

DOI: 10.7667/PSPC170189

# 基于振动信号的双馈异步发电机滑环装置故障诊断方法研究

张艳<sup>1</sup>, 马宏忠<sup>1</sup>, 陈涛涛<sup>2</sup>, 付明星<sup>1</sup>, 魏海增<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 宿迁 223815)

**摘要:** 电枢滑环系统是双馈异步发电机励磁系统的重要组成部分, 但运行中时常出现因滑环面损伤而导致的电刷滑环接触不良现象, 严重影响电机励磁稳定性。针对这一问题, 提出了基于振动信号的滑环面损伤故障诊断新方法。简要分析了电刷滑环系统振动法原理、振动传播途径及故障机理。搭建电刷滑环仿真运行实验平台, 实时采集系统故障运行前后的振动信号。应用小波能量谱法进行滑环接触面故障诊断。通过对比分析故障前后振动信号的小波能量谱分布及占比情况, 找出发生振动异常的频带, 为电枢滑环接触面的故障诊断提供依据。

**关键词:** 滑环; 电刷; 振动; 小波能量谱; 故障诊断

## Research on fault diagnosis method for slip ring device of doubly-fed induction generators based on vibration signal

ZHANG Yan<sup>1</sup>, MA Hongzhong<sup>1</sup>, CHEN Taotao<sup>2</sup>, FU Mingxing<sup>1</sup>, WEI Haizeng<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Maintenance Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Suqian 223815, China)

**Abstract:** The brush and slip ring system is an important part of doubly-fed induction generator excitation system, but the poor contact of brush and ring caused by slip ring surface damage in operation influences the excitation stability. For the problem, this paper proposes a new method of slip ring surface damage fault diagnosis based on the vibration signal. Firstly, the vibration method principle, route of transmission and failure mechanism of the slip ring are analyzed. And then the experiment platform of the brush and slip ring simulation is set up for real-time vibration signals before and after fault operation, and the wavelet energy spectrum method is applied to fault diagnosis of slip ring interface. The abnormal vibration is found out by comparing and analyzing the wavelet energy spectrum distribution and the proportion of vibration signal before and after the fault, which provides the basis for the fault diagnosis of the slip ring contact surface.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577050).

**Key words:** slip ring; brush; vibration; wavelet energy spectrum; fault diagnosis

## 0 引言

双馈异步发电机因其调速范围宽、有功和无功独立可调节等优点迅速成为风电机组的主流机型<sup>[1-3]</sup>, 电刷滑环是其重要的动静转换设备, 对大型双馈异步发电机的稳定运行起着至关重要的作用。然而, 因滑环装置接触面损伤故障所导致的发电机运行不稳定现象屡有发生, 造成巨大的经济损失<sup>[4-5]</sup>。所以, 对电机滑环装置故障诊断的研究刻不容缓。

滑环接触面损伤后, 会导致多种故障现象, 如产生放电火花、局部过热、异常噪声、电气量值变

化等等。文献[6]通过天线来接收由电刷滑环间的火花导致的无线电波, 从而监测故障火花强度和等级。文献[7]针对异步电机滑环火花, 提出了一套放电火花故障的诊断监测系统, 该监测系统采用统计学的方法记录由火花释放出的电磁脉冲干扰的峰值, 采集相关数据进行分析对比, 可以有效监测电刷滑环间火花故障。文献[8-9]的研究表明, 发电机电刷和滑环间的电流泄漏产生高频脉冲分量, 同时验证了时域电流信号与火花光信号有很强的关联性, 频域电流高频脉冲幅值与电刷火花的强度亦有很强的关联性。文献[10]通过分析双馈异步发电机电刷滑环不稳定接触故障前后的转子电流频谱, 对电刷滑环系统进行故障诊断。此外, 文献[11-13]从电刷滑环

装置运行温度的角度来分析判断其运行状况，具有一定的工程实践价值。

考虑以上种种诊断及监测方法，其简易性、精确性和时效性仍有待进一步提高。本文提出了一种基于振动法的滑环装置故障诊断方法。针对滑环装置接触面损伤故障，搭建电刷滑环系统仿真运行实验平台，测取电刷滑环振动信号，然后将小波包变换法应用到滑环故障前后的振动信号分析中来，对振动信号的小波能量谱进行对比分析，找出故障判据，并以此作为滑环装置故障诊断的依据。

