力臂阻尼,支撑机座阻尼。

风机传动链拓扑关系如图 5 所示,叶片根部与轮毂固定连接,轮毂与主轴连接,主轴利用锁紧盘与齿轮箱上的行星架相连接,通过主轴轴承支撑在机舱上,齿轮箱通过左右 2 个扭力臂支撑在机舱上,同时通过齿轮高速轴与联轴器连接,联轴器与发电机转子相连,发电机定子通过支架支撑在机舱上,机舱由塔架支撑。

根据风机传动链几何拓扑关系图,可以建立系统动力学方程^[17]

$$Mx + Cx + Kx = F(t), \tag{1}$$

式中, M 为系统质量矩阵, $x(\ddot{x}, \dot{x})$ 为系统振动位移(速度,加速度)矩阵; C 为系统阻尼矩阵; K 为系统刚度矩阵; F 为系统外部载荷矩阵。

目前国内外对基于上述风机传动链动力学特性进行了大量研究^[18],从风场测试的角度来揭示传动链动态特性。图 6 是测试风机运行时的功率和转速曲线,图 7 是传动链齿轮箱高速级测点 Y 方向振动三维瀑布图和频谱图,可以看出系统振动除转频 25.78 Hz 外,还有高速级啮合频率 761 Hz 及其 2 倍频,且啮合频率对应振动幅值较大。在振动速度频谱图中存在 1.563 Hz 频率,系传动链低频扭振频率。

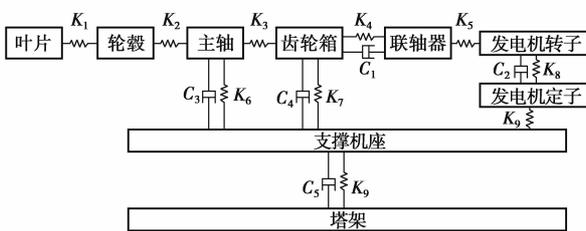


图 5 风机传动链几何拓扑关系图

Fig.5 Topology relationship among wind turbine drive-train components

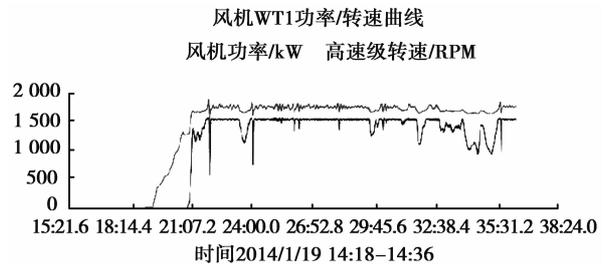
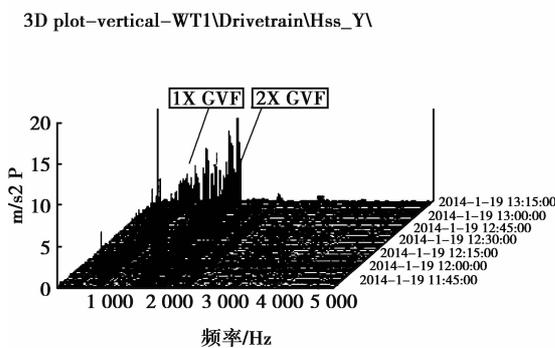
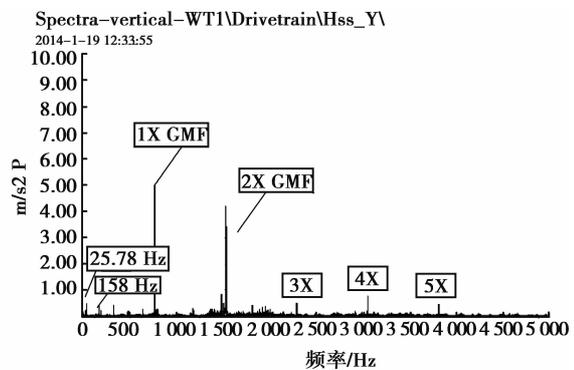


