

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.009

# 海上风电机组辅助监控系统方案设计

张振, 杨源, 阳熹

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的]考虑海上风电场生产监控与运营管理的需求,分析海上风电机组辅助监控系统总体设计、功能要求、子系统要求。[方法]整合风机状态监测系统(含振动在线状态监测系统、风机基础监测系统、螺栓载荷在线监测系统、桨叶状态监测系统、发电机绝缘电阻自动监测系统、雷电远程监测系统、齿轮箱润滑油质在线监测系统、箱变运行状态监测系统)、视频监控系統、风机IP电话系统、扩展功能等,实现风机动力设备、环境、安防的统一监控。[结果]该系统结合多参数信息融合,实现电气及机械特征量的风机故障诊断,为广东省海上风电大数据中心的风机性能比较提供支撑。[结论]辅助监控系统方案可实现预防性的运营维护,使风电场智能化监控和故障早期预警成为可能。

**关键词:** 海上风电机组; 辅助监控系统; 体系架构; 功能要求

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0049-06

## Design of Offshore Wind Farm Auxiliary Monitoring System

ZHANG Zhen, YANG Yuan, YANG Xi

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] This paper considered the requirements of production monitoring and operation management in offshore wind farms, and analyzed the overall design, functional requirements, and subsystem requirements of the auxiliary monitoring system for offshore wind turbines. [Method] This paper integrated the wind condition monitoring system (including vibration online condition monitoring system, wind foundation monitoring system, bolt load on-line monitoring system, blade condition monitoring system, generator insulation resistance automatic monitoring system, lightning remote detection system, gear box lubricant online monitoring system, box change operation monitoring system), video monitoring system, wind IP telephone system, extended functions, etc. [Result] The system incorporates multi-parameter information fusion to achieve fault diagnosis of electrical and mechanical characteristics of wind turbines, providing support for the performance comparison of wind turbines in offshore wind power big data centers in Guangdong Province. [Conclusion] In this way, preventive operation and maintenance can be realized, and a large number of corrective maintenance can be transformed into preventive maintenance, making it possible to intelligently monitor and early warning of wind farm.

**Key words:** offshore wind turbine; auxiliary monitoring system; architecture; functional requirement

由于海上风电场分布广阔、海上气候环境恶劣,风电场运行巡检工作困难,按照陆上风电场运行管理模式来运营管理海上风电场是不现实的。目前海上风电场多采用传统的事后维修和日常点巡检相结合方式,这种传统检维修方式存在以下问题:

(1)人工定点巡检需要较多人力且人工工作量大,并存在风机过度维修和失修风险;(2)易导致风机非计划停机,直接影响经济效益。根本原因在于缺少风机全面的运行实时状态数据,无法了解风机历史运行状态。对于早期故障不能及时发现,也无法知晓风机当前故障程度和部位,对于风机故障下一步劣化趋势也不能做出准确预测。风机虽然都配有风机主控系统(SCADA),通过该系统可以远程操控风机,同时监测功率、风速、电流、电压以及温

收稿日期: 2018-05-28 修回日期: 2018-07-20

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电场电气系统关键技术及电气设计”(EV02861W)

度、压力等信号,总的来讲监测更侧重于电气信号。由于风机大部件早期机械损伤,对SCADA系统监测的众多电气信号基本没有影响,因此SCADA在监测风机大部件机械损伤方面处于失灵状态<sup>[1-2]</sup>。为了弥补SCADA系统在风机大部件机械损伤监测方面的不足,需配置完善的风机状态监测系统。

同时,根据如何全面整合各个风机状态监测,综合多参数信息对多个关键部件进行全面的监测和故障诊断,提供风电机组的全面故障诊断,是降低海上风电场运营维护成本的关键所在。因此,成立海上风电机组辅助监控系统是非常有必要的<sup>[3-4]</sup>。

本文考虑生产监控与运营管理的需求,分析海上风电机组辅助监控系统总体设计、功能要求、子系统要求。海上风电机组辅助监控系统(简称“风机辅控系统”)应用远程通讯技术、传感技术、视频技术、网络技术、控制技术、遥测、遥视技术,实现风机的动力设备、环境、安防的统一监控,提高了设备、系统维护的及时性和准确数据的存储和处理,使风电场智能化监控和故障早期预警成为可能。

