

大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述

李 辉¹, 胡姚刚¹, 李 洋¹, 杨 东¹, 梁媛媛², 欧阳海黎³, 兰涌森³

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆科凯前卫风电设备有限责任公司, 重庆 401121;

3. 中船重工(重庆)海装风电设备有限公司, 重庆 401122)

摘要: 状态监测与故障诊断技术是降低大功率并网风电机组的故障率和其运维费用的有效手段之一。对风电机组状态评估和故障预测进行综述。首先, 在分析国内外风电机组故障统计情况的基础上, 提出状态监测需要关注的风电机组关键部件; 其次, 综述风电机组整机综合状态评估和故障预测研究现状; 然后, 重点评述和分析风电机组关键部件的状态监测与故障诊断方法; 最后, 提出大功率并网风电机组状态监测与故障诊断的研究要点及趋势。

关键词: 风电机组; 状态监测; 故障诊断; 状态评估; 多参数融合; 故障预测; 风电; 故障分析

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.002

0 引言

近年来, 风能在世界能源结构中地位越来越突出, 风电将逐步成为火电、水电之后的第三大常规能源。随着我国大型海上风电建设规划相继启动和现运行的大部分风电机组质保期逐渐超出或邻近超出, 高故障发生率和高运维成本的现状越来越引起风电运营商、制造商和第三方运维公司等机构的关注。相比陆地风电机组, 海上风电机组将面临更恶劣的运行环境和更高的运行维护成本。据统计, 海上风电机组的维护成本至少为陆上风电机组的 2 倍, 运维成本高达经济收入的 30%~35%, 其中约 25%~35% 为定期维护费用, 65%~75% 为事后维修费用^[1]。随着单机容量不断增加, 大功率风电机组的复杂性程度增加, 将会面临更高的故障率和运维费用。为了降低故障率和减少维修费用, 开展风电机组的状态监测和故障诊断研究, 对及时掌握风电机组运行状态, 及早发现潜在故障征兆, 降低故障率, 减少运维成本, 从而保证风电机组安全高效发电运行有着重要学术研究和工程应用价值^[2]。

鉴于风电机组对状态监测和故障诊断的急迫需求, 国内外相继出台了标准规范, 如 2009 年欧盟推

出了关于《风力机及其部件的机械振动测试与评估标准 VDI3834》; 2011 年国家能源局提出《风力发电机组振动状态监测导则》。上述标准主要是针对风电机组关键部件的振动特征量制定的规范要求, 对于实现全面的风电机组状态监测和故障诊断的要求还远远不够。与传统火电、水电机组相比, 风电机组在高空运行, 是多部件协同工作的复杂系统, 监测特征量类型多、数量大, 受风速大小和风向的不确定性以及变速恒频发电控制的约束, 运行状态通常在不同工况之间随机频繁切换, 各类特征量随机波动范围较宽, 利用单一或几个特征量采用传统状态监测和故障诊断方法, 难以得到风电机组真实的运行状态和实现准确故障定位。基于上述风电机组特殊性, 有必要了解风电机组状态监测和故障诊断领域研究现状, 综述该领域的研究方法和成果, 进一步促进该领域研究的开展。

目前, 风电机组状态监测和故障诊断领域的研究处于起步阶段, 已有的研究成果中, 对于整机的研究侧重于状态评估和故障预测, 对于机组的关键部件研究侧重于故障诊断。本文首先介绍风电机组的运行环境及其故障统计情况; 其次, 对整机状态评估和故障预测研究现状, 从统计分析、多参数融合和故障预测角度进行综述; 再次, 重点介绍和评述风电机组关键部件故障诊断方法的研究现状; 最后, 结合当前研究现状和存在的问题, 指出风电机组状态监测与故障诊断技术的发展趋势。

1 风电机组故障统计与分析

风电机组长期工作在恶劣的自然环境中, 受到正常和极限极端温度、太阳辐射、降雨、积雪、盐雾、沙尘、地形轮廓等因素影响, 各部件的绝缘强度、疲劳

收稿日期: 2015-01-29; 修回日期: 2015-09-14

基金项目: 国际科技合作专项资助项目(2013DFG61520); 国家自然科学基金资助项目(51377184); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(CDJZR12150074); 重庆市集成示范计划项目(CSTC2013JCSF70003); 重庆市研究生科研创新项目(CYB14014)

Project supported by International Science & Technology Cooperation Program of China(2013DFG61520), the National Natural Science Foundation of China(51377184), Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJZR12150074), the Integration and Demonstration Program of Chongqing(CSTC-2013JCSF70003) and Chongqing Graduate Student Research Innovation Project(CYB14014)

强度和运行性能等必将不可避免地随运行环境和运行时间的变化而逐渐下降,导致故障发生。文献[3]分析指出,易发生故障的齿轮箱、发电机、低速轴、高速轴、桨叶、电气系统、偏航系统、控制系统等关键部件,约占风电机组总成本的 80%~90%。国外某机构的各部件故障率与平均故障排除时间统计情况,如图 1 所示^[4],可见电气系统的故障率相对较高,齿轮箱、发电机和传动链的平均故障排除时间相对较长,约在 5~8 d。另外,我国的 2012 年《全国风电场设备运行质量状况调查报告》故障统计情况,变流器的每年故障发生频次最高为 0.20 次/台;齿轮箱相对较低,约为 0.09 次/台。各部件的故障详细情况如表 1 所示,可见叶片的平均排除故障耗时最长,达到 229.54 h,其次是齿轮箱和发电机,分别是 158.01 h 和 105.93 h。上述为国内外陆地风电机组的故障统计情况,统计结论基本相似:平均故障排除时间少的部件对应故障率较高,相反,故障率较低的部件对应的平均故障排除时间长。但值得注意的是,上述的统计分析结果仅来自于陆地风电场的情况,随着海上风电机组安装与并网运行,故障率高的关键部件,如变流器、变桨系统等电气控制系统,由于海上复杂运行环境和高难度的维修状况也必将花费较长的检修

时间或更多的故障排除时间。因此,对于大功率风电机组的状态监测而言,不仅需要关注机械系统的关键部件,故障率高的电气系统同样也要引起高度重视。

2 风电机组整机综合状态评估与故障预测

风电机组一般要求服役 20 a,风电运营商或者电网调度部门更多关心的是整机安全性、运行可靠性、发电能力、运行状态变化趋势及服役剩余时间等指标,因此,有必要开展整机的综合状态监测方法研究。目前,关于整机的状态方法研究大多是在风电机组数据采集与监视控制(SCADA)系统的运行数据基础上开展,本文对现有研究情况分类,从基于统计分析和多参数融合整机状态评估,及其故障预测 3 个方向分别进行综述。

2.1 基于统计分析的风电机组综合状态监测与评估

利用统计分析方法,通过分析大量的风电机组状态监测的各类特征量(功率、风速、转速、温度、振动等)离线运行数据,提取某些有规律的指标,与出厂设计标准值进行对比,或通过多个机组之间的比较,达到对风电机组整机状态监测的目的。目前,对功率运行数据进行统计分析研究较多,文献[5]中 2 台 1.5 MW 风电机组功率曲线如图 2 所示,它是通过获取反映机组运行性能的实测风速、功率等数据,采用 Bin 方法对数据进行统计处理后获得 2 台机组的功率曲线。通过 2 台机组的功率曲线、风能利用曲线及其标准差值,对机组的运行性能进行了对比分析和评估。图 2(b)所示机组 2 的实际功率曲线在低于额定

