

风力发电机故障预测半物理仿真系统设计*

肖桂雨¹, 向健平¹, 郭立霞², 凌永志¹

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院 清洁能源与智能电网湖南省 2011 协同创新中心, 湖南 长沙 410114; 2. 江苏海上龙源风力发电有限公司, 江苏 南通 226000)

摘要: 设计了一种利用电信号进行风力发电机故障预测研究的半物理仿真系统, 对系统的工作原理、硬件构成以及软件设计方法进行了描述。利用 MATLAB 仿真和实际数据处理实例, 研究了风力发电机在非可控自然风况下快速傅里叶变换和小波变换等传统方法和新的方法处理电功率中非平稳故障信号实现故障预测的可行性和有效性。结果证明在难以获得实际风场数据的情况下, 该方法是一种具有实际意义的研究风力发电机故障预测的方法。

关键词: 风力发电机; 故障诊断与预测; 半物理仿真; 系统设计

中图分类号: TM 307 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)05-0104-07

Semi Physical Simulation System Design for Fault Prediction of Wind Turbines*

XIAO Guiyu¹, XIANG Jianping¹, GUO Lixia², LIN Yongzhi¹

(1. Hunan Province 2011 Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Jiangsu Longyuan Offshore Wind Power Co., Ltd., Nantong 226000, China)

Abstract: A semi physical simulation system for fault prediction of wind turbines was designed. The electric signals of the system were used for the prediction. Based on MATLAB simulation and examples of real data processing, the working principle, hardware structure and software design method of the system were described. The feasibility and effectiveness of the Fast Fourier transform, wavelet transform and other traditional and new methods on non-stationary electric power data processing for fault prediction were studied, with wind turbines operating under the condition of uncontrollable natural winds. The results proved that the system was a significant method of studying fault prediction, while it was difficult to obtain the data of wind turbines.

Key words: wind turbines; fault prediction; semi physical simulation; system design

0 引言

风力发电机组高精度的故障诊断和预测是降低风力发电机组运维成本、提高风力发电机组发电效率、改善风电场工作人员工作环境的重要途径。

国内风电机组设备的运行状态大多依靠振动及温度等信息来进行测量^[1-3]。通过对该类型的信号进行测量分析, 从而判断故障的原因和位置,

但这种测量方法使用的传感器大多为接触式传感器, 存在高成本且会对风电机组性能产生影响的缺点。基于电信号的故障诊断系统节省了采集振动信号的传感器, 从而避免高成本以及安装会对被测设备造成安全隐患的缺点。电信号诊断方法, 选择在发电机的输出端安装二次侧测量设备, 读取发电机侧的电压、电流、有功功率等电信号, 再进行信号的频谱分析, 达到与振动信号分析方式相同的目的。电信号诊断方法由于其特有的优

* 基金项目: 中国外国专家局高端外国专家项目(GDT20154300072); 湖南省科协“海智计划”项目(XKX-HZJH2017-06)

作者简介: 肖桂雨(1996—), 女, 研究方向为风力发电机状态监测与故障诊断。

向健平(1959—), 女, 博士, 教授, 研究方向为风力发电机故障诊断、状态监控和寿命预测。

越性,近年来受到国内外学者较为广泛的关注^[4-7]。文献[8]分析了电流信号用于风力发电机故障诊断的基本原理,在此基础上采用永磁同步发电机建立了一套模拟直驱型风力发电机运行的试验模型。文献[9]利用电信号和数值模拟进行了轴承的故障诊断等。

大规模风力发电场通常位于边远和恶劣自然环境中,风力不可控,风况复杂。由于边远地区不宜居住难以就地处理大规模测量数据,而远距离大数据传输又非常困难,因此有必要设计试验平台,研究处理风力发电机非平稳信号实现故障预测的方法。鉴于变桨和偏航系统及其控制系统的复杂性,本项目利用 MATLAB 建立了风力发电机故障预测半物理仿真系统。

目前,常用的信号分析方法有快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、小波变换、神经网络等。小波变换可给出一个随频率改变的“时间-频率”窗口,对采集的信号逐步细化,同时窗口幅值也可以随着频率的变化而变化,适用于对非平稳信号的处理。风力发电机电信号是典型的非平稳信号,故近年来小波变换在电信号处理上得到了广泛的应用^[10-12]。