### 1 滑环装置振动故障机理分析

对于双馈异步发电机，电刷滑环系统运行状态的改变将导致振动信号的改变，这是利用振动信号作为故障诊断依据的理论基础。造成运行中的电刷滑环系统振动的原因有以下 3 种。

1) 摩擦力：电刷滑环作为动静转换器件，静止的电刷与转动的滑环紧密接触时将产生滚动摩擦力，该摩擦力对电刷滑环系统振动有重要影响，且该部分的振动信号幅值与接触面的粗糙程度密切相关，接触面越粗糙系统的振动越剧烈。

2) 电磁力：作为发电机的重要励磁组成部分，通过电刷滑环系统的交流电流会在电刷、滑环上产生交变电力，通电的电刷之间相互也会感生电磁力，一定程度上加剧了振动的产生。

3) 电机本体：滑环固定在发电机大轴上，发电机转轴在旋转过程中产生的振动通过滑环传递到电刷上，对电刷滑环系统整体的振动产生一定的影响。

图 1 给出电刷滑环系统振动分析模型，压簧施加弹力在电刷上使之与滑环紧密接触，从而在滑环转动过程中产生摩擦振动。与此同时，滑环一方面接受来自发电机转轴传递的振动，另一方面与电刷滚动摩擦过程中因滑环圆度不规整而造成电刷、滑环共同的振动，这些振动信号的叠加构成电刷滑环系统运行时的振动信号。

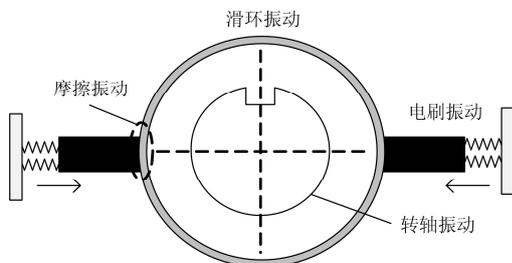


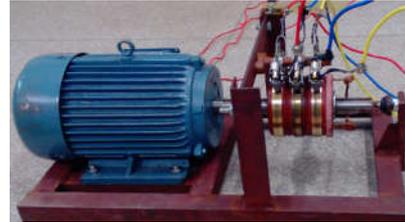
图 1 电刷滑环系统振动产生和传播途径

Fig. 1 Vibration generation and transmission way of the brush and slip system

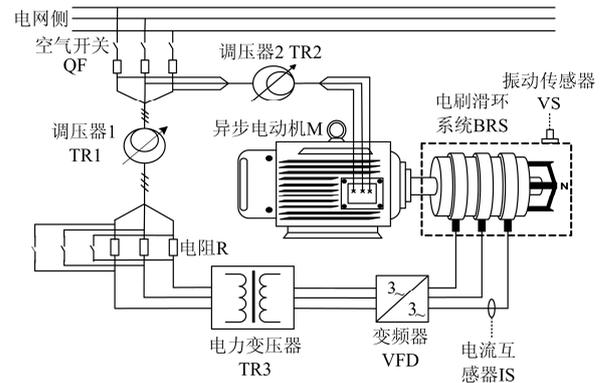
## 2 电刷滑环系统振动法实验研究

### 2.1 实验平台的结构和原理

本实验平台在动态模拟实验室搭建，由 1.1 kW 三相异步电动机、调压器、变压器、电刷滑环装置、电机工作台、多通道数字采集仪和电流传感器等组成。图 2(a)为滑环故障实验装置图，图 2(b)是模拟滑环故障实验原理图。



(a) 滑环故障实验装置图



(b) 模拟滑环故障实验原理图

图 2 双馈异步发电机滑环装置故障诊断实验平台

Fig. 2 Fault diagnosis experiment platform of slip ring device of doubly-fed induction generators