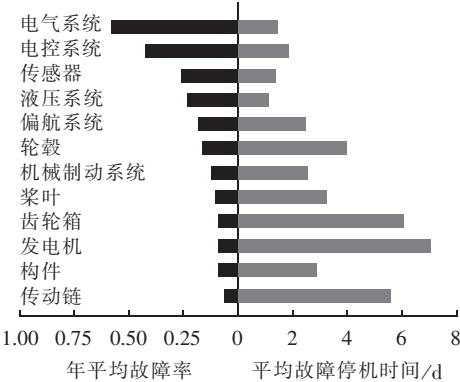


图 1 风电机组关键部件故障率与平均故障排除时间
Fig.1 Fault rate and average fault removal time for key wind turbine unit components

表 1 风电机组关键部件故障详细情况
Table 1 Detailed fault information of key wind turbine unit components

部件名称	故障统计的 机组数量/台	故障发生 次数	故障发生频次/ (次·台 ⁻¹ ·a)	平均排除故障 耗时/h
变流器	4069	811	0.20	21.74
发电机	4215	550	0.13	105.93
变桨系统	3515	415	0.12	20.52
齿轮箱	2891	261	0.09	158.01
偏航系统	1530	167	0.11	50.54
叶片	824	102	0.12	229.54
测风系统	1071	76	0.07	7.43
制动系统	583	69	0.12	3.46
控制系统	245	41	0.17	26.53
其他	4204	780	0.19	24.20

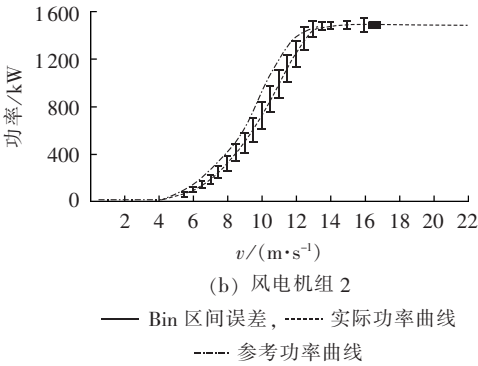
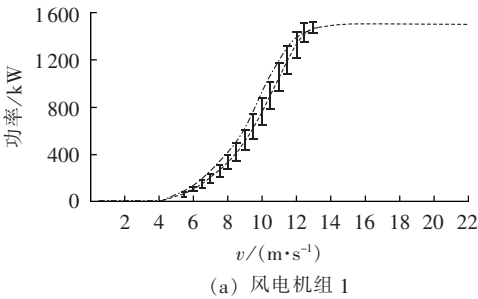


图 2 利用 Bin 方法得到的功率曲线及其标准差
Fig.2 Power curve and standard deviation obtained by Bin method

风速以下区间内要比图 2(a)机组 1 的低一些,而且在高于额定风速时,有部分 Bin 区间内功率的标准差偏大,运行状态不太稳定。据此可以判断图 2(a)对应机组 1 的性能优于图 2(b)对应的机组 2 的性能。另外,文献[6]基于 Copula 函数建立了风电机组功率曲线的概率模型,利用 SCADA 系统运行数据,实例结果表明,可对风电机组的叶片退化、偏航和变桨系统的早期故障征兆进行有效监测。文献[7]采用霍特林 T^2 统计方法,对机组的有功功率运行数据进行分析,来识别整机的运行状态。上述研究是通过功率信息进行统计分析来实现整机的状态监测,能否采用其他特征量的统计结果来更好地表征整个风电机组的运行状态,值得深入探索研究。

2.2 基于多参数融合的风电机组综合状态监测与评估

在该研究方向,大多数研究是在风电 SCADA 系统运行数据基础上进行开展的。风电机组 SCADA 系统中包括的物理特征量有:角度、压力、温度、速度、机舱振动、电气等,通过分析这些运行数据,可以反映整机的运行状态[8]。目前,关于风电机组多参数融合的状态监测和评估方法,包括人工神经网络[9-10]、高斯混合模型参数估计[1]、物元分析[11]、模糊综合评判[12-15]等。其中,由于模糊综合评判方法不需要过多依赖试验数据的分析,文献[14]利用模糊数学理论从技术经济指标、功能设置、可靠性和维修性这 4 个指标综合评判了风电机组的设计性能,但难以有效地反映机组实时运行状态。文献[14-15]在应用模糊综合评判时指出各评判指标赋予权重是建模的关键,而传统的变权理论在 2 项或多项指标发生严重偏离时,不能较好地实现对各评判指标的权重进行赋值。文献[15]虽然采用了层次分析法对评判指标赋予常权值,但是常权值的选取不能准确有效地反映机组运行状态。文献[12]针对子项目层中存在多项评判指标同时发生严重偏离的情况,引入劣化度指标,建立模糊综合评判的流程图,如图 3 所示。按照图 3 的评估流程,通过劣化度对监测数据进行量化,结合层次分析法确定权重,采用模糊综合评判方法,构建风电机组在线状态评估方法,并基于某 850 kW

风电机组在线监测数据,验证了所建的风电机组运行状态评估方法是有效的。文献[13]在文献[12]的基础上,考虑了影响评估指标的劣化度 g 的因素,提出了风电机组运行状态评估的改进模型。模糊综合评判方法是根据评估指标对评估对象本身存在的性态或类属上的亦此亦彼性,从数量上对其所属程度给予刻画和描述。物元分析理论不仅能从数量上反映被评估对象存在状态的所属程度,而且能从数量上刻划何时为此性态与彼性态的分界[16]。文献[11]提出应用物元分析理论的关联函数来计算各评估指标潜在的优劣程度,结合可拓集合中的关联函数,建立了风电机组运行状态的物元评估模型。

2.3 风电机组的故障预测方法

故障预测是指根据系统现在或历史性能状态预测性地诊断部件或系统完成其功能的状态(未来的健康状态),包括确定部件或者系统的剩余寿命或正常工作时间。故障预测的 3 种方法为:基于模型的方法、基于统计可靠性的方法和基于数据驱动的方法[17]。目前,基于模型的风电机组故障预测研究方向比较鲜见,而另外 2 个研究方向已出现在相关文献中。

a. 基于统计可靠性的风电机组故障预测研究。目前,关于已出质保期或服役了较长时间的风电机组,其运行性能下降和各部件劣化度增加,导致可靠性不断降低和平均故障间隔时间 MTBF(Mean Time Between Failures)逐渐缩短,对于上述方面的故障预测研究比较少见。而对试运行期间风电机组 MTBF 的预测已有少量文献报道,一般是在假设风电机组可靠性服从某种分布(如 Weibull、非齐次泊松等分布)的基础上开展研究,如文献[18-19]对试运行期间风电机组 MTBF 进行预测。其中,文献[18]提出了一种利用多台机组运行信息的 MTBF 估计方法,其基本思路是:根据风电机组安装及其故障数据的特点,构造具有相同配置的多台故障停机的随机截尾数据,对机组的可靠度进行 Kaplan-Meier 非参数估计;基于这种初步估计结果,再进行二参数 Weibull 分布拟合,并根据 Weibull 分布的性质计算得到机组的 MTBF,通过实例验证表明,试运行期间机组的 MTBF 不断增长。文献[19]提出了基于广义伽玛分布的系统可靠性增长预测方法。根据随机过程和可靠性增长预测理论,阐明风电机组试运行过程中伴随维修的故障次数遵从非齐次泊松过程的规律,分析了机组未来故障时间分布,预测机组未来故障时间及故障时刻 MTBF 的点估计及区间估计。并以表 2 中的 4 台风电机组 40 次运行故障数据为例,其中, $t_{ij}(i=1,2,3,4)$ 为第 i 台机组第 j 次被观测到的故障时间。按照上述预测方法,在给定置信度为 0.8 时,预测的第 41 次故障时间预测的点估计为 1704.44 h,与事后观测到故障时