本文针对故障预测的需求搭建了1套半物理仿真试验平台。该试验平台也将用于研究剩余使用寿命的预测。

1 半物理仿真系统的设计

半物理仿真系统使用 MATLAB 编程和 Simulink 工具箱对系统的输入风速、偏航、变桨和控制系统等进行了仿真。主传动和发电机部分采用硬件实现,用于产生相关故障(如轴不对中、恒频冲击等),并研究实体损伤阈值。

1.1 系统工作原理

半物理仿真试验平台中,风速到风轮部分由模拟仿真代替,风轮到发电机部分搭建实物系统。系统采用 MATLAB 编程仿真出由基本风、阵风、渐变风和随机风 4 种基本类型风组成的组合风速模型,然后再由编程实现把转矩表达成关于风速的函数,即 $n_{\text{转}}=f(v)$ 。将风速转化为转矩信号输出传递给 PLC,通过 PLC 控制电动机的起停以及调节电动机的转速,再由电动机带动发电机发电。同时,利用 STM18N5 能量采集模块采集发电

机发出的电功率信号。FFT 和小波变换可以应用于电功率信号分析,提取出故障信息,监控故障发展趋势。其他传感器测量信号将与电功率分析方法比较,提高风力发电机状态监控系统的可靠性。半物理仿真系统工作原理结构图如图 1 所示。

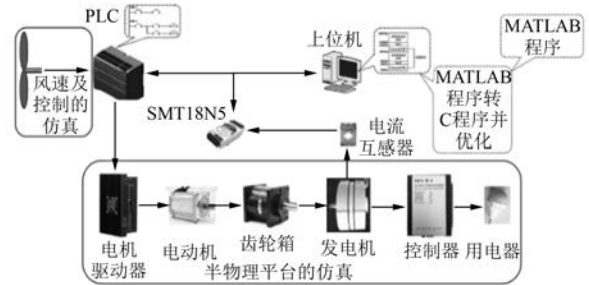


图 1 半物理仿真系统工作原理结构图

1.2 系统组成

半物理仿真试验平台主要用于风力发电机故障的物理模拟和数据分析,研究风力机的实时状态监控,故障预测和剩余使用寿命的预测。如图 1 所示,具体分为以下 5 个部分,具体的设备型号如表 1 所示。

表 1 设备型号

名称	型号	数量
继电器	RXM4AB2BD DC24V	3
断路器	HDBE 1P10A/HDBE 2P 10A /HDBE 2P 32A	5
电源模块	PM1207	1
PLC-CPU	S7-12001214C	1
电机驱动器	BLDH-750A	1
电流互感器	BH-0.6620/5 0.2	3
用电器	DC12V30W/DC12V12W/300W	3
原动机	80BL145S55-3130TK0	1
齿轮箱	PX80N004SW 1:4	1
发电机	NE-300 24V	1
整流器	FW10-48-A	1
能量检测模块	SMT18N5	1
霍尔传感器	CY12-02PK	1

(1) 风轮模块。将风速进行建模与仿真,并进行相应的编程。通过函数计算与转化,将转矩表达成关于风速的函数,即 $n_{\text{转}}=f(v)$ 。

(2) 控制模块。PLC 控制器组通过其内部起停、调速等给定的程序向电机驱动器发出相应的

指令,进而达到对拖动电机的间接调控^[13]。

(3) 风力机模块。由直流电机驱动器控制电动机转动,经过齿轮箱进行减速,再带动发电机。发电机发出的电最终通过风力机控制器进行整流后,使交流电变为直流电,最后接用电器对发出电量进行消耗^[14]。

(4) 测量分析模块。先通过电流互感器对发电机发出的大电流进行缩比,再由能量检测模块采集缩比后的小电流信号。能量检测模块对该信号进行格式转化,使之生成具有可读性的数据文件,再通过上位机中相应的软件已有的分析程序读取文件并进行分析。

(5) 反馈控制模块。能量检测模块中采集到的数据信号由上位机中的 MATLAB 反馈控制程序处理后,再传输给 PLC 控制器组;由 PLC 控制器组中的程序根据处理后的数据来调节输出给电机驱动器的信号。