### 2.2 故障模拟方法及实现

参照滑环实际故障运行情况，采用锉刀、烙铁等工具对滑环运行故障进行模拟设置，先用锉刀在滑环面上打磨，使其表面出现一定程度的划痕，然后用加热后的烙铁对滑环表面进行点焊，使其表面均匀分布一些污垢、麻点。工程中，双馈异步发电机滑环故障大都发生在一相滑环面上，故本实验只针对 C 相滑环面故障进行单独设置。图 3 为滑环面模拟故障设置的效果图，图中左一滑环面已经受到轻度损伤，出现划痕、麻点和表面污垢。

### 2.3 振动信号采集系统及装置

考虑到振动信号的传播规律及现场具体条件，在振动传感器的选择过程中，除了考虑传感器的主要技术特征满足要求外，还应考虑传感器的尺寸和重量以及传感器的环境条件适应性。综合考虑，最



图3 滑环面模拟故障设置效果图

Fig. 3 Picture for fault simulation settings of slip ring's surface

终选用了压电式加速度振动传感器 CA-YD-103。

本文研究对象为双馈异步发电机电刷滑环系统。振动测试部位应固定在电刷、滑环某部件上,然而电刷固定在刷握内、滑环处于高速旋转状态,且运行过程中都有强电流通过,不利于振动传感器在电刷、滑环本体上安装。根据前文对电刷滑环系统振动传递的分析,电刷支撑架上的振动来自电刷、滑环及其摩擦振动,且处于绝缘状态,符合测量标准及传感器安装要求,故本章将振动传感器测试点选择在电刷支撑架上。图4是振动传感器安装部位等效图。

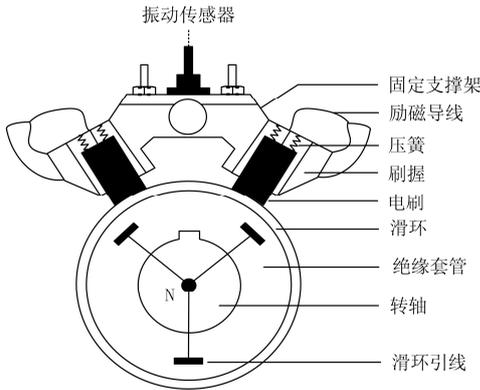


图4 振动传感器安装部位等效图

Fig. 4 Vibration sensors' installation position diagram

图5是振动信号采集系统结构图。振动传感器和电流互感器所测取的电刷滑环系统振动信号经过尼高数据采集仪后传至计算机处理模块进行存储、数据处理和分析。



图5 振动信号采集系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of vibration signal acquisition system

本文采用尼高数据采集仪、直流电压源、PC处理机搭建振动信号采集系统结构。振动传感器感应探头安装在电刷支撑架表面,另一端输出接口与尼高数据采集仪相连接,尼高数据采集仪通过网络传输线与PC处理机相连接,直流电压源提供稳定

的直流电压供其他辅助传感器使用,从而构成了一条完整的采集通道。

### 3 电刷滑环振动实验数据分析

#### 3.1 小波包能量谱基本原理

小波包分解也可称为小波包或最佳子带树结构。其概念是用分析树来表示小波包,即利用多次叠代的小波转换分析输入信号的细节部分。小波包变换可把信号投射到由小波伸缩而成的一组基函数上,能将在整个频率范围内的故障信息反映出来,是一种更加精细、准确的数据分析方法<sup>[4]</sup>。

设 $\phi(x)$ 和 $\psi(x)$ 分别是尺度函数和小波函数,令 $\psi_0(x) = \phi(x)$ ,  $\psi_1(x) = \psi(x)$ , 且有:

$$\begin{cases} \psi_{2n}(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_k \psi_n(2x-k) \\ \psi_{2n+1}(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g_k \psi_n(2x-k) \end{cases} \quad (1)$$

定义的函数 $\{\psi_n\}$ 称为关于尺度函数 $\phi(x)$ 的小波包。其中, $n=0,1,2,\dots,+\infty$ ,  $\{h_k\}$ 、 $\{g_k\}$ 是一高低通组合正交镜像滤波器,通过该滤波器的信号被二抽一方式采样,巧妙地划分了子空间,从而达到更加细致地处理和分析信号的目的。

利用小波变换可将电刷滑环运行时的振动信号分解到独立的频带里,分解出来的不同频段的信号都具有一定的能量,这些能量对电刷滑环系统运行时的状态监测及故障诊断有重要的参考价值。这种以能量方式来表示小波包分解结果的方法称为小波包能量谱分析法。