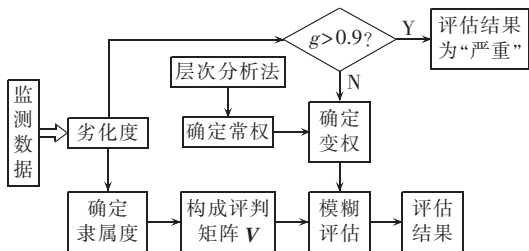


图 3 模糊综合评判的流程图

Fig.3 Flowchart of fuzzy synthetic evaluation

表 2 风电机组试运行故障数据
Table 2 Fault data of trial operation of
wind turbine unit

j	t_{1j}/h	t_{2j}/h	t_{3j}/h	t_{4j}/h
1	53	42	29	32
2	96	78	56	61
3	157	136	107	118
4	252	177	156	172
5	376	233	200	211
6	553	297	233	242
7	842	456	340	356
8	1398	710	574	598
9	—	1326	847	880
10	—	1597	1125	1196
11	—	—	1473	1512

间 1733 h 相比,相对误差为 1.6%。上述研究在缩短机组试运行时间、保证交付用户时机组满足可靠性指标等方面起到重要的作用。

b. 基于数据驱动的风电机组故障预测研究。在该部分的研究多集中利用 SCADA 数据对风电机组关键部件(如齿轮箱^[20-23]、发电机^[24]、主轴^[25]等)开展故障预测研究,现有的故障预测方法有支持向量机^[20]、ARMA 方法^[23-24]、多元线性回归方法^[25]、人工神经网络^[21,26]等方法。大多数研究的基本思路是通过残差趋势分布来实现故障预测,如图 4 所示的故障预测框架,将 SCADA 的监测数据作为预测模型的输入,通过所建立如人工神经网络或支持向量机的预测模型获得预测值,进而将实际监测值与预测值结合求取残差,结合利用事先通过专家经验或正态分布等方法确定的残差阈值,通过检测是否超过阈值或通过残差趋势分析实现对故障预测。另外,现有对整机故障预测方面多是基于 SCADA 监测数据信息开展研究,如文献[27]充分考虑风电机组各部件或子系统之间的相互作用和耦合关系,利用 SCADA 历史运行数据中的连续量监测数据,建立了风电机组有功功率的支持向量回归模型。该模型与 SCADA 报警系统相配合,组成了鲁棒性更强的风电机组整体的评估方法。该方法通过观察有功功率预测值与实际值的残差的变化趋势监测风电机组的运行状况。通过实例分析,如图 5 所示,对比了故障前有功功率的预测值与实际值,发现在故障发生前 25 min 残差严重超过阈值进而给出“风电机组已发生故障”的报警信号。文献[1]还采用工况辨识实现运行工况空间的划分。

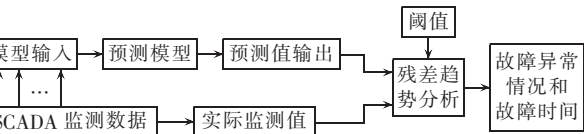


图 4 基于数据驱动的风电机组部件故障预测框架
Fig.4 Framework of data-driven fault forecasting for
wind turbine unit components

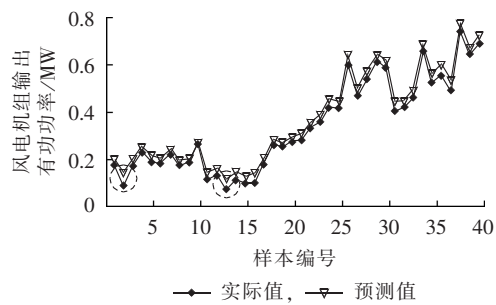


图 5 故障前 40 min 的样本预测值与实际值对比
Fig.5 Comparison between predicted and actual
samples for 40 minutes before fault

建立基于高斯混合模型(GMM)多状态特征融合的健康状态评价模型。采用健康衰退指数(HDI)作为表征整机健康状态的评价指标。图 6 所示为采用某 1.5 MW 风电机组运行数据验证得传动系统故障前整机的健康状态渐进变化情况,从图 6(b)的采用基于工况辨识的 GMM 可知:与图 6(a)相比,故障前 HDI 有较明显的增大趋势,可以用于实现故障的早期预报。

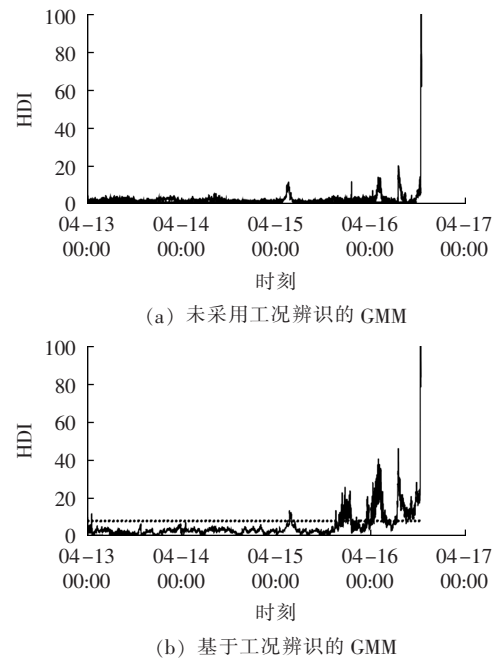


图 6 多状态特征参数建模的健康状态评价结果
Fig.6 Results of health condition evaluation by
multi-status characteristic parameter modeling

3 风电机组关键部件的在线故障诊断

风电机组是由多个部件组成,开展对其关键部件在线状态监测和故障诊断的研究,可及时识别故障征兆、实时掌握故障渐变发展程度和节省故障排查时间,为优化运维检修策略进而提高整机的运行可靠性具有重要的学术意义和工程实用价值。本节对风电机组的叶轮、齿轮箱、发电机、变流器和变桨系统

5 个关键部件的在线故障诊断研究现状进行综述。

3.1 叶轮

叶轮是捕捉风能关键部件,包括叶片和轮毂。目前,对叶片老化和损坏、叶轮不平衡故障的研究较多,现有的在线状态监测和故障诊断方法现多处在实验室模拟仿真阶段,在实际应用中比较鲜见。

a. 叶片老化和损坏。叶片运行环境恶劣,酸雨、冰冻等侵蚀以及叶片旋转时变化的冲击力破坏,引起叶片裂纹甚至破裂。关于叶片动态无损在线监测技术有声发射、超声波、光纤光栅和振动分析等技术。相比超声波和光纤光栅技术,声发射可获得叶片上较为全面的缺陷信息,具有相对较高的灵敏度和分辨率,能够准确监测到薄弱区位置^[28]。文献[29]针对叶片初始裂纹特征难以提取的问题,提出了一种逐步提取并消减噪声源信号从而获得微弱裂纹故障特征的盲提取方法。该方法可提取初始萌生裂纹的声发射信号特征,但不适用于裂纹再扩展信号特征的提取。文献[30]通过对叶片的裂纹萌生和裂纹再扩展这 2 种裂纹进行实验研究。针对因声发射信号中存在裂纹故障特征与噪声特征相混叠,造成这 2 种裂纹很难区分的问题,应用所提出的优化小波重分配尺度谱分析方法,用于识别和区分裂纹再扩展和裂纹萌生信号特征。

b. 叶轮不平衡故障。随着单机容量不断增大,叶轮直径越来越长,风力机的柔性也越强,尤其在北方冬季,叶片结冰使得叶轮不平衡造成整体结构振动进一步加大,将在传动链部件产生疲劳应力,严重影响机组寿命。现有大多数研究是从发电机的电气信号中提取故障特征,文献[31-32]利用发电机的功率来检测叶轮不平衡故障。文献[32]理论上推导叶轮不平衡故障对功率的影响,建立了包含叶轮、传动链与发电机的风力机仿真模型,仿真得到有功功率及其频谱分析结果如图 7 所示,叶轮旋转的一倍频分量即为故障特征频率,随着不平衡质量的增大而幅值增大。上述为现有叶轮状态监测和故障诊断的初步研究进展情况,考虑到风电机组叶轮体积庞大,且

