

大型风电机组电机驱动型主动偏航系统 故障诊断技术概述

邓子豪¹, 李录平^{1*}, 刘 瑞¹, 杨 波², 陈 茜¹, 李重桂¹

(1. 长沙理工大学, 长沙 410014; 2. 广州特种承压设备检测研究院, 广州 510000)

摘 要: 在分析风电机组偏航系统结构特点的基础上, 综述了电机驱动型主动偏航系统的故障类型及对应的故障机理、常用的故障诊断技术与方法的研究进展。经过文献分析发现, 大功率风电机组电机驱动型主动偏航系统故障诊断技术的研究主要集中在大数据平台研究、多传感器信息融合技术开发等热点领域。未来, 风电机组偏航系统故障诊断技术研究将以成本较低的基于 SCADA 系统的数据深度挖掘为发展方向。

关键词: 风电机组; 偏航系统; 故障诊断; 故障预测; 故障分析

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引言

作为可再生能源发电形式之一, 风力发电技术经过多年的发展, 已成为国内外主要的可再生能源发电形式^[1]。大型风电机组的结构复杂, 具备典型的大型旋转机械设备的特征, 且由于风电场常建设在偏远地区, 风电机组极易受到运行环境的影响, 故障率较高, 且故障机理呈现多样性。与常规设备相比, 风电机组因风的随机性而导致识别其运行状态变化较为困难。而风电机组一旦发生故障, 轻则导致电网波动、影响发电质量, 重则导致电网故障, 无法供电, 产生安全事故。

风电机组偏航系统具有连接机舱与塔筒的作用, 主要功能是使风轮对准风向及机组自动解缆, 其与风电机组运行的经济性和安全性有极大关联^[2]。文献[3]的研究统计表明, 偏航系统故障率可达到 6.7%, 而因该系统故障导致的风电机组停机比例占总停机时间的 13.3%, 如此高的故障时间占比使偏航系统故障成为判断风电机组能否安全可靠运行的重要考量因素。某风电场运

行数据表明, 在年均发生故障统计次数与单位容量年损失电量这 2 项数据统计中, 偏航系统故障都位列前 3 位^[4]。

相关文献表明^[5-6], 陆上风电机组的运维成本基本占风电场收益的 10%~15%, 而海上风电机组的占比更是达到了 25%~30%。现代大型风电机组的偏航系统位于塔架顶端, 维修更换过程复杂, 运维困难, 因此建立有效的状态监测和故障诊断机制, 可帮助机组提高安全性、稳定性及经济性, 还能及时了解机组内部构件的运行情况, 对不同故障类型做出正确的诊断, 达到提前预防、及时解除故障的目的。因此, 进行风电机组偏航系统故障诊断的研究具有重要意义。

现阶段, 各国都在不断加大针对风电机组偏航系统故障诊断的研究, 由于我国国内的风电发展晚于国外, 相关诊断及技术研究较少, 因此需要加强相关方面的研究。由于篇幅限制, 再加上主流大型风电机组多使用电机驱动的主动偏航形式, 所以本文仅综述了电机驱动型主动偏航系统故障诊断技术的研究进展。

收稿日期: 2019-06-29

基金项目: 广东省质量技术监督局科技项目 (2018CT28); 广州特种承压设备检测研究院科技项目

通信作者: 李录平 (1963—), 男, 教授, 主要从事动力机械状态检测与故障诊断方面的研究。cs_liluping@163.com

1 偏航系统的故障类型与机理

基于风向随机变化的特性，大型水平轴风电机组需要依靠偏航装置调整风轮旋转平面正对风向，以达到风能利用率最大化。已商业化应用的风电机组偏航系统存在多种形式：根据驱动力来源可分为液压型和电动型；根据是否为主动形式可分为主动偏航和被动偏航；根据偏航轴承齿圈分布位置可分为内啮合驱动和外啮合驱动；根据偏航轴承的类型可分为偏航滚动轴承式和偏航滑动轴承式。

现役的大部分风电机组类型为水平轴风电机组，采用主动偏航方式，主要以电动机作为驱动力来源，此种偏航驱动机制的主要组成部分包括轴承、电机、齿轮、制动器及制动盘等。表1简单介绍了电机驱动型偏航系统的控制原理，其中， θ 为偏航角，代表风向角与风轮角度的差值。

