

双馈风力发电机轴承故障诊断研究现状与发展^{*}

马宏忠, 李思源

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 双馈风力发电机 (DFIG) 目前广泛应用于风电事业。就自身结构而言, 轴承是电机非常重要的组成部分, 其状态决定着电机整体的运行性能。在实际风电场中一般会定期更换电机轴承, 但该方法不能避免轴承产生的早期故障。因此对其进行故障初期的诊断尤为重要。首先简单介绍 DFIG 轴承故障的产生机理及故障模式, 再对近几年来相关的诊断方法做逐条归类阐述, 最后基于现有成果展望未来 DFIG 轴承故障诊断方法的发展趋势, 为日后该领域的突破和新方法的提出做好准备。

关键词: 双馈风力发电机; 轴承; 故障诊断; HHT; Park 矢量; 柔性滤波; 关联维数; 周期稀疏导向超小波
中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)09-0117-08

Research Status and Development of Bearing Fault Diagnosis for Doubly-Fed Induction Generator^{*}

MA Hongzhong, LI Siyuan

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

Abstract: Doubly-fed induction generator (DFIG) was widely used in wind power industry. In terms of its structure, the bearing was a very important part of the motor, and its status determined the overall performance of the motor. In the actual wind farm, the motor bearings would be replaced periodically, but this method could not avoid the early fault of the bearing. Therefore, the early diagnosis of the fault was particularly important. First, the bearing fault generation mechanism and failure modes of DFIG were introduced. Then the diagnostic methods frequently used in recent years were classified and described. Finally, based on the existing achievements, the future development trend of DFIG bearing fault diagnosis method was analyzed, so as to make preparations for the possible breakthrough in the field and after the proposal of new methods.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); bearing; fault diagnosis; HHT; Park vector; flexible filter; correlation dimension; periodic sparse steering super-wavelets

0 引 言

相比于其他电机, 双馈风力发电机 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 的结构简单、运行可靠、制造成本较低, 因而广泛应用于风电事业^[1]。轴承是电机非常重要的组成部分, 其状态决定着电机整体的运行性能, 其故障会造成电机整体设备的非正常振动。

截至目前, 在所有安装的风力发电机中,

75%~80% 的主轴轴承采用滚动轴承^[2]。统计结果显示, 轴承故障的 20% 与过载或制造质量有关; 30% 与安装有关; 40% 与污染和润滑有关^[3-4]。对此, 实际风电场中都会定期更换电机轴承, 但该方法不能避免轴承产生的早期故障。因此对其进行故障初期的诊断尤为重要。一般而言, 电机轴承故障的诊断步骤包括采集故障信号、提取故障特征和识别故障模式。其中特征量提取和模式识别是两个关键环节。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51577050, 51177039)

作者简介: 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。

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。

本文整理了近9年来DFIG轴承故障的相关诊断方法并基于现有成果展望未来DFIG轴承故障诊断方法的发展趋势,有助于日后该领域的突破和新方法的提出。

1 轴承故障产生机理及模式

DFIG 主轴滚动轴承主要由内圈、滚动体、外圈和保持架组成,其中,滚动体主要有球形、鼓形和锥形^[5],一般采用鼓形滚动体且安置在滚道内圈和外圈之间。主轴承采用调心滚子轴承,可以同时承受轴向和径向的载荷作用,适用于重载荷和冲击载荷。DFIG 主轴滚动轴承如图1所示。



图1 DFIG 主轴滚动轴承

1.1 故障产生机理

DFIG 主轴滚动轴承的故障根源包括内生性和外源性2个方面。其中,内生性因素包括选型不当、安装不适、润滑不良、设计不佳、误差超标等;外源性因素包括部件设计不当引发的损坏或停机保护、维护维修不及时连带的其他部件损坏、外部应力不均导致的轴承局部损伤等。

当轴承内部旋转部件周期性地通过损伤点时,产生的冲击信号中包含低频振动调制频率,又称作轴承故障的通过频率。不同零件对应的该频率各不相同,因此可以作为轴承故障的重要诊断信息^[6]。