## 1 海上风电机组辅助监控系统总体设计

风机辅控系统按“无人值班(少人值守)”的原则设计,采用计算机监控,在陆上集控中心控制室设置操作员站,可实现对整个风场的每台风机状态集中监视和控制。辅控系统具有远动功能,为风电场一体化监控系统、风电机组监控系统(SCADA)提供辅控系统相关运行数据和设备状态,为调度机

构和远方监控中心实时掌握各大型设备状况及提供可靠保证。风机辅控系统和风电场一体化监控系统、风电机组监控系统(SCADA)进行通信,实现数据信息的共享,提供更完备、更人性化的监控功能,实现风机设备经济、稳定、安全、可控的智能化运行<sup>[5]</sup>。海上风电机组辅助监控系统结构如图1所示。

风机辅控系统纵向贯通调度、生产等站控层,横向联通风机内各自动化设备,是海上风电场一体化监控的重要组成部分<sup>[6-7]</sup>。风机辅控系统由间隔层、前置层、站控层这三个相互衔接、缺一不可的部分组成。

### 1.1 间隔层

间隔层对站内风机状态监测:风机及塔筒在线状态监测、风机基础监测、风机螺栓载荷在线监测报警、风力发电机组桨叶状态监测、风力发电机绝缘电阻自动监测装置,风机视频监控,风机IP电话进行数据整合,负责对风机视音频、状态测量量、环境量、开关报警量等信息进行采集、编码、存储及上传,并根据制定的规则进行自动化联动<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 前置层

风机辅控系统的网络承载于前置层通讯交换机数据网,用于风机与陆上集控中心、海上升压站之间的通信。可以对间隔层进行监控,实时了解前端风机的运行情况。海上升压站与陆上集控中心之间的信息传输,通过SDH光端机进行通信。

### 1.3 站控层

站控层包括陆上集控中心的主站,并预留企业

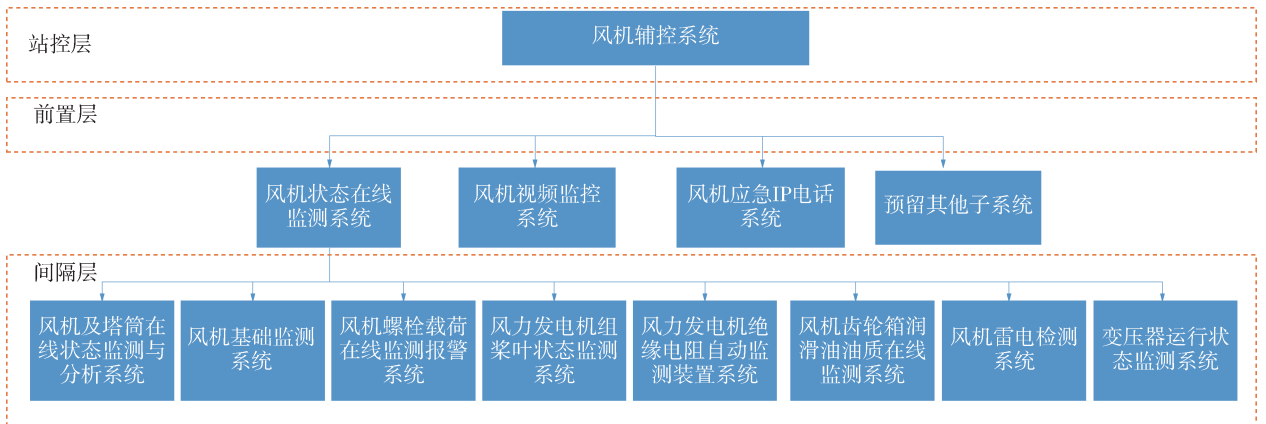


图1 海上风电机组辅助监控系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of offshore wind farm auxiliary monitoring system

集团远程中心的接口。

## 2 海上风电机组辅助监控系统整体要求

### 2.1 海上风电机组辅助监控系统的功能要求

风机辅控系统应具备如下功能:

- 1) 实时视频监控。
- 2) 实时振动及基础状态监测。
- 3) 实时发电机绝缘电阻监测。
- 4) 箱变运行状态实时监测。
- 5) 齿轮箱润滑油质监测。
- 6) 雷电远程检测。
- 7) 其他子系统。