表1 电机驱动型偏航系统的控制原理

Table 1 Control principle of motor-driven yaw system

	偏航方向	偏航电机转向
$0^\circ < \theta \leq 90^\circ$	锐角顺时针	正转
$90^\circ < \theta \leq 180^\circ$	钝角顺时针	正转
$180^\circ < \theta \leq 270^\circ$	钝角逆时针	反转
$270^\circ < \theta \leq 360^\circ$	锐角逆时针	反转

下文根据偏航系统的系统构成，对系统主要部件的故障类型进行叙述。

1.1 偏航齿轮故障

1.1.1 偏航大齿及驱动齿断裂故障

风电机组正常偏航时，应是4台偏航电机同步运转驱使机舱正对风向，受力均匀。发生偏航大齿及驱动齿断裂故障的原因为^[7]：

1) 其中1台偏航电机抱闸，驱动失效，制动盘为抱死状态，而另外3台偏航电机正常运转，偏航大齿圈与偏航减速器小齿轮挤压，造成断裂；

2) 由于卡钳漏油或大齿润滑脂泄露，污染偏航刹车片与刹车盘，致使摩擦力不足，大风工况下难以制动，机舱滑移使得驱动器抱闸，刹车片磨损加剧失效；

3) 极端风况下的机舱滑移使大齿与驱动齿相互碰撞，冲击导致裂纹或断裂发生；

4) 驱动器变速箱油量过少也会产生齿轮传动故障，导致偏航驱动电机转速过低或锁死，小齿轮承受过大力矩，造成齿轮断裂，电机烧坏。

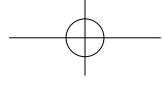
1.1.2 异常噪音故障

齿轮的运行常伴随啮合的问题，存在部件间的接触、摩擦和振动，因此会存在响声，且有时会出现不规律的声响，即存在噪音的问题。文献[8]的研究表明，由于润滑不到位造成的偏航小齿和偏航轴承齿圈间的齿侧间隙不合理，会导致噪声的产生。文献[9]指出，偏航噪声形成的原因主要是：1) 刹车卡钳预紧力过大或过小；2) 刹车卡钳摩擦片制作工艺不达标；3) 偏航运行速度不在正常范围；4) 风电机组的整体刚性强度不够。

1.2 偏航轴承故障

偏航轴承是偏航系统中用于连接机舱与塔筒的关键部件，既连接机舱底部，又连接塔筒顶部。现主要采用4点接触球轴承，故障形式以滚道与钢球失效为主^[10]，但随着风电产业的成果积累，现有轴承工艺水平得到了很大提升，一般情况下并不会存在这一故障问题。风电机组处于百米高处或严寒地带，低温使润滑的流动受阻；机组位于内陆热带地区或处于高温季节时，高温工作环境会大幅损坏润滑的黏度和稳定性，润滑易氧化、硬化和软化，难以达到高温持久润滑，从而造成润滑不充分，使润滑脂从轴承缝隙中溢出^[11]。而需要承受较大倾覆力矩的偏航轴承润滑形式主要采用自动注脂式，部件有部分裸露在外，会受到灰尘、雾气及极端雨雪天气的腐蚀，由此说明了轴承密封性及内部润滑的重要性。

偏航轴承主要承受来自轮毂处因风力造成的荷载及机舱部分的荷载。相关文献针对此处荷载进行了研究分析。偏航齿圈与偏航轴承直接相连，两者之间关系密切，文献[12]模拟验证了碰撞模型的正确性，发生碰撞后的齿轮依旧会发生接触，依此发现，影响弹性回转支承



(即偏航轴承)正常运作的异常振动主要是来源于冲击力。

分析偏航轴承联接处的结构,有利于研究偏航系统故障来源。文献[13]研究了大型风电机组偏航系统的联接螺栓在预紧力分散工况下的外部荷载影响,模拟了轴承滚子刚度与其承受荷载之间的关系,并在此基础上采用有限元方法建立了偏航系统整体模型,计算了该处螺栓的静强度荷载及疲劳荷载,得到了 $S-N$ 曲线,且验证了模拟刚度与实际数据之间的符合程度。文献[14]对回转轴承及其相应结构进行了有限元建模,但指出该模型不足以直接应用于回转轴承。

