

双馈风力发电机转子绕组故障的试验研究

李思源, 马宏忠

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 在实际生产中, 双馈风力发电机 (DFIG) 转子绕组状态监测能有效提高风电机组的运行可靠性。为研究 DFIG 转子绕组运行故障试验方案, 首先介绍试验平台的基本原理、现场试验装置及搭建过程中主要问题的解决方法; 然后以变换器网侧电流作为研究对象, 分析故障特征信息流经变流器电力电子器件的传播规律, 基于电流频谱提取转子绕组发生不平衡故障的诊断依据; 最后基于获取的转子绕组三相不对称负载故障运行前后的转子绕组电流频谱图, 可分析转子侧电气量故障特征频率。依据试验结果将转子变换器网侧电流频谱中的 100 Hz、200 Hz 和几个特征频率边频分量作为转子绕组不平衡故障的诊断依据; 将 $3sf$ 和 $(2\pm 3s)f$ (s 为转差率, f 为基频) 作为转子三相负载不对称故障的特征频率, 具有一定的试验指导性和工程意义。

关键词: 双馈风力发电机; 传播规律; 不对称运行; 特征频率

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)10-0120-06

Experimental Study on Rotor Winding Faults of Doubly-Fed Induction Generator

LI Siyuan, MA Hongzhong

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In actual production, the rotor winding state monitoring of doubly-fed induction generator (DFIG) could effectively improve the operation reliability of wind turbine. The complete experimental program for research on rotor winding fault of DFIG was provided. Firstly, the basic principle and field experimental devices of the experimental platform, as well as the solutions to problems in the process of platform building were introduced so as to ensure the accuracy of experimental data. Then, taking the converter side current as the research object, we analyzed the propagation of fault information through the power converter electronic device, and extracted the diagnostic characteristics of rotor winding unbalance fault based on current spectrum. Finally, the current spectra of rotor windings before and after the unbalance fault caused by three-phase unbalance loads were obtained by experiments, and, in combination with the theory of electrical fault characteristic frequency on the rotor side, the fault characteristic frequencies were analyzed. According to the experimental results, 100 Hz, 200 Hz and several characteristic frequency components of rotor converter side current spectrum were selected as the diagnostic characteristics of the rotor winding unbalance fault. It was significant to take $3sf$ and $(2\pm 3s)f$ (s : slip ratio; f : fundamental frequency) as the characteristic frequencies of rotor three-phase unbalance load fault in engineering and experiments.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); propagation law; asymmetric operation; characteristic frequency

0 引言

发电机的正常运行对整个电网的安全稳定意

义重大^[1-2]。在风电场中, 双馈风力发电机 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 凭借高效率、低成本和功率因数可调等优点成为主流机

作者简介: 李思源 (1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为双馈异步风力发电机状态监测与故障诊断。

马宏忠 (1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备状态监测及故障诊断。

型^[3]。但由于运行环境恶劣,故风力发电机引起的故障远多于常规发电机。为了增强风电机组的可靠性,实现故障早期预警和及时维修^[4],对风电机组在线监测技术的研究至关重要。

DFIG 转子绕组由于自身外接电路且连接 1 个背靠背变换器,较难检测其运行状态,并且发电机转子侧控制器参数调节滞后,有功功率、无功功率、定转子电流和转速等在故障前后振荡严重,对电机本身和电网产生冲击,因此需要加强对转子绕组状态信息的在线监测^[5-6]。目前国内外对 DFIG 转子绕组故障的诊断研究仍处于起步阶段。国内的研究相对较成熟,文献[7-10]通过对应特征方法选择合适的特征信号找出故障。在国外, Yazidi 等^[11]面向电路建立双馈风力发电机正常及转子绕组匝间短路的模型进行仿真研究。Dinkhauser 等^[12]利用 MATLAB 软件建立双馈电机模型,通过引入因子 u 表征匝间故障的严重程度,通过小波分析和龙伯格观测器寻找故障特征。Gritli 等^[13-14]对转子绕组故障时的试验数据进行分析,运用小波变换对故障进行量化,设置固定阈值判别故障,但没有考虑转子变换器不同控制策略对提取特征信号的影响。

