

特约稿件

无传感器诊断方法及在风力发电中的应用与展望

时献江, 罗 建, 宫秀芳

(哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对风力发电机运行环境复杂, 常规振动诊断技术应用困难问题, 在介绍无传感器检测与诊断技术原理及发展的基础上, 从信号处理和仿真分析等角度详细分析了电机定子电流对齿轮、轴承等机械故障的感应机理. 介绍微弱机械故障信息的预处理方法等研究成果, 综述其在风力发电机组机械故障诊断应用的可行性. 并对其在风力发电机组传动系统故障诊断中的存在的问题与应用进行了展望.

关键词: 风力发电机; 传动系统; 无传感器诊断; 定子电流

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)06-0082-06

Application of Sensor-less Diagnosis Approaches in the Wind Turbine Generator

SHI Xian-jiang, LUO Jian, GONG Xiu-fang

(School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Traditional mechanical fault diagnosis methods using vibration metrics face many difficulties in the application of the wind turbine generator due to complicated operation environments. Therefore, in this paper, we adopt the innovative approach based on the technology of wireless sensor diagnosis. We investigate into how the electric current in the motor stator reacts to the mechanical faults from components such as gears and bearings by using advanced signal process and simulations techniques. This paper also summarizes some experience in how to preprocess the minor mechanical faults information and its feasibility as well as prospects in the fault diagnosis of wind turbine drive train system.

Key words: wind turbine generator; drive train; sensor-less diagnosis; stator current; summary

0 引 言

目前, 风力发电作为一种洁净的可再生能源技术受到了世界各国的关注, 特别是近 10 年来, 世界风力发电装机量增长迅猛, 截至 2009 年底, 中国风

电新增装机达到 1 380 万千瓦, 超过美国, 成为当年新增风电装机容量世界第一的国家. 到 2020 年, 中国风电累计装机预计可以达到 2.3 亿千瓦, 相当于 13 个三峡电站, 总发电量可以达到 4 649 亿千瓦时, 相当于取代 200 个火电厂^[1].

与风电装机量迅猛发展的现状相比, 国内风电

收稿日期: 2014-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(51275136).

作者简介: 时献江(1962—), 男, 博士, 教授, E-mail: hustsxj@hrbust.edu.cn;

罗 建(1989—), 男, 硕士研究生;

宫秀芳(1990—), 女, 硕士研究生.

机组状态监测和故障诊断技术的研究与应用尚处于起步阶段,远远跟不上风电设备的发展速度. 由于风电场一般地处偏远,位置分散,机组又位于高高的塔顶,常规振动(加速度,位移)传感器的安装与维护困难,信号采集与传输不便,使得机组的监测与诊断工作推广困难. 随着国内风电机组装机量日益增长,在役机组运行时间加长,机组出现故障导致系统停止运行的现象频繁发生. 另外,由于风电行业的特殊性,设备运行与维护费用昂贵,据统计,风电设备运行维护费用超过总收益的10%~15%^[4],而一次齿轮箱的更换工作就要花费上百万元^[5]. 因此,目前迫切需要研究一种简便易行的故障监测与诊断方法,及时发现故障初期征兆,防止严重故障或恶性事故的发生.

针对这种情况,考虑到风电机组以发电机作为机电转换器,相应的机组故障信息也会耦合在发电机电气回路中,一种定子电流分析法(motor current signature analysis, MCSA)的研究得到了国内外学者的瞩目,该方法不需要在设备上安装振动等物理传感器,仅使用电压或电流变换器,所以也称为无(振动)传感器故障诊断方法(sensorless fault diagnosis SFD),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,可以克服上述振动诊断技术存在的诸多问题,这对降低监测与系统维护成本,保证风电机组安全运行,高效利用风力资源,都有着非常重要的意义.