1.3 偏航驱动装置故障

偏航驱动装置主要包括偏航驱动器、偏航驱动减速机 and 偏航电机等多个机械部件,机械部件的运行常会因发生接触而造成振动,且噪声就来源于异常振动。文献[15]指出了偏航驱动装置产生噪声的原因:1)齿圈与驱动器小齿啮合处无润滑,或润滑不充分造成的干摩擦,从而产生振动和噪声;2)偏航驱动装置中油位过低,偏航驱动器齿轮气密性不足或运行过程中润滑油发生泄露,造成驱动器内传动齿之间的干摩擦,使其运行过程中产生噪声。

针对啮合效果的问题,文献[16]认为,进行优化后的结构结合有合理传动比的渐开线少齿差行星齿轮的偏航驱动器更利于解决该问题。文献[17]指出,应用两级传动形式传动机构,并结合渐开线少齿差与零齿差行星齿轮的风电机组偏航驱动器,具有良好的啮合效果。文献[18]总结了振动程度的评价标准,主要有4种情况,并以1.5 MW风电机组偏航驱动减速机为例,说明了振动与噪声的关系,分析了传动机理,指出了偏航减速机传动过程噪声产生的主要原因。

关于偏航驱动器连接高强度螺栓的研究,主要是针对偏航力矩、荷载较大等方面。文献[19]基于VDI 2230标准,计算了偏航驱动器处的高强度螺栓的安全校核,并将该方法与传统计算方

式进行了对比验证,发现该方法具有指导意义。偏航噪声故障会隐藏多种机械故障,隐含着许多不可忽视的故障。

偏航电机是偏航驱动装置的核心部件,故障原因主要包括损耗大、稳定性差和偏航驱动阻力过大,但由于针对各式各样电机的研究已相当成熟,所以少有专门以偏航电机为诊断对象的研究,此处无需多做介绍。文献[20]对电机故障的形式进行了总结。电机故障主要包括电气故障与机械故障,其中,电气故障主要是短路、断路与过热等故障形式;机械故障主要是轴承过热、损伤及磨损严重等故障形式。文献[21]针对偏航电机频繁启动导致电机损耗过大和电机稳定性不足这一故障,提出了采用液压马达代替偏航电机的方法,并经理论分析和AMESim仿真证实了方法可行。文献[22]中发明了采用双向定量泵驱动低速大扭矩液压马达的液压偏航驱动器,主要解决了可靠性低与偏航驱动阻力大的问题。针对偏航液压马达液压管路破裂、可靠性差及偏航精度低的问题,文献[23]中去除了液压中的电磁换向及调速阀,以减少该部件带来的故障问题,而是采取直驱电磁式的器件进行偏航驱动辅助。

由于风力造成的机舱不稳定会对风电机组的运行造成潜在危害,因此为保证机舱的稳定性,现有偏航制动部件一般采用液压方式提供阻尼力矩。但该部件进行相应配置时,若未依据实际设定,会导致液压站压力偏高;操作不规范还会造成液动力过大,超出运行上限,导致部件损坏^[24]。文献[25]指出了偏航刹车钳与刹车盘摩擦故障的原因,主要来自卡钳、刹车盘处压力或润滑介质泄露。偏航驱动部分与轴承之间啮合异常主要是齿侧隙偏小造成的过度挤压、偏航电机转轴偏心问题,以及偏航轴承齿面润滑污染。

表2为上述偏航系统故障发生的位置、主要故障类型和原因的简单总结。

表2 偏航系统主要故障发生位置、类型及原因
Table 2 Location, type and cause of main faults of yaw system

偏航系统故障发生位置	故障类型	故障原因
偏航齿轮	断裂	卡钳漏油或润滑脂泄露；机舱滑移发生碰撞； 润滑不足
	异常噪声	刹车卡钳预紧力过大； 磨擦片质量不达标； 风电机组整体刚性强度不足
偏航轴承	损坏	润滑不足；安装不合理
偏航驱动	摩擦异常	卡钳油路不通或漏油； 安装位置不对称； 刹车压力偏大；
	电机失效	短路；断路；过热

