

DOI: 10.7667/PSPC161996

风电母线槽热故障状态在线监测系统

黄新波¹, 张杰¹, 田毅², 朱永灿¹, 乔卫中¹

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安电子科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 风力发电机组容量的不断增大, 使得母线槽电力传输系统成为风电输送的主导。风电塔筒由于长期承受各种风况的作用而发生振动, 从而引起其内部母线槽连接处的固定螺栓松动和导电排之间的相互摩擦, 并使得连接处的接触电阻增大和发热的不断加重, 进而破坏母线槽的绝缘性能, 甚至造成短路故障。针对这一问题, 以红外测温技术为基础, 首次提出了一种风电母线槽发热故障在线监测方法。考虑到母线槽所处的特殊环境, 设计了专用的红外测温传感器, 利用最小二乘算法对温度进行标定, 并结合温度补偿法提高了传感器的精度。为了保证数据通信的稳定性, 系统采用了RS-485网络及ZigBee无线MESH网络。在现场测试过程中, 该系统能够实现母线槽发热故障的实时监测、定位和预警。

关键词: 风电母线槽; 发热故障; 红外测温传感器; 最小二乘算法; 温度补偿; 在线监测

On-line monitoring system for wind power busbar trunk heat fault status

HUANG Xinbo¹, ZHANG Jie¹, TIAN Yi², ZHU Yongcan¹, QIAO Weizhong¹

(1. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: With the increasing of the wind turbine capacity, the busbar trunk power transmission system has become the dominant technique for wind power transmission. The tower tube of the wind power vibrates due to withstanding the influence of various wind conditions for a long time, which causes its internal busbar trunk connections fixed bolt loose and friction between conductive rows, leads to the contact resistance of the connection increases and heating continues to increase, further damages busbar trunk insulation, and even causes short circuit fault. According to this problem and based on the infrared temperature measurement technology, this paper proposes an on-line monitoring method for the first time to the heating failure of wind power busbar trunk. Meanwhile, taken into account the special busbar trunk environment, a special infrared temperature sensor is designed, and then the least square algorithm is used to calibrate the temperature, and the sensor accuracy is improved combined with temperature compensation. In order to ensure the stability of the data communication, the system uses the RS-485 network and the ZigBee wireless MESH network. In the field test, the system can realize the real-time monitoring, positioning and early warning of the heating failure of the busbar trunk.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177115) and Key Technology Innovation Team Project of Shaanxi Province (No. 2014KCT-16).

Key words: wind power busbar trunk; heat fault; infrared measuring temperature sensor; least squares algorithm; temperature compensation; on-line monitoring

0 引言

风力发电以其多资源、低成本、易利用的特点成为目前新能源技术最完善、最具开发潜力的发电

方式。装机容量的扩大和输送电流等级的提高^[1-2], 使得传统动力电缆的体积和用量持续加大, 成本压力不容小觑, 且鉴于电缆芯是多股铜线, 其根面积比同电流等级的母线槽导电排大, “集肤效应”严重, 线路损耗高^[3], 使电缆在风电传输方面受到制约。采用母线槽传输电能, 电流密度大, 安装方便且可靠性高, 得到广泛应用^[4]。风电机组的完整运行周

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177115); 陕西省重点科技创新团队计划(2014KCT-16)

期内, 塔筒时刻遭受着叶轮、机顶舱乃至自重的影响, 并处于各类复杂风况引起的动载荷作用下, 导致塔筒发生振动^[5], 长时间会使其内部母线槽连接处的固定螺栓松动和导电排之间的相互摩擦, 从而导致连接处的接触电阻增大, 温度不断升高, 电能损耗增加。同时, 严重的发热会进一步降低母线槽的绝缘性能, 甚至使母线槽因绝缘层击穿而烧毁, 导致机组不能正常运行^[6-7]。