本文在追溯、分析定子电流分析法在机械驱动及传动系统故障诊断研究的轨迹及进展基础上,仅对其在风力发电机组机械故障方面应用的可行性进行归纳分析、对其应用前景进行展望

1 无传感器故障诊断方法简介

定子电流分析法,或称为无传感器检测方法,是根据发生故障时由于电机内部不平衡原理造成的磁场变化,磁场的变化引起定子电流成分的改变,通过研究其特征与故障的关系,可以对发生的故障进行明确检测诊断,能够检测到其他方法所不能检测到的故障

无传感器检测技术是近20年才发展起来的一种新技术^[6-8],其优点是含有反映电机运行过程中比较多的信息量. 相对于其它诊断方法来说,定子电流法诊断电机故障不需要使用其它的物理量传感器,电机自身所反映出的信息量就相当于传感器的

作用,整个系统的运行过程的故障情况在定子电流成分中反应的淋漓尽致^[9]. 定子电流信号不同于振动信号,没有外界振动信号的干扰,定子电流法不受环境的影响,直接从定子绕组上采集电流,精度较高,是比较理想的检测方法^[8-9]. 因为定子电流特征分析法在几乎所有工业应用上容易实现,所以一直被认为是一个对机械监测来说很好的备选方案^[10].

定子电流法缺点是:由于属于间接测量方式,其中包含的故障信息成分较弱且各种信息交叉、耦合,电流信号以供电频率为主,因此微弱的有价值成分在电流信号分析中的提取相当困难,影响分析的精度和故障识别的效果.

理论上,无传感器检测方法可以检测电机的电气和机械两方面的故障,限于专业及篇幅,本文仅局限于机械传动系统的研究范围.

2 无传感器检测方法的国内外研究现状

在20世纪70年代开始,无传感器检测技术就开始用于交流电动机的自身故障,如断条、偏心,定子匝间短路等故障的检测与诊断^[11]. 另外,对电机拖动系统的故障,如转子失衡^[12]、滚动轴承和齿轮故障^[13-14]和转子扭转振动^[15-16]等也进行了广泛地研究与应用. 另外,随着计算机仿真技术的发展,关于断条等故障诊断的仿真分析文献也在逐渐增多^[17-18]. 而且在不同供电方式下的研究案例也在增多,罗铭等^[19]采用仿真方法研究了变频环境下电机断条故障诊断的可行性,胡文彪等^[20]通过理论分析,解释了感应电机转子故障特征在交直交变频器中的传播过程与规律,为从变频器的整流器交流侧诊断感应电机转子故障提供了理论依据.

由此可以看出,无传感器检测方法的研究,已经从电动机本身的故障诊断逐步扩展到电机驱动设备的故障诊断领域,供电方式从一般的公共供电电网扩展到采用变频器的局部变频供电环境. 研究内容也从开始的应用性研究,逐步深入到故障的模拟、仿真等理论性研究. 特别是由于机械故障在电机电流中的感应机理尚不是很清楚,近年来集中于这方面的理论与实验研究也在逐渐增多.

2.1 机械部件故障诊断的模型与仿真研究

除了电机本身的故障(如断条、轴承等故障)感应机理外,驱动(或传动)系统的轴、齿轮和滚动轴承等机械部件的故障检测与感应模型研究也是热点.

滚动轴承故障检测模型主要有两种,一种是径

向振动传递模型,最早由 SCHOEN 等^[21]提出,认为定子轴承故障频率时将产生一个旋转偏心率,该偏心率将导致电机感应电流的周期性变化,在定子电流中产生一个额外的频率 f_{bf} :

$$f_{bf} = f_s \pm kf_c \quad (1)$$

其中 f_s 为电机定子供电频率, f_c 为故障频率, $k=1,2,\dots$.

另一种模型是扭振传递模型.一般认为,断齿部分啮合时或滚珠通过一个内外圈的坑时产生瞬时频率变化,从而产生扭矩的瞬时波动.多数学者认为这个波动成分与电网频率是调幅关系^[14-16],但是,BLODT^[22]在详细分析了两种传递模型后,通过电磁场的数学分析,证明了这种扭矩的周期性变化会引起定子电流的相位调制.

在齿轮故障诊断方面,有许多基于 MSCA 方法的文献报道,研究表明,齿轮的旋转以及啮合频率分量均可在定子电流中检测到^[23-26]. Mohanty 等^[23]通过幅值和频率解调来监测转轴旋转频率,并利用离散小波变换某一特定层次的谱来诊断齿轮故障.而在新的文献中,基于扭转振荡传递作用的,定子电流中旋转和啮合频率分量的感应模型也被提出和验证^[25-26].

可见,目前主要有两种模型(径向振动和扭振)用于解释齿轮和轴承故障信息的传递和感应过程,对于扭振模型也有幅值调制和相位调制的两种解释.