2 偏航系统故障诊断技术与方法

本章节的风电机组偏航系统故障诊断技术主要是指能进行故障预测的技术，目前该类技术主要分为基于物理机理的故障预测技术和基于数据分析的故障预测技术。前者主要以受损与裂纹等物理可见的故障为主，并结合相应物理理论进行建模，分析故障演化进程，可进行关键部位计算分析，精度较高，但成本与难度较大；而后者可基于实时数据与历史运行数据进行分析，现有文献研究也体现了该方向为产业研究热点，技术可行性很强。

因此，本章节主要对基于数据分析的故障预测技术进行介绍，该类技术可分为基于模型的方法、基于人工智能的方法，以及基于振动信号分析的方法。

2.1 基于模型的方法

基于模型的方法的优点是能最直观的与实际情况进行比较和分析，并且在建模过程中可以了解模型的结构特点及其主要部分，可靠性较高；但不足之处在于模型运算过程耗时较长，成本较高，不利于工程利用。

何冲^[26]利用有限元技术和子模型技术建立了偏航回转支承静力与应力分析模型及局部模型，并分析了滚道疲劳集中位置及缘由。丁龙建^[27]利用几何方法研究了滚道接触状态，并建立了数学模型，得出了压力分布情况。另外，为研究额定工况下的振动噪声主要激励来源，有研究者在Pro/E平台对偏航减速装置进行了建模与模拟分析，实现了动力仿真^[28-31]。

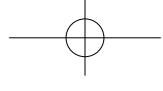
何玉林等^[32]通过理论分析接触下的轴承滚珠与其内外圈的刚度，建立了偏航轴承承载时的平衡受力模型，采用带松弛因子的牛顿-拉夫逊方法解析了该工况下的应力与角度，以此确定了经过有限元检验的基于以上参量的精确数值解法。此外，基于上述成果，何玉林等^[33]还得出负游隙条件下双排4点接触轴承的接触应力及接触角。周飞^[34]以德国某公司研制的S70型1.5 MW级风电机组的偏航轴承为研究对象，施加静荷载与动荷载在偏航回转支承上进行模态分析，成功建立了可求得轮齿最大静荷载和滚动物体最大应力值的有限元模型，并可得到最大值发生部位。

2.2 基于人工智能的方法

由于风电产业的不断发展，促使在其他领域已得到大范围应用的人工智能方法被应用至风电机组偏航系统故障诊断领域，并出现了很多基于人工智能的故障诊断方法。研究表明，基于人工智能的故障诊断方法在风电领域取得了很好的效果，相较于传统方法，该方法无需建立精确模型，就能够很好地分析处理模糊故障。应用于风电机组偏航系统故障诊断领域的人工智能方法主要包括基于模糊逻辑的方法、基于数据挖掘的方法、基于神经网络的方法，以及专家系统。

2.2.1 基于模糊逻辑的方法

模糊逻辑是模拟人的思维推理，主要针对的是模型无法知道或难以确定的非线性系统。SCHLECHTINGEN等^[35]采用基于长达3年的SCADA系统数据的ANFIS，成功预测了多种风电机组故障。针对强噪声与非线性的典型特征，



程静等^[36]以风电机组滚动轴承为诊断对象,提出了基于二值双谱和模糊聚类的故障诊断方法,对其振动信号进行分析诊断。

2.2.2 基于数据挖掘的方法

基于大数据的发展和风电场 SCADA 系统不断完善的情况,基于挖掘 SCADA 数据之间关联的方法更具有发展前景。

翟永杰等^[37]以 V80 机型为研究对象,通过比较滑动式偏航系统与常用滚动轴承偏航系统的优、缺点,使用 LabVIEW 建立了一种对多个偏航电机参数在线监测数据采集系统,通过监测数据发现偏航电机存在功率不一致、运行不稳定等情况,并提出了相应的解决措施。梁颖等^[38]建立了回归预测模型,运用 SVR 算法输入 SCADA 系统监测的风电机组数据,可输出机组的有功功率。

偏航控制在发电量与机组保护方面起着重要作用,而保证偏航角测量的精度是保证偏航控制有效性的基础,且零点漂移还会影响精度。因此,为了提高偏航角的实测精度,PEI 等^[39]先是针对偏航角传感器零点漂移故障进行了定义,定性评价零点漂移问题,然后基于不同偏航角情况的功率特性,提出了基于监测和 SCADA 数据驱动的零点漂移故障监测的方法。