用 $S_{3b}$ 表示第三层第 $b$ 个频带上的重构信号,总的重构信号为

$$S = S_{30} + S_{31} + S_{32} + S_{33} + S_{34} + S_{35} + S_{36} + S_{37} \quad (2)$$

小波包分解第三层第 $b$ 个频带上的能量时谱用二次能量型可表示为

$$E_b(k) = |x_{3b}(k)|^2 \quad (3)$$

式中: $x_{3b}(k)$ 是重构信号 $S_{3b}$ 的离散点幅值; $b$ 是小波分解第三层的频带序号( $b=0,1,2,\dots,7$ ); $k$ 是采样点序列( $k=1,2,\dots,n$ ); $n$ 为采样点数。

第三层第 $b$ 个频带信号的总能量为

$$E_b = \int |S_{3b}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |x_{3b}(k)|^2 \quad (4)$$

由于电刷滑环系统故障时会对各不同频带内的信号能量产生较大影响,根据各频带内能量的分布情况,可以诊断出系统发生故障的频率范围,同时根据能量的大小也可以确定设备故障的严重程度。

因此, 将小波包能量谱方法应用到电刷滑环系统故障诊断中是可行的, 计算出各频带的能量占总能量的比重, 并将其能量分布特征作为系统故障诊断的依据, 该诊断方法具有直观性和准确性。

### 3.2 振动数据分析

在前述的实验平台和采集系统的基础上, 选取正常运行状态下的电刷滑环系统振动信号进行存储和录波, 并用 Matlab 数学分析软件读取数据并进行相应处理。实验在不同滑环转速、不同励磁电流条件下测取多组振动数据, 实验采样频率为 10 kHz。本文取滑环转速 1350 r/min、励磁电流 20 A 的实验数据进行分析。

在同样的运行条件下, 测取电刷滑环接触面故障前后的振动数据, 虽然故障后电刷滑环振动信号的幅值有明显增大, 波形也有所不同, 但无法准确判断电刷滑环接触面的异常情况, 故不能对故障进行有效的诊断。为进一步对故障振动信号进行分析, 对故障前后的 C 相电刷-滑环的振动信号进行傅立叶分析, 转化成频域信号进行分析对比, 图 6(a)、图 6(b)分别是电刷滑环接触面故障前、后的 C 相电刷-滑环振动信号频谱图。从图 6 中可以看出, 当电刷滑环系统运行在接触面良好状态下时, 振动信号的频谱主要集中在 0~250 Hz, 波峰在 90 Hz 处附近; 而接触面故障时振动信号的频谱幅值有明显的增加,

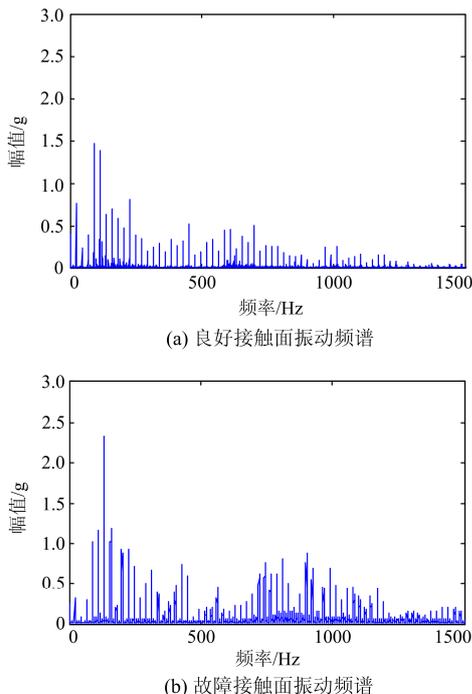


图 6 接触面振动频谱

Fig. 6 Vibration spectrum of contact surface

且 1000 Hz 频率段的附近出现较大的异常振动信号, 整体振动信号较为强烈, 且波峰出现在 135 Hz 处附近。但是仍然无法进行深入、直观、准确的故障诊断。