图 6 风机 WT1 额定发电运行时功率转速曲线

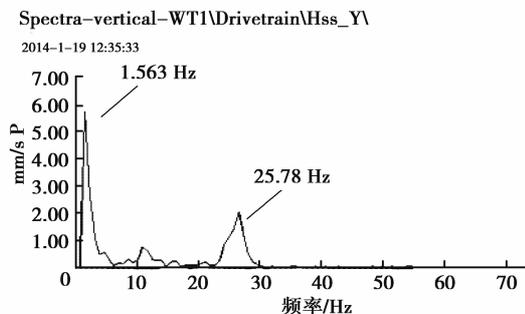
Fig.6 Power & speed curves of 1# wind turbine



(a) 振动加速度 3 维瀑布图



(b) 振动加速度频谱图



(c) 振动速度频谱图 (细化)

图 7 传动链齿轮箱高速级 Y 向测点振动谱图,

GMF—Gear Meshing Frequency, 齿轮啮合频率, 此处指齿轮箱高速级啮合频率; 1X, 2X, 3X 分别表示 1、2、3 倍

Fig.7 Vibration spectrum in HSS-Y of wind turbine gearbox in drivetrain, GMF gear meshing frequency, here refers to HSS of Gearbox; 1X, 2X, 3X means multiples 1, 2, 3 respectively

传动链中齿轮箱其他测点,如扭力臂、低速轴及齿圈等的振动特征与高速轴测点类似,均表现为各级齿轮啮合频率、高速轴转频。

风机传动链中支撑机架处振动主要集中在低频区域,如图 8 所示,振动速度幅值较大的频率有 1.72 Hz、3.38 Hz,主要来自于低速部件转频及塔架频率。发电机测点频谱中的周期信号成分与齿轮箱中、高速级齿轮啮合吻合较少,因为电机输入端通过弹性联轴器与齿轮箱输出端相连,弹性联轴器衰减了齿轮箱的振动频率成分。

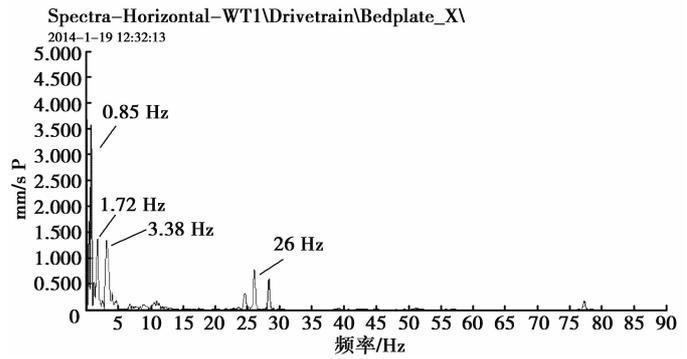


图 8 传动链支撑机架测点振动速度频谱

Fig.8 Spectrum of vibration velocity in supporting Table of drine train

图 9(a)、(b)是风机正常启、停时齿轮箱高速级 Y 向测点拓扑图。启动过程中,高速级啮合频率从无到有,且对应的振动幅值从小到大,高速级啮合频率三倍从小到大变化;风机停机过程中,齿轮啮合频率由大到小,达到某一阈值后测点振动周期成分消失。风机传动链在启、停工况下均存在 1.73 Hz 频率,为系统扭振频率。图 9(c)是风机正常运行时测点振动趋势图,风机在相对稳定运行的工况下测点振动水平不稳定,与风湍流有关。

