

风力发电机齿轮故障诊断仿真与模拟试验*

郭 华, 罗 建, 官秀芳, 徐 斌, 时献江

(哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨, 150080)

摘要 为了探讨无传感器故障诊断方法在风力发电机传动系统故障中的感应机理,在 SIMULINK 环境下,建立了一个双馈风力发电机仿真模型,对风力发电机传动系统故障在发电机定子电流中的响应过程进行理论分析。研制专用的风力发电机组模拟试验台,进行传动系统的断齿故障模拟试验与验证。利用 Hilbert 变换的幅值和频率解调方法,分析仿真及模拟试验结果,表明定子电流主要反映传动系统的扭矩或速度波动特征,将其用于风力发电机传动系统齿轮断齿类故障的监测与诊断是可行的。

关键词 风力发电机; 齿轮故障; 仿真; 无传感器诊断

中图分类号 TP273

引 言

风力发电机单体发电功率有限,目前多采用群体组网运行方式,安装地点分散、偏远,且主机安装于高高的机架上,使得常规振动检测与诊断技术应用受到一定的限制^[1]。针对这种情况,利用各种间接方法进行风力机故障诊断的研究逐渐增多,例如利用现有 SCADA 数据间接诊断方法、模型法、声发射和电参数方法等^[1]。其中,利用风力发电机电参数(如电压、电流等)进行机械故障诊断方法引人注目。由于该方法不需要在设备上安装振动等物理量传感器,仅使用电压或电流变换器,所以也称为无传感器诊断方法^[2]。该方法的主要优点是可以在变电所集中安装电参数变送器,且成本低、维护方便。

Royo 等^[3]建立了一个笼型异步发电机系统的简易模拟实验台,证明定子匝间短路、转子断条故障和电机轴承故障在定子电流频谱中均有响应。Yang 等^[4]建立了一个较为完善的风力发电机组故障模拟试验台,通过采集发电机电流、电压及功率等参数,利用小波变换等方法证明了电参数诊断方法的优点。Gong 等^[5]提出了采用定子电流信号的小波滤波方法,实现风力发电机轴承的故障诊断。Amirat 等^[6-7]分别采用定子电流的幅值解调法和经验模态分解方法进行双馈感应发电机轴承故障诊断,取得了较好结果。这些研究成果表明,无传感器诊断方法在风力发电机故障诊断中是可行的。

上述研究多限于发电机本身机械或电气方面的

故障,其实,风力发电机组是一个机械结构庞大、电气控制系统复杂的机电一体化系统,目前缺乏一个简单有效的机械与电气两方面的整机故障检测与预警手段,仅针对发电机本身故障诊断研究也缺乏全面性。为此,笔者以风力发电机传动链中的齿轮故障诊断为对象,从理论仿真和模拟试验两个方面,研究无传感器诊断方法的故障感应机理,探讨其在风电机组传动链机械故障诊断中应用的可行性。

1 双馈风力发电机的仿真模型

据统计,在当前市场上占统治地位的是双馈式变速恒频风力发电机(doubly fed induction generator,简称 DFIG)^[1],因此,文中以 DFIG 为研究对象,建立仿真模型如图 1 所示。图中双馈风力发电机模型由绕线式异步电机代替,由 PWM 功率变频器模块给转子供电。发电机的定子绕组接三相阻性负载,机械输入取转速调节型,参考坐标系取同步参考坐标系,初始状态均为 0。仿真基本参数如表 1 所示。

稳态仿真运行时,转子励磁频率 $f_2 = 7 \text{ Hz}$,转子转速 $\omega_r = 135.088 5 \text{ rad/s}$,此时发电机定子发电频率 f_1 为

$$f_1 = pf_r + f_2 = p \frac{\omega_r}{2\pi} + f_2 = 2 \frac{135.088 5}{2\pi} + 7 \approx 50 \text{ Hz} \quad (1)$$

其中: f_r 为发电机轴转频; p 为发电机极对数,本例为 2。

* 国家自然科学基金资助项目(51275136)