根据前述小波包分解原理, 本文利用 Matlab 软件进行编程, 选用 db3 小波基对滑环面划痕故障前后的振动信号进行四层小波包分解, 得到 16 个子频带。为了提高信号的分辨率及诊断的精确性, 滑环面滑环故障前后振动信号的采样频率均取 10 kHz, 采样点数取 4000 个点。图 7(a)是良好运行时振动信号四层小波包分解后各频段的重构信号, 图 7(b)是划痕故障振动信号四层小波包分解后各频段的重构信号。

根据图 7 可以看出, 故障后节点(4,0)、(4,4)、(4,10)、(4,11)、(4,14)、(4,15)的幅值有较大幅度的增加, 节点(4,6)、(4,7)、(4,12)的幅值较系统故障前有所降低, 初步分析说明上述各节点对应的频段属于故障频段, 电刷滑环接触故障可从这些频段异常中得到反映。表 1 给出了振动信号经小波包四层分解后每层所表示的频率带范围。

表 1 四层小波包分解后各频段频带  
Table 1 Frequency bands after four-layer wavelet packet decomposition

节点	频率段/Hz	节点	频率段/Hz
(4,0)	0~312.5	(4,8)	4687.5~5000
(4,1)	312.5~625	(4,9)	4375~4687.5
(4,2)	937.5~1250	(4,10)	3750~4062.5
(4,3)	625~937.5	(4,11)	4062.5~4375
(4,4)	2187.5~2500	(4,12)	2500~2812.5
(4,5)	1875~2187.5	(4,13)	2182.5~3125
(4,6)	1250~1562.5	(4,14)	3437.5~3750
(4,7)	1562.5~1875	(4,15)	3125~3437.5

通过图 7(a)、图 7(b)对电刷滑环接触面进行状态监测仍缺乏直观性。本文采用基于小波包能量谱的方法, 对经小波包 4 层分解后不同频带下的振动信号进行能量统计分析, 16 个子频带的能量组成一个 16 维向量。为了直观比较不同状态下电刷滑环振动信号各频带能量大小, 计算出滑环面在故障前后的每个子频带的能量及总能量, 并对比分析, 找到直观、简易的故障特征量。图 8 是滑环面故障前后振动信号能量分布对比图, 从图中可以看出, 滑环面发生故障后, 其振动信号能量分布发生明显变化, 节点(4,0)、(4,2)、(4,3)、(4,6)、(4,7)对应频率段的能量明显增大, 节点(4,1)对应频率段的能量略微降低, 其他节点对应频带的能量变化很小。