2.2 微弱故障信息提取方案研究

另一方面,电机电流信号以供电频率为主,真正的故障信息成分却较弱,因此如何提取微弱的故障信息,分离无用的供电频率成分,也是无传感器检测方法的研究热点.最常见的是细化谱的边带分析、Hilbert 变换包络谱和细化包络谱法等^[15-16,27],其中 Hilbert 变换包络谱在单一故障情况下能突出故障特征,但在复合故障情况下容易产生交叉项.小波分析应用于异步电动机的故障诊断也有多篇文献报道^[24-25],但该方法主要适合于时频分析,所以多用于电机的起动等过渡过程分析.

上述方法都属于针对单一定子电流信号的分析方法.另外,同时采集电流、电压信号,经适当的坐标转换或估计算法来突出故障特征,是近年来的研究发展方向.如基于 Park's 矢量方法^[28],基于瞬时功率频谱分析方法^[29-30]等.胡笃庆等^[31]采用解析法提出了将三相电流变换为两相磁化电流和扭矩电流,变换后的磁一扭矩电流可更好的用于检测故

障特征.孟庆丰^[3]提出了谐波导纳的概念,利用频域内的各次谐波的电流与电压之比——谐波导纳,来进行电机驱动系统的不平衡故障的微弱特征提取和诊断. IBRAHIM 等^[32]则提出了利用电压信号估算标准电流,并与带有故障信息的工作电流相减,以减少电网频率干扰的类似于维纳滤波的方法.万年红等^[33]则开发了基于类似原理的,但采用硬件实现的工频信息剔除装置,提高后续数据采集和故障分析的信噪比.赵志科等^[33]则采用自适应滤波与极窄带陷波器去除 50Hz 电网频率成分,削弱其频率泄露成分对边带估计的影响.另外,还有学者^[34-35]根据电流和电压信号估计电磁转矩来进行故障诊断,有学者^[35]认为电磁转矩包含了电机定转子全部磁链和电流的相互作用,其对电机转子故障非常敏感,理论上,电磁转矩信号是转子本体电流之外的最能反应转子故障特征的参数.

从上述研究进展可以看出:目前的研究方法多倾向于采用各种前处理方法,而且为了不失电流诊断法无振动传感器的优势,多数仅采用电压、电流联合的方法来估计瞬时功率和扭矩、以及像谐波导纳等参数,解决电流信号中的故障成分较弱的缺陷.

3 无传感器检测方法在风力发电机组中研究及应用现状

在发电机的无传感器检测技术研究方面,国内外的相关文献相对较少,这和研究对象——发电机有一定的关系.一般情况下,发电机大多是大型的同步发电机,在火电或水电厂运行,数量少,且多数配备有完善的振动监控系统,使用无传感器检测技术并没有优势可言.但是,随着风力发电的迅猛发展,近几年来,这一状况逐渐发生了变化,关于风力发电机组无传感器检测技术研究的文献及报道开始呈现逐渐增长的趋势.

风力发电机组一般按照风力机转速进行分类,可分为恒速运行风力机和变速运行风力机.目前常用的型式有:笼型恒速发电机、双馈式变速恒频风力发电机(doubly fed induction generator,DFIG)、永磁同步发电机直驱风力机和永磁同步风力发电机.据统计^[1],当前在风力发电商业市场上占统治地位的是双馈感应发电机和多级增速齿轮箱的概念,而最常用的发电机为双馈感应电机和鼠笼感应电机.一个典型的 DFIG 风电机组的机械和控制部分组成如图 1 所示.机械部分包括叶片、主轴和主轴承,增

速齿轮箱和发电机等. 发电机定子与电网直接连接, 用于发电, 转子通过两个背靠背的交-直-交变频器连接到电网中. 机组可在较大速度范围内运行,

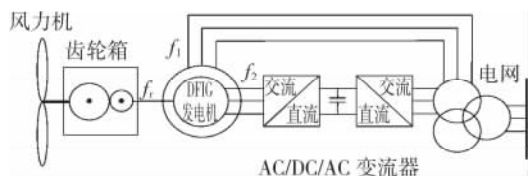


图1 DFIG 风力发电机组的基本组成

转子与电网之间实现能量双向传输. 当风力机运行在超同步转速时, 功率从转子流向电网; 而当运行在次同步或同步转速时, 功率从定子流向转子.