AN 等^[40]研究了直驱型风电机组的正常工况,进行了包括偏航故障、风轮气动不平衡故障在内的共 5 项实验室实验,并通过训练,在 SVM 模型中建立了特征参数与故障类型之间的映射,提出了一种结合了支持向量机与特征选择的直驱式风电机组偏航系统故障诊断方法。BI 等^[41]将人工智能应用于 SCADA 数据,并将风电机组的预测功率输出同实际功率输出进行了比较,以预测误差作为故障检测的指标。YE 等^[42]提出了基于 SCADA 的风力机状态监测系统,分别对发电功率、转子速度和俯仰角同风速之间的关系进行了 3 次测试,应用更客观的粒子群优化算法,融合所有测试结果来识别风力机的健康状况。

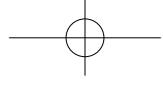
2.2.3 基于人工神经网络的方法

模拟大脑神经处理模式的人工神经网络方法对非线性问题的处理有很好的效果,且在信号处理方面有不俗成效。

张文秀等^[43]针对风电机组机械系统滚动轴承建立了同时利用归一处理与一致性检验的样本进行 BP 神经网络训练的神经网络故障诊断模型,并能通过检验提高诊断效率与预测效果。文献 [44-46] 均提出了基于神经网络的诊断方法。针对风力机振动信号的高度非线性及非平稳的特点,AN 等^[47]以直驱式风电机组为诊断对象,提出了基于反向传播神经网络 (BPNN) 的故障诊断方法,该方法考虑了包括偏航、叶片断裂在内的 5 种工况的特征,采用 BP 神经网络,选取振动信号作为分析信号,输入相互垂直的时域信号特征参数样本,依此建立了 BPNN 模型,将特征与故障类型进行关联。为分析风电机组的结构与工况,张海涛等^[48]将风向特性提炼成 Elite 因子,并结合蚁群智能算法以提高数据精度,提出了一种应用 BP 神经网络的新型风电机组偏航系统故障检测方法。针对故障样本少、信号弱及不易提取的特点,钮满志等^[49]将加速度信号的小波能谱与温度、扭矩信号结合成特征向量,提出了基于小波能谱与支持向量机融合的故障诊断方法,并针对 3 种螺栓状态进行了比较,发现支持向量机方法优于 BP 神经网络方法,还提出了 SVM 可应用于风电回转轴承的在线故障诊断系统。

2.2.4 专家系统

专家系统是一种模拟人类专家决策的处理复杂问题的智能方法。CHEN 等^[50]针对偏航系统等部件故障特征及其原因进行了详细分析和总结,并基于此建立了结合专家系统工具夹及 Visual C++ 的故障诊断专家系统。针对风电机组故障定量分析难度较大的原因,贾子文等^[51]利用几何平均法、灰色关联度方法和层次分析法进行融合,提出了一种改进的专家群决策方法。



2.3 基于振动信号分析的方法

在现有的故障诊断研究中，诊断技术较为成熟的是基于振动信号分析的技术，风电机组的振动数据可运用在故障预测中。

通过查阅文献发现，振动分析是目前对旋转机械状态监测进行有效检验和故障诊断应用最多的方法，如油膜振荡^[52]。操炼^[53]较为详细地研究了噪声与振动检测和无损检测等。KHAN等^[54]通过研究偏航轴承及齿轮润滑油和液压油的性能，了解了运行设备的磨损信息。

处理平稳信号运用傅里叶分析的方法较为理想，但由于偏航系统结构复杂，属于典型非线性系统，所以处理非平稳信号采用小波分析效果更好^[55]，提取故障信号特征及分析处理最适用。该方法的优势在于时频结合这一特点，可广泛应用于故障诊断领域^[56-57]，极适用于电机诊断，对偏航电机的故障诊断具有参考意义。