1.2 故障模式分析

如图2所示,DFIG 并网带载运行的主轴轴承

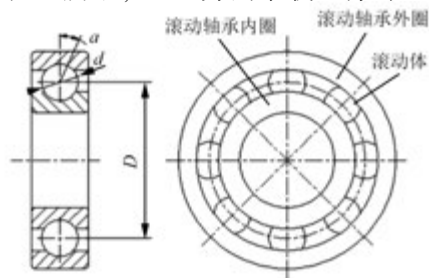


图2 滚动轴承几何形状示意图

滚子圆周与内外环之间受到交变载荷的反复作用,从而产生摩擦。另外,实际设计、安装、润滑、维护等外部因素都将导致轴承的早期损伤。

常见的故障模式如下。

(1) 疲劳剥落。电机轴承在正常工作中,滚动体与内外圈之间的相对运动会在二者接触表面产生脉动循环的交变应力,形成疲劳点蚀,导致轴承内接触面金属呈片状剥落。这种现象称为疲劳剥落,又名点蚀。疲劳剥落是电机轴承在正常工况下发生故障的主要原因,一般由某点或某块的应力集中或是强迫安装、润滑不良等外部因素造成。发生疲劳剥落后的碎片掉落到正常滚道上会进一步扩大轴承的损伤,产生明显的冲击信号,后期振动噪声及温度也会明显升高。

(2) 磨损或擦伤。电机主轴轴承滚动体和内外圈之间的相对运动以及外界污染物的入侵会直接导致轴承的磨损。除此之外,装配误差和润滑不良也会引起磨损或擦伤。若磨损面积继续扩大,则会相应地增大轴承游隙,在降低轴承运转精度的同时,也会产生非正常振动和噪声。

(3) 压痕。轴承过载荷运作时,滚动体和滚道接触面会产生塑性形变,从而在滚道表面形成塑性变形凹坑,直接引发轴承剧烈的振动和噪声。此外,DFIG 的正常振动和外界硬粒的进入等因素都会形成滚道接触面的压痕。

(4) 塑性变形与断裂。滚道表面一旦产生划痕或压痕,由此产生的冲击载荷或偏载力会进一步引发划伤处附近滚道表面的剥离。在此情况下轴承长时间工作或短时过载,将可能发生塑性变形;当轴承零件所受应力超过自身材料的极限值时,会导致其内部或表面产生非常危险的局部甚至完全断裂。裂纹的产生因素多种多样,内部原因主要有轴承过载工作、金属材料缺陷及不良热处理,外部原因主要是电机轴承和主轴之间装配过盈。

(5) 电蚀和腐蚀。当电机无绝缘或在单面绝缘轴承上发生反向高压击穿时,产生的击穿电流会在滚子接触点和内外环滚道处引发电火花,严重时会在滚道表面形成电蚀损伤。同时,由于轴承密封不严,外界水分或腐蚀性介质入侵轴承会引发化学腐蚀。

(6) 胶合。当电机轴承严重润滑不良、短时过载、高速重载或选型不当时,摩擦生热使其零件

表面金属过热融化粘附到其他零件。这种现象即胶合^[7]。

不论主轴轴承出现何种故障模式,都会引起电机的异常运转,导致振动和噪声的急剧增加和温度的急剧上升。

2 轴承故障诊断研究方法

DFIG 主轴滚动轴承故障一般分为 2 类:一类是渐变性磨损故障;另一类是表面损伤性故障。前者会给电机转轴施加反复冲击而引发异常振动,产生 0~100 Hz 的故障特征频率;后者会产生突变的冲击脉冲力,突发性强且早期症状难以识别。现阶段对滚动轴承故障的研究诊断技术基本包括信号处理和故障识别 2 个环节。

本文从状态分量和特征提取 2 个角度对 DFIG 主轴轴承故障的诊断研究方法进行归类,重点总结了近 9 年来该领域出现的检测新方法和新思路,便于日后进一步的突破和创新。