2 系统硬件

风力发电机故障诊断和预测半物理仿真系统中,控制系统主要由 PLC、继电器和断路器组成;动力系统由电动机、直流无刷电机驱动器和发电机组成;用电系统由发电机充电控制器和用电器组成;数据采集系统由电流互感器、霍尔传感器以及斯达森能量采集模块组成。根据该设计的用途及特点,在此对 PLC、斯达森能量采集模块及霍尔传感器进行介绍,其他常规设备不再进行介绍。

(1) PLC 控制器。系统应用 Simatic 公司的 PLC 1200 和 STEP 7 BASIC 作为硬软件。在 PLC 硬件组装中,以 CPU 模块为核心,安装在 35 mm 的导轨上,左边接通信模块和电源模块,右边接扩展的信号模块。CPU 的型号为 1214C DC/DC/RAY,数字量输入模块型号为 SM 1221 DI 16×24DC,数字量输出模块型号为 SM 1222 DQ 16×24DC,电源模块型号为 PM 1207,模拟量输入模块型号为 SM 1231 AI 4×13BIT,模拟量输出模块型号为 SM 1232 AI 4×14 BIT。电源模块相当于一个变流器,将 220 V 交流电转换成 24 V 直流电给 PLC 的 CPU 模块供电。SIMATIC PLC S7-1200 控制器采用博途 V13 (SIMATIC TIA Portal STEP 7 Basic V13)作为编程软件。通过博途 V13 软件编写模拟风速变化的程序,再将程序

导入 PLC 中,通过 PLC 控制电机驱动器从而实现电机转速的调节。

(2) 斯达森能量采集模块。现阶段多数功率信号测量仪电压采样频率都在 10 Hz 以下,且不能记录、保存数据,而能用于故障诊断的信号要求的采样频率至少达到几十赫兹。为了达到预期的数据采集要求,故在 SMT18N 系列中选取了最高提供 40 Hz 电流、电压数据采集频率的 N5 型作为核心采集设备。该设备内部集成了微型控制电脑芯片、数字信号处理芯片,可以完成测量、校准、设定、遥测、遥调等功能,可以用在多种交流用电场合下的测量、计量以及远程集中抄表、监控管理。在本文的半物理系统试验中,采集设备主要用于检测发电机发出的电能质量,其中包括测量交流回路的每相电压、电流、有功功率、无功功率、视在功率、频率以及谐波分量等。系统数据通过斯达森 SMT18N5 能量检测模块采集之后,通过串口线和通信转换器接入上位机,在上位机中使用串口调试软件来读取所需的数据。

(3) 霍尔传感器。由于霍尔效应式转速传感器输出的信号是矩形脉冲信号,抗干扰能力强,故选用型号为 CY12-02PK 的霍尔传感器,对发电机主轴齿轮的转速进行测量。电机旋转驱动传感器产生对应频率的信号,此脉冲信号可直接输出到脉冲计数器或 PLC 设备,运用脉冲计数法中的 M 法测量速度的脉冲信号,从而实现了对发电机转速的测量。

3 系统软件设计方法

3.1 风速软件设计方法

为模拟真实风速的特点,体现风速的不定性、阶段性和骤变性,使用 MATLAB/Simulink 工具箱来对风速的仿真模型及 MATLAB 算法编程进行计算分析。风速模型通过对风速的仿真和编程实现了整个半物理仿真系统的信号输入。在对已有的参考文献查阅后可知,处于自然界中的自然风经过分析及整理后可细分为基本风风速模型、随机风风速模型、阵风风速模型和渐变风风速模型^[15]4 种风速模型,关系式如下。

基本风风速模型:

$$v_a = k \tag{1}$$

式中: v_a ——阵风风速;

k ——常数。

阵风风速模型：

$$v_b = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ \frac{v_{bmax}}{2} \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \left(\frac{t - t_1}{T_b} \right) \right] \right\}, & t_1 \leq t \leq t_1 + T_b \\ 0, & t > t_1 + T_b \end{cases} \quad (2)$$