早期的风电母线槽发热故障都是通过人工定期检查固化, 其往往不能提前预防故障的发生从而造成巨大的经济损失。智能化在线监测技术是风电母线槽发热故障监测方法的发展趋势, 但是目前国内外仍处于空白阶段, 传统上常采用接触式感测技术来测量物体的温度, 但由于其必须与待测物体达到热平衡状态, 才能准确感应物体的温度, 普遍存在感测速度低及测量延迟的问题, 这对于母线槽温升的实时监测具有很大的缺陷。本文提出了一种新的监测方法, 以适用于母线槽高压环境的红外测温传感器对其温度进行检测, 并通过温度采集器完成各相数据的采集与处理, 最终结合监测分机与上位机实现数据汇总与故障预警^[8]。

1 系统架构

风力发电专用母线槽发热故障在线诊断系统框架如图 1 所示, 系统主要由红外测温传感器、温度采集器、塔筒监测分机及上位机监控中心组成。

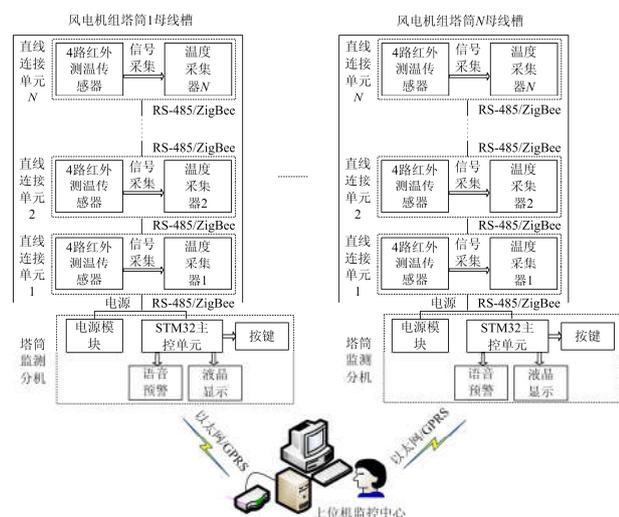


图 1 系统总体框架

Fig. 1 System overall framework

在每一个母线槽直线连接单元, 通过安装 4 路红外测温传感器采集母线槽 A、B、C 三相及零线导电排的温度, 并结合温度采集器对数据进行采集

和实时处理。所有温度采集器的温度、温升数据和设备地址信息通过 RS-485 网络或 ZigBee 无线通信模块传输给监测分机, 监测分机通过接收各个采集器的数据并进行热学分析和故障诊断, 从而完成故障点的图像和语音预警^[9-12]。此外, 监测分机通过以太网或 GPRS 将监测信息传递给后台监控中心, 实现工作人员对母线槽温升的远程实时监测, 进一步预防发热故障的出现。红外测温传感器的安装示意图如图 2 所示。

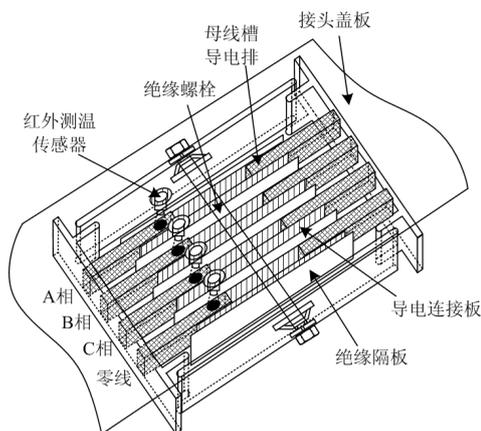


图 2 红外测温传感器安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of infrared measuring temperature sensor installation

2 基于红外的温度传感器设计

红外测温传感器由红外热传感探头和信号调理电路组成。红外热传感探头分为两种: 红外热电堆型和红外热释电型^[13]。由于用其测量温度数值, 且考虑母线槽所处的高压强电场工作环境^[14], 本文采用 OTP-538U 红外热电堆传感探头。其测温范围为 $-20 \sim 120 \text{ } ^\circ\text{C}$, 测量精度为 $1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 测量距离为 3 cm 。它是由 116 个热电偶串联组合而成, 且探头封盖有光学带通滤波器, 使其能在 $5 \sim 14 \text{ } \mu\text{m}$ 的波长范围进行温度感测。此外, 探头内部带有热敏电阻, 用来监测冷端环境温度, 实现温度补偿^[15]。