采用多功能混合智能采集终端 ERTU, 兼容模拟摄像机和 IP 摄像机, 可整合风机状态监测、安全防范、IP 电话等子系统。

系统集成改变了各系统独立运行局面。系统提供完备的数据分析软件工具, 包括但不限于: 趋势分析、关联分析、统计分析、轨迹分析、频谱分析、包络分析等, 对风电机组状态数据进行分析, 发现设备缺陷, 诊断故障原因。

### 2.2 海上风电机组辅助监控系统的故障诊断

系统提供的分析工具, 能够辅助用户诊断风机故障, 如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 海上风电机组辅助监控系统应能诊断的风电机组故障

Tab. 1 Wind turbine fault diagnosis analysis of offshore wind farm auxiliary monitoring system

监测部位	故障类型
主轴承	主轴承损伤
齿轮箱	轴承故障, 齿轮磨损, 断齿
发电机	轴承故障, 轴不对中, 转子不平衡, 发电机电气故障, 结构共振
叶片	结构不平衡(鼓包、开裂、变形、断裂), 空气动力学不平衡, 覆冰
塔筒	结构共振, 倾斜量过大, 螺栓松动
基础	结构共振, 不均匀沉降, 结构腐蚀

风机辅控系统整合各个状态监测后, 可实现以下两方面的故障诊断<sup>[11-12]</sup>。

#### 1) 基于电气及机械特征量的风机故障诊断

作为机电耦合较强系统的风电机组, 任何机械和电气故障, 都会在电气及机械特征量中有所反映。比如, 当齿轮箱齿轮的轴承损坏, 发电机定子和转子的匝间短路等故障时, 会引起发电机转轴振动的机械特征量。同时, 由于改变气隙分布情况,

也改变了定子和转子的电气特征量。

因此, 充分挖掘各个状态监测之间的电气及机械特征量的关联, 可对风电机组进行全面综合分析。

#### 2) 基于多参数信息融合的关键部件故障诊断

目前, 单一参数信息含量有限, 较难准确反映关键部件的异常状态, 尤其是早期的潜在故障。可充分利用多类型参数信息(如频谱、时域等信号), 获取更为准确关键部件状态监测和故障诊断结果。

### 2.3 海上风电机组辅助监控系统组网方式

间隔层以智能采集终端(ERTU)为核心, 风机及塔筒在线状态监测、风机基础监测、风机螺栓载荷监测、桨叶状态监测、绝缘电阻自动监测等子系统均接入 ERTU; ERTU、视频监控、IP 电话均通过风机配置的交换机接入到光纤网络中。海上风电机组辅助监控系统间隔层拓扑, 如图 2 所示。

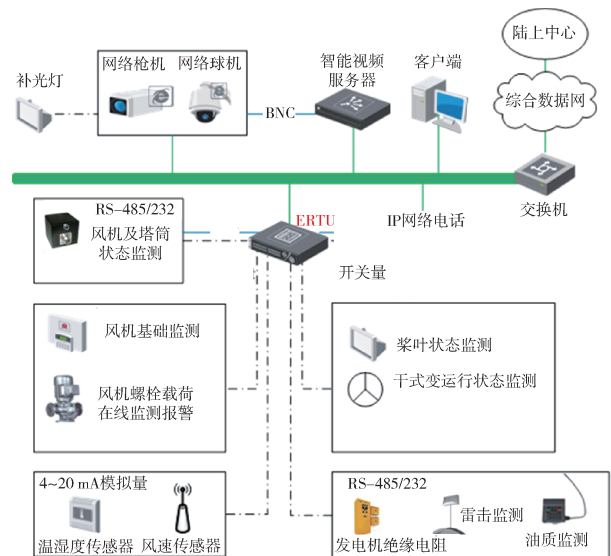


图 2 海上风电机组辅助监控系统间隔层拓扑图

Fig. 2 Interval topology diagram of offshore wind farm auxiliary monitoring system

间隔层中, 风机及塔筒在线状态监测、风机基础监测、风机螺栓载荷监测、桨叶状态监测、绝缘电阻自动监测等子系统通过 RS485 接入到接入 ERTU。视频监控和 IP 网络电话通过以太网接入风机交换机中, 视频监控、IP 电话、ERTU 数据采集处理终端接收子系统上传的数据信息及报警信息, 并进行处理、上传, 工作人员可通过客户端向子系统发送一系列的控制指令。