式中： v_{bmax} ——阵风最大值；

T_1 ——阵风开始时间；

T_b ——阵风出现的周期。

渐变风速模型：

$$v_c = \begin{cases} 0, & (t < t_{c1}) \\ v_{cmax} \frac{t - t_{c1}}{t_{c2} - t_{c1}}, & (t_{c1} \leq t \leq t_{c2}) \\ v_{cmax}, & (t > t_{c2}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： v_c ——渐变风速；

v_{cmax} ——渐变风速最大值；

t_{c1}, t_{c2} ——渐变风的起、止时间。

随机风速模型：

$$v_d = v_{dmax} R_{am}(-1, 1) \cos(\omega_d t + \varphi_d) \quad (4)$$

式中： v_d ——随机风的风速计算值；

v_{dmax} ——随机风的风速最大值；

$R_{am}(-1, 1)$ —— ± 1 之间的随机值；

ω_d ——风速波动的平均转速变化，一般 ω_d 取值 $0.5 \sim 2\pi$ rad/s；

φ_d —— $0 \sim 2\pi$ 的随机值。

由式(1)~式(4)拟合后可得出叶轮处的模拟风速模型为

$$v = v_a + v_b + v_c + v_d \quad (5)$$

4种风速模型仿真结果如图2所示，组合风速模型仿真结果如图3所示。

通过使用 MATLAB/Simulink 工具箱来对风速的仿真模型以及 MATLAB 算法编程进行计算分析，模拟了真实风速的特点，结果体现出风速的不定性、阶段性和骤变性。

3.2 风轮系统软件设计方法

为了使 PLC 接收能量信号且把命令传输给电动机，需将主传动链的能量信号加以转换。该平台中，即将风速转换为电机转速。通过推导出函数关系式，如式(6)所示；然后通过 MATLAB 软件，进行相应的编程与仿真。电机转子转速与

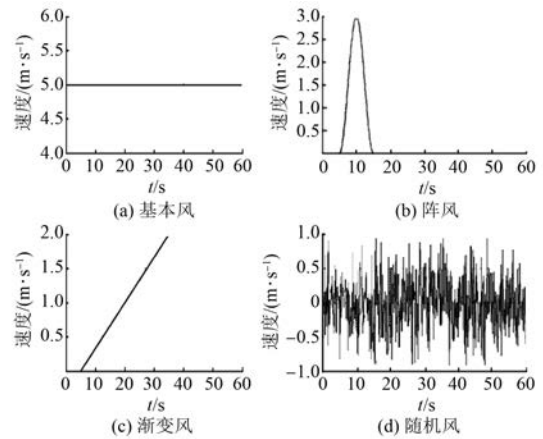


图2 4种风速模型仿真结果

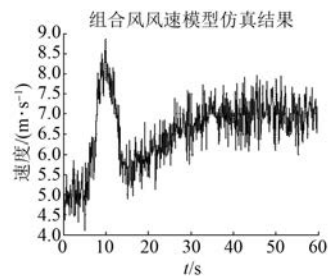


图3 组合风速模型仿真结果

风速对比结果如图4所示。

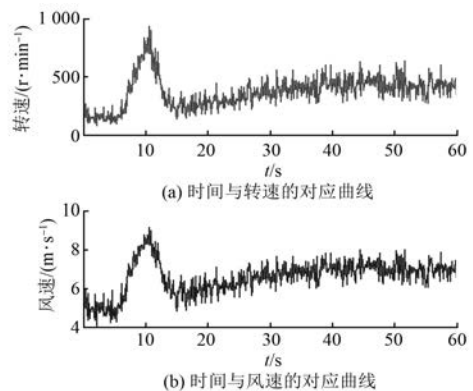


图4 电机转子转速与风速对比

$$n_{转} = 1.875 \times 10^1 R^2 \rho v^3 C_p \quad (6)$$

式中： R ——风轮半径；

ρ ——空气密度；

v ——风速；

C_p ——风能利用系数。

通过计算推导得到风轮系统的模型，并利用 MATLAB 编程进行结果分析。如图4所示，该图形有效反映了函数关系式中各物理量之间的对应

关系,明确了能量在传递过程中的变化,为整个试验平台的搭建提供了理论依据。

3.3 系统的整体仿真设计

使用 MATLAB/Simulink 工具箱,通过工具箱中的模块库中所含有的模块,对模块进行参数设定,使模块能实现试验平台中的部件的功能。

将各个部件在 Simulink 中连接,构建与风力发电机半物理仿真试验平台功能相同的仿真模型,另外再设定 Power Guide 等电力系统指引模

块,即可运行模型,从连入的示波器中输出波形,查看模型输出结果是否合理。

再将风力发电机半物理仿真试验平台的实际运行得到的数据,与风力发电机整体仿真模型模拟运行得到的数据作对比。若两组数据能很好地符合,则证明半物理仿真试验平台的试验结果是有效的,才能继续对获取的数据进行整理分析,确保分析结果的准确无误。