信号调理电路主要由热电偶电压采集电路、环境温度补偿电路构成, 其电路结构如图 3 所示。OTP-538U 的 1、3 脚输出的信号是其内部多个热电偶冷热端子两端的电压差之和, 该信号非常小且随温差变化灵敏, 因此在采集电路中设计有两级放大电路, 第一级差分放大主要完成对信号的获取和适当放大, 并减少信号中的共模干扰, 后经第二级同相放大最终完成对信号的 500 倍放大, 得到温差电压信号 U_1 , 同时为消除后端电路对 U_1 的影响, 电路中设计有电压跟随器, 实现阻抗匹配^[16-18]。

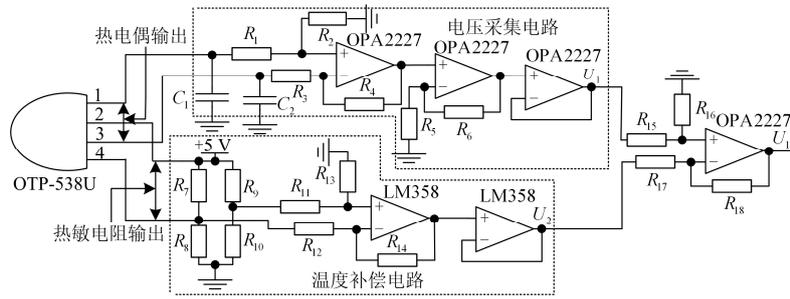


图 3 信号调理电路结构图

Fig. 3 Structure diagram of signal conditioning circuit

由于 U_1 是随着冷热端子两端的温差变化而变化，其不能完全反映热端被测物体温度的变化，基于 OTP-538U 内置的热敏电阻，本文设计了环境温度补偿电路，利用惠斯通电桥来产生不同环境温度转换到 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时所需的补偿电压，由于热敏电阻的电阻—温度特性曲线为负温度系数、非线性，设计中通过给热敏电阻并联电阻，并结合电桥特性对其进行线性化处理^[19]。通过仿真，确定了并联电阻值和惠斯通电桥臂，使得电桥输出电压差与补偿电压近似相等，仿真结果与标准温度补偿电压对比曲线如图 4。此电压差再经过后端处理得到环境温度补偿电压 U_2 ，最后将 U_1 与 U_2 叠加，得到只随被测物体温度变化而变化的电压信号 U_{10} ，完成不同环境温度的模拟补偿^[20-21]。

为减小环境温度变化对电压采集电路输出信号的影响，本文选用精密运算放大器进行电路设计，其具有极低的失调电压 ($\pm 5\text{ }\mu\text{V}$) 和温漂 ($\pm 0.1\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)，同时采用了差动放大电路，有效降低了电路输出的漂移。

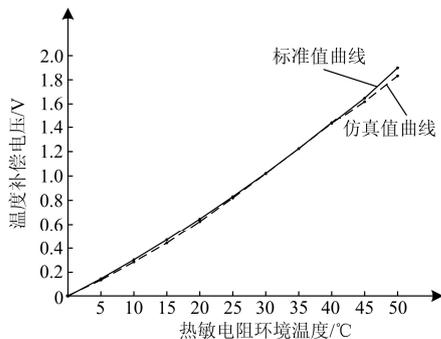


图 4 温度补偿电压值对比曲线图

Fig. 4 Contrast curve of temperature compensated voltage value

被测温度在 $-20\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内时， U_{10} 的变化范围为 $-0.25\sim 2.93\text{ V}$ ，为保证输出信号在 A/D 的采样量程内，需给 U_{10} 叠加一个幅值为 300 mV 的直流偏移量，使其变化范围 $0\sim 3.3\text{ V}$ ，以便于 A/D 采样。