基于以上方法,本文为更好地研究 DFIG 转子绕组故障提供了完整的试验方案。首先介绍试验平台的基本原理、现场试验装置及搭建过程中主要问题的解决方法,保证试验数据的准确性;然后以变换器网侧电流作为研究对象,分析故障特征信息流经变流器电力电子器件的传播规律,基于电流频谱提取转子绕组发生不平衡故障的诊断依据;最后基于试验方法获取转子绕组三相不对称负载故障运行前后的转子绕组电流频谱图,结合转子侧电气量故障特征频率理论来分析故障特征频率,为实际工程提供一定指导。

1 故障诊断试验平台搭建

1.1 试验平台基本原理及现场装置

DFIG 空载时转子绕组故障模拟系统如图 1 所示。

图 1 中,参数均为额定运行参数。风力机特性模拟装置用来调节电机转速,风机励磁控制屏用来调整转子侧及电网侧控制器的起停及参数变化,并实时显示转速、有功功率、无功功率等数值。

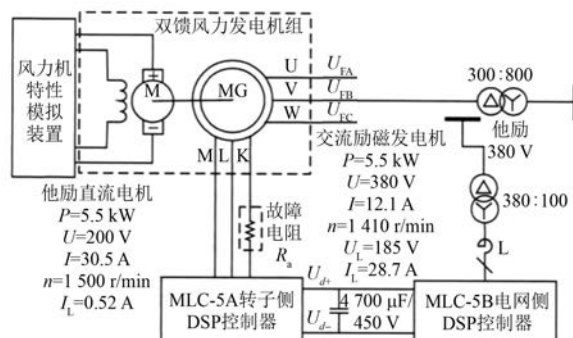


图 1 DFIG 空载时转子绕组故障模拟系统图

综合考虑试验的安全性和经济性,在转子绕组三相串联阻抗模拟绕组三相不平衡故障^[15-17]。

DFIG 系统模拟图如图 2 所示。在 1~4 点处安装合适的电压、电流互感器分别测量故障前后的信号值,以便后续频谱分析。

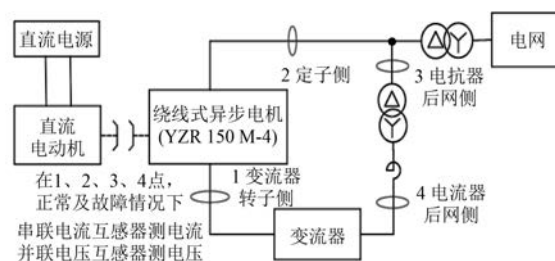


图 2 DFIG 系统模拟图

双馈风力发电机接入负载原理图如图 3 所示。在试验过程中用灯泡代替负载。



图 3 双馈风力发电机接入负载原理图

本试验平台搭建于动态模拟试验室,由 5.5 kW 直流电动机、5.5 kW 绕线式异步电机、模拟风力机特性仿真屏、双馈风机励磁控制屏、负载以及电力故障录波器等组成。DFIG 故障试验现场装置如图 4 所示。