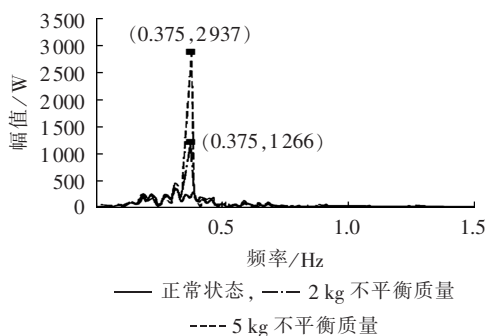


图 7 3 种状态下电功率频谱

Fig.7 Frequency spectrum of active power for three conditions

在高空变速运行,面临着恶劣运行环境和各种不确定干扰因素,应重点深入开展准确有效的叶轮异常特征提取方法研究。

3.2 齿轮箱

关于齿轮箱在线监测和故障诊断的研究较多,除离线检测的油液分析方法外,在线的分析方法主要包括:振动分析、温度分析和电气分析。

a. 振动分析。通常从振动特征量的时域和频域中提取齿轮箱的故障特征。文献[33]采用时域信号统计指标对齿轮箱的振动特征量信息进行初步处理,并采用 FFT 和功率谱分析方法实现对故障类型定位。文献[34]应用小波变换理论,对齿轮箱的联轴器以及高、中、低速轴的振动信号进行分析,得到比传统时域和频域分析方法更好的监测结果。文献[35]通过对齿轮箱振动测试和分析,从时域和频域角度出发分析齿轮箱损坏时呈现的特性。文献[36]提出了利用谱峭度诊断行星齿轮箱故障的方法,利用谱峭度可有效分析出信号中的冲击成分。文献[37]将小波神经网络应用到齿轮箱的故障诊断。目前,现有的风电机组状态监测系统产品也大多以振动特征量分析为主,采用数据离线分析和专家辅助分析方式,获取得到齿轮箱轴承和齿轮的状态监测和故障诊断结果。但是,振动分析对于低频信号具有一定的局限性,且在齿轮箱本体上安装传感器获取振动信号需增加投资和维护费用。

b. 温度分析。温度特征量在一定程度上反映齿轮箱的运行状态^[38]。文献[39-40]建立齿轮箱正常工作状态下的温度模型并用其进行温度预测,应用滑动窗口方法实时计算残差的统计分布特性,当残差的均值或标准差的置信区间超出预先设定的阈值时,发出报警信息。其中,文献[40]采用温度趋势分析方法对齿轮箱的运行状态进行监测。利用非线性状态估计方法建立齿轮箱正常工作状态下的温度模型并用其进行温度预测。通过模拟齿轮箱的故障情况,在 SCADA 监测数据中加入温度偏移来模拟故障,分析结果如图 8 所示,均值曲线的 95% 置信区间的上限在第 451 个滑动窗口超出了预先设定的均值阈值,在第 551 点处,监测出齿轮箱温度的异常变化情况。然而,由于温度具有热惯性特性,变化缓慢,易受到外界环境因素影响,采用固定阈值时,当发出预警信号时,部件已经严重劣化,故障可能即将发生,难以起到早期故障诊断的作用。因此,有必要研究多种工况下的温度特征量动态阈值确定方法。

c. 电气分析。从发电机中电气信号的时域和频域中提取故障特征信息来实现齿轮箱的故障诊断。文献[41]搭建了同步风电机组传动链的状态监测和故障诊断试验平台,通过设置各类故障,应用小波变

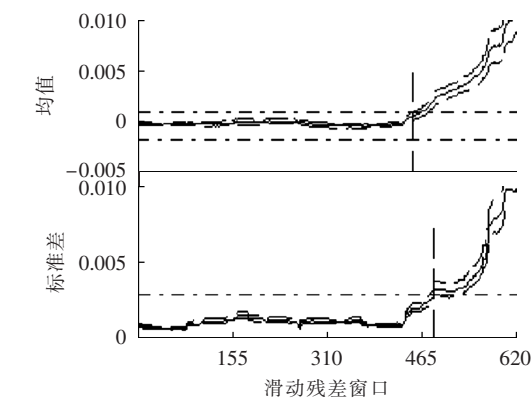


图 8 温度偏移后的残差滑动窗口统计特性
Fig.8 Moving window statistics of residual error after temperature drift

换方法,将提取的电气、机械监测信息中的信号特征进行对比分析,结果表明,可利用解调的电流或功率信号特征监测和诊断齿轮断齿故障。文献[42]针对多级齿轮箱,通过解调异步发电机的电流信号来诊断齿轮箱故障。通过搭建实验室的风电机组模型,模拟输出端在断齿故障情况,观察功率信号的频谱变化情况,图 9 为实验用齿轮箱详细的频率分布,可见齿轮箱输出端的转频 f_3 为 21 Hz。采用离散小波变换,输出端断齿前后的定子电流频谱分析,如图 10 所示,可见相比齿轮箱断齿前 f_3 的幅值附近,断齿后 f_3 的幅值附近陡峭度比较大。相比其他信号,电气特征量的采集不需要另行加装传感器,不会影响到机组的完整性。但是风电机组运行环境复杂,干扰源较多,还可能存在多部件异常特征交叉重叠发生,需考虑实际运行环境,深入研究基于电气特征量的齿轮箱状态特征提取算法。

d. 油液分析。齿轮啮合在非正常的磨损状态出现,会瞬间产生巨大磨损颗粒,或磨损率上升导致磨损颗粒数量显著增加。油液分析被认为是实现齿轮箱状态监测和故障诊断最有效的技术之一[43],包括红外光谱技术、铁谱技术、颗粒分析技术、气相色谱