图 5 所示为设计之一的变速异步风力发电机 Simulink 仿真模型。

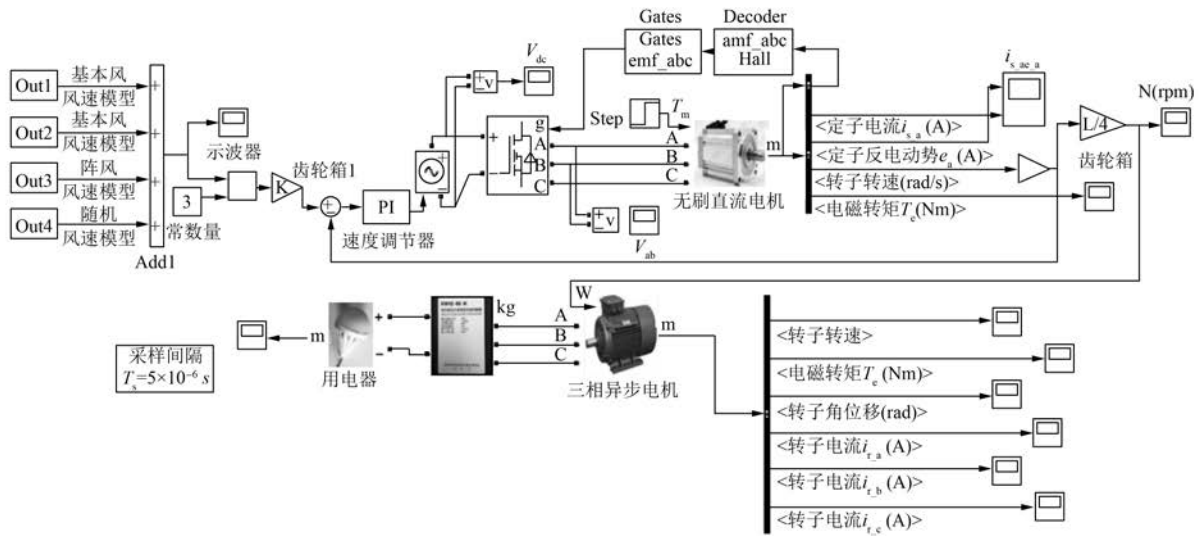


图 5 变速异步风力发电机整体仿真模型

4 MATLAB 仿真和实际数据处理方法

4.1 MATLAB 故障仿真

图 6 利用 MATLAB 仿真研究了通过 FFT、小波变换等传统和新的方法处理非平稳信号实现故障预测的可行性和有效性。通过模拟风力发电机非平稳故障信号,FFT 首先用于检测故障信号,然后利用改进的 Morlet 小波计算故障信号的实际强度,给出趋势图,实现剩余使用寿命预测。图 6(a)为两个故障信号合成的非平稳信号,其纵轴 $x(t)$ 为模拟合成故障信号,时有时无,故障振幅随故障变严重而增大。图 6(b)通过 FFT 检测出两个故障频率,但无振幅值实际值信息。图 6(c)为图 6(a)的小波二维时频图。图 6(d)为用小波分析从图 6(a)信号计算出来的故障的波形,显示了

两个频率的故障信息。两个故障信号波形,包括时间和振幅特征完全从混合信号中分离。为更好地显示出波形的形状特征以便观察,图 6(d)截选其中的一段进行展示,纵轴 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 为运用小波分解得到的故障信号。图 6(e)为故障趋势图,粗线为小波分析计算的 501.53 Hz 信号的振幅值,细线为原 501.53 Hz 信号的仿真函数的振幅值。原信号幅值为 5、10、15,小波计算值为 4.950 9、9.901 1、14.853,相对误差为 0.009 821 3、0.009 891 3、0.009 827 9,由此可知,经小波分析所得的结果精确度较高。

风力发电机任一元件从发生微小故障到元件损坏,都会有一段时间。若通过试验和理论分析获得元件损伤阈值,即元件损坏时对应的最大幅值,就可以通过故障趋势图预测风力发电机故障和剩余使用寿命^[16]。