收稿日期:2014-09-14;修回日期:2014-10-31

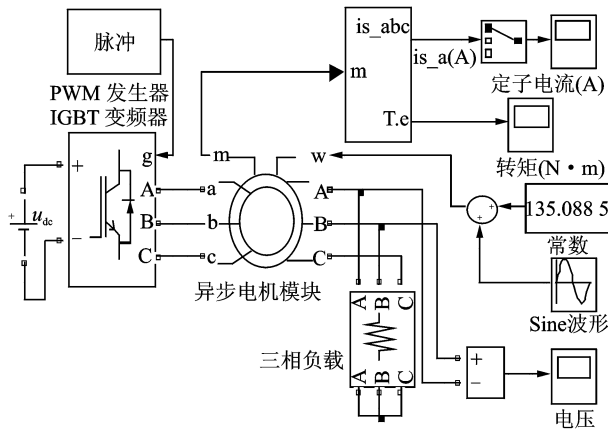


图 1 双馈感应发电机及控制系统仿真模型

Fig. 1 The simulation model of doubly fed induction generator and control system

表 1 发电机仿真基本参数表

Tab. 1 The basic parameters of generator simulation

名称	电阻/ Ω	电感/H	互感 L_m /H
定子	1.918 8	0.241 22	0.234
转子(折算到定子侧)	2.571 2	0.241 22	0.234

2 模拟试验台设计

国内关于风力发电模拟平台多采用绕线式异步电机代替双馈发电机,控制系统采用自己研制的专用双向交-直-交变频器^[8-9]。考虑到故障诊断模拟系统对发电机控制系统的性能要求较低,且不需要并网,风轮只要在某些稳态条件下运转即可,故尝试采用通用三相变频器替代双向交-直-交变频器,仅给转子单向励磁。

试验台的整体结构如图 2 所示,对应的试验台图片如图 3 所示。由交流异步电动机、增速齿轮箱和模拟 DFIG 发电机、控制系统、数据采集系统和计算机组成。交流异步电机模拟风机叶轮,配合三相交流变频器控制转矩和转速。绕线式三相异步电动机作为双馈感应发电机使用,其定子绕组与三相阻性负载连接,转子侧由通用变频器单向给转子绕组励磁。两台电机的功率均为 1.5 kW,磁极对数 p 均为 3,额定转速为 920 r/min。采用齿轮组模拟风力发电机组的增速箱,试验中准备了两组齿轮组,一组为正常齿轮,另一组其中有一个断齿,电动机端齿轮齿数为 23,发电机端齿轮齿数为 34,增速比约为 1.478。

数据采集系统由 NI 数据采集板 PCI-6251, HCT204R 型霍尔电流传感器、TR 系列电涡流位移

传感器、高低通滤波器及计算机等组成。其中电涡流传感器安装在发电机侧齿轮端(如图 2,3 所示),用于检测发电机轴的转速或扭矩波动,并与安装在发电机定子侧的电流传感器测量结果相比较。

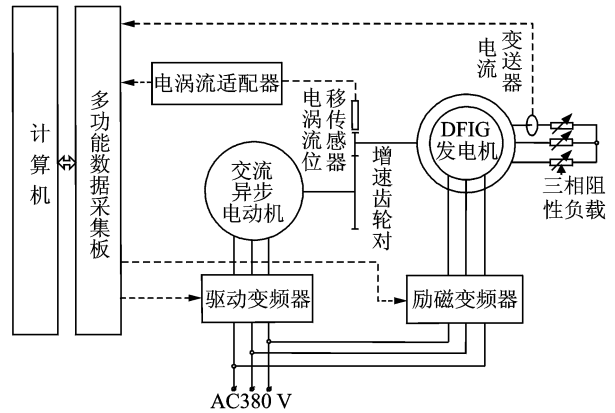


图 2 风电机组齿轮故障模拟试验台控制系统示意图

Fig. 2 Control system diagram of the wind turbine gear fault simulation platform



图 3 风电机组齿轮故障模拟试验台照片

Fig. 3 The photo of the wind turbine gear fault simulation platform

3 仿真结果分析

3.1 正常运行状态

当转子侧通过 PWM 变频器供以 7 Hz 频率励磁电流,双馈感应发电机转速恒定时,定子电压、电流以及电磁转矩的时域波形如图 4 所示。针对其中定子电流的稳态信号,利用 FFT 变换及希尔伯特变换幅值和频率解调原理^[10],计算出的幅值谱、幅值包络谱和瞬时频率解调谱如图 5 所示。可见定子电流信号是一个基本正常的频率为 50 Hz 的简谐信号。在幅值包络谱和瞬时频率解调谱的低频段没有明显的频率成分,只有一个 15.97 Hz 的未知频率成分。