另外，由于红外传感器工作在高压环境下，存在信号干扰，因此设计了二阶输出低通滤波器，其截止频率为 $f_d = 13\text{ Hz}$ ，保证了输出直流信号 U_o 的纯净性^[17]。电路结构如图 5 所示。

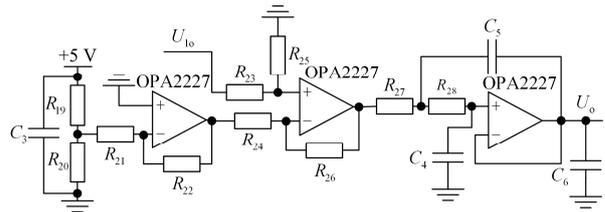


图 5 直流偏移和滤波电路结构图

Fig. 5 Structure diagram of DC offset and filter circuit

3 温度采集器设计

温度采集器主要完成对 4 路传感器输出信号的实时采集及温度数值计算，并结合自身所带的 PT100 铂热电阻实现连接单元处的环境温度测量，通过将母线槽连接处各导电排温度与环境温度做差得到各监测位置的当前温升值，最终利用 RS-485 网络或 ZigBee 网络将实时数据打包发送给监测分机。

3.1 硬件设计

本文利用 PT100 的阻值—温度特性，通过设计的恒流源电路完成环境温度的测量，具体原理图如图 6 所示。

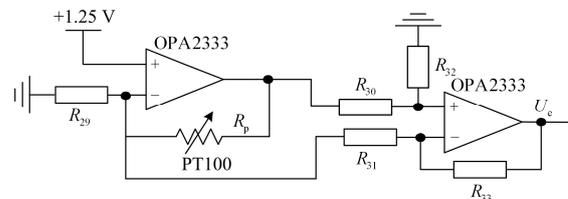


图 6 PT100 环境温度检测电路

Fig. 6 PT100 ambient temperature detection circuit

针对母线槽发热故障监测的特殊环境，为抑制通信过程中的共模干扰，保证数据传输的可靠性，

系统通信主要以 RS-485 有线通信方式为主, 并预留 ZigBee 无线通信模块。

3.2 软件设计

温度采集器通过串口中断实时接收监测分机发送的采集命令, 并将接收到的采集地址与自身的单元 ID 比较, 如相同, 则启动定时器触发 A/D, 对四路红外传感器信号进行采样, 并对每一周期的采样数据进行平均值计算和滤波处理, 再利用最小二乘法完成温度的标定。四路母线槽温升数据是通过与 PT100 所测到的环境温度作差而得到, 数据打包后通过 RS-485 总线发送给监测分机, 其中包括温度、温升数据和设备地址信息。其主程序流程如图 7 所示。