1.2 主要问题解决方法

试验数据的采集装置由电压、电流传感器和电力故障录波器组成。

试验前需测试电压、电流互感器性能。通过工频电源、调压器、万用表等验证电压互感器且二次侧不能短路;在回路中串电阻,利用调压器、钳

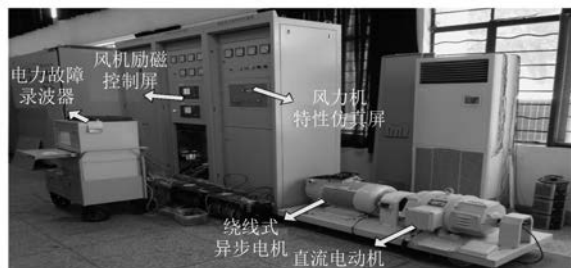


图4 DFIG故障试验现场装置图

形电流表等验证电流互感器且二次侧不能开路。使用工频互感器测得的低频转子电压、电流如图5所示,波形发生畸变而产生直流偏离现象。

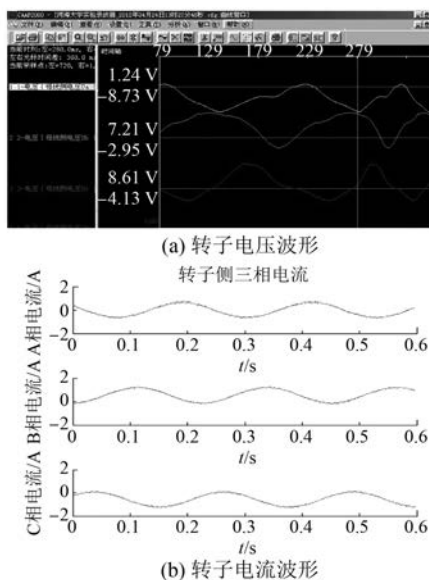


图5 转子电压、转子电流波形图

排查接线、通道等问题,考虑转子侧电流频率为 sf ,其中: f 为定子侧频率(一般取 50 Hz), s 为转差率,可得出低频信号存在直流磁化效应,超出工频互感器频率传输范围而导致二次侧波形畸变的结论。选择型号为HZIA-C06的霍尔电流传感器,通过放大电路可将微弱的电压信号变成标准电压或电流信号,测量范围广且精度高^[18-19]。重新测试可得三相对称的转子电流波形如图6所示。零序电流基本为零,因此成功解决了低频信号的测量问题。

同理,转子电压信号也发生直流偏离,如图7所示。由于转子电压数值小,可直接接入中元华电定制的低频信号测量装置中,从而解决直流偏

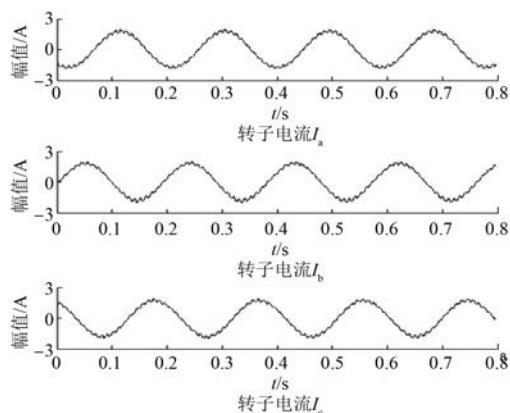


图6 霍尔电流传感器读取的转子电流波形图

离问题。

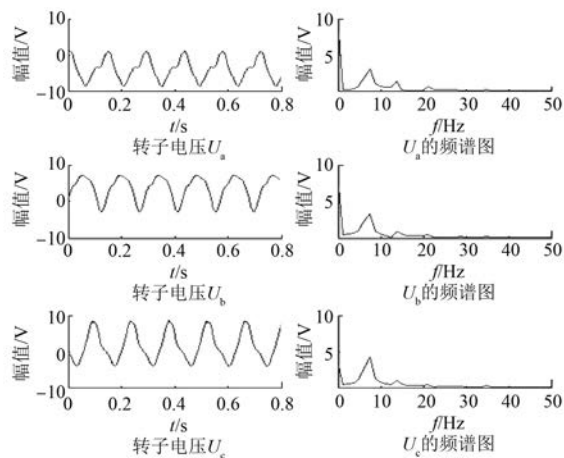


图7 工频电压互感器测量的三相转子电压及其频谱图

进一步观察低频信号测量装置中的三相转子电压。由于转子侧未接N线而发生零点漂移,故会发生如图8所示的三相幅值不对称现象。将B相与N线短接测量线电压 U_{ab} 、 U_{bc} ,解决了三相幅值的不对称问题。

试验中选用中元华电定制的型号为ZH-2B的电力故障录波分析装置,其多通道可用来记录并监测发电机的运行状态。选择一组直流通道DSP连接低频信号测量装置并在软件中重新修改配线,对直流信号进行零漂设置即可完成校正。