3.2 模拟齿轮断齿故障状态

一般认为,断齿部分啮合时会产生传动轴的扭矩或速度的瞬时波动,并通过传动机构传递给发电机转子,引起定子电流的调制现象。在电机模型的

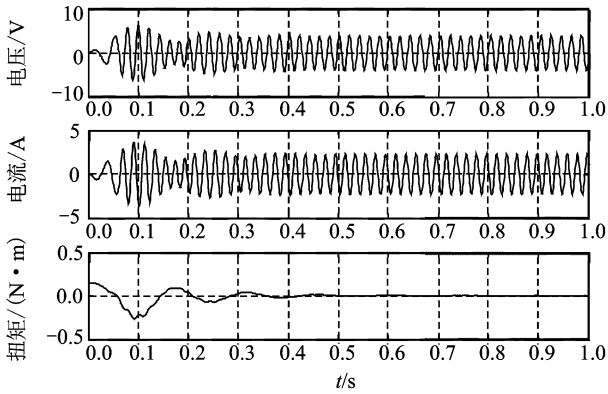


图 4 正常时发电机启动过程各参数时域波形
 $(f_2=7\text{ Hz}, \omega_r=135.088\ 5\text{ rad/s})$

Fig. 4 Signals of each parameters in the process of generator startup($f_2=7\text{ Hz}, \omega_r=135.088\ 5\text{ rad/s}$)

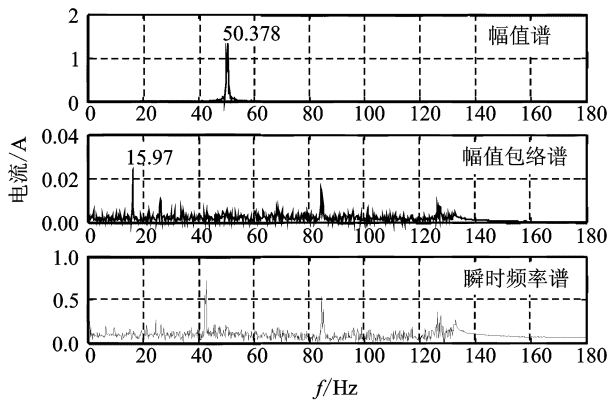


图 5 正常时发电机稳态定子电流频谱
 $(f_2=7\text{ Hz}, \omega_r=135.088\ 5\text{ rad/s})$

Fig. 5 Spectrum of generator steady-state stator current in normal($f_2=7\text{ Hz}, \omega_r=135.088\ 5\text{ rad/s}$)

转速输入端(图 1 中异步电机模块 W 端)输入一个变化的转速信号,就可以模拟这种故障。仿真时,转子转速为 $135.088\ 5+5\sin(31.4t)\text{ rad/s}$,转子供电频率 7 Hz 。此时定子电压、电流以及转子电磁转矩的波形如图 6 所示,与图 4 相比,定子电流有明显调制现象,电磁转矩曲线也发生了同频的波动现象。

稳态时的定子电流信号的幅值谱、幅值包络谱和瞬时频率解调谱如图 7 所示,在幅值谱中可以明显分辨出发电主频率(49.98 Hz)上调制有边带成分,在瞬时频率谱中可以更清楚地看到转速波动的 3.875 Hz 及其倍频成份,说明在离网状态下,断齿故障引起的速度波动导致发电频率产生了波动,其波动频率与故障频率一致。

4 模拟试验结果分析

在图 2,3 所示的试验台上进行了模拟试验,试

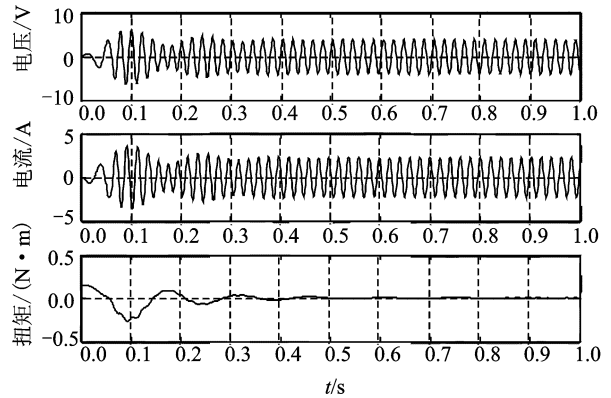


图 6 模拟故障时发电机启动过程各参数时域波形
 $(f_2=7\text{ Hz}, \omega_r=135.088\ 5\text{ rad/s}+5\sin(31.4t)\text{ rad/s})$

Fig. 6 Signals of each parameters in the process of generator startup when simulation fault