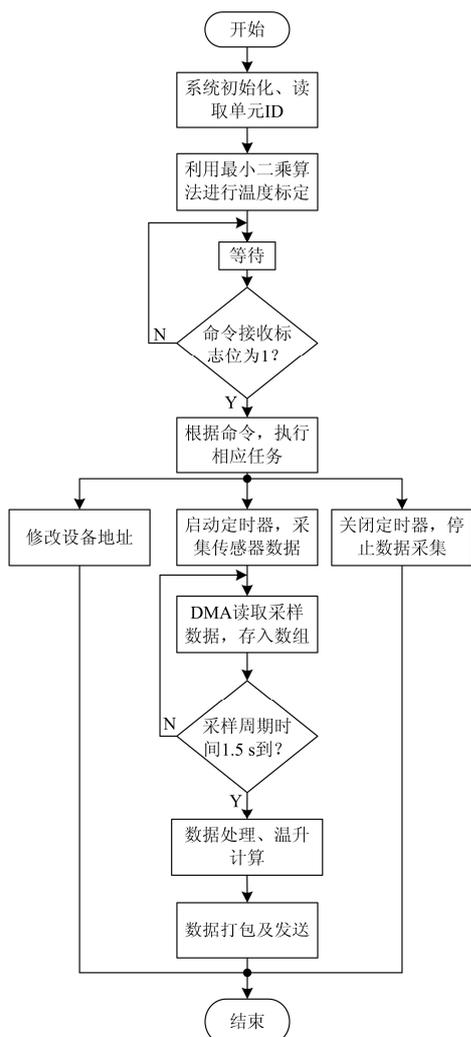


图 7 温度采集器程序流程图

Fig. 7 Program flow chart of temperature collector

3.3 温度标定分析

由于 OTP-538U 传感器的热电偶输出电压与温度之间的关系呈非线性化, 本文在进行传感器温度

标定时, 利用最小二乘法中的多项式拟合算法对热电偶输出曲线进行了二次拟合, 并充分考虑了放大器输入失调电压对测量温度的影响, 进一步完成传感器的数字温度补偿, 提高测量精度。

已知一组实验测量数据 $\{(T_1, V_1), (T_2, V_2), \dots, (T_n, V_n)\}$, 所确定的拟合函数为二次型 $T(V) = a_0 + a_1V + a_2V^2$, 采用最小二乘法进行二次拟合时, 可得

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n V_i & \sum_{i=1}^n V_i^2 \\ \sum_{i=1}^n V_i & \sum_{i=1}^n V_i^2 & \sum_{i=1}^n V_i^3 \\ \sum_{i=1}^n V_i^2 & \sum_{i=1}^n V_i^3 & \sum_{i=1}^n V_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n T_i \\ \sum_{i=1}^n V_i T_i \\ \sum_{i=1}^n V_i^2 T_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: V 和 T 分别为热电偶输出电压和测量温度; a_0, a_1, a_2 为拟合系数。

通过式(1)即可计算出拟合系数 a_0, a_1, a_2 , 从而确定拟合函数 $T(V) = a_0 + a_1V + a_2V^2$, 实现对热电偶输出信号的初步二次拟合^[22-24]。

由 OTP-538U 的输出特性可知, 当其在 0°C 工作环境温度下, 测量温度 T 为 0°C 时, 热电偶输出电压 V 也应为 0 , 但由于后端处理电路中放大器输入失调电压的存在, 导致实际的 A/D 采样信号经换算后, 所得的热电偶输出电压 V' 不为 0 , 这时代入拟合函数 $T(V)$ 算出的测量温度 T' 将不再是真实的测量温度 0°C , 二次拟合结果产生偏差。因此, 为了消除输入失调电压对二次拟合结果的影响, 使得所拟合的温度值更加接近真实值, 需在拟合函数 $T(V)$ 上叠加一个修正量 $\xi = T'$, 引入修正量 ξ 后的拟合函数为 $T'(V) = a_0 + a_1V + a_2V^2 + \xi$, 最终完成传感器的温度标定和数字补偿^[25]。

4 塔筒监测分机设计

监测分机主要包括电源模块、主控单元、预警模块和按键检测与显示模块, 如图 8 所示。发热故

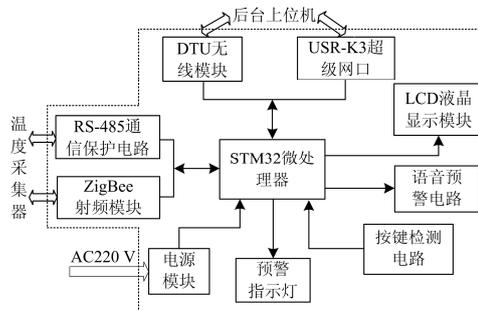


图 8 监测分机结构图

Fig. 8 Structure diagram of monitoring extension set

障诊断方法分两种：一是将前后时刻的温度做差，所得的温升值大于阈值 1 时报警；二是将当前温度与环境温度做差，所得的温升值大于阈值 2 时报警。

主程序流程中首先完成对系统的初始化，后进入主循环，利用定时中断进行各个按键状态的扫描，

执行相应的采集、发送等功能。当有监测单元满足预警条件时，主控单元会通过扬声器执行对应位置的语音报警，并刷新液晶屏数据。实时的监测信息通过 GPRS 上传至后台监控中心，其主程序流程如图 9 所示。