2.1 轴承故障的状态分量诊断法

根据检测电机滚动轴承采用的状态分量进行如下方法分类^[8]。

(1) 噪声检测法。DFIG 主轴轴承的设计寿命一般为 20 a,正常工作时轴承转动灵活无异响。现场可以使用听棒或是电子听诊器检测轴承的疲劳损伤。滚动轴承正常运行时会产生一种连续而圆滑的固有滚动声和滚动体带动保持架发出的周期性颤音。轴承出现故障时产生一定周期的噪声;当有异物入侵时会产生大小不定的非周期性噪声;当在电机无负荷运转下主轴异常振动时会发出蜂鸣声;当轴承受到径向振动或冲击时会发出“咕噜”声。此时必须停机检查并确定故障类型和处理方法,但由于实际影响因素较多,所以可靠性较差。

(2) 振动检测法。滚动轴承产生的振动通常分为自身弹性振动和故障振动。故障轴承受滚动体和损伤面相对运动的影响产生交变的冲击力,进而引发频率成分丰富的复杂振动。一般而言,主轴转速越高或表面损伤越严重,振动频率就越高^[9]。可以利用振动加速度传感器对滚动轴承进行振动信号的检测,再选择适当的信号处理方法提取故障特征量。具体方法在下文中详细给出。这样就提高了监测诊断的准确性。

(3) 温度检测法。轴承温度跟电机的热容量、散热性、转速和负载有关,正常温升一般不超过 55 K。利用温度传感器实时采集接触箱体的温度再推算出轴承的温度,技术含量小且易于实现。若润滑或安装不当,温度会急剧上升并出现异常高温,需要停机处理。

(4) 油样检测法。抽取滚动轴承机械接触表面的润滑油样,分析其成分、金属磨粒大小及形貌,判断滚动轴承的运行工况。同时也可以通过滚动轴承润滑油或油脂成分判断润滑剂的状态。该方法有利于滚动轴承的早期故障诊断,但因取样不便而受到限制。

2.2 轴承故障的特征提取诊断法

根据检测电机滚动轴承采用的新型信号处理方法进行如下分类。

2.2.1 基于共振解调技术的方法

由于冲击持续时间短,对振动信号进行频谱分析诊断轴承损伤故障特征不够明显。文献[10]提出利用共振解调和 AR 模型诊断轴承故障,利用共振特性提取故障冲击信息。

共振解调法选择合适的传感器和电路谐振放大故障冲击引起的周期性衰减振动,再利用解调技术进行包络检波提取故障信息,通过对解调后的信号进行频谱分析诊断出故障部位^[11]。该技术尤其适用于轴承故障的早期诊断。

2.2.2 基于故障频率分析的方法

文献[12]分析了滚动轴承滚动体、内外圈和保持架的故障特征频率。

(1) 滚动轴承内圈故障。如图 3(a)所示,考虑到径向间隙和运行过程中的受力不均衡性,滚动轴承内圈若发生点蚀、磨损、剥落或裂纹等故障会产生如图 3(b)所示的频率为 $k n f_i + f_r$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) 的振幅调制振动,其中 f_i 表示轴承滚道内圈转动率, f_r 表示转子的转动频率。

(2) 滚动轴承外圈故障。滚动轴承外轨道发

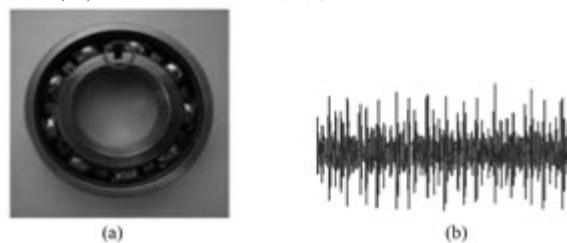


图3 内圈故障时信号特征

生裂纹、点蚀、磨损等都会造成外圈故障,如图 4(a)所示。滚道损伤点位置与轴承上载荷的相对关系保持恒定,其故障特征频率为 $k n f_o$ ($k = 1, 2, 3, \dots$),其中, f_o 为轴承外圈的旋转频率。外圈故障的信号特征如图 4(b)所示。