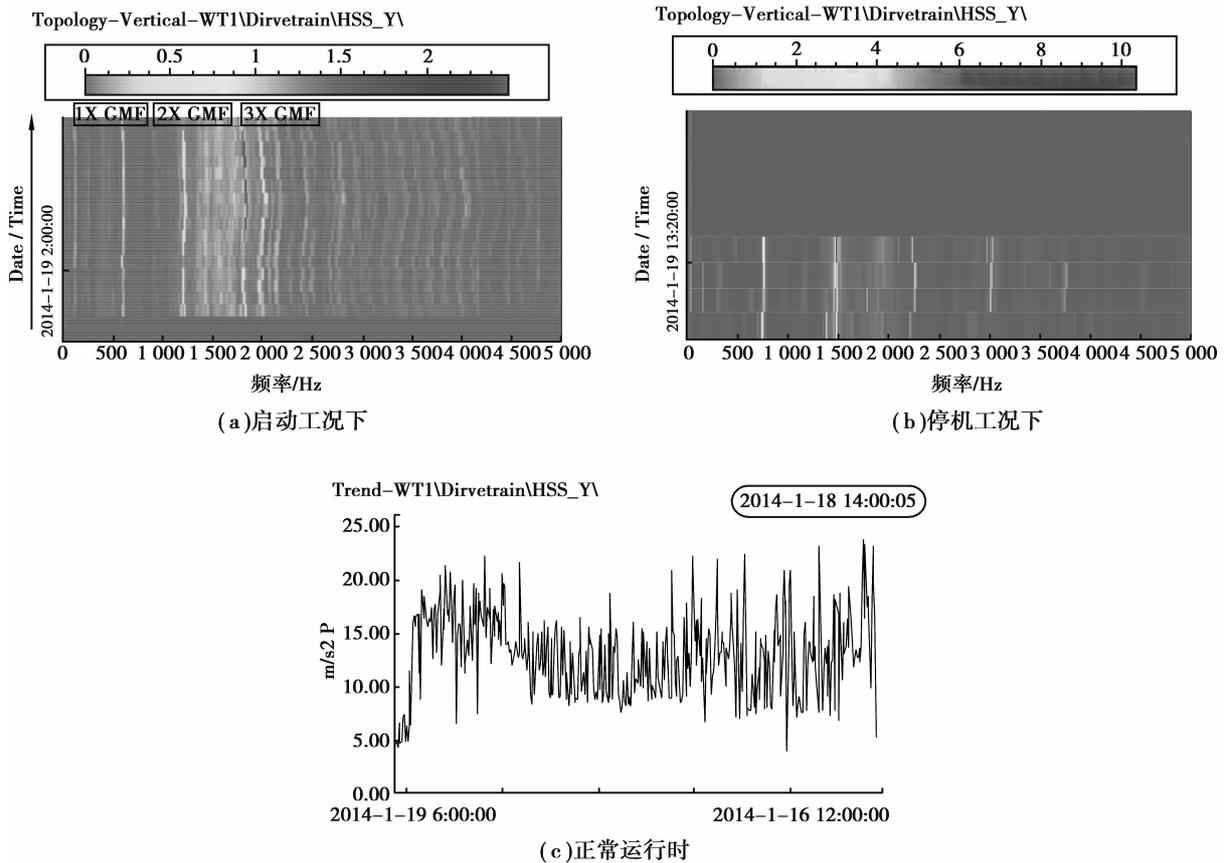


图 9 风机正常启动、停机时传动链高速旋转部件高速级测点 Y 向振动拓扑图以及风机正常运行时振动趋势图

Fig.9 Vibration topology graph of HSS-Y under different working conditions and vibration trend for normal working condition

4 结 论

传动链作为风力发电机组的主要组成部分,工作在柔性塔架支撑、风向和载荷多变等复杂恶劣的环境下,其动态特征直接影响风机可靠性和使用寿命。基于 SKF 的 WindCon 智能采集系统,以某兆瓦级风力发电机组为例,在正常运行和启、停工况下对传动链的动态特性进行了测试分析。

测试结果表明风机传动链中齿轮箱各测点振动频率主要是其转频、各级齿轮啮合频率及其倍频,伴随有高速轴转频调制现象。传动链中支撑机架在低频区域的振动还包含传动链扭振和塔筒振动。风机传动链的第一阶固有频率 1.73 Hz,为系统扭振频率,风机在启、停工况下存在较大的冲击振动,与风湍流有关。

参考文献:

- [1] Agency I E.technology roadmap wind energy[M/OL].2013.
- [2] Nejad A R,Gao Z,Moan T.Long-term Analysis of gear loads in fixed offshore wind turbines considering ultimate operational loadings[J].Energy Procedia,2013,35(0):187-197.
- [3] 秦大同,古西国,王建宏,等.兆瓦级风力机齿轮传动系统动力学分析与优化[J].重庆大学学报,2009,32(4):408-414.
QIN Datong,GU Xigou,WANG Jianhong,et al.Dynamic analysis and optimization of gear trains in a megawatt level wind turbine[J].Journal of Chongqing University,2009,32(4):408-414.
- [4] 周志刚.随机风作用下风力发电机齿轮传动系统动力学及动态可靠性研究[D].重庆大学,2012.
- [5] 杨军.风力发电机行星齿轮传动系统变载荷激励动力学特性研究[D].重庆大学,2012.
- [6] Zhu C C,Chen S,Liu H J,et al.Dynamic analysis of the drive train of a wind turbine based upon the measured load spectrum[J].Journal of Mechanical Science and Technology,2014,28(6):2033-2040.
- [7] Musial W, Butterfield S, Mcniff B. Improving wind turbine gearbox reliability [M]. Milan: European Wind Energy Conference,2007.
- [8] 朱才朝,黄泽浩,唐倩,等.风力发电齿轮箱系统耦合非线性动态特性的研究[J].机械工程学报,2005,41(8):203-207.
ZHU Caichao,HUANG Zehao,TANG Qian.Analysis of nonlinear coupling dynamic characteristics of gearbox system about wind-driven generator[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(8):203-207.
- [9] 朱才朝,陈爽,马飞,等.轮齿修形对兆瓦级风电齿轮箱动态特性影响[J].振动与冲击,2013,07:123-128.
ZHU Caichao,CHEN Shuang,MA Fei,et al.Effect of gear teeth modification on dynamic characteristics of a megawatt level wind turbine gearbox[J].Journal of Vibration and Shock,2013,07:123-128.
- [10] Zhu C C,Xu X,Liu H J,et al.Research on dynamical characteristics of wind turbine gearboxes with flexible pins[J].Renewable Energy,2014,68:724-732.
- [11] Dong W,Xing Y,Moan T,et al.Time domain-based gear contact fatigue analysis of a wind turbine drivetrain under dynamic conditions[J].International Journal of Fatigue,2013,48:133-146.
- [12] Nejad A R,Gao Z,Moan T.On long-term fatigue damage and reliability analysis of gears under wind loads in offshore wind turbine drivetrains[J].International Journal of Fatigue,2014,61:116-128.
- [13] Helsen J,Vanhollebeke F,De Coninck F,et al.Insights in wind turbine drive train dynamics gathered by validating advanced models on a newly developed 13.2 MW dynamically controlled test-rig[J].Mechatronics,2011,21(4):737-752.
- [14] Helsen J,Marrant B,Vanhollebeke F,et al.Assessment of excitation mechanisms and structural flexibility influence in excitation propagation in multi-megawatt wind turbine gearboxes: Experiments and flexible multibody model optimization[J].Mechanical Systems and Signal Processing,2013,40(1):114-135.
- [15] Zhu C C,Huang H,Liu H J,et al.On-line vibration monitoring and diagnosing of a multi-megawatt wind turbine gearbox [M].Lyon,France:International Gear Conference,2014.
- [16] 朱才朝,胥良,徐向阳,等.兆瓦级风电齿轮箱远程实时在线测试及评价[J].振动与冲击,2012,31(20):17-22.
ZHU Caichao,XU Liang,XU Xiangyang,et al.Remote real-time online testing and evaluation for a megawatt level wind turbine gearbox[J].Journal of Vibration and Shock,2012,31(20):17-22.
- [17] 陈会涛,秦大同,吴晓铃,等.考虑随机制造误差的风力机行星齿轮系统动力学特性[J].机械工程学报,2012,48(21):77-83.
CHEN Huitao,QIN Datong,WU Xiaoling,et al.Dynamic characteristics of planetary gear transmission system of wind turbine with random manufacturing error[J].Journal of Mechanical Engineering,2012,48(21):77-83.
- [18] Helsen J,Vanhollebeke F,Coninck F D,et al.insights in wind turbine drive train dynamics gathered by validating advanced models on a newly developed 13.2 MW dynamically controlled test-rig[J].Mechatronics,2011,21:737-752.