风机辅控系统的数据通过光纤经风机、海上升

压站,回传至陆上集控中心的服务器后台,进行全面的状态分析和故障诊断。

同时,风机辅控系统经过二次安防的 III 区,将风机的状态监测信息传输至广东省海上风电大数据中心,为广东省海上风电大数据中心的不同风电场不同风机性能比较提供数据的支撑。

### 3 海上风电机组辅助监控系统子系统设计

#### 3.1 视频监控系统

每台风机能支持 8 路视频信号输入。同时,每台风机的视频存储量是:4 TB 硬盘可存储 1 个月以上的数据,并具备网络输出功能,可通过光纤网络在远程监控中心进行实时监测及录像回放功能。

在海上风电机组机舱顶部、机舱内部和塔筒内设置监控点。机舱顶部摄像机主要监视风机周围环境和周围风电机组的运转情况。机舱内部摄像机主要监视发电机、齿轮箱、变桨设备、偏航设备及舱内控制柜等主要设备的运行情况。塔筒内部摄像机主要监视主控制柜、变流器柜、电气柜和 35 kV 变压器柜(如布置在风机内)的运行情况和塔筒开门处的情况。机组标准配置为机舱内、塔筒扭缆处、塔基各设备层均配置一台室内红外智能球型摄像机;爬梯上方配置一台防腐蚀高清夜视摄像机;风机基础平台和机舱顶各配置一台 360°旋转高清红外球型摄像机。

视频监控通过场区内环形网络进行数据传输。机舱内摄像机连至机舱交换机,塔基摄像机和室外一体机连至塔基环网交换机。

#### 3.2 风机及塔筒振动在线状态监测系统

每台风机配置风机振动在线状态监测与分析系统(CMS),形成风机-塔架振动监测,对每台风机的塔筒进行应力监测和垂直度监测。

除具备基本的传动链振动监测功能外,还具备风机风塔摆动监测功能的扩展功能。振动测点配置为 12 个,如表 2 所示,包括但不限于:

能实现自动化在线监测沉降、应变、倾斜、振动,为指导风机整体安全运行提供预警信号,防止因过大振动、倾斜、腐蚀等情况影响平台正常运行。可以对海上风机基础进行实时监测,既可以为风机基础运行规律的研究提供长期、可靠的数据,又可以为风电场的运维策略提供技术支持,满足风机基础服役期间的安全运营需求。

表 2 海上风电机组的振动测点配置

Tab. 2 Vibration measurement point configuration for offshore wind turbine

测点位置	安装方式	传感器选择
主轴承(4 个)	径向	低频加速度传感器
齿轮箱体(2 个)	径向	低频加速度传感器
发电机轴承(4 个)	径向	普通加速度传感器
机舱弯头(1 个)	迎风向	低频加速度传感器
机舱弯头(1 个)	横向	低频加速度传感器

#### 3.3 风机基础监测系统

海上风电机组的基础和塔架的安全运行是确保风机正常发电的关键,在极端海况或循环荷载长期作用下,一旦基础发生沉降、倾斜,杆件、关键节点发生损伤、破坏等,就会造成很大的经济损失。

提供一种基于光纤传感和压电式传感的结构健康在线监测系统。能实现自动化在线监测沉降、应变、倾斜、振动,为指导风机整体安全运行提供预警信号,防止因过大振动、倾斜、腐蚀等情况影响平台正常运行。功能要求如下:远程监测应变、倾斜、沉降、振动等参数;可生成阶段性监测评估报告等。

#### 3.4 风机螺栓载荷在线监测系统

塔架是风力发电机组重要的承载部件之一,而塔架法兰连接系统又是连接机舱底座和各段塔架的重要部件,因此连接的可靠性和安全性对整个风电机组的正常运行有着至关重要的作用。

它可以同时监测不同法兰面螺栓的应力。通过分析螺栓工作载荷和应力幅值的变化,不仅可以直接确定当前螺栓的工作状态,而且可以间接计算螺栓所在法兰面的工作状态。不仅能够在线监测风力发电机组塔架系统,还能够在线监测风力发电机的螺栓,发电机螺栓和变桨轴承螺栓。

可以在监控部分的螺栓上执行紧急信息检测和预警信息,以避免事故发生。通过对各种法兰螺栓力数据的积累,验证了风机的理论设计,并积累了运维数据,取代了传统运行维护策略。