LU等^[58]通过振动分析对轴承进行检测与诊断。由于应变及旋转作用，风电机组偏航制动装置在运行过程中会不断产生振动，导致电流变化，程静等^[1]通过在相应部位安装传感器检测电流，预测到设备的相应运行状况，由此可提前预警故障，触发相对应的动作，采取预防措施。同理，为分析噪声信号，秦剑^[59]通过安装相应传感器采集噪声，采用小波分析处理噪声故障特征，进行风电机组机械故障及运行状态的分析诊断。

3 偏航系统故障诊断研究展望

1) 现有的大型风电机组偏航系统只有基于单一或2种参数信号监测，且仅限于风力机的故障越限报警停机功能。未来，可开发出基于多参数故障预测的偏航系统故障诊断系统，提供更高效的运维方案。

2) 成本控制是各大风电企业考虑的重要问题。基于此，对于亟待开发应用的在线故障诊断系统而言，其开发成本将是重点考虑的问题。相对于传统建模分析手段而言，在现有的大数据

SCADA系统平台背景下，未来，基于SCADA的数据挖掘技术开发的偏航系统故障在线诊断系统更具发展前景，其成本可以得到有效控制；但由于不同厂商的不同类型风电机组的SCADA系统存在差异性，因此，系统兼容性也是开发者需要考虑的问题之一。

3) 现有大型风电机组的SCADA系统的数据精度已得到一定程度的提升，相比于以前的10 min/次的数据采集精度，现在可以达到1 s/次的数据采集精度。但是在这种精度下提供数据的有效性有限，比如高频数据难以提供，因此为了提供更好的故障分析，需要不断地精细化数据。而且由于各大运营风电场出于商业保护等原因，导致海量的风力机有效数据不能得到充分利用，更谈不上及时利用。基于现有的人工智能技术、大数据、云端数据平台的开发利用，未来，可建立可靠的云端共享平台，在远程情况下即可及时且最大化地利用风力机有效数据，有助于偏航系统故障在线诊断系统的开发。

4) 现有大型风电机组故障诊断模式主要以现场技术人员的经验判断为主，而此种诊断方式与风电场工作人员的工作年限和经验积累有很大的关系，效率低下且误差较大。未来，由于风电机组的复杂结构，故障诊断方法的单一性会使偏航系统故障诊断精度难以达到要求，因此需要建立完善的偏航系统故障诊断专家系统数据库，且其可以有效结合其他故障诊断方法进行分析诊断，即采用多种方法融合的方式，综合各种方法的优势，会更适合风电机组偏航系统的故障分析及诊断。

4 结论

本文分析了风电机组偏航系统结构的特点，并对电机驱动型主动偏航系统故障类型及对应的故障机理、常用的故障诊断及方法的研究进展进行了综述。分析后发现，大功率风电机组电机驱动型主动偏航系统故障诊断研究主要集中在大数据平台研究、多传感器信息融合技术开发等热点领域。

[参考文献]