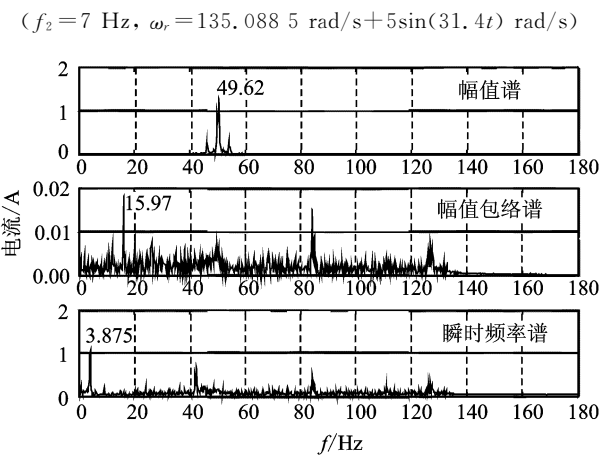


图 7 模拟故障时发电机稳态定子电流频谱

$(f_2=7\text{ Hz}, \omega_r=135.088\ 5\text{ rad/s}+5\sin(31.4t)\text{ rad/s})$

Fig. 7 Signals of generator stator current when simulation fault

$(f_2=7\text{ Hz}, \omega_r=135.088\ 5\text{ rad/s}+5\sin(31.4t)\text{ rad/s})$

验时,发电机转子供电电压为 100 V ,频率 36.5 Hz ,电动机定子供电频率 10 Hz ,发电机三相总负载功率为 120 W ,测得发电机定子侧的相电流信号的频谱如图 8 所示。为了估计实际发电机转子的转速及波动情况,采用图 2,3 所示的电涡流位移传感器检测发电机侧齿轮齿端的位移信号频谱图如图 9 所示。从幅值谱可以看到 106.4 Hz 的主频,为齿轮的齿通过频率,等于齿轮对的啮合频率,将其除以小齿轮齿数 23 可以得到发电机轴转频 $f_r=6.626\text{ Hz}$,根据式(1)可得发电频率应为 48.878 Hz ,与图 8 的幅值谱中的 48.84 Hz 相同。从图 9 中的速度信号的幅值包络谱和瞬时频率谱还可以看到 2.91 和 4.61 Hz 的幅值调制成分和频率调制成分,说明断齿故障使得发电机轴转频产生了调制现象,其中

2.91 Hz对应大齿轮的转频,4.61 Hz对应小齿轮的转频,即发电机的转频。

从图8的电流信号的幅值包络谱和瞬时频率解调谱,可以看出和图9对应的大小齿轮轴的转频2.91和4.61 Hz,其中4.61 Hz是发电机轴的转频。由于发电机的安装问题,其多少存在一定的不平衡和不对中现象,所以会出现这个频率成分;2.91 Hz为模拟风轮轴的转频,正常齿轮时,在发电机定子电流中不应该出现此频率成分,但是由于该轴上的大齿轮有1个断齿,导致每转产生一次冲击,与发电机轴产生转频调制,从而反映在发电机定子电流信号中。

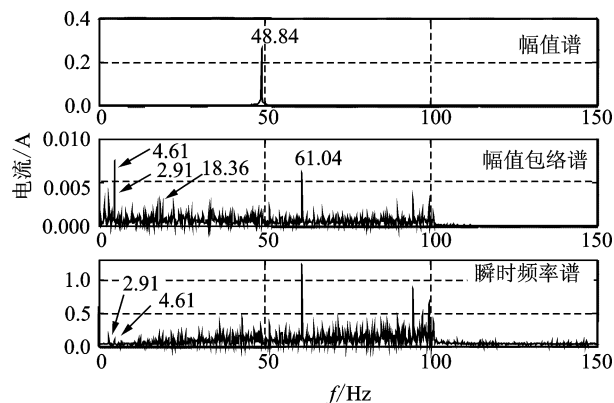


图8 模拟断齿故障时发电机定子电流信号频谱($f_2 = 7$ Hz,电动机定子供电频率10 Hz)

Fig.8 Spectrum of generator stator current when simulation broken teeth fault ($f_2 = 7$ Hz, Power frequency of motor is 10 Hz)

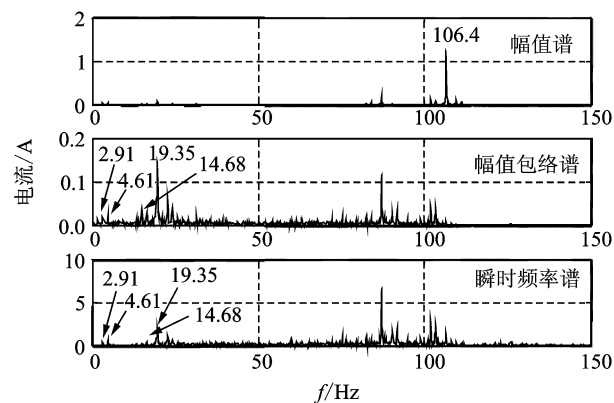


图9 模拟断齿故障时发电机侧齿轮速度波动信号频谱($f_2 = 35$ Hz,电动机定子供电频率10 Hz)