#### 3.5 风力发电机组桨叶状态监测系统

配置一套风力发电机组桨叶状态监测系统。通过采集安装于叶片上的加速度传感器,采集 3~6 个月的正常运行数据,通过人工智能预学习建立叶

片的正常运行时的振动模型。叶片振动模型建立后,叶片在线监测系统实时采集、计算、分析叶片振动数据,并实时与正常模型数据对比,尽早发现监测叶片异常。

每个叶片都对单独安装加速度传感器,通过低通滤波消除结构噪声及环境噪声,硬件采集模块采集叶片运行时的振动数据,软件实时评估传感器数据的有效性,以消除传感器失效带来错误评估结果,通过对叶片固有频率的分析,来实时监测叶片的结构损伤。

至少满足如下功能:

1) 损伤监测: 桨叶前后缘开裂, 分层, 翼梁和襟带分离, 外壳外层解体, 尖端开裂(如雷击后的损伤)。

2) 运行异常: 主要振动中的共振, 桨叶内部、外部和轮毂内部的部件松动, 不平衡探测, 桨距角误差, (噪声)音调, 桨叶动态过载。

3) 通讯: 数字接口(以太网)连接风机辅控系统。在危险情况下出发自动停机(如损伤、覆冰等事件)。

### 3.6 风力发电机绝缘电阻自动监测系统

对于海上风电机组的发电机,潮湿和盐雾污染加重了对线圈绝缘系统的考验。配置一套在线全自动的绝缘电阻监测装置,可在发电机停运状态下自动检测其绕组的整体绝缘水平,并在绝缘不良时触发闭锁或远程报警信号,避免运行人员将存在绝缘缺陷的发电机投入运行,导致启动故障。检修维护人员可以提早做好检修的计划,防止意外事故的发生并避免非计划的停机和支出昂贵的发电机维修费用。

### 3.7 雷电远程检测系统

监测风机所受直击雷,测量并记录雷电流关键参数:电流峰值、波前时间、总电荷、比能(单位电阻消耗的量)、完整波形。

雷电传感器连续采样风力发电机塔筒表面的磁场,以确保可准确无误地监测到雷击电流。如果采样信号上升到触发水平以上,则当前正在使用的采样缓冲区会被采样数据填满,之后会使用备用采样缓冲区保存采样数据。

在处理和当前采样缓冲区数据的同时,备用缓冲区用于记录紧随发生的雷击采样数据,如此双缓冲区设计可以保证系统以1 MHz的频率记录2

s时间的采样数据。

### 3.8 齿轮箱润滑油质在线监测系统

实时监测齿轮箱润滑油的电导率、介电常数、酸值、氧化度,非正常磨损等反映齿轮箱运行状态关键参数,及早发现油质变化预兆可实现载荷优化和及时预防性维护。主要实现以下功能:

1) 实时监控油液内部的金属磨损和故障颗粒,实时油液清洁度“健康检查”。

2) 识别轴承和齿轮损坏。

3) 三信道同步输出。细信道:显示积聚的小磨粒,提供油清洁度可靠指标。粗信道:检测较大的磨粒,表明可能轴承或齿轮损坏。三信道:检测油液水分含量/油。

### 3.9 箱变运行状态监测系统

实时监测箱变器身表面的振动与变压器绕组及铁芯的压紧状况、绕组的位移及变形状态、实时监测变压器局部放电量等。

1) 使用此系统时变压器不需要停电,即意味着可以直接对工作中的变压器进行诊断。

2) 振动和局放的测量同时进行,方便联合分析。

3) 变压器绝缘在线监测系统进行的一套完整的基于振动信号和高频脉冲电流的分析。

4) 可区分正常、预报警、报警等状态。正常运行状态:在变压器上没有检测到紧固力的显著下降,且无明显局部放电发生。预报警状态:在变压器内部检测到有紧固力下降的情形或有轻微局部放电发生报警状态:在变压器内部检测到紧固力下降情况严重,这将降低变压器抵抗短路冲击的能力。

### 3.10 风机 IP 电话系统

每台风机配置为机舱内、塔基平台各配置一台工业级 IP 语音电话,分别连至机组内交换机网络。建立 IP-PBX 语音电话系统,通过场区光缆环网与风电场 IP 语音电话系统以及风机辅控系统进行通讯,实现机舱与塔基、风机与风机、风机与陆上集控中心、海上升压站之间的即时通讯。

