本文引用格式: 胡长鹏,黄国健,李中兴,等.大型风力发电机组雷电流监测系统[J].自动化与信息工程,2022,43(1):38-42.

HU Changpeng, HUANG Guojian, LI Zhongxing, et al. Lightning current monitoring system for giant wind turbine[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(1):38-42.

大型风力发电机组雷电流监测系统*

胡长鹏1 黄国健2 李中兴2 何振亚3

(1.上海品研测控技术有限公司,上海 201108

2.广东机电职业技术学院, 广东 广州 510515 3.华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要:在雷击风力发电机组时,利用雷电流监测系统进行实时监测,可保障风力发电机组正常运行。首先, 介绍雷击风力发电机组放电的全过程及雷电流在风力发电机组的传播路径;然后,设计一套大型风力发电机组雷 电流监测系统:最后,第三方测试机构对该监测系统进行2类模拟典型雷电流特性的瞬态冲击电流监测性能测试, 测试结果的相对误差均小于 5%。测试结果表明,该监测系统适用于风力发电机组遭受雷击时的雷电流监测,具 有较高的工程实用价值。

关键词:风力发电机组;雷电流;监测系统;罗氏线圈
中图分类号:TP249
文献标识码:A
DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.01.007

0 引言

为扎实应对"碳达峰""碳中和"的各项工作, 风能作为一种永不枯竭的清洁能源,已成为全球推荐 转型的重要能源之一。随着风力发电技术日益进步, 风力发电机组(以下简称风机)功率不断提高,尺寸 也随之增大。目前,大功率风机叶片尖端最高点已接 近 300 m,恶劣天气时易遭受雷击。据相关统计^[1-3]: 德国风电场每百风机•年的雷击事故率约为 10%;日 本因雷电造成风电停机的比例占 10%~20%。风机遭 受雷击后,叶片可能损坏,不仅检修工艺复杂、费用 高昂,还会造成电力损失,甚至可能导致整台风机报 废,造成重大经济损失。因此,有必要对雷击风机时 的雷电流进行监测,快速定位雷击故障风机位置、分 析故障机理,为风机雷击防护措施提供科学的数据支 撑。

关于风机叶片等高建筑物遭受雷击时的雷电流 监测,许多学者已开展广泛研究。文献[4]在电力杆塔 这类高建筑物上实现了雷电流多通道监测;文献[5-10] 主要从仿真分析和实验测量,对风机的雷电瞬态响应 特性进行深入探究,为风机雷电流监测系统的研制提 供理论支撑;还有学者专门针对雷电流监测的传感器 理论入手,研制更适合于雷电流监测的罗氏线圈传感 器^[11-12]。

文章编号: 1674-2605(2022)01-0007-05

NG

本文在前述学者研究的基础上,介绍雷击风机时 的放电全过程及雷电流在风机的传播路径;设计大型 风力发电机组雷电流监测系统,用于监测风机遭受雷 击时的雷电流。

1 雷击风机特性分析

1.1 雷击风机放电原理

雷云对地面放电通常是从下行先导放电阶段开 始。风机是典型的高体结构,在雷云下行先导(负电 荷)的感应下,出现感应正电荷。如图1(a)所示;当 下行先导通道头部接近风机时,叶片尖端发生畸变作 用,如果电场强度快速扩大,附近的空气产生游离, 叶片尖端出现上行先导;上行先导和下行先导在空气 中汇合产生回击放电,即发生雷击风机,如图1(b)所 示。

雷击风机时的雷电流主要包括预放电电流(上行 先导)和主放电电流(回击电流)。因为对风机造成

^{38 *} 基金项目:广东省普通高校重点科研平台和科研项目(科技类) (2021ZDZX1108);上海市科技型中小企业技术创新项目(1804H175500)。