- [1] 程静, 王维庆, 何山. 风电机组噪声检测及故障诊断研究[J]. 自动化仪表, 2014, 35(3): 39 - 41.
- [2] 谢源, 强珏贤. 大型兆瓦级风力发电设备状态监控系统研究[J]. 上海电机学院学报, 2009, 12(4): 271 - 275.
- [3] 孙鹤旭, 孙泽贤, 林涛. 数据挖掘技术在风电机组故障诊断中的应用[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 81 - 85.
- [4] 张艳霞. 风电机组状态监测与故障预测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [5] ENTEZAMI M, HILLMANSEN S, WESTON P, et al. Fault detection and diagnosis within a wind turbine mechanical braking system using condition monitoring[J]. Renewable energy, 2012, 47: 175 - 182.
- [6] Wind turbine power performance testing: IEC 61400-12-1:2005[S]. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [7] 山西某风电场 2.0 MW 机组偏航大齿及驱动齿断裂故障分析报告[EB/OL]. [2019-02-03]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190203/961367.shtml>.
- [8] 刘永刚. 风力发电机组偏航系统常见故障的分析及处理[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(4): 103.
- [9] 罗方正. 风电机组偏航系统运行特性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [10] 周楠, 赵荣珍, 郑玉巧. 大型风电机组偏航轴承动态性能研究[J]. 机械传动, 2016, 40(1): 64 - 67, 109.
- [11] 付亮. 风力发电机轴承润滑方式的改进[J]. 通用机械, 2018(12): 30 - 31.
- [12] YAN L, ZHAO R, HONG L, et al. Dyna turbine generator yaw gear system with elastic impact and its simulation[C]// Fourth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications, Zhangjiajie, China, November 6-7, 2013, Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013: 284 - 290.
- [13] 钟杰, 梁裕国, 晏红文, 等. 风力发电机组偏航系统联接螺栓强度分析方法研究[J]. 机械工程师, 2014(7): 187 - 189.
- [14] GÖNCZ P, GLODE S. Calculation model for pre-stressed bolted joints of slewing bearings[J]. Advanced engineering, 2009, 3(2): 175 - 186.
- [15] 王耀, 单泽众. 风机偏航执行机构噪音剖析和预防[J/OL]. 中国科学: 技术科学, 2019(5): 1 - 8 [2019-05-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5844.TH.20190507.1419.002.html>.
- [16] 陶磊. 风力发电新型偏航驱动器设计与研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [17] HAANS W, SANT T, VAN KUIK G, et al. HAWT near-wake aerodynamics, Part I: Axial flow conditions[J]. Wind energy, 2008, 11(3): 245 - 264.
- [18] 张彬. 新型风电偏航驱动减速机减振降噪机理与仿真分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [19] 郑大周, 王兵, 莫尔兵, 等. VDI 2230 在风机螺栓分析中的应用[J]. 东方汽轮机, 2013(2): 26 - 31.
- [20] 朱振海. 风力发电机组故障诊断与预测技术研究综述[J]. 工程建设与设计, 2018(18): 63 - 64.
- [21] 闫利文, 艾存金, 王福山, 等. 基于 AMESim 的风力发电机液压偏航驱动系统的研究[J]. 液压气动与密封, 2015, 4(35): 19 - 21.
- [22] 苏文海, 姜继海, 刘庆和. 一种风力发电机的偏航驱动装置: CN200910071424.6[P]. 2009-02-20.
- [23] 苏文海, 陈建华, 姜继海. 用于风力发电机上的无偏航齿轮的偏航驱动装置: CN200910071361.4[P]. 2009-01-24.
- [24] 高杨. 降低风力发电机偏航减速箱断齿故障率初探[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2017(11): 176 - 177.
- [25] 陈波, 何明. 兆瓦级风电机组偏航系统异响原因分析和改进[J]. 风能, 2012(11): 88 - 91.
- [26] 何冲. 风电偏航轴承接触应力分析与疲劳寿命研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [27] 丁龙建. 兆瓦级风力发电机偏航轴承的力学性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2011.
- [28] MATHIS R, REMOND Y. Kinematic and dynamic simulation of epicyclic gear trains[J]. Mechanism and machine theory, 2009, 44(2): 412 - 424.
- [29] DION J L, MOYNE S L, CHEVALLIER G, et al. Gear impacts and idle gear noise: Experimental study and non-linear dynamic model[J]. Mechanical systems and signal processing, 2009, 23(8): 2608 - 2628.
- [30] 王淑营, 徐礼钜. 移动活齿传动的受力及接触强度分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(6): 82 - 85.
- [31] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [32] 何玉林, 侯海波, 杜静, 等. 风力发电机偏航轴承载荷分布及接触角数值解法研究[J]. 机械设计, 2012, 29(4): 68 - 72.
- [33] 何玉林, 冯博, 杜静. 风力发电机组偏航系统结构有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2011(1): 17 - 19.
- [34] 周飞. 水平轴风力发电机偏航轴承的性能分析与研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [35] SCHLECHTINGEN M, SANTOS I F. Wind turbine condition monitoring based on SCADA data using normal behavior models, part 2: Application examples[J]. Applied soft computing, 2014, 14(C): 447 - 460.
- [36] 程静, 王维庆, 樊小朝, 等. 基于二值双谱和模糊聚类的风电轴承故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 765 - 771, 874.
- [37] 翟永杰, 李冰, 常启诚. 风机滑动偏航系统的在线监测系统数据分析[J]. 现代电子技术, 2015, 38(21): 123 - 126.
- [38] 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, 31.
- [39] PEI Y, QIAN Z, JING B, et al. Data-driven method for wind turbine yaw angle sensor zero-point shifting fault detection[J]. Energies, 2018, 11(3): 553.
- [40] AN X L, JIANG D X, LI S H, et al. Fault diagnosis of direct-drive wind turbine based on support vector machine[J]. Journal of physics conference series, 2011, 305(1): 012030.
- [41] BI R, ZHOU C, HEPBURN D M, et al. A NBM