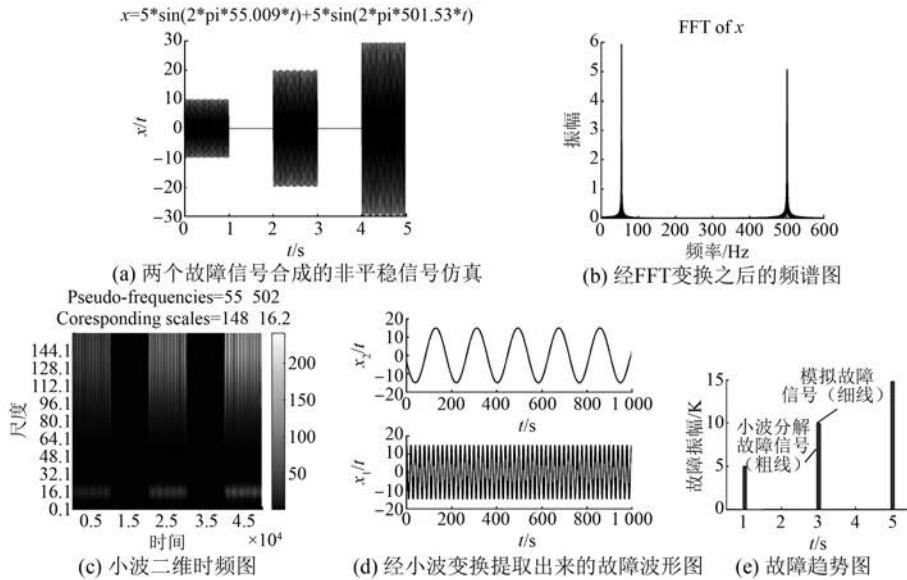


图6 使用FFT和小波变换分析非平稳信号

4.2 故障物理试验

轴不对中是风力发电机产生轴承故障常见的原因之一,其在运行中对轴承产生冲击力,使轴承产生裂缝故障。轴不对中引起轴承的破损变大时,振动越严重,最后导致风力发电机停机。该试验在半物理平台上模拟轴不对中的故障。当系统运行时,敲击电动机与发电机之间的传动轴。在此恒频冲击力的作用下使传动轴产生振动,对轴承施加动态压力,使发电机磁场空气隙发生变化,故在电功率信号中会出现该振动分量。试验中可通过小波变换对电功率信号进行滤波,通过FFT检测到该信号的存在。利用改进的小波变换或其他非平稳信号处理方法可监测故障的发展趋势,以此估计风力发电机的剩余使用寿命,为维修计划提供根据,防止风力发电机因元件失效破坏而停机。

图7(a)为半仿真系统实测电功率数据,图7(b)为经小波滤波处理后的电功率信号高低频部分,图7(c)为经小波滤波处理后的电功率信号频谱图。通过小波滤波和FFT计算,检测出0.2~0.7 Hz有微弱的轴敲击振动信号。