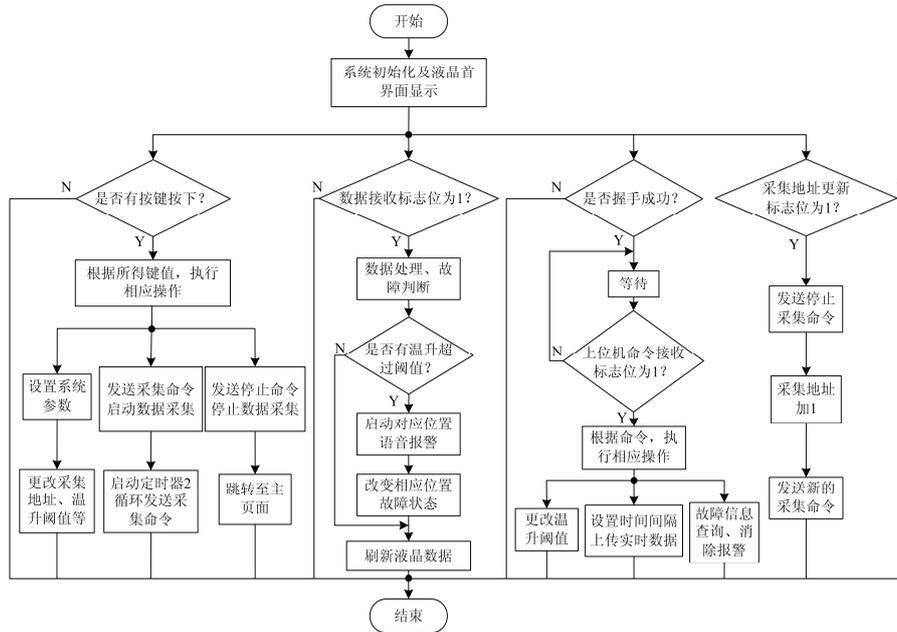


图 9 主控单元程序流程图

Fig. 9 Program flow chart of master control unit

5 风电母线槽运行状态监控中心

工作人员可通过后台上位机对母线槽运行状态进行实时监测，并完成对监测设备的远程操控。其中包括温升阈值设定、监测数据请求和查询、故障消除及历史数据查询等功能。上位机实时监测界面如图 10 所示。



图 10 上位机实时监测界面

Fig. 10 Real time monitoring interface of upper computer

图 10 所示为 1 号风场 1 号风机的 02 号采集单元出现发热故障时的实时监测界面，此时的 02 号采集单元的各个导电排运行状态均显示为“故障”，完成了故障预警。同时对以往监测数据的查询，可方

便监测人员更好地了解母线槽运行状态及趋势，进行故障预测和排除。

6 实验结果分析

通过搭建的实验平台，对系统性能进行了调试，如图 11 所示。系统参数配置为 1 台监测分机、4 个温度采集器、16 路红外测温传感器，实现对 4 处母线排连接单元的发热故障监测，并结合后台上位机对监测信息进行汇总与分析。

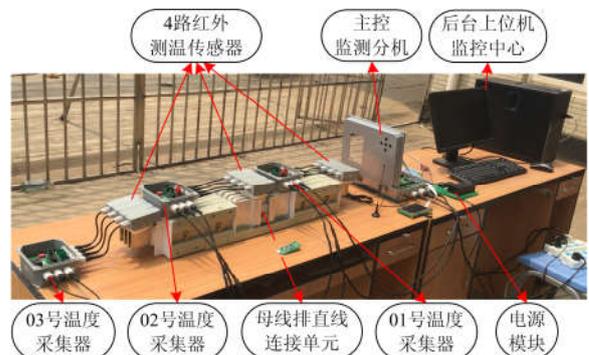


图 11 在线监测系统实验平台

Fig. 11 Test platform for on-line monitoring system

为确保温度监测的有效性, 本文对红外测温传感器的监测位置进行了实验研究, 利用交流稳流电源对母线槽施加不同等级的工作电流, 根据文献[26]所述的母线槽温度场分布, 通过对导电排、导电连接板和绝缘隔板 3 处温度的监测, 得出运行过程中出现最高温度的具体位置, 表 1 为 B 相不同位置处的测试数据。