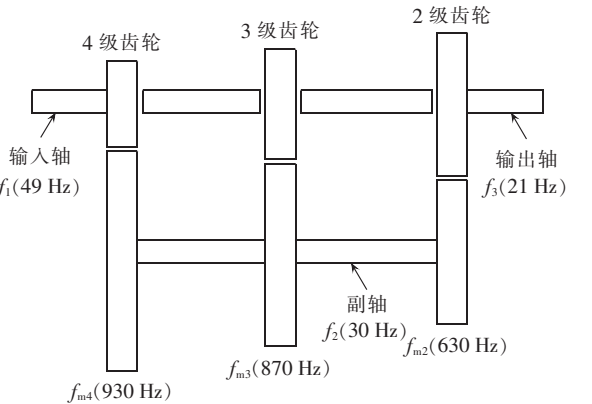


图 9 齿轮箱详细的频率分布
Fig.9 Detailed frequency distribution of gearbox

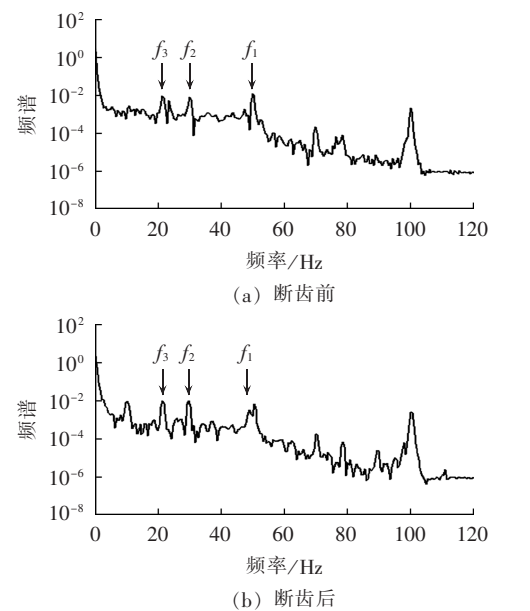


图 10 电流信号的振幅解调频谱
Fig.10 Spectra of amplitude-demodulated current signal

技术等,通过提取油液中各项监测指标,包括运动粘度、PQ 铁谱、酸值、水分等,监测和分析油液中各类监测指标变化情况,实现齿轮箱异常检测。目前,我国许多机构先后建立了油液监测实验室,但是因受限于监测硬件(传感器)设计和制造技术,存在测量误差较大、精度低因素,还没有在实际中实现在线油液监测。

3.3 发电机

关于发电机的故障诊断研究,大多是通过在线监测定子电流、转子电流、有功功率变化情况,对匝间短路、单相或多相短路、轴承损坏、转子偏心等进行故障诊断。文献[44]从转子电流和电压中提取出谐波成分来监测匝间短路情况。但当匝间短路程度较为微弱时,难以提取其谐波成分。文献[45]提出当定子绕组发生轻微匝间短路时,三相定子电流的时域波形变化比较微小,而三相电流 Park 矢量轨迹随着故障变化,可以得到正常及匝间故障情况下的 Park 矢量轨迹,如图 11 所示,与正常情况相比,在 3 匝短路情况下, Park 矢量轨迹的椭圆环宽度和倾斜角度相对较大,可以以此故障特征来确定是否短路并估计匝间短路的严重程度。文献[46]利用发电机的电流、磁密、温度及振动特征量运行数据,分别采用 BP 神经网络、Elman 神经网络、概率神经网络(PNN)对短路故障进行故障诊断,采用 PNN 的诊断模型见图 12,结果表明:PNN 对于故障诊断有较强的容错能力,可进行结构自适应调整,能够根据信号来综合判断短路故障究竟属于单一还是复合型故障。另外,关于轴承损坏和转子偏心监测,文献[47]认为发电机轴承损坏或变形,将引起转子偏心和振动,进而引

起气隙改变,在定子绕组内感生出相应的谐波电流,可通过对定子电流或功率信号分析处理来监测轴承状态。文献[48]应用连续小波变换提取发电机有功功率信息特征,用于转子偏心或轴承状态监测和故障诊断。上述研究是基于电气特征量分析来开展研究,能否进一步考虑从发电机之外的机械信号中提取发电机的故障特征,通过冗余校验等方法提高故障诊断的准确性,值得探索研究。

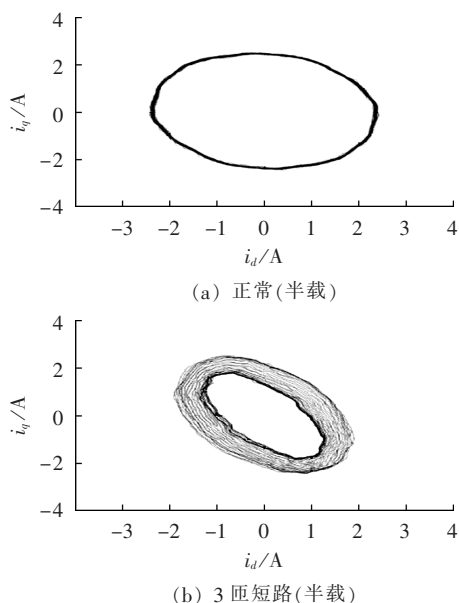


图 11 实验测得双馈电机的 Park 矢量轨迹
Fig.11 Park vector trajectories of doubly-fed machine measured by experiment

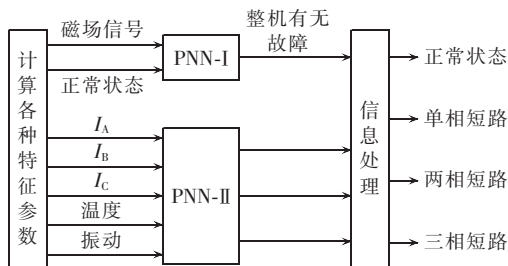


图 12 基于 PNN 的发电机诊断模型
Fig.12 Generator diagnosis model based on PNN

3.4 变流器和变桨系统

a. 变流器。变流器作为电能回馈至电网的关键控制通道,是影响风电机组及入网安全稳定运行的重要环节[49]。现有文献中多采用基于样本训练的在线变流器的智能故障诊断方法,如文献[50-51]对双馈型风电机组变频器的故障进行了分类,提出了采用基于波形直接分析的 BP 神经网络故障诊断方法,但计算复杂较难实现。文献[52]选择风电变流器故障电流,处理后作为小波神经网络的学习样本和检测样本,改进算法的小波神经网络可以克服传统故障检测方法在发电机同步运行时出现故障后误报的问题,且提高了在亚同步和超同步时发生故障时的诊

断精度。上述研究主要侧重于风电变流器的故障诊断,然而,由于风速的不确定性,风电变流器运行的可靠性受机侧变流器低频运行和风速随机波动影响较为严重,变流器输出功率变化很大,使得功率器件运行在不同载荷水平下,可能导致器件结温的变化,功率器件会承受长期、频繁的不均衡电热应力,造成疲劳累积,导致焊料开裂、焊线脱落等故障现象发生。图 13 所示为 11 m/s 的湍流风速及双馈风电机组的机侧变流器 IGBT 结温变化情况[53],可见 IGBT 功率器件在整个变流器寿命周期内需要承受频繁波动且幅值为 20℃ 的结温热循环,不可避免地将加快器件老化和失效速度,因此,基于疲劳、失效机理的风电变流器的器件的在线状态监测应该引起关注。目前关于功率器件的该领域研究比较少见,文献[54]研究了 IGBT 功率循环前后其栅极电压、跨导及通态压降随温度变化的特性,实验表明:栅极电压、跨导、导通压降这 3 个电参数可作为 IGBT 模块的状态监测特征参量。然而,由于其端部信号变化微弱以及可能的其他因素(如温度)导致其变化,再加上测量工具固有的误差,实际应用中存在困难。