5 结 语

本文利用MATLAB风速模拟、系统控制模拟、PLC、电动机、发电机和测量部件等搭建的半物理仿真试验平台可以相对容易地设计相关故

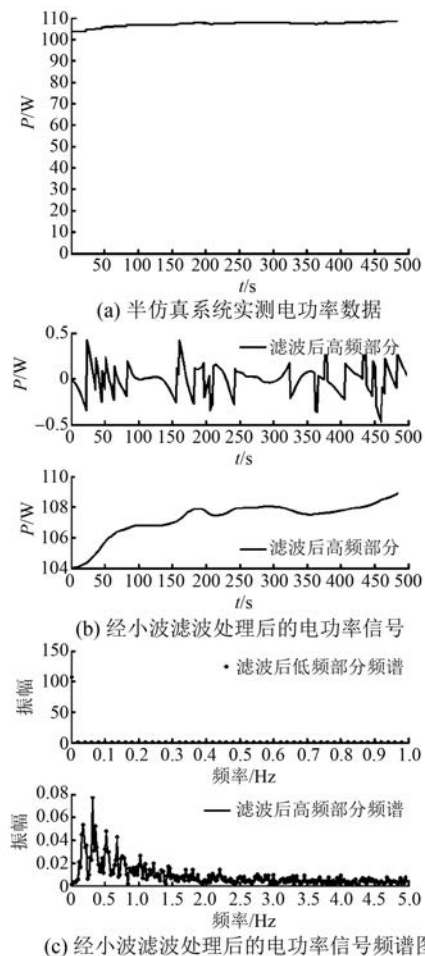


图7 半物理仿真系统实测故障分析

障,如轴不对中和恒频冲击等,具有很高的工程实用价值。实际测量电功率信号及其处理实例说明了利用 FFT 和小波变换等方法对非平稳信号的分析实现故障诊断与预测是一种实用和有效的方法。该方法减少了传统接触式传感器需置于机体内部从而存在破坏被测设备功能的隐患,且解决了成本高的问题。

本文从实际测量电功率信号中计算出了包括频率、时间和振幅特征的各个故障信号的波形,获得了非平稳故障的发展趋势图。后期将配合其他传感器测量试验及分析方法或理论分析等方法获得各部件的损伤阈值,通过在线计算的故障值与阈值的对照实现风力发电机故障预测,甚至剩余使用寿命的预测。

【参考文献】

[1] 陈长征,梁树民.兆瓦级风力发电机故障诊断[J].沈阳工业大学学报,2009,31(3): 277-280.

[2] 史霞飞,潘宏侠,何强.基于 DSP 的风力发电机齿轮箱故障诊断系统的研究与应用[J].机械传动,2013,37(2): 13-16.

[3] 曲弋.MW 级风力发电机组关键部件振动分析与故障诊断方法研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2012.

[4] NETI P, ZHANG P, SHAH M, et al. Electrical signature analysis based online monitoring of drive-trains for doubly-fed wind generators [C] // IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2012: 1764-1769.

[5] AMIRAT Y, CHOQUEUSE V, BENBOUZID M. EEMD-based wind turbine bearing failure detection using the generator stator current homopolar component [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 41(1): 667-678.

[6] GONG X, QIAO W. Bearing fault diagnosis for direct-drive wind turbines via current-demodulated signals [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3419-3428.

[7] 张金卫,刘峻华,张伟鹏,等.基于电流信号分析的风力发电机齿轮箱故障诊断[J].广东电力,2016,29(6): 18-23.

[8] 周昆鹏.直驱型同步风力发电机组故障诊断系统的研究和设计[D].长沙:中南大学,2010.

[9] MACHADO C, GUESSASMA M, BELLENGER E, et al. Diagnosis of faults in the bearings by electrical measures and numerical simulations [J]. Mechanics & Industry, 2014, 15(5): 383-391.

[10] WATSON S J, XIANG B J, YANG W, 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.

[11] 张燕.风电机组齿轮箱故障特征提取技术的研究[D].北京:华北电力大学,2014.

[12] 张祥罗.风力机中发电机在线故障特征提取与故障诊断系统研究[D].广州:华南理工大学,2013.

[13] 魏毅立,薛小倩.风力机风轮模拟实验平台的设计[J].电测与仪表,2012,49(5): 89-92.

[14] 杨亮,王聪,王畅,等.小型风力发电的应用前景[J].农村电气化,2014(1):52-53.

[15] 杨煜,何炎平,李勇刚.基于 Simulink/MATLAB 的变速风力发电机组在低于额定风速时的仿真研究[J].华东电力,2009,37(5): 816-819.

[16] WIGGELINKHUIZEN E, VERBRUGGEN T, BRAAM H, et al. Assessment of condition monitoring techniques for offshore wind farms [J]. Transactions of the ASME; Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130(3): 1-9.

收稿日期: 2017-09-27

(上接第 103 页)

[10] GRITLI Y, STEFANI A, FILIPPETTI F, et al. Stator fault analysis based on wavelet technique for wind turbines equipped with DFIG [C] // Italy, International Conference on Clean Electrical Power, 2009: 485-491.

[11] NANDI S. An extended model of induction machines with saturation suitable for fault analysis [C] // IEEE IAS Annual Conference Salt Lake City, Utah, 2003: 1861-1868.

[12] 刘卉圻,韩坤,苟斌,等.异步电机定子绕组匝间短路故障建模与分析[J].机车电传动,2013,29(6): 52-55.

[13] 刘沛津,谷立臣.异步电机负序分量融合方法及其在定子匝间短路故障诊断中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(15): 119-123.

收稿日期: 2017-09-27