2 故障特征经电力电子器件传播规律

基于动模试验平台模拟DFIG转子绕组不平衡故障时,转子侧将产生三相不对称的电流量,转子连接的背靠背式变换器会依据自身控制策略进

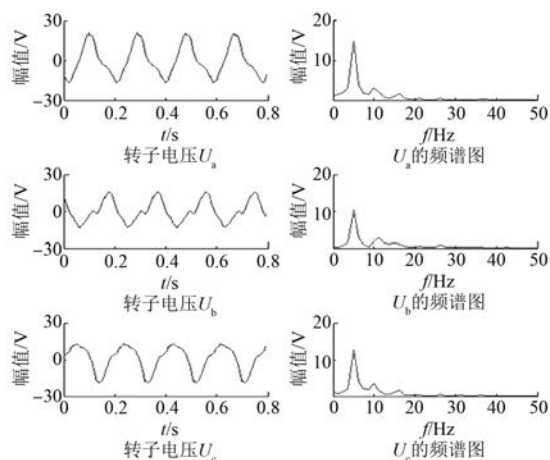
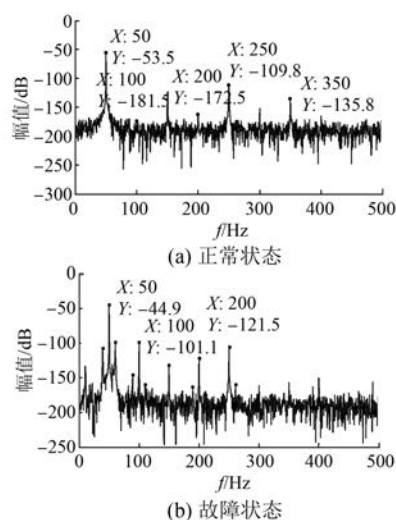
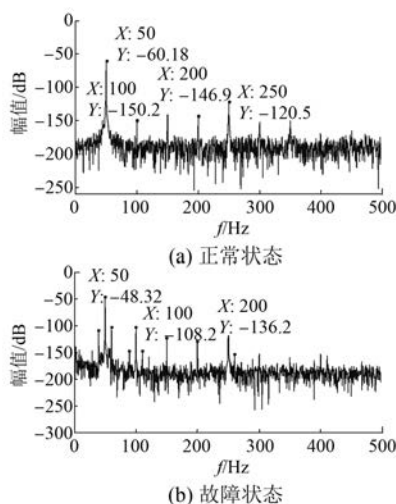


图8 接入低频信号测量装置的三相转子电压及其频谱图

行相应调节。因此在诊断 DFIG 转子绕组故障时,必须计及转子变换器产生的影响。这是其他普通异步电机故障诊断所不具备的特征因素。

文献[20]具体介绍了转子变换器在不同控制策略下故障特征信号的选取方式。在此基础上提取变换器网侧特征信号进行频谱分析,进一步研究特征频率经变换器电力电子器件的传播规律。试验中设置转子变换器为正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)矢量控制策略,在转子侧串入故障电阻 $R_a = R_r$ (R_r 为转子电阻)模拟转子绕组不平衡故障,将变换器网侧电流作为研究对象。图9所示分别为发电机次同步状态下转差率 s 取 0.1 时的转子绕组正常与故障状态下变换器网侧转子电流频谱图。图10所示分别为发电机超同步状态下转差率 s 取 -0.1 时的转子绕组正常与故障状态下变换器网侧转子电流频谱图。

由图9(a)、图10(a)可得,正常状态下变换器网侧转子电流包含基频、3次谐波、5次谐波和7次谐波等成分。电网侧控制器与 Y/ Δ 变压器相连后接入电网,可以消除网侧电流存在的3次谐波。由图9(b)、图10(b)可得,转子绕组发生不平衡故障时,基频 50 Hz 附近出现边频 $(1 \pm 2s)f$ 分量,但该分量作为特征频率已用来诊断普通异步电机的转子断条故障,因此不能作为转子绕组不平衡故障的诊断依据^[21]。不同之处在于,定性分析故障后频率幅值变化情况,100 Hz、200 Hz 处幅值明显增大,尤其是 100 Hz 处的幅值变化更具有

图9 $s=0.1$ 时变换器网侧转子电流频谱图图10 $s=-0.1$ 时变换器网侧转子电流频谱图

代表性,并且 100 Hz、200 Hz 处出现了 $2sf$ 边频分量,该分量由背靠背变换器电力电子器件在传播特征频率时产生。因此依据试验定性分析结果,可将转子变换器网侧电流频谱中的 100 Hz、200 Hz 和几个特征频率边频分量作为 DFIG 转子绕组不平衡故障的诊断依据。