风机塔筒内语音电话需要适应于海面上高盐雾高湿度环境下运行,要求防腐蚀、防潮湿,应采取密封安装等措施,IP 防护等级在 IP56 以上。

### 3.11 扩展系统

可采集风机的温湿度、风速等模拟量数据,并支持实时显示环境信息的告警,可显示实时和历史

信息的趋势曲线。并预留其他子系统接口。

## 4 结论

本文根据生产运营管理的需求,提出了风机辅助系统,整合风机状态监测系统(含振动在线状态监测系统、风机基础监测系统、螺栓载荷在线监测系统、桨叶状态监测系统、发电机绝缘电阻自动监测系统、雷电远程检测系统、齿轮箱润滑油质在线监测系统、箱变运行状态监测系统)、视频监控系统、风机IP电话系统、扩展功能等。

根据间隔层、前置层和站控层,风机辅助系统纵向贯通调度、生产等站控层,横向联通风机内各自动化设备。通过对主轴承、齿轮箱、发电机、叶片、塔筒、风机基础等的全面状态监测,实现了基于电气及机械特征量的风机故障诊断和基于多参数信息融合的关键部件故障诊断,也为广东省海上风电大数据中心的风机性能比较提供支撑。从而,将大量维护转变为预防性,实现了风电场智能化的监控和故障预警。

最终,如何充分挖掘各个状态监测之间的电气及机械特征量的关联,并如何充分利用多类型参数信息(如频谱、时域等信号),需要进一步深入研究和完善优化。

### 参考文献:

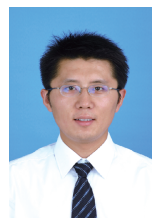
- [1] 国家能源局. 风电场工程 110 kV~220 kV 海上升压变电站设计规范: NB/T 31115—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海上风力发电场设计规范(送审稿) [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [3] 国家电网公司. 智能变电站一体化监控系统建设技术规范: Q/GDW 679—2011 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.  
State Grid Corporation. Technical specifications for construction of integrated supervision and control system of smart substation: Q/GDW 679—2011 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [4] 国家电力监管管理委员会. 电力二次系统安全防护规定: 国家电力监督管理委员会令第5号 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
State Electricity Regulatory Commission. Regulations on the protection of secondary power systems: State Electricity Regulatory Commission Order No. 5 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [5] 徐龙博, 李煜东, 汪少勇, 等. 海上风电场数字化发展设想

[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 189-193+199.

XU L B, LI Y D, WANG S Y, et al. Digital development assumptions of offshore wind farms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 189-193+199.

- [6] 傅质馨, 袁越. 海上风电机组状态监控技术研究现状与展望 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 121-129.  
FU Z X, YUAN Y. Status and prospect condition monitoring technologies of offshore wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 121-129.
- [7] 樊陈, 倪益民, 窦仁晖, 等. 智能变电站一体化监控系统有关规范解读 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 1-5.  
FAN C, NI Y M, DOU R H, et al. Interpretation of relevant specifications of integrated supervision and control systems in smart substations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 1-5.
- [8] 寇兴魁. 风电场管理信息系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [9] 卞俊善. 基于智能电网的变电站综合监控系统设计应用 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011.
- [10] 中国长江三峡集团公司. 风力发电机组状态在线监测与故障诊断系统技术导则: Q/CTG 91—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [11] 万黎升, 曹洋, 闫照云. 风电场群远程集中监控与生产管理系统设计 [J]. 江西电力, 2016, 40(6): 13-17.  
WAN L S, CAO Y, YAN Z Y. Design of remote centralized monitoring and production management system for wind farms [J]. Jiangxi Electric Power, 2016, 40(6): 13-17.
- [12] 李辉, 胡姚刚, 李洋, 等. 大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 6-16.  
LI H, HU Y G, LI Y, et al. Overview of condition monitoring and fault diagnosis for grid-connected high-power wind turbine unit [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 6-16.

### 作者简介:



ZHANG Z

张振(通信作者)

1984-, 男, 江苏徐州人, 高级工程师, 硕士, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司电气一室副主任, 长期从事海上风电新能源利用研究 (e-mail) zhangzhen@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)