图 4 外圈故障时信号特征

(3) 滚动体故障。滚动体发生故障时会出现滚珠磨损、点蚀或表层金属脱落等现象,导致滚动体产生相应的冲击振动,如图 5(a)所示。结合间隙作用产生以滚动体公转频率 f_c 进行振幅调制的振动频率为 $k n f_b + f_c$ ($k = 1, 2, 3, \dots$)。其特征波形如图 5(b)所示。

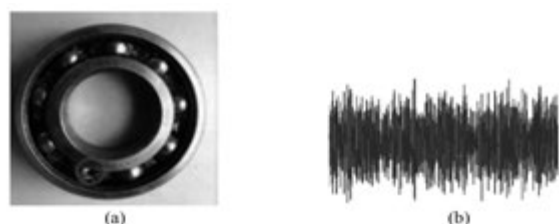


图 5 滚动体故障时信号特征

2.2.3 基于红外测温的方法

采用有限元法建立电机转子的三维导热模型,仿真电机轴承不同运行状态下的转子三维温度场。基于 ANSYS 平台建立的电机输出端轴承故障时转子三维几何模型如图 6 所示。转子模型横截面示意图如图 7 所示^[13]。

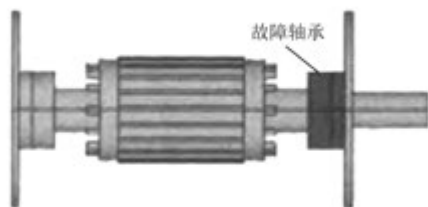


图 6 转子三维模型图

通过仿真分析可得,不论轴承故障与否,电机端盖温度分布均沿径向从内到外逐渐降低且在端



图 7 转子模型横截面示意图

盖轴承座正对部位变化缓慢,但从轴承外径向外下降迅速;同种负荷下的轴承损坏越严重,端盖表面温升越大;电机端盖表面绝对温升随负荷的增加而明显升高,但电机负荷的变化对端盖温度场的分布规律影响小到基本可以忽略,因此不能仅凭此量来判断相应的轴承状态。根据以上规律,可以利用红外热像仪测量电机端盖表面温度场的分布规律进行电机轴承状态的实时判断。

2.2.4 基于 HHT 的方法

当滚动轴承分别在滚动体和内外环等部位出现故障时,会在谱图中对应的故障特征频率处出现峰值。因此文献[14]提出一种结合 HHT 和散度指标的轴承故障诊断方法。重构轴承振动信号特征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)并进行 Hilbert 包络谱分析提取故障特征量,通过计算特征量的 J-散度和 KL-散度判断故障类型和程度。在从重构高频信号中分离故障特征信号时,可通过盲源分离降低轴承复合故障中不同故障特征频率混叠的影响^[15]。

由于 DFIG 轴承故障特征难以提取,文献[16]利用经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)近似正交分解的特征,将 EMD 产生的残差分量与原信号间的相关系数作为阈值,对 IMF 进行自适应筛选,避免由 3 次样条拟合误差引发伪 IMF 问题,具有工程实践意义。

考虑到现有 EMD 中 IMF 判据必须指定经验值范围的缺点,结合峭度系数法,文献[17]提出了一种基于峭度的 IMF 判据方法,利用峭度对冲击成分敏感、可反映幅值分布形状变化的特点,避免了由于经验取值不同而造成的结果差异,能准确地诊断出故障部位。

在实际运行中,当风速较高时,依靠 HHT 时频谱难以判断轴承异常振动的原因。因此可以采用 Hilbert 空间熵对故障轴承不同输入转速频率

下的振动信号进行分析^[18], 轴承正常状态熵值在 4.4~4.6 之间, 故障状态熵值在 5.0~5.2 之间, 且二者随输入转速频率的增加均有增大的趋势。该系数值可以作为风力发电机轴承在线监测的指标。