损伤的主要是回击电流,因此需要对主放电电流进行 重点监测。



1.2 雷电流传播路径

根据现代风电防雷技术,风机避雷将被动引雷变 为主动引雷,基本措施是提供一条雷电流能够顺利释 放的低阻抗通道,防止其随机选择放电路径。主动引 雷设施主要包括接闪器、引下线等,将雷电流通过通 道接引,引导至地下释放。雷电主放电电流在风机中 的传播路径如图2所示。



图 2 雷电流在风机中的传播路径

即使通过主动引雷,雷击时风机仍可能处于未知 的危险中。为此,本文设计一套雷电流监测系统,对 风机遭受雷击时持续保护设备安全具有重要作用。

2 雷电流监测系统

雷电流监测系统主要用于监测雷击次数、雷电流 强度、雷击电压特性以及避雷装置是否发生损坏等。

2.1 雷电流监测系统组成架构

雷电流监测系统由雷电流传感器、雷电监测箱、 上位机等组成,框图如图3所示。





首先, 雷电流传感器测量流经避雷装置的雷电流 信号, 雷电流信号通过二次电缆进入雷电监测箱的前 端处理器; 然后, 雷电流信号经前端处理器变换处理 后, 送入由 DSP 和 CPLD 组成的控制器, 分析雷电 流波形与峰值电流等; 输出设备是一块 7 英寸的触摸 屏, 用于监测现场指令输入和显示测量数据; 调制解 调器对监测数据进行编码解调, 实现与上位机之间的 远距离传输; 上位机通过 5G 信号与雷电监测箱进行 双向通信。风机遭受雷击后, 会触发雷电监测箱内置 的计数器动作, 累加统计遭受雷击的次数。

2.1.1 雷电流传感器

风机遭受雷击时,利用接闪器主动引雷,此时主 放电电流持续时间为 µs 级,幅值为 10~200 kA。该 电流是一个持续时间短、能量大的非周期性瞬态电流 信号,直接采集该信号有一定难度,本文考虑通过间 接方法进行测量采集。

罗氏线圈是一种非接触、无铁心、绝缘良好的传

2022年 第43卷 第1期 自动化与信息工程 39

感元件,具有测量范围大、频率响应范围宽、无铁磁 振荡和磁饱和等特点,适合作为雷电流传感器来测量 雷电流。罗氏线圈传感模型如图 4 所示。当一次导线 流经电流 *i*(*t*)时,对外会感应磁场 *B*(*t*),根据电磁感应 定理,磁场中组成罗氏线圈的各匝小线圈均会感应出 电势 de(*t*),那么通过测量流经整个罗氏线圈的总电势 *e*(*t*)即可得知 *i*(*t*)。



图 4 罗氏线圈传感模型[13]

本文雷电流监测系统采用7个罗氏线圈作为传感 单元,其中3个安装在风机避雷装置下面的叶片引下 线处,另外4个安装在塔基的东南西北4个方向。7 个罗氏线圈传感器协同作业,将流经风机的雷击电流 感应变换成小电势,作为雷电流监测系统输入信号。 2.1.2 雷电监测箱

雷电流监测箱是雷电监测系统的核心部分,布置 于风力发电机机房内。因为罗氏线圈采集的是一个微 弱的电压信号,即雷电流对时间的微分,所以雷电监 测箱设置了前端处理器(积分器)还原前端信号;控 制器对经积分还原后的信号进行调理分析,分析结果 实时显示在触摸屏上,同时通过网络向远程上位机发 送。

2.1.3 上位机

上位机布置在远程控制端,一般采用稳定性较好的工控机,通过 5G 移动通信,实时接收雷电监测箱 传来的监测信号。根据风力发电机组雷电流监测系统 的实际需求,一个上位机可同时对多个雷电监测箱进 行管控。

2.2 雷电流监测系统实物

大型风力发电机组雷电流监测系统样机如图5所示,包含雷电监测箱及4个罗氏线圈。主界面如图6 所示,通过点击界面上各个罗氏线圈传感器监测点的链接,可对当前传感器的状态和测量数据进行动态查询。