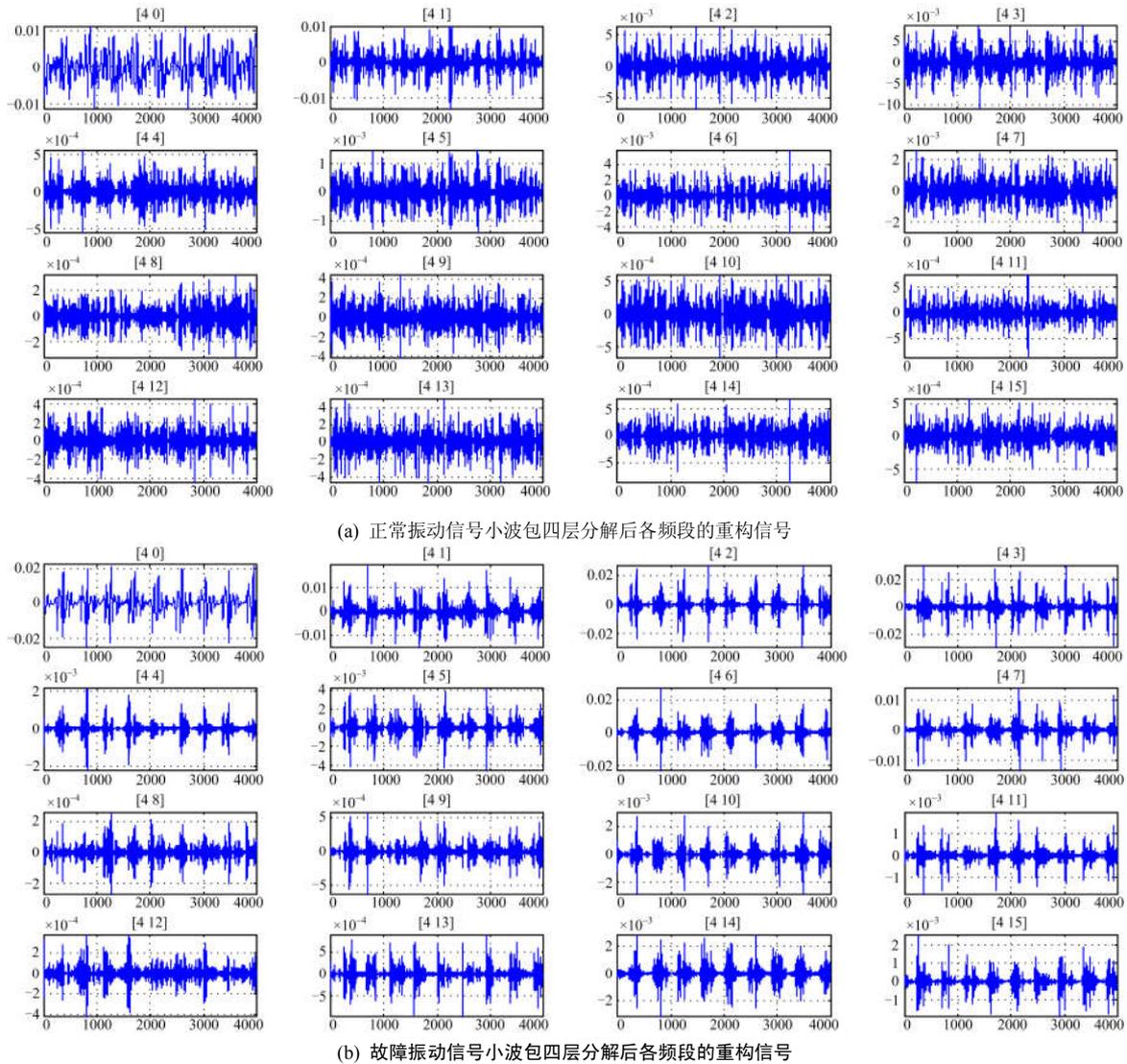


图 7 小波包四层分解后各频段的重构信号

Fig. 7 Reconstruction signal of frequency bands after four-layer wavelet packet decomposition

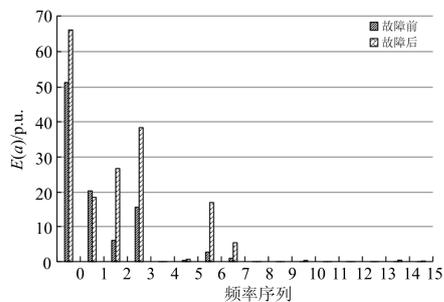


Fig. 8 Contrast diagram of vibration signal energy distribution before and after slip ring surface fault

为分析滑环面故障前后对能量变化起主要作用的频带, 对节点(4,0)、(4,1)、(4,2)、(4,3)、(4,6)、(4,7)

对应频段的能量进行能量占比分析。表 2 给出了各频带能量占总能量的百分比例。

表 2 故障前后各频段频带能量占比

Table 2 Band energy percentages before and after fault

节点	各频带能量占比/%	
	故障前	故障后
(4,0)	52.45	37.90
(4,1)	20.87	10.66
(4,2)	6.20	15.33
(4,3)	15.86	21.99
(4,6)	2.79	9.84
(4,7)	1.02	3.10

对照表 1 中的小波包分解后频率段分布规律, 可以发现, 电刷-滑环故障振动信号 2、3、6、7 频

段占总能量的百分比较正常振动信号明显增加, 这四个频带分别对应的频率范围为: 937.5~1250 Hz、625~937.5 Hz、1250~1562.5 Hz、1562.5~1875 Hz, 即滑环面故障对 937.5~1875 Hz 的中频段信号有较大影响, 可作为电刷滑环接触面的故障频带。此外, 0、1 频带的能量百分比较正常时有所下降, 但这并不能说明 0、1 频带也是故障频带, 因为由于其他频带能量增加了, 而 0、1 频带能量没有发生变化或变化很微弱, 这样其占总能量的百分比就会降低, 其他频带的能量百分比变化较小, 一般认为这些频带运行状态良好。