表 1 不同测量位置下的测试数据

测量位置	导电排	导电连接板	绝缘隔板
运行电流/A	800	800	800
测量值/°C	47.73	42.15	38.88
运行电流/A	1400	1400	1400
测量值/°C	80.64	72.37	67.49

分析可知, 运行中的温度最高点出现在导电排处, 确定了红外测温传感器的安装位置。由于此传感器是通过感应物体的红外辐射强度来完成温度测量, 所以传感器的监测方向应垂直对准导电排, 避免其他物体的热辐射对测量结果造成影响。

为模拟母线槽工作环境的强电场干扰, 实验中

将 10 kV 的加压引线置于母线槽连接单元旁作为干扰源, 干扰强度达到 1000 V/m, 对比有电场干扰和无电场干扰条件下的测试数据, 分析监测系统的抗电场干扰性能。表 2 为不同工作温度下 B 相导电排强电场干扰的测试数据。

表 2 强电场干扰下的测试数据

测试电压	工作温度/°C	无电场干扰时温度数据/°C	有电场干扰时温度数据/°C	电磁干扰下测量误差/°C
1000 V/m	35	34.54	35.99	0.99
	45	45.78	44.82	0.18
	60	60.01	60.57	0.57
	80	80.42	81.19	1.19

基于以上分析, 对监测系统的整体性能进行测试, 表 3 为系统监测信息的数据分析, 表中以温升阈值 20°C, 环境温度 25°C 为实验条件, 以长期正常工作电流在 400~1400 A 的风电母线槽所允许的最高温度为依据, 通过给监测位置施加不同的温度来模拟塔筒振动所引起的不同程度的发热。

表 3 实验数据分析

Table 3 Test data analysis

母线槽连接单元	监测位置	温升阈值/°C	环境温度/°C	监测点实际温度/°C	监测点测量温度/°C	温升计算值/°C	温度测量误差/°C	故障预警
01	零线	20	25	35	34.56	9.56	0.44	正常
01	A 相	20	25	35	34.67	9.67	0.33	正常
01	B 相	20	25	35	35.12	10.12	0.12	正常
01	C 相	20	25	35	34.96	9.96	0.04	正常
02	零线	20	25	45	44.18	19.18	0.82	正常
02	A 相	20	25	45	46.79	21.79	1.79	报警
02	B 相	20	25	45	44.38	19.38	0.62	正常
02	C 相	20	25	45	45.13	20.13	0.13	报警
03	零线	20	25	60	61.45	36.45	1.45	报警
03	A 相	20	25	60	60.87	35.87	0.87	报警
03	B 相	20	25	60	61.76	36.76	1.76	报警
03	C 相	20	25	60	60.45	35.45	0.45	报警
04	零线	20	25	80	80.73	55.73	0.73	报警
04	A 相	20	25	80	81.95	56.95	1.95	报警
04	B 相	20	25	80	81.33	56.33	1.33	报警
04	C 相	20	25	80	80.67	55.67	0.67	报警

由表 3 可以看出: 01 连接单元各监测位置的温升数值低于阈值时, 系统不启动预警; 而当 02 连接单元 A 相和 C 相的当前温升分别为 21.79 °C 和 20.13 °C 时, 均高于预先设定的温升阈值 20 °C, 此时监测分机能够快速进行发热故障的诊断, 准确定位故障点并完成故障的预警和图像预警, 在 03、04 连接单元监测温度高达 80 °C 时, 系统仍能够安全稳定运行, 所有温度数据的测量误差均在 ±2 °C 之内。

本文根据母线槽实际运行中的工作电流、发热温度等条件, 对监测系统进行了等效实验, 通过施加不同载荷模拟实际环境下振动对发热的影响, 实验表明该系统能够完成故障诊断和预警, 满足现场应用需求。