3 转子绕组三相不对称负载对故障特征的影响

在实际运行工况中,DFIG 三相存在固有不对称问题,与此同时,接入负载也经常存在不对称情况。因此,考虑现场工程的应用,在研究

DFIG 转子绕组不平衡故障的动模试验平台基础上模拟三相不对称负载运行故障,通过采集试验数据定性分析转子绕组的故障特征影响,提取故障特征频率。可以通过转子侧串联阻抗的方式模拟 DFIG 三相存在的固有不对称,此处不再重复介绍;由于试验中用灯泡代替负载,可以通过去除某相灯泡的方式模拟负载不对称。试验中利用电力故障录波器进行相应录波,数据存储为 comtrade 格式,通过 MATLAB 读取数据并进行频谱分析。

当 DFIG 转子绕组出现故障时,转子侧故障特征信息比定子侧丰富,并且转子侧电气量的故障特征频率包含 ksf 成分($k=3,5,7,\dots$)^[12],其中 s 为转差率, f 为电机基频。三相不对称负载通过背靠背变换器与转子绕组相连,其故障特征信息会随之发生变化,因此 DFIG 在实际工作时,转子绕组外接不对称负载与自身内部不平衡故障对发电机的影响不同。这里对转子绕组的内部不平衡故障不做重复研究。

图 11 所示为 $s=0.12$ 时的次同步状态下转子绕组三相负载不对称运行故障前后转子电流频谱图。图 12 所示为 $s=-0.12$ 时的超同步状态下转子绕组三相负载不对称运行故障前后转子电流频谱图。

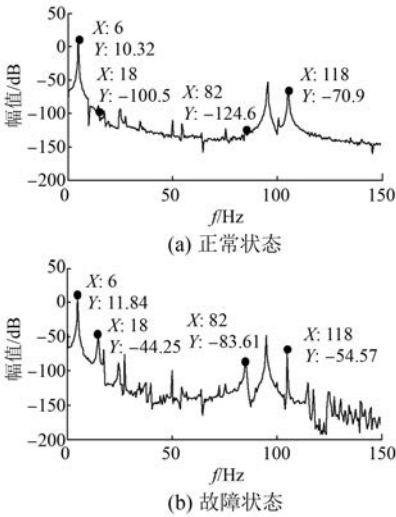


图 11 $s=0.12$ 时转子绕组电流频谱图

根据图 11、图 12,将次同步和超同步状态下转子绕组三相不对称负载运行故障前后的不同频率变化整理如表 1 所示。

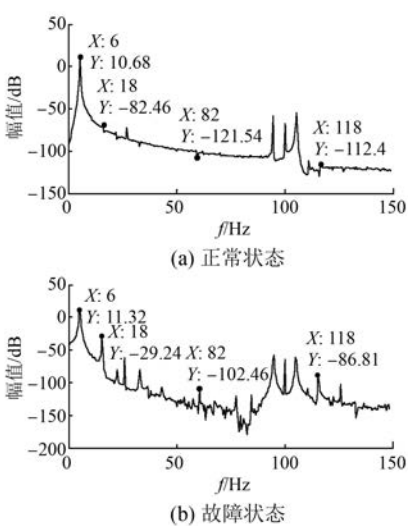


图 12 $s=-0.12$ 时转子绕组电流频谱图

表 1 转子绕组三相不对称负载运行故障前后频率变化

频率	$s=0.12$ (次同步)		$s=-0.12$ (超同步)	
	变化值	变化率/%	变化值	变化率/%
sf	1.52	14.73	1.64	5.99
$3sf$	56.25	55.97	53.22	64.54
$(2-3s)f$	40.99	32.90	19.08	15.70
$(2+3s)f$	16.33	23.03	25.59	22.77

由表 1 可知,发生故障时转子侧电气量的故障特征频率幅值均增大,且 $3sf$ 处的频率幅值变化最明显;当电机运行在次同步状态时,频率 $(2-3s)f$ 的变化率较 $(2+3s)f$ 的变化率大,故障诊断精度更高;当电机运行在超同步状态时,频率 $(2+3s)f$ 的变化率较 $(2-3s)f$ 的变化率大,故障诊断精度更高。因此在诊断 DFIG 转子绕组三相不对称负载运行故障时,可将 $3sf$ 作为电机通用状态特征频率,将 $(2-3s)f$ 作为电机次同步状态特征频率,将 $(2+3s)f$ 作为电机超同步状态特征频率,进一步提高该故障的诊断精度。