目前, 风力发电机组机械部分的故障诊断主要以振动检测方法为主^[2-3], 该方法主要通过安装在风力发电机组上的振动传感器在线采集, 或采用手持式测振仪定期进入机舱采集与存储数据. 前者需要安装大量的传感器, 成本较高, 传感器的可靠性要求也高; 后者需要人工逐个爬上风机塔顶的机舱内进行测试, 高空作业危险, 测试人员劳动强度大. 为此, 国内外一些学者^[36-38,3]开始研究采用简便、低成本的监测诊断方法, 其中一项就是无传感器故障检测技术.

国外学者 AHMAR 等^[39]比较分析了常规电流信号分析法和先进的信号分析法(如小波分析法), 分别对发电机的偏心, 断条和轴承等故障诊断进行了实验研究, 认为电流法需要进行更细致先进的信号处理方法才有效. Royo 等^[40]建立了一个如图2所示笼型异步发电机系统的模拟实验台, 通过试验方法研究和分析了定子匝间短路、转子断条故障和轴承故障的定子电流频谱, 证明了无传感器检测方法的可行性. 但是其试验台结构简单, 没有中间的增速齿轮传动机构.

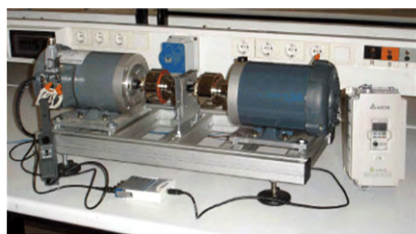


图2 风力发电系统的实验室模型

英国杜伦大学的研究团队^[41-43]建立一个比较完善的风力发电机组故障模拟试验台, 进行了振动与电参数两方面的故障诊断对比研究. 其中文^[5]报道了采集发电机电流、电压及功率参数, 利用小波变

换方法进行机组故障诊断的试验与分析结果, 证明了发电机电参数诊断方法的优点. VIEIRA^[44]也从电压监测入手, 建立了故障模拟试验台, 并利用主分量分析(PCA)和人工神经网络方法(ANN)进行了发电机组轴承的无传感器检测方法的研究, 提出了该方法还需要进一步借助有效的信号处理手段来进行特征提取的意见.

文^[45]提出了一种采用小波滤波方法实现风力发电机轴承诊断的方法, 作者还在文^[46]中使用转速同步采样方法, 解决直驱风力发电机变速时的轴承故障诊断问题. AMIRAT^[47-48]采用定子电流的幅值解调法和基于经验模态分解的本征模态函数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, 无传感器检测技术在风力发电机故障诊断中也是完全可以应用.

国内风力发电机组的故障诊断多以振动方法为主, 采用无传感器检测法的研究报道较少^[3], 且多为初步性的研究. 华中科技大学的赵龙建立了一个以发电机电信号为主, 辅助监测振动和温度信号的风力发电机故障诊断监控系统, 并进行了初步的试验研究^[49]. 中南大学廖力清教授的研究团队^[19,35,38]研究、分析了双馈、笼型和直驱感应发电机组发生机械故障和电气故障时的电流、电压信号故障特征, 对发电机的主部件故障状态建模仿真, 验证了发电机组故障时电流、电压信号故障特征量的准确性, 但是没有进行更进详尽的理论分析.

4 无传感器检测方法在风力发电机故障诊断中的应用前景及存在问题

从以上综述可以看出, 无传感器检测技术在风力发电机组故障诊断领域有着广泛的应用前景, 国外目前这方面的研究也仅处于起步阶段, 国内这方面的研究更是凤毛麟角. 由于风力发电系统主要机型采用双馈或笼型异步发电机, 和异步电动机的结构与原理很相近, 因此, 如果能够借鉴无传感器检测方法在异步电动机及驱动系统故障诊断中的丰硕研究成果, 进行风力发电机组的机械故障诊断是顺利成章的事情, 这即顺应风力发电故障诊断技术研究的迫切需要, 同时也为无传感技术的发展提供了一个新的研究方向.