2.2.5 基于 SVM 的方法

为了提高电机轴承故障诊断的准确率, 文献[19]提出一种基于粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 的支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 故障诊断方法。采用局部均值分解 (Local Mean Decomposition, LMD) 提取电机轴承完整的振动信号特征作为 SVM 的特征向量, 同时有效地抑制了端点效应; 利用粒子群优化算法优化支持向量机的核函数参数 σ 和惩罚参数 c , 以此建立分类器用于识别电机轴承的故障类型。

考虑到 SVM 参数难以选择的问题, 文献[20]提出了针对 SVM 参数寻优的 AMPSO 算法, 将电机振动信号各频带能量划分成电机运行状态的特征向量, 组成轴承状态“决策树”并对电机状态进行分类。AMPSO 能快速地找出 SVM 的最优参数, 提高了诊断精度且耗费时间短, 更适合工业运用。

2.2.6 基于神经网络的方法

针对滚动体故障波形变化不明显且同一故障类型下轴承的不同损伤程度难以区别的问题, 文献[21]提出了一种基于小波包变换 (Wavelet Packet Transform, WPT)、多尺度熵 (Multiscale Singular Entropy, MSE) 和概率神经网络 (Probabilistic Neural Network, PNN) 的诊断方法。利用 WPT 处理信号样本并分解为相应子带信号分量, 避免原始信号中复杂成分的交叉干扰, 同时计算所得子带信号分量的 MSE 值并构造表征电机轴承运行状态的特征向量; 最后通过 PNN 分类识别电机轴承的不同状态。

针对经常使用的 RBF 神经网络泛化能力的不足, 文献[22]利用 PSO 算法优化 RBF 神经网络参数, 基于优化后的 PSO-RBF 神经网络提取滚动轴承运行状态的峭度、峰值因子、峭度因子、脉冲因子、裕度因子和波形因子等信号特征为轴承故障的诊断特征量。同理也可以应用容错性强、动态性能良好的 Elman 神经网络建立从特征向量到故障模式的映射, 实现轴承的故障分类^[23]。

为进一步识别电机故障轴承端位和其内部点蚀的具体位置, 文献[24]提出一种用小波奇异熵 (Wavelet Singular Entropy, WSE) 和自组织特征映射 (Self-Organizing Feature Mapping, SOFM) 神经网络识别电机轴承故障的建模方法, 采集电机驱动端和风扇端的故障振动信号, 通过计算和比较其 WSE 值识别故障轴承的端位; 在此基础上对故障端信号进行小波包分解, 得到底层各结点能量并作为特征向量, 输入 SOFM 神经网络模型进行具体点蚀破坏位置的识别, 具有很高的稳定性。

2.2.7 基于定子电流的方法

文献[25]通过对风力发电机定子电流的幅值解调和经验模态分解法进行轴承故障分析, 利用 SCADA 系统和 CMS 系统进行数据采集。图 8 所示为通过工业数据总线对风电机组进行实时数据采集的系统配置图。由于轴承故障时会造成电机内部磁场气隙长度和磁导的变化, 进而引起磁动势与磁通密度的变化并反映在电流信号中, 因此可以将定子电流分频带分析法应用在电机轴承磨损检测中^[26]。

Önel 等^[27]提出基于感应电机电流信号的 Park 矢量方法, 将轴承故障特征信息以计算机监控到圆度变化的图形方式呈现^[28], 诊断过程如图 8 所示。

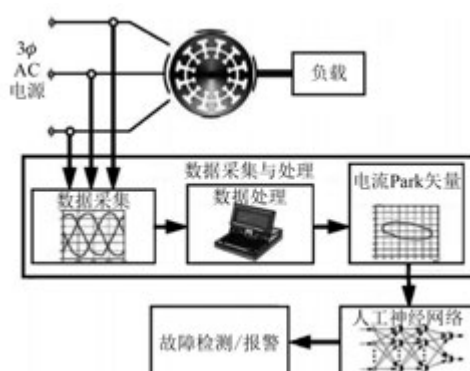


图 8 基于 Park 矢量法的诊断过程

为消除电流基波和谐波变化的影响, 对三相定子电流的 Park 矢量模信号进行小波包分解, 求得相应子频带的小波包分解系数的均方根值, 以此表征轴承的故障特征并作为轴承故障的诊断依据^[29]。这样不仅降低了基频电流及电流中的噪声影响, 还能准确地提取变化微弱的故障特征频率, 实际而可行。