图 5 大型风力发电机组雷电流监测系统样机



图 6 大型风力发电机组雷电流监测系统主界面

3 试验分析

本文研制的大型风力发电机组雷电流监测系统 样机在第三方检测机构——上海某防雷产品测试中 心进行检测。采用的仪器有 SSGA 200-180 冲击电流 发生器、EXTECH 数据记录仪、数字示波器、组合波 发生器等,所有仪器均在计量校准有效周期内。

3.1 模拟直击雷电流检测性能试验(10/350 µs)

根据 GB/T 18802 标准,使用模拟直击雷波形(一般一级防护)10/350 μs 冲击电流进行测试。通过 SSGA 200-180 冲击电流发生器产生的模拟直击雷电流信号

与本文雷电流监测系统样机测出的电流峰值进行比较,结果如表1所示,对应的电流波形如图7所示。

冲击电流测 试系统数据/ kA	样机测出数据/ kA		相对误差/ %
99.165	通道 1	100.180	1.0
	通道 2	102.300	3.2
	通道 3	97.880	1.3
	通道 4	102.100	3.0
	通道 7	98.400	0.8
8.030	通道 1	8.064	0.4
	通道 4	7.868	2.0
	通道 5	7.639	4.9
	通道 6	8.016	0.2

表 1 10/350 µs 冲击电流测试结果

由表1可知:大型风力发电机组雷电流监测系统 在模拟直击雷波形 10/350 µs 冲击电流下,102.300 kA 和7.639 kA 时测试结果的最大相对误差分别为3.2% 和4.9%,说明该系统可以较准确地测出直击雷电流。



图 7 10/350 µs 波形下的电流波形

由图 7 可以读出: 在模拟直击雷波形 10/350 μs 冲击电流下, 12.282 μs 时电流达到峰值的 90%, 446.700 μs 时电流下降到峰值的 50%,说明大型风力 发电机组雷电流监测系统样机能较好地实时监测直 击雷电流的大小。

3.2 模拟感应雷电流检测性能试验(8/20 µs)

根据 GB/T 18802 标准,使用模拟感应雷波形(一般二级防护) 8/20 μs 冲击电流进行测试。通过 SSGA

200-180 冲击电流发生器产生的模拟感应雷电流信号 与本文雷电流监测系统样机测出的电流峰值进行比 较,结果如表 2 所示,对应的电流波形如图 8 所示。

表 2 8/20 µs 冲击电流测试结果

冲击电流测 试系统数据/ kA	样机	则出数据/ kA	相对误差/ %
80.321	通道 1	77.070	4.0
	通道 2	77.670	3.3
	通道 3	77.790	3.2
	通道 5	76.690	4.5
	通道 6	78.620	2.1
3.940	通道 1	3.910	0.8
	通道 4	3.765	4.4
	通道 5	3.860	2.0
	通道 7	3.889	1.3

由表 2 可知:大型风力发电机组雷电流监测系统 在模拟感应雷波形 8/20 µs 冲击电流条件下,76.690 kA 和 3.765 kA 时测试结果的最大相对误差分别为 4.5% 和 4.4%,说明该系统可以较准确地测出感应雷电流。



图 8 8/20 µs 波形下的电流波形

由图 8 可以读出: 在模拟感应雷波形 8/20 μs 冲击 电流下, 8.120 μs 时电流达到峰值的 90%; 21.684 μs 时电流下降到峰值的 50%,说明大型风力发电机组雷 电流监测系统样机能实时监测感应雷电流的大小。

4 结语

本文通过分析雷击风力发电机组放电的全过程 及雷电流在风力发电机组的传播路径,研制了适用于 大型风力发电机组的雷电流监测系统。该系统经第三 方机构测试结果表明:在10/350 µs 和 8/20 µs 冲击电 流下,均能实时监测雷击电流的大小等信息,且测试 结果的相对误差均小于5%。该系统可推广到其他瞬 态大电流监测场合。