由于无传感器检测方法本身属于间接诊断技术的范畴, 不管是电动机还是发电机, 在故障感应机理和微弱故障特征提取方面, 都还存在一定的不足, 有

必要进行更深入和更系统的研究,例如:

1) 机械故障,特别是传动或驱动系统机械故障在电机电信号中的传递过程和耦合机理尚不是完全清楚,国内外这方面的研究结论尚不统一,缺乏一个统一的、适合各种传动部件的理论分析和解释模型.而对与发电机系统,特别是风力发电机领域,国内外基本还是空白,需要各方进行系统深入的研究;

2) 如何有效地提取电流信号中的微弱机械故障信息有待进一步的研究.目前的趋势是综合电流、电压和功率等信号,采用特殊的预处理估计算法.实际上,由于发电机可以产生并网或独立于电网的定子电压、电流信号,从这方面讲,本项目更有利于微弱故障信息的分离与提取方法研究.

参 考 文 献:

- [1] 程明,张运乾,张建忠. 风力发电机发展现状及研究进展 [J]. 电力科学与技术学报, 2009, 3(24): 2-8.
- [2] LU Bin, LI Yaoyu, WU Xin, et al. A Review of Recent Advances in Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis [C]. Power Electronics and Machines in Wind Applications, PEMWA 2009. 2009: 1-7.
- [3] 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.
- [4] KLIMAN G B, PREMIERLANI W J, YAZICI B, et al. Sensor-less on-line Motor Diagnostics [J]. IEEE Trans. On Computer Application in Power, 1997(4): 39-43.
- [5] RILEY C M, LIN B K, HABETLER T G, et al. A Method for Senso-less On-line Vibration Monitoring of Induction Machines [C]. //Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference. San Diego, 1996: 201-207.
- [6] 孟庆丰,何正嘉. 基于谐波阻抗的感应电机系统无传感器监测方法研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2001, 21(2): 91-94.
- [7] LI C. James, MA Jun. Wavelet Decomposition of Vibration for Detection of Bearing-localized Defects [J], DT&Interation, 1997, 30, (3): 143-149.
- [8] PRABHAKARS, MOHANTYA R, SEKHARA S. Application of Discrete Wavelet Transform for Detection of Ball Bearing Race Faults [J]. Tribology International, 2002, 35: 793-800.
- [9] BASAK D, TIWARI A, DAS S P. Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Electrical Machines-A eview [C]. // In Proc. IEEE ICIT, Mumbai, 2006: 3061-3066.
- [10] SHAHIN Hedayati Kia, HUMBERTE Henao. A Modeling Approach for Gearbox Monitoring Using Stator Current Signature in Induction Machines [C]. // Industry Applications Society Annual Meeting, 2008: 1-6.
- [11] 魏云冰,李留杰. 基于定子电流的异步电动机转子故障诊断方法综述 [J]. 水利电力机械, 2007, 29(12): 179-180.
- [12] 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.
- [13] IBRAHIM A, EL BADAOU M., GUILLET F, et al. Electrical Signals Analysis of an Asynchronous Motor for Bearing Fault Detection [C]. // IECN 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 2006: 4975-4980.
- [14] 苏恒,洪迈生,熊诗波. 通过监测电机的定子电流实现齿轮的故障诊断 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(10): 1414-1416.
- [15] 赵文生. 基于电机电流信号的扭转振动测量及应用 [D]. 太原: 太原理工大学, 2006: 100-200.
- [16] 时献江,郭华,邵俊鹏. 基于无传感器检测方法的机械系统扭转试验研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(3): 352-355.
- [17] 蒋建东,魏臻珠,冯涛. 感应电机鼠笼转子断条故障的仿真分析 [J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(2): 81-82.
- [18] 马丽强. 笼型异步感应风电机组故障诊断中的电参数分析研究 [J]. 长沙: 中南大学, 2011: 5.
- [19] 罗铭,刘振兴,黄菲. 变频电源笼型异步电机断条故障诊断仿真 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12(2): 139-146.
- [20] 胡文彪,夏立,吴正国,等. 感应电机转子故障特征在交直交变频器中的传播 [J]. 振动、测试与诊断, 2010: 418-475.
- [21] SCHOEN R R, HABETLER T G, KAMRAN F, et al. Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring [J], IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(6): 1274-1279.
- [22] BLODT M, GRANJON P, RAISON B, et al. Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors using Stator Current Monitoring [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(4): 1813-1822.
- [23] MOHANTY A R, KAR C. Fault Detection in a Multistage Gearbox by Demodulation of Motor Current Waveform [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1285-1297.
- [24] KAR C, MOHANTY A R. Monitoring Gear Vibrations Through Motor Current Signature Analysis and Wavelet Transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(1): 158-187.
- [25] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G A. Gearbox Monitoring Using Induction Machine Stator Current Analysis [C]. // in Proc. of IEEE SDEMPED'07, 2007: 149-154.
- [26] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G A. A Modeling Approach for Gearbox Monitoring Using Stator Current Signature in Induction Machines [C]. // 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2008: 1-6.
- [27] 时献江,张春喜,邵俊鹏. 异步电机断条故障诊断的细化包络方法 [J]. 电机与控制学报, 2008, 12(2): 139-142.
- [28] ZAREI J, POSHTAN J. An Advanced Park's Vectors Approach for Bearing Fault Detection [C]. // IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006: 1472-1479.
- [29] IBRAHIM A, El Badaoui M, Guillet F. A New Bearing Fault Detection Method in Induction Machines Based on Instantaneous Power Factor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,