7 结论

本系统实现了风电母线槽发热故障的在线监

测和诊断预警。实验表明, 风电母线槽发热故障在线监测系统能够对母线槽连接处的工作状态进行实时监测并完成故障位置的准确定位和预警, 以专用红外测温传感器并结合最小二乘算法的温度测量技术, 抑制了母线槽特殊环境的干扰, 有效地提高了检测精度和可靠性; 监测分机的数据分析与故障诊断方法, 能够快速排查故障点, 误报率低、灵敏度高; 带有专用数据库的上位机软件为后台工作人员的实时监测提供便捷, 提高了监测效率。

参考文献

[1] 刘军, 周飞航, 刘飞. 考虑塔影与风切变的永磁同步风电系统最大风能跟踪控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 107-114.
LIU Jun, ZHOU Feihang, LIU Fei. Research of maximum wind power tracking control strategy of permanent magnet synchronous wind power system based on the tower shadow and wind shear[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 107-114.

[2] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 9pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0016-y

[3] 邓显波, 欧阳本红, 孔祥海, 等. 大截面高压电缆导体交流电阻的优化[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 522-527.
DENG Xianbo, OUYANG Benhong, KONG Xianghai, et al. Optimization of AC resistance of large cross-section high-voltage cable conductor[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 522-527.

[4] 杨东, 王东, 刘广东, 等. 风电机组动力电缆与母线排的应用对比分析[J]. 电气技术, 2012(1): 75-79.
YANG Dong, WANG Dong, LIU Guangdong, et al. Application contrast analysis of wind generator power cables and bus bar[J]. Electrical Engineering, 2012(1): 75-79.

[5] 刘贻雄. 大型风力机塔筒结构动力学与稳定性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
LIU Yixiong. Structure dynamic analysis and buckling stability analysis on large wind turbine tower[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.

[6] 孙国霞, 关向雨, 金向朝, 等. 基于多场耦合计算的气体绝缘开关设备母线接头过热性故障分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3445-3451.
SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, JIN Xiangchao, et al. Temperature rise calculation and overheating fault analysis of gas insulated switchgear bus connector based

on coupled field theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3445-3451.

[7] 丛浩熹, 李庆民, 齐波, 等. 基于红外传感的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 144-148, 161.
CONG Haoxi, LI Qingmin, QI Bo, et al. Online GIS switch contact temperature monitoring based on IR sensing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 144-148, 161.

[8] JOONG K K, SUNG C H, KYONG Y P, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetothermal finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1636-1638.

[9] 翟瑞聪, 谢善益, 范颖, 等. 基于 IEC 61850 的在线监测装置通信仿真系统开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 137-141.
ZHAI Ruicong, XIE Shanyi, FAN Ying, et al. Development and application of the communication simulation system for the online monitoring device based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 137-141.

[10] 蔡骥然, 郑永康, 周振宇, 等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.
CAI Jiran, ZHENG Yongkang, ZHOU Zhenyu, et al. A survey of research on secondary device condition monitoring in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 148-154.

[11] 田毅, 黄新波. 高压开关柜温升在线监测系统[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 64-67, 71.
TIAN Yi, HUANG Xinbo. On-line monitoring system of temperature inside HV switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 64-67, 71.

[12] 王曦, 魏卓. 一种远程红外智能照明控制系统的设计[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 170-171.
WANG Xi, WEI Zhuo. Design of a remote infrared intelligent lighting control system[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2016, 44(5): 170-171.

[13] 黄新波. 变电设备在线监测与故障诊断[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2012: 14-15.

[14] 万保权, 邬雄, 杨毅波, 等. 750 kV 变电站母线电磁环境参数的试验研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 57-59, 71.
WAN Baoquan, WU Xiong, YANG Yibo, et al. Study on electromagnetic environment of bus in 750 kV station[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 57-59, 71.

[15] 杨武, 王小华, 荣命哲, 等. 基于红外测温技术的高压

- 电力设备温度在线监测传感器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 114-118.
- YANG Wu, WANG Xiaohua, RONG Mingzhe, et al. On-