4 结 语

本文为研究 DFIG 转子绕组运行故障提供了完整的试验方案,介绍了试验平台的基本原理、现场试验装置及搭建过程中主要问题的解决方法,包括 CT、PT 的测试,低频转子电压电流信号的读取和录波器的校正,确保试验数据的准确性。

在研究转子绕组不平衡故障时,本文分析了

故障特征信息流经变流器电力电子器件的传播规律,基于转子变换器网侧电流频谱图将 100 Hz、200 Hz 和几个特征频率边频分量作为诊断转子绕组不平衡故障的依据。

考虑到工程实际,基于试验方法获取转子绕组三相不对称负载故障运行前后的转子绕组电流频谱图,结合转子侧电气量故障特征频率理论分析故障特征频率,将 $3sf$ 作为电机通用状态的故障特征频率,将 $(2-3s)f$ 作为电机次同步状态的故障特征频率,将 $(2+3s)f$ 作为电机超同步状态的故障特征频率,进一步提高了 DFIG 转子绕组三相不对称负载运行的故障诊断精度,具有一定的工程意义。

【参考文献】

- [1] 沈标正.电机故障诊断技术[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [2] 达夫勒 P J,彭曼 J.电机的状态监测[M].姜建国,史家燕,译.北京:水利电力出版社,1992.
- [3] SHAH D, NANDI S, NETI P. Stator inter-turn fault detection of doubly-fed induction generators using rotor current and search coil voltage signature analysis [C] // 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, New Orleans, 2007: 1948-1953.
- [4] VAS P. Parameter Estimation Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines[M].Oxford, U. K: Clarendon, 1993.
- [5] 马宏忠.电机状态监测与故障诊断[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [6] SMITH K S, LI R, PENMAN J. Real-time detection of intermittent misfiring in a voltage-fed PWM inverter induction-motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(4): 468-476.
- [7] 马宏忠,胡虔生,黄允凯,等.感应电机转子绕组故障仿真与实验研究[J].中国电机工程学报,2003, 23(4): 107-112.
- [8] 刘振兴,尹项根,张哲.基于 Hilbert 模量频谱分析的异步电动机转子故障在线监测与诊断方法[J].中国电机工程学报,2003,23(7): 158-161.
- [9] 黄进,牛发亮,杨家强.基于双 PQ 变换的感应电机转子故障诊断[J].中国电机工程学报,2006,26(13): 135-140.
- [10] 马宏忠,李训铭,方瑞明.利用失电残余电压诊断异步电机转子绕组故障[J].中国电机工程学报, 2004,24(7): 183-187.
- [11] YAZIDI A, HENAO H, CAPOLINO G A, et al. Double-fed three-phase induction machine model for simulation of inter-turn short circuit fault [C] // Electric Machines and Drives Conference, Miami FL, 2009: 571-576.
- [12] DINKHAUSER V, FUCHS F W. Rotor turn-to-turn faults of double-fed induction generators in wind energy plants-modelling, simulation and detection [C] // Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, 2008: 1819-1826.
- [13] GRITLI Y, STEFANI A, ROSSI C, et al. Experimental validation of double fed induction machine rotor fault diagnosis based on wavelet analysis in closed-loop operations [C] // International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, Pisa, 2010: 513-518.
- [14] STEFANI A, YAZIDI A, ROSSI C, et al. Double fed induction machines diagnosis based on signature analysis of rotor modulating signals [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(6): 1711-1721.
- [15] WATSON S J, XIANG B J, YANG W X, 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.
- [16] 曾庆虎,邱静,刘冠军,等.基于小波相关滤波-包络分析的早期故障特征提取方法[J].仪器仪表学报,2008,29(4): 729-733.
- [17] 秦前清,杨宗凯.实用小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,1994.
- [18] WALKER J S. A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications[M].Wisconsin: Chapman & Hall, 1999.
- [19] 万永革.数字信号处理的 MATLAB 实现[M].北京:科学出版社,2007.
- [20] 马宏忠,时维俊,韩敬东,等.计及转子变换器控制策略的双馈风力发电机转子绕组故障诊断[J].中国电机工程学报,2013,33(18): 119-125.
- [21] 许伯强,宋佳伟,孙丽玲.变频供电异步电动机转子断条状态下变频器一次侧特征电流分析[J].中国电机工程学报,2010,30(12): 76-79.

收稿日期: 2018-04-25