2. 2. 8 基于数学算法的方法

为了分析电机轴承的故障类型,对轴承振动信号进行小波包高低频分解重构并以各频带能量值构造特征向量,通过朴素贝叶斯网和权重分析两种方法进行电机轴承的故障分类:前者对已知电机轴承故障类型的样本数据进行训练,与未知样本故障类型进行参数匹配识别^[30];后者计算已知与未知类型的电机轴承振动样本相关系数,构建权重并按权值大小获取未知样本的故障类型。同理,基于正交小波包的信号分解功能,也可以将电机的振动信号分解成相互正交的频率子空间。对其借助离散余弦变换的频域能量聚集性构造故障特征参数,从而实现电机轴承的早期故障检测^[31]。

文献[32]提出一种多尺度子带流形保持故障诊断算法,对轴承故障信号进行小波包二次分解得到多尺度子带信号,提取其样本熵得到故障信号的初步特征值,对该值进行平滑伪 Wigner-Ville 分布并进行局部保持投影流形学习降维,提取最终故障信号的时频流形特征;同理可对多尺度子带信号直接进行流形学习降维,再对流形子带信号进行二次均方根值提取,可得轴承故障信号的预测特征值,达到对轴承复杂故障很好的预测。

在实际工况中,电机轴承故障极易与转子故障耦合而形成复合故障。针对轴承故障信号调制性的特点,采用形态梯度解调法提取双加性时域信号中的冲击成分^[33]。该方法对低频信号的抗干扰能力强且故障特征反应明显。

3 DFIG 轴承故障诊断研究展望

3. 1 方法创新

针对电机轴承故障多级分类的问题,文献[34]提出一种基于柔性形态滤波和遗传规划的诊断新方法,具体流程如图 9 所示,其中,柔性形态滤波能有效提取电机轴承的故障特征,GP 算法优化获得的分类器模型适用于故障的分类。

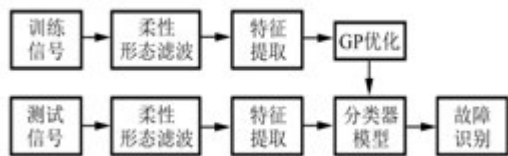


图 9 基于 GP 算法和柔性形态滤波的故障诊断框图

在滚动轴承故障诊断中,不同的故障类型对应

不同的动力学机理。引入“关联维数”的概念,定义为在相空间重构的基础上得到时间序列并计算相应动力学系统的吸引子维数^[35]。不同故障类型的关联维数值呈现固定规律,正常信号的该值较小,故障时则较大,采用小波包降噪就可以克服噪声的影响。该方法弥补了传统方法只能分析局部时频信号的不足,使诊断结果更为精确。所得轴承一般故障状态下的关联维数值如表 1 所示。

表 1 滚动轴承消噪后振动信号的关联维数

工作 状态	延迟 时间	嵌入 维数	关联维数				均值
			采样次数				
			1	2	3	4	
正常信号	7	5	1.563	1.557	1.559	1.575	1.561
内圈重度	5	5	1.629	1.617	1.621	1.625	1.623
内圈轻度	5	5	1.729	1.724	1.722	1.733	1.727
滚珠重度	6	5	1.785	1.769	1.779	1.771	1.776
滚珠轻度	7	5	1.680	1.672	1.675	1.677	1.676

基于诱发周期性非平稳冲击的特征,文献[36]提出了基于周期稀疏导向的可调品质因子小波变换 (Tunable Q-factor Wavelet Transform, TQWT) 新方法。采用 TQWT 对轴承的振动信号进行分解和单支重构,利用基于轴承故障特征信息的冲击特征评价指标优化原则引导 TQWT 的参数优化选择。通过检验不同振动特性下的 TQWT 与故障特征的相容性,可得提取周期性冲击故障的最优基函数。该方法对信号进行了高效的分析,具有一定的工程实用性。