- 2008, 55(12): 4252–4259.
- [30] 阳同光, 将新华, 付强. 瞬时功率频谱分析在牵引电机转子故障诊断的应用研究 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(10): 96–98.
- [31] 胡笃庆, 秦国军, 夏鲁瑞. 一种消除工频分量的电机电流特征分析算法 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(8): 53–55.
- [32] 万年红, 杨大雷, 宋杰峰. 一种提取电机电流信号故障特征的方法 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(S1): 168–169.
- [33] 赵志科, 王新. 自适应滤波与极窄带陷波器在异步电机转子断条故障诊断中的应用 [J]. 煤矿机械, 2011, 32(8): 258–260.
- [34] KIA S H, HENAO H, CAPOLINO G A. Torsional Vibration Assessment Using Induction Machine Electromagnetic Torque Estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 209–217.
- [35] 周鲲鹏. 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: 6.
- [36] DANESHI-FAR Z, CAPOLINO G A, HENAO H. Review of Failures and Condition Monitoring in Wind Turbine Generators [J] // 19th International Conference on Electrical Machines, ICEM2010, 2010: 1–6.
- [37] 钱雅云, 马宏忠. 双馈异步电机故障诊断方法综述 [J]. 大电机技术, 2011, (5): 5–8.
- [38] 杨勇. 双馈异步感应发电机组电参数故障诊断技术的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 100–105.
- [39] Al Ahmar, CHOQUEUSE E, BENBOUZID V, et al. Advanced Signal Processing Techniques for Fault Detection and Diagnosis in a Wind Turbine Induction Generator Drive Train: A Comparative Study [J] // 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 Proceedings, 2010: 3576–3581.
- [40] ROYO J, ARCEGA F J. Machine Current Signature Analysis as a Way for Fault Detection in Squirrel Cage Wind Generators [J] // 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED, 2007: 383–387.
- [41] YANG Wenxian, TAVNER P J, WILKINSON M. Wind Turbine Condition Monitoring and Fault Diagnosis Using both Mechanical and Electrical Signatures [J] // Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008: 1296–1301.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] VIEIRA P, BOBI M A S, GOMES C R, et al. Vibration Monitoring of Electric Generators without Sensor Dedicated [J] // 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2010: 451–456.
- [45] GONG Xiang, QIAO Wei, ZHOU Wei. Incipient Bearing Fault Detection via Wind Generator Stator Current and Wavelet Filter [J] // Proceedings-HECON 2010, 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2010: 2615–2620.
- [46] GONG Xiang, QIAO Wei. Bearing Fault Detection for Direct-Drive Wind Turbines via Stator Current Spectrum Analysis [J] // 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011: 313–318.
- [47] AMIRAT Y, CHOQUEUSE V, BENBOUZID M E H. Wind Turbines Condition Monitoring and Fault Diagnosis Using Generator Current Amplitude Demodulation [J] // 2010 IEEE International Energy Conference and Exhibition, 2010: 310–315.
- [48] AMIRAT Y, CHOQUEUSE V, BENBOUZID M E H, et al. Bearing Fault Detection in DFIG-Based Wind Turbines Using the First Intrinsic Mode Function [J] // 19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010.
- [49] 赵龙. 风力发电机组故障诊断系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 100–105.

(编辑: 关毅)