#### 4 结语

通过对比分析故障前后振动信号的小波包能量谱, 找出发生故障的频率带, 从而判断电刷滑环接触面运行状态是否良好, 此方法直观、准确、简便。由各子频带能量谱构成的能量特征向量, 可作为电刷滑环接触面故障智能诊断的依据之一。根据上述分析, 滑环划痕故障后, 振动信号的频谱变化主要发生在中频带, 而电机其他部分故障后, 振动信号频谱主要发生在低、高频带, 从而可以将不同部位故障区分开来。

#### 参考文献

- [1] 高骏, 王磊, 周文, 等. 双馈风电机组电网背景谐波运行与谐波抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 164-169.  
GAO Jun, WANG Lei, ZHOU Wen, et al. Study on operating behavior and suppression strategy of doubly-fed induction generators wind turbine under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 164-169.
- [2] 魏书荣, 何之倬, 符杨, 等. 海上风电机组故障容错运行研究现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 145-154.  
WEI Shurong, HE Zhizhuo, FU Yang, et al. Research status and prospect of offshore wind turbine fault tolerance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 145-154.
- [3] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.  
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [4] 盛明珺, 沈良, 倪勤. 发电机集电环电刷故障实例及分析[J]. 安徽电力, 2006, 23(2): 22-25.  
SHENG Mingjun, SHEN Liang, NI Qin. Example and analysis of generator collector ring brush faults[J]. Anhui Electric Power, 2006, 23(2): 22-25.
- [5] 陈立志, 董伟, 刘德辉. 300 MW 发电机转子滑环烧毁原因分析[J]. 华电技术, 2012, 34(4): 47-49.  
CHEN Lizhi, DONG Wei, LIU Dehui. Analysis of the causes of the burning of 300 MW generator's rotor ring[J]. Huadian Technology, 2012, 34(4): 47-49.
- [6] SAWADA F H, BARTON S C, GUNNOE G H. Early detection and warning of carbon brush sparking[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 91(1): 167-171.
- [7] MICHIGUCHI Y, TANISAKA S, IZUMI S. Development of a collector ring monitor for sparking detection on generators[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 3(4): 928-933.
- [8] HEASSLER H W, LINDE M. A new measurement technique for the investigation of arcing processes of sliding contacts[C] // Proceedings of the Thirty-Seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, October 6-9, 1991, Chicago, USA: 153-155.
- [9] MORITA N, UENO T. Comparison of brush dynamic operation characteristics for turbine generator steel collector ring[C] // IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, September 16-19, 2007, Pittsburgh USA: 205-210.
- [10] WURFEL M, HOFMANN W. Monitoring of the transmission properties of the rotor slip ring system of doubly-fed induction generators[C] // IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, May 15, 2015, San Antonio, USA: 295-299.
- [11] HAMILTON H B. Calculation of temperature transients in carbon brushes[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(10): 1857-1861.
- [12] 马宏忠, 陈涛涛, 时维俊. 风力发电机电刷滑环系统三维温度场分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(30): 98-105.  
MA Hongzhong, CHEN Taotao, SHI Weijun. Analysis and calculation on three-dimensional temperature field of brush and slip ring systems for wind generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(30): 98-105.
- [13] GABRIELLI G, SCHWEITZER G. Thermoelastic effects on slip ring surface leading to brush vibrations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(3): 522-528.
- [14] 曾祥君, 张小丽, 马洪江. 基于小波包能量谱的电网故障行波定位方法[J]. 高电压技术, 2009, 34(11): 2311-2316.  
ZENG Xiangjun, ZHANG Xiaoli, MA Hongjiang. Traveling wave fault location method for power grids based on wavelet packet energy spectra[J]. High Voltage Engineering, 2009, 34(11): 2311-2316.

收稿日期: 2017-02-14; 修回日期: 2017-07-05

作者简介:

张艳(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为双馈异步电机故障诊断; E-mail: 530167282@qq.com

马宏忠(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断等。E-mail: hhumhz@163.com

(编辑 魏小丽)