Fig.9 Spectrum of generator side gear speed fluctuation when simulation broken teeth fault ($f_2 = 35$ Hz, Power frequency of motor is 10 Hz)

理论仿真和试验验证,说明发电机定子电流信号可以准确反映传动系统的机械故障信息,且电流信号的频率成分与齿轮的波动速度传感器信号相近,说明无传感器诊断法主要以扭矩或速度波动形式感应机械传动系统的故障信息,因此,将其用以风力发电机传动系统的故障诊断是可行的。但是,由于信号中还包含有多种电气控制信号成分,有时机械故障信息并不是很明显,这还需要采用高级信号处理方法才能解决。

参 考 文 献

- [1] 陈雪峰,李继猛,程航,等. 风力发电机状态监测和故障诊断技术的研究与进展[J]. 机械工程学报,2011,47(9): 45-52.
Chen Xuefeng, Li Jimeng, Cheng Hang, et al. Research and application of condition monitoring and fault diagnosis technology in wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering,2011,47(9): 45-52. (in Chinese)
- [2] 孟庆丰,焦李成,费晓琪. 感应电机驱动的机械系统无传感器监测方法研究[J]. 振动、测试与诊断,2004,24(4): 257-261.
Meng Qingfeng, Jiao Licheng, Fei Xiaoqi. Sensorless monitoring of machinery system driven by induction motors[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004,24(4): 257-261. (in Chinese)
- [3] Royo J, Arcega F J. Machine current signature analysis as a way for fault detection in squirrel cage wind generators [C]// 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Cracow, Poland: IEEE Computer Society, 2007,383-387.
- [4] Yang Wenxian, Tavner P J, Crabtree C J, et al. Cost-effective condition monitoring for wind turbines [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 263-271.
- [5] Gong Xiang, Qiao Wei, Zhou Wei. Incipient bearing fault detection via wind generator stator current and wavelet filter [C]// 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ: IEEE Computer Society, 2010:2615-2620.
- [6] Amirat Y, Choqueuse V, Benbouzid M E H. Wind turbines condition monitoring and fault diagnosis using generator current amplitude demodulation[C]// 2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition, Manama, Bahrain: IEEE Computer Society, 2010: 310-315.

5 结束语

通过对一个双馈风力发电机故障模拟试验台的

- [7] Amirat Y, Choqueuse V, Benbouzid M E H, et al. Bearing fault detection in DFIG-Based wind turbines using the first intrinsic mode function[C]//19th International Conference on Electrical Machines. Rome Italy: IEEE Computer Society, 2010:1-6.
- [8] 乔明, 林飞, 孙湖, 等. 基于异步电机的风力机模拟实验平台的研究[J]. 电气传动, 2009, 39(1): 40-43. Qiao Ming, Lin Fei, Sun Hu, et al. Development of experimental platform for wind power generation using induction machine[J]. Electric Drive, 2009, 39(1): 40-43. (in Chinese)
- [9] 姚春光, 潘卫明, 徐殿国, 等. 基于鼠笼式异步电机的风机模拟实验平台研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6): 23-25. Yao Chunguang, Pan Weiming, Xu Dianguo, et al. Development of experimental platform for wind power-generation using induction machine[J]. Power Electronics, 2010, 44(6): 23-25. (in Chinese)
- [10] 时献江, 郭华, 邵俊鹏. 基于无传感器检测方法的机械系统扭振试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(3): 352-355. Shi Xianjiang, Guo Hua, Shao Junpeng. Torsional vibration test of mechanical system using sensorless detection method[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(3): 352-355. (in Chinese)



第一作者简介:郭华,女,1962年12月生,高级实验师。主要研究方向为机电一体化。曾发表《Development of auto-correct system towards circle precise carbon-film potentiometer》(《Key Engineering Materials》2014, Vol. 621)等论文。

E-mail: ghwgl@sina.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为 EI Compendex 数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价 20 元,全年 120 元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街 29 号 邮政编码:210016

电话:(025)84893332

传真:(025)84893332 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn

网址:http://zdcns.nuaa.edu.cn