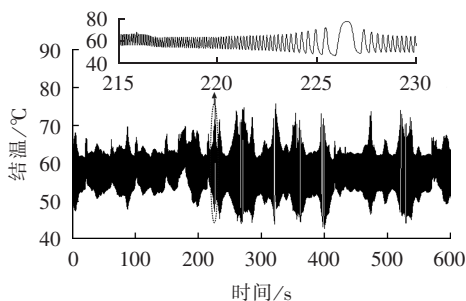


图 13 11 m/s 的湍流风速及机侧变流器 IGBT 结温
Fig.13 Temperature of rotor-side IGBT junction at 11 m/s turbulent wind speed

b. 变桨系统。关于变桨系统的故障诊断研究较少,变桨系统转速极低,运行不连续,负载随机,对其在线状态监测可采用振动分析或发电机的电流信号进行分析[55]。另外,考虑基于单一参量的绝对阈值评估方法,可能导致现有变桨系统状态监测方法不能及时准确地在线判断其异常状态的问题,文献[56]利用 Relief 方法挖掘出表征变桨系统状态的主要特征量,并提出基于多参量距离的变桨系统状态异常识别方法,异常识别流程如图 14 所示。首先,通过机组 SCADA 系统的历史监测数据,基于 Relief 方法挖掘变桨系统特征参量向量 F ;然后,按照挖掘出的特征参量向量 F 选择 SCADA 系统的实时监测数据作为 F 的测量值向量(记为 A_F),并实时计算出 A_F 与相应特征参量回归模型输出的观测值向量(记为 A'_F)的距离(记为 δ),从而根据此特征参量的距离是否超出其阈值(距离阈值记为 τ)来识别变桨系统的异

常状态。其中, A_{F-1} 和 A'_{F-1} 分别为归一化处理后的特征参数向量的测量值向量和观测值向量。最后,通过实例验证,在选取合适的距离阈值条件下,比单参数绝对阈值的评估方法更能准确地识别其异常状态,可在线识别出变桨系统的状态异常情况。

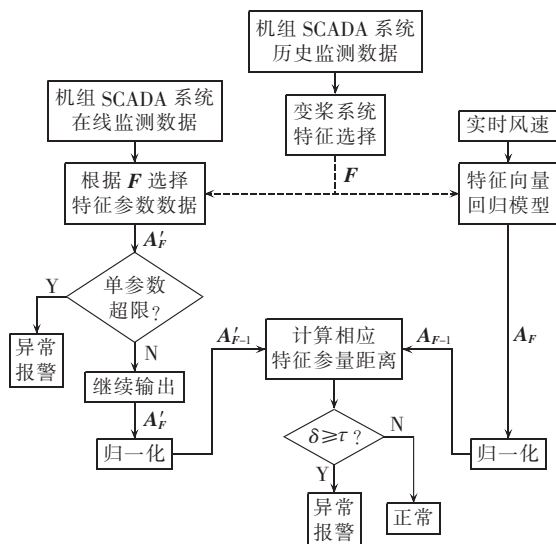


图 14 基于多参量距离的变桨系统异常识别流程图

Fig.14 Flowchart of abnormality identification based on multiple parameter distances for electric pitch system

4 结语与展望

随着大功率风电机组安装与并网运行,对其运行可靠性将提出更高的要求,必将促进风电机组状态监测与故障诊断技术进一步发展。本文对风电机组整机状态评估和故障预测方法以及其关键部件故障诊断的研究现状进行综述,综合分析了现有的风电机组状态监测与故障诊断技术研究现状和存在的不足,提出以下研究要点及趋势。

(1) 对于地处偏远、交通不便的陆地风电机组和受复杂运行环境约束的海上风电机组往往存在故障诊断难、维修时间长等问题。通过对风电机组故障统计情况分析可知,除了对导致停机时间长的机械系统等部件关注的同时,还应对故障频率高的电气部件引起高度重视,如变流器、变桨系统等,对电气系统的在线监测和故障诊断技术研究可能是今后的发展趋势之一。

(2) 受随机风速大小和风向随机变化影响,风电机组 SCADA 等监测信息呈现出频繁的波动性和不确定性,基于数据挖掘的整机综合状态评估和故障预测可能是今后的研究趋势。如,应用数据挖掘技术,考虑原始运行数据波动性和间歇性,探索基于监测数据的风电机组整机运行状态渐变规律的新方法,制定出整机长期和短期状态趋势变化的定量指标。另外,还可以考虑监测数据不同时间尺度固有特

点,研究基于数据驱动方法的整机故障预测方法,获取整机的在线运行状态和剩余运行时间。

(3) 从风电机组关键部件的故障诊断研究现状分析情况可知,现有的方法各有优缺点和局限性,如何准确地从监测数据中提取故障特征以提高故障诊断的精确度,研究多类故障诊断技术将可能是今后的研究热点。近期可能的研究趋势如下。

① 基于电气特征量的关键部件状态监测和故障诊断研究。风电机组是一个机电耦合较强系统,任何机械和电气故障势必会在电气特征量中有所反映,如当齿轮箱齿轮、各部件的轴承损坏,发电机定子和转子的匝间短路和相间短路等故障发生时,会不同程度地引起发电机转轴振动,进一步改变气隙分布情况,进而将故障特征信息叠加在定子和转子的电气特征量上。如何基于电气特征量,寻求各类故障的机理和演化规律,特别是揭示异常的根源,实现有效故障诊断需进一步深入研究。

② 多参数信息融合的关键部件状态监测和故障诊断研究。目前,单一参数信息含量有限或者故障特征提取较难,很难准确反映关键部件的异常状态,特别是早期的潜在故障。可考虑充分利用多类型参数信息,依据某种方法实现时空冗余和互补信息融合,获取更为准确关键部件状态监测和故障诊断结果,如行星轮的通过效应或行星架和太阳轮的旋转对啮合振动产生额外的调幅作用,导致横向振动信号的频谱结构非常复杂,需借助于复杂的故障特征提取方法实现对故障频率的提取,而扭转振动信号不受这些额外的调幅效应影响,使得频谱结构更加简单,但是扭振振动信号还可能受测量误差和噪声干扰等影响,提取的故障特征准确性会受到影响。然而,对这 2 类特征量的监测信息,采用基于信息融合的故障特征提取方法,可能会获得更准确的故障诊断结果。

③ 基于老化失效过程的关键部件状态评估和故障预测研究。受随机风速大小和风向随机变化影响,电气系统老化失效过程存在不确定性和难预测性,有必要开展基于老化失效过程的电气部件状态评估和故障预测研究,如探索关键部件在运行过程的不同阶段的磨损、老化和失效过程的一般规律,研究关键部件状态评估和故障预测方法,如变流器功率器件作为整个系统中故障发生率高且较为脆弱的部件之一,在掌握其不同运行阶段的磨损、老化和失效过程的一般规律基础上,考虑变流器功率器件的应力分布、疲劳积累,以及在非平稳工况导致的功率器件结温大幅度波动等因素,从状态监测角度研究出适合功率器件在线状态评估、运行可靠性以及故障预测建模的新方法。

参考文献:

- [1] 董玉亮,李亚琼,曹海斌,等. 基于运行工况辨识的风电机组健康状态实时评价方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(11):88-95.
DONG Yuliang,LI Yaqiong,CAO Haibin,et al. Real-time health condition evaluation on wind turbines based on operational condition recognition[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(11): 88-95.
- [2] TCHAKOUA P,WAMKEUE R,OUHROUCHE M,et al. Wind turbine condition monitoring:state-of-the-art review,new trends and future challenges[J]. Energies,2014,7(4):2595-2630.
- [3] CHEN Z,GUERRERO J M,BLAABJERG F,et al. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2009,24(8):1859-1875.
- [4] HAHN B,DURSTEWITZ M,ROHRIG K. Reliability of wind turbines[M]. Berlin,Germany:Springer,2007:329-332.
- [5] 刘昊,柳亦兵,辛卫东,等. 基于运行数据的风力发电机组功率特性分析[J]. 电网与清洁能源,2009,25(7):53-56.
LIU Hao,LIU Yibing,XIN Weidong,et al. Wind turbine power performance based on the operation data[J]. Power System and Clean Energy,2009,25(7):53-56.
- [6] GILL S,STEPHEN B,GALLOWAY S. Wind turbine condition assessment through power curve Copula modeling[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy,2012,3(1):94-101.
- [7] KUSIAK A,ANDRE W,ANOOP V. Monitoring wind farms with performance curves[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013,4(1):192-199.
- [8] YANG W,COURT R,JIANG J. Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis[J]. Renewable Energy, 2013,53:365-376.
- [9] ZAHER A,MCARTHUR S D J,INFIELD D G. Online wind turbine fault detection through automated SCADA data analysis [J]. Wind Energy,2009,12(6):574-593.
- [10] LI Jian,LEI Xiao,LI Hui,et al. Normal behavior models for the condition assessment of wind turbine generator systems[J]. Electric Power Components and Systems,2014,42(11):1201-1212.
- [11] 李辉,胡姚刚,杨超,等. 并网风电机组运行状态的物元评估方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(6):81-85.
LI Hui,HU Yaogang,YANG Chao,et al. A matter-element assessment method of a grid-connected wind turbine driven generator system under on-line operating conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(6):81-85.
- [12] 李辉,胡姚刚,唐显虎,等. 并网风电机组在线运行状态评估方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(33):103-109.
LI Hui,HU Yaogang,TANG Xianhu,et al. Method for on-line operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30 (33):103-109.
- [13] 肖运启,王昆朋,贺贯举,等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13): 103-109.
XIAO Yunqi,WANG Kunpeng,HE Guanju,et al. Fuzzy comprehensive evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(13):103-109.
- [14] 王志国,马一太,杨昭,等. 风力发电机组性能分析的模糊综合评判方法[J]. 太阳能学报,2004,25(2):177-181.
WANG Zhiguo,MA Yitai,YANG Zhao,et al. Fuzzy comprehensive evaluation method of wind power generation unit[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2004,25(2):177-181.
- [15] 郭建斌,闻源长. 基于 AHP 方法的在役风电机组安全检测技术研究[J]. 能源研究与利用,2008,4(4):36-39.
GUO Jianbin,WEN Yuanchang. The safety detect technique research of using wind set based on AHP method[J]. Energy Research and Utilization,2008,4(4):36-39.
- [16] 熊浩,孙才新,杜鹏,等. 基于物元理论的电力变压器状态综合评估[J]. 重庆大学学报,2006,29(10):24-28.
XIONG Hao,SUN Caixin,DU Peng,et al. Synthetic assessment of power transformer condition based on matter-element theory [J]. Journal of Chongqing University,2006,29(10):24-28.
- [17] 彭宇,刘大同,彭喜元. 故障预测与健康管理工作综述[J]. 电子测量与仪器学报,2010,24(1):1-9.
PENG Yu,LIU Datong,PENG Xiyuan. A review:prognostics and health management[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2010,24(1):1-9.
- [18] 芮晓明,张穆勇,霍娟. 试运行期间风电机组平均故障间隔时间的估计[J]. 中国电机工程学报,2014,34(21):3475-3480.
RUI Xiaoming,ZHANG Muyong,HUO Juan. An estimation method of wind turbines' mean time between failures during the trial operation period[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(21): 3475-3480.
- [19] 孙永全,郭建英,陈洪科,等. 兆瓦级直驱风力发电机组可靠性增长预测[J]. 中国电机工程学报,2010,30(18):67-71.
SUN Yongquan,GUO Jianying,CHEN Hongke,et al. MW level direct-driven wind turbine reliability growth prediction[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(18):67-71.
- [20] 赵洪山,胡庆春,李志为. 基于统计过程控制的风机齿轮箱故障预测[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(13):67-73.
ZHAO Hongshan,HU Qingchun,LI Zhiwei. Failure prediction of wind turbine gearbox based on statistical process control[J]. Power System Protection and Control,2012,40(13):67-73.
- [21] 马玉峰. 风电机组齿轮箱故障趋势预测方法研究[D]. 保定:华北电力大学,2013.
MA Yufeng. Research on fault trend prediction method wind turbine gearbox[D]. Baoding:North China Electric Power University,2013.
- [22] 马涛. 基于振动信号的大型风力发电机齿轮箱健康状态预测研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.
MA Tao. Research on megawatt wind generator gearbox health state prediction based on vibration signal[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2013.
- [23] 王斐斐. 基于状态监测信息的风电机组齿轮箱故障预测研究 [D]. 保定:华北电力大学,2012.
WANG Feifei. Research on wind turbine fault prediction based on monitoring information[D]. Baoding:North China Electric Power University,2012.
- [24] 吴建军,杨俊华,杨梦丽,等. 风力发电机状态预测与故障诊断的研究[J]. 华东电力,2013,41(12):2561-2566.
WU Jianjun,YANG Junhua,YANG Mengli,et al. State prediction and fault diagnosis of wind turbines[J]. East China Electric Power,2013,41(12):2561-2566.
- [25] 张小田,鄢盛腾,周雪青,等. 基于状态监测的风电机组主轴承早期故障预测方法[J]. 广东电力,2012,25(11):6-9,50.