- based on p-n relationship for DFIG wind turbine fault detection[C]//2015 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies(ICSGCE), October 20-23, 2015, Offenburg, Germany, 2015.
- [42] YE X, ZHOU L. Using SCADA data fusion by swarm intelligence for wind turbine condition monitoring[C]//2013 Fourth Global Congress on Intelligent Systems, December 3-4, 2013, Hong Kong, China, 2013.
- [43] 张文秀, 武新芳. 风电机组状态监测与故障诊断相关技术研究[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(2): 50 - 56, 63.
- [44] YANG S L, LI W H, WANG C L. The intelligent fault diagnosis of wind turbine gearbox based on artificial neural network[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, April 21-24, 2008, Beijing, China, 2008.
- [45] BAILEY S. A neural network approach to transmission line modeling and fault diagnosis of hydraulic press control system[J]. Journal of systems and control engineering, 2002, 216: 357 - 367.
- [46] LINARIC D, KOROMAN V. Fault diagnosis of a hydraulic actuator using neural network[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology, December 10-12, 2003, Maribor, Slovenia, 2003.
- [47] AN X L, JIANG D X, Li S H. Application of back propagation neural network to fault diagnosis of direct-drive wind turbine[C]//2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, November 5-7, 2010, Nanjing, China, 2010.
- [48] 张海涛, 高锦宏, 吴国新, 等. 蚁群优化算法在风电偏航故障检测中的应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(11): 48 - 50, 55.
- [49] 钮满志, 陈捷, 封杨, 等. 基于支持向量机的风电偏航回转支承故障诊断[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 117 - 122.
- [50] CHEN C Z, LI Y. The fault diagnosis of large-scale wind turbine based on expert system[J]. International conference on graphic and image processing (ICGIP 2011), 2011, 8285.
- [51] 贾子文, 顾煜炯, 邢月, 等. 改进专家群决策方法的风电机组故障风险评价研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(3): 453 - 460.
- [52] 王小斌. 油液分析技术在机械设备状态监测中的应用分析[J]. 煤炭技术, 2001, 20(9): 52 - 53.
- [53] 操炼. 振动信号在船舶设备检验中的应用探讨[D]. 上海: 上海海事大学, 2005.
- [54] KHAN M, LQBAL T, KHAN F. Reliability and condition monitoring of a wind turbine[C]// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 1-4, 2005, Canadian, 2005.
- [55] 马超, 陈西宏, 姚懿玲, 等. 变频机组小波分析早期故障检测系统的设计[J]. 自动化仪表, 2011, 32(5): 11 - 13, 16.
- [56] 朱明玲, 王直杰, 郑丽霞. 改进的小波变换在罗拉故障诊断中的应用[J]. 自动化仪表, 2011, 32(3): 36 - 38.
- [57] 辛卫东. 风电机组传动链振动分析与故障特征提取方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [58] LU B, LI Y Y, WU X, et al. A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis[C]//2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications, June 24-26, 2009, Lincoln, NE, USA, 2009.
- [59] 秦剑. 风能发电系统关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

REVIEW OF FAULT DIAGNOSIS TECHNOLOGY FOR MOTOR-DRIVEN YAW SYSTEM OF LARGE WIND TURBINE

Deng Zihao¹, Li Luping¹, Liu Rui¹, Yang Bo², Chen Xi¹, Li Zhonggui¹

(1. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410014, China;

2. Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In this paper, the structure of yaw system of wind turbine is characterized. The fault types and related corresponding mechanism, fault diagnosis techniques are summarized. Through literature analysis, it is found that large data platform and development of multi-sensor information integration technology are the key issues on fault diagnosis technology for motor-driven yaw system of high power wind turbine. It is predictable that deep development of SCADA-based system will be the next fault diagnosis techniques of wind turbines.

Keywords: wind turbine; yaw system; fault diagnosis; fault prediction; fault analysis