参考文献

- [1] 姒天军,蓝磊,文习山,等.风力发电机雷电放电全过程电流测 量系统设计[J].仪表技术与传感器,2017(10):46-49,54.
- [2] MICHISHITA K, YOKOYAMA S, HONJO N, et al. Measurement of lightning current at wind turbine near coast of Sea of Japan in winter [C]// International Conference on Lightning Protection. IEEE, 2016:1-5.
- [3] 施广全,张义军,陈绍东,等.风力发电机组防雷技术进展综述[J].电网技术,2019,43(7):2477-2487.
- [4] 姜凯华,杜林,陈伟根,等.杆塔雷电流多通道监测方法及其特性分析[J].电机与控制学报,2021,25(3):27-37.
- [5] 陶世祺.海上风力发电机组雷电瞬态研究[D].北京:北京交通 大学,2019.

- [6] TONI J, PUIG J M. Simulation of current distribution in a wind turbine blade using the FDTD method[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 185(6):106350.
- [7] LAUDANI A, CARLONI L, THOMSEN O T, et al. Efficient method for the computation of lightning current distributions in wind turbine blades using the Fourier transform and the finite element method[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2020, 14(7):786-799.
- [8] 谢荣斌,夏关荣,李江涛,等.基于EMTP-ATP的风力发电机雷 电电磁暂态特性分析[J].电力大数据,2019,22(8):60-66.
- [9] 林其友,张建华,王治林,等.内设防雷引下线风力机雷击暂态 特性分析[J].科学技术与工程,2019,19(35):215-220.
- [10] 肖剑锋,王剑飞,何志满,等,用于雷电流在线监测的多层PCB 微分环理论分析[J].电测与仪表,2018,55(10):24-33.
- [11] 肖剑锋,王剑飞,何志满,等.基于罗氏线圈和微分环的雷电 流在线监测综述[J].电测与仪表,2018,55(17):1-8.
- [12] 赵燕君,钱江,武永国,等.基于罗氏线圈的雷电流监测系统 的设计与实现[J].仪表技术与传感器,2015(1):68-70,107.
- [13] 黄国健,刘桂雄,陈铁群.装配误差对 Rogowski 线圈电流互 感器准确度的影响[J].现代制造工程,2009(4):56-59,91.

Lightning Current Monitoring System for Giant Wind Turbine

HU Changpeng¹ HUANG Guojian² LI Zhongxing² HE Zhenya³

(1.Rogowski Technology(Shanghai) Co., Ltd. Shanghai 201108, China2.Guangdong Mechanical & Electrical Polytechnic, Guangzhou 510515, China3.South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: When the wind turbine is struck by lightning, the lightning current monitoring system is used for real-time monitoring, which can ensure the normal operation of the wind turbine. Firstly, the whole discharge process of lightning struck wind turbine and the propagation path of lightning current in wind turbine are introduced; Then, a set of lightning current monitoring system for giant wind turbine is designed; Finally, the third-party testing organization carries out two types of transient impulse current monitoring performance tests simulating typical lightning current characteristics of the monitoring system, and the relative errors of the test results are less than 5%. The test results show that the monitoring system is suitable for the monitoring of lightning current when the wind turbine is struck by lightning, and has high engineering practical value.

Keywords: wind turbine; lightning current; monitoring system; Rogowski coil

作者简介:

胡长鹏,男,1982年生,硕士,工程师,主要研究方向:智能传感、智能电气技术。E-mail:89415704@qq.com 黄国健,男,1981年生,博士,教授,主要研究方向:机电一体化技术。E-mail:Guojian.huang@gmail.com 李中兴,男,1985年生,硕士,高工,主要研究方向:电气自动化技术。E-mail:285669644@qq.com 何振亚,女,1985年生,博士,副教授,主要研究方向:机器人技术。E-mail:mezhyhe@scut.edu.cn