- ZHANG Xiaotian, YAN Shengteng, ZHOU Xueqing, et al. Early stage failure forecast method for main bearing of wind turbine based on state monitoring[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(11): 6-9, 50.
- [26] BANGALORE P, TJERNBERG L B. An approach for self-evolving neural network based algorithm for fault prognosis in wind turbine[C]//2013 IEEE PowerTech (POWERTECH). Grenoble, France; [s.n.], 2013: 1-6.
- [27] 梁颖, 方瑞明. 基于 SCADA 和支持向量回归的风电机组状态在线评估方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 7-12.
- LIANG Ying, FANG Ruiming. An online wind turbine condition assessment method based on SCADA and support vector regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 7-12.
- [28] BEATTIE A G. Acoustic emission principals and instrumentation [J]. Journal of Acoustic Emission, 1983(2): 95-128.
- [29] 周勃, 陈长征, 赵新光, 等. 风力机叶片蒙皮初始裂纹的盲信号提取[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1483-1489.
- ZHOU Bo, CHEN Changzheng, ZHAO Xinguang, et al. Blind signal extraction for initial crack on blade skin of wind turbine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7): 1483-1489.
- [30] 陈长征, 赵新光, 周勃, 等. 风电机组叶片裂纹故障特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(2): 112-117.
- CHEN Changzheng, ZHAO Xinguang, ZHOU Bo, et al. Study on extracting crack fault feature of wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(2): 112-117.
- [31] CASELITZ P, GIEBHARDT J. Rotor condition monitoring for improved operational safety of offshore wind energy converters [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(2): 253-261.
- [32] 杨涛, 任永, 刘霞, 等. 风力机叶轮质量不平衡故障建模及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 130-135.
- YANG Tao, REN Yong, LIU Xia, et al. Research on the modeling and simulation of wind turbine rotor imbalance fault [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 130-135.
- [33] 唐新安, 谢志明, 王哲, 等. 风力发电机组齿轮箱振动测试与分析[J]. 电气制造, 2010(11): 72-74.
- TANG Xin'an, XIE Zhiming, WANG Zhe, et al. Wind turbine gearbox vibration test and analysis[J]. Electric Manufacture, 2010(11): 72-74.
- [34] 张照煌, 丁显, 刘曼, 等. 基于小波变换的风电机组传动系统故障诊断与分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(增刊): 210-218.
- ZHANG Zhaohuang, DING Xian, LIU Man, et al. Based on wavelet transform of fault diagnosis and analysis of wind generator transmission system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(Supplement): 210-218.
- [35] 唐新安, 谢志明, 王哲, 等. 风力机齿轮箱故障诊断[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(1): 120-124.
- TANG Xin'an, XIE Zhiming, WANG Zhe, et al. Fault diagnosis of gearbox for wind turbine[J]. Noise and Vibration Control, 2007, 27(1): 120-124.
- [36] BARSZCZ T, RANDALL R B. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1352-1365.
- [37] 姜香菊, 刘二林. 小波神经网络对风力发电机齿轮箱的故障诊断[J]. 自动化仪表, 2012, 33(4): 9-12.
- JIANG Xiangju, LIU Erlin. Fault diagnosis based on wavelet neural network for gearbox in wind generator[J]. Process Automation Instrumentation, 2012, 33(4): 9-12.
- [38] 胡姚刚. 并网风力发电机组的运行状态评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- HU Yaogang. Operating conditions assessment for a grid-connected wind turbine generator system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [39] 郭鹏, 李淋淋, 马登昌. 基于 IPSO-BP 的风电机组齿轮箱状态监测研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 439-445.
- GUO Peng, LI Linlin, MA Dengchang. Wind turbine gearbox condition monitoring with IPSO-BP[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(3): 439-445.
- [40] 郭鹏, INFELD D, 杨锡运. 风电机组齿轮箱温度趋势状态监测及分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(32): 129-136.
- GUO Peng, INFELD D, YANG Xiyun. Wind turbine gearbox condition monitoring using temperature trend analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(32): 129-136.
- [41] YANG W, TAVNER P J, WILKINSON M R. Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(1): 1-11.
- [42] MOHANTY A R, CHINMAYA K. Fault detection in a multi-stage gearbox by demodulation of motor current waveform[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1285-1297.
- [43] 孙玉彬, 金声超, 梁培沛, 等. 油液监测技术在风电机组中的应用分析[J]. 风能, 2014(2): 76-79.
- SUN Yubin, JIN Shengchao, LIANG Peipei, et al. Analysis on application of oil monitoring technology in wind turbine [J]. Wind Energy, 2014(2): 76-79.
- [44] SHAH D, NANDI S, NETI P. Stator-interturn-fault detection of doubly fed induction generators using rotor-current and search-coil-voltage signature analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1831-1842.
- [45] 魏书荣, 符杨, 马宏忠, 等. 双馈风力发电机定子绕组匝间短路诊断与实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 25-28.
- WEI Shurong, FU Yang, MA Hongzhong, et al. Stator winding inter-turn short-circuit diagnosis and experimental research on doubly-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 25-28.
- [46] 何山, 王维庆, 张新燕, 等. 基于类神经网络的 MW 永磁风力发电机短路故障智能诊断[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(9): 24-29.
- HE Shan, WANG Weiqing, ZHANG Xinyan, et al. Short circuit fault intelligent diagnosis of MW permanent magnet wind power generator based on artificial neural network[J]. Electric Machines & Control Application, 2011, 38(9): 24-29.
- [47] 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.
- QIAN Yayun, MA Hongzhong. A survey of fault diagnosis method for doubly-fed induction motor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2011(5): 5-8.
- [48] 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 Oil Energy Conversion, 2010, 25(3): 715-721.
- [49] 李辉, 季海婷, 秦星, 等. 考虑运行功率变化影响的风电变流器

- 可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 1-8.
- LI Hui, JI Haiting, QIN Xing, et al. Reliability evaluation considering operational active power variation of wind power converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 1-8.
- [50] 于辉, 邓英. 变速风力发电机变流器故障诊断方法[J]. 可再生能源, 2010, 28(3): 89-92.
- YU Hui, DENG Ying. The diagnosis method for converter fault of the variable speed wind turbine[J]. Renewable Energy Resources, 2010, 28(3): 89-92.
- [51] 王占霞, 张晓波. 基于SOM网的风电变流器故障诊断[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(4): 35-38.
- WANG Zhanxia, ZHANG Xiaobo. Fault diagnosis of wind turbine's converter based on SOM neural net[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(4): 35-38.
- [52] 段其昌, 张亮, 袁景明, 等. 改进的小波神经网络算法对变流器的故障诊断方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(8): 2143-2145.
- DUAN Qichang, ZHANG Liang, YUAN Jingming, et al. Fault diagnostic method for power converter based on wavelet neural network with improved algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(8): 2143-2145.
- [53] 李辉, 秦星, 刘盛权, 等. 双馈风电变流器 IGBT 模块功率循环能力评估[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 6-12.
- LI Hui, QIN Xing, LIU Shengquan, et al. Assessment of power cycling capability for converter IGBT module of DFIG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 6-12.
- [54] PATIL N, DAS D, GOEBEL K, et al. Identification of failure precursor parameters for Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)[C]//2008 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, Marriott Tech Center. Denver, CO, USA: [s.n.], 2008: 1-5.
- [55] 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.
- [56] 李辉, 杨超, 李学伟, 等. 风机电动变桨系统状态特征参量挖掘及异常识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1922-1930.
- LI Hui, YANG Chao, LI Xuewei, et al. Conditions characteristic parameters mining and outlier identification for electric pitch system of wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1922-1930.

作者简介:



李辉

李辉(1973—), 男, 浙江永康人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为风力发电技术、新型电机及其系统分析(E-mail: cqulh@163.com);

胡姚刚(1985—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向为风电机组运行监测与故障诊断(E-mail: huyaogang345@163.com);

李洋(1991—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向为风电变流器运行可靠性分析;

杨东(1989—), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 研究方向为风电机组状态监测与评估;

梁媛媛(1984—), 女, 河南安阳人, 工程师, 硕士, 从事大型并网风力发电机组控制系统的研发工作;

欧阳海黎(1963—), 男, 重庆人, 高级工程师, 硕士, 主要从事大型风电机组安全高效运行研究工作;

兰涌森(1982—), 男, 四川自贡人, 工程师, 硕士, 从事大型风电机组电控系统运行和调试分析研究工作。

Overview of condition monitoring and fault diagnosis for grid-connected high-power wind turbine unit

LI Hui¹, HU Yaogang¹, LI Yang¹, YANG Dong¹, LIANG Yuanyuan², OUYANG Haili³, LAN Yongsen³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing KK-QIANWEI Wind Power Equipment Co., Ltd., Chongqing 401121, China;

3. CSIC(Chongqing) Haizhuang Wind Power Equipment Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: Condition monitoring and fault diagnosis are effective ways to decrease the fault rate of grid-connected high-power wind turbine unit and its operational cost. The condition monitoring and fault forecasting technologies of wind turbine unit are reviewed. The key components of wind turbine unit requiring condition monitoring are proposed based on the statistical analysis of wind turbine unit faults at home and abroad, the research status of comprehensive condition assessment and fault forecasting for whole wind turbine unit is summarized, the methods of condition monitoring and fault diagnosis for the key components are emphatically analyzed, and the outlines and trend of condition monitoring and fault diagnosis for grid-connected high-power wind turbine unit are proposed.

Key words: wind turbine unit; condition monitoring; fault diagnosis; condition assessment; multi-parameter fusion; fault forecasting; wind power; failure analysis