3. 2 未来展望

随着信号采集技术、信号处理技术、计算机技术和人工智能技术的飞速发展,DFIG 滚动轴承故障的诊断技术水平不断提高,诊断方法也越来越趋向于融合性和跨学科性,主要表现在以下几方面:

- (1) 对轴承故障的诊断总是融合当下最先进的传感技术;
- (2) 对轴承故障的诊断总是融合最新的信号处理方法,取代传统的傅里叶分析法;
- (3) 对轴承故障的诊断总是融合现代的智能诊断方法,包括神经网络、专家系统、SVM 等,势必成为未来发展的趋势。

然而在实际的故障诊断中,风机系统经常会

同时发生多种故障,各自对应的故障特征量之间会产生相互影响从而增加电机轴承故障的诊断难度。因此,如何将单一的轴承故障诊断融入对DFIG的综合故障诊断,仍需进一步研究。

4 结 语

本文总结了近9年来DFIG主轴滚动轴承故障诊断的研究现状和新方法新思路;提出了柔性形态滤波和遗传规划结合的诊断方法以及周期稀疏导向超小波的新型概念,并列举出基于振动信号的滚动轴承消噪后不同类型故障对应的关联维数表;最后预测了该领域未来的发展趋势与方向,为日后的课题研究打下一定的基础。

【参 考 文 献】

- [1] 马宏忠.电机状态监测与故障诊断[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [2] 陈文静,吴金强.Hilbert-Huang变换在风力发电机主轴轴承故障诊断中的应用[J].轴承,2013(6): 59-62.
- [3] 吴桂梁,胡杰,陈修强,等.风力机安装、维护与故障诊断[M].北京:化学工业出版社,2011.
- [4] 褚福磊,彭志科,冯志鹏,等.机械故障诊断中的现代信号处理方法[M].北京:科学出版社,2009.
- [5] 陈文献.风力发电机主轴轴承故障诊断研究[D].西安:西安理工大学,2013.
- [6] 曾承志.大型双馈风电机组传动系统故障诊断与故障失效预测技术研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [7] KANG M, KIM J, KIM J M, et al. Reliable fault diagnosis for low-speed bearings using individually trained support vector machines with kernel discriminative feature analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2786-2797.
- [8] 侯晓林.风电机组发电机轴承故障分析及处理[J].建筑工程技术与设计, 2017(3): 639-640.
- [9] 翟保超,陈继刚.大型风电机组主轴轴承故障分析及疲劳寿命数值模拟[D].秦皇岛:燕山大学,2011.
- [10] MATHEW J, SZEZEPANIK A B, KUHNALL T. Incipient damage detection in low speed bearing using demodulation resonance analysis technique [C] // International Tribology Conference Melbourne, 1987: 366-369.
- [11] 陈文涛.共振解调技术在风力发电机滚动轴承故障诊断中的应用[J].设备管理与维修, 2012(2): 52-53.
- [12] 马鲁.风电机组传动系统关键机械部件的故障检测方法研究[D].上海:上海电机学院,2016.
- [13] 孙斌,王艳武,杨立.基于红外测温的异步电机轴承故障诊断[J].电机与控制学报, 2012, 16(1): 50-55.
- [14] 郭艳平,颜文俊,包哲静,等.基于经验模态分解和散度指标的风力发电机滚动轴承故障诊断方法[J].电力系统保护与控制, 2012(17): 83-88.
- [15] 高伟,胡定玉,方宇.采用小波变换和盲源分离的电机轴承故障诊断[J].测控技术, 2017, 36(5): 51-54.
- [16] 陈长征,孙鲜明,周勃,等.HHT改进及其在风力发电机故障诊断中的应用[J].华东电力, 2014, 42(6): 1123-1128.
- [17] 郭艳平,颜文俊.一种新的IMF判据及其在风力发电机滚动轴承故障诊断中的应用[J].计算机应用研究, 2012, 29(9): 3362-3364.
- [18] 孙鲜明,陈长征,李思源.基于Hilbert空间熵的风力发电机轴承故障诊断[J].轴承, 2014(11): 53-56.
- [19] 丁瑞成,黄友锐,陈珍萍,等.LMD和SVM相结合的电机轴承故障诊断研究[J].组合机床与自动化加工技术, 2016(8): 81-84.
- [20] 马立新,黄阳龙,范洪成.基于自适应变异微粒群优化SVM的电机轴承故障诊断方法[J].电力科学与工程, 2016, 32(2): 66-71.
- [21] 徐建军,杜蕾楠,徐建勇.WPT-MSE结合PNN的电机轴承故障诊断方法[J].自动化仪表, 2017, 38(4): 85-89.
- [22] 李宝栋,马向军.基于PSO-RBF神经网络的电机轴承故障诊断[J].自动化与仪器仪表, 2013(2): 143-144.
- [23] 李运红,张湧涛,裴未迟.基于小波包-Elman神经网络的电机轴承故障诊断[J].河北联合大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 81-85.
- [24] 贺岩松,黄毅,徐中明,等.基于小波奇异熵与SOFM神经网络的电机轴承故障识别[J].振动与冲击, 2017, 36(10): 217-223.
- [25] AMIRA T Y, CHOQUEUSE V, BENBOUZID M E H. Wind turbines condition monitoring and fault diagnosis using generator current amplitude demodulation [C] // IEEE International Energy Conference, 2010: 310-315.
- [26] STACK J R, HABETLER T G, HARLEY R G. Fault

- classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2004, 40 (3): 735-739.
- [27] ÖNEL I Y, BENBOUZID M E H. Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and Concordia transform approaches comparative study [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 13 (2): 257-262.
- [28] BENBOUZID M E H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47 (5): 984-993.
- [29] 侯新国, 吴正国, 夏立. 基于 Park 矢量模信号小波分解的感应电机轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (14): 115-119.
- [30] 李万清. 基于朴素贝叶斯方法和权值分析方法的电机轴承故障诊断[J]. 机电工程, 2012, 29 (4): 390-393.
- [31] 张巍, 秦玉志, 崔瑞. 双馈式风力发电机组发电机滚动轴承状态监测及故障诊断方法探究[J]. 吉林电力, 2015, 43 (6): 16-18.
- [32] 杜谋军. 基于时频流形的风力发电机轴承轴电流故障诊断与预测方法[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
- [33] 王冰, 李洪儒, 田海雷. 形态梯度解调在电机轴承故障特征提取中的应用研究[J]. 大电机技术, 2013 (5): 25-29.
- [34] 于湘涛, 卢文秀, 褚福磊. 柔性形态滤波和遗传规划在电机轴承故障诊断的应用[J]. 控制理论与应用, 2009, 26 (9): 953-957.
- [35] 岳红利, 田慕琴. 基于分形维数的电机轴承故障诊断[J]. 电气技术, 2011 (1): 21-23.
- [36] 贺王鹏, 瞿艳阳, 陈彬强, 等. 周期稀疏导向超小波在风力发电设备发电机轴承故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2016, 52 (3): 41-48.

收稿日期: 2018-01-05

(上接第 107 页)

- [15] FAN T, LI Q, WEN X H. Development of a high power density motor made of amorphous alloy cores [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (9): 4510-4518.
- [16] KRINGS A, BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, et al. Soft magnetic material status and trends in electric machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (3): 2405-2414.
- [17] KIYOTA K, CHIBA A. Design of switched reluctance motor competitive to 60 kW IPMSM in third-generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (6): 2303-2308.
- [18] KIYOTA K, KAKISHIMA T, CHIBA A. Comparison of test result and design stage prediction of switched reluctance motor competitive with 60 kW rare-earth PM motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (10): 5712-5721.
- [19] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [20] 吴建华. 开关磁阻设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

收稿日期: 2018-04-25

[主要栏目]

- 综述
- 研究与设计
- 变频与调速
- 控制与应用技术
- 应用
- 运行与保护
- 新产品介绍
- 新能源与风力发电
- 电机系统节能
- 测试技术与检测设备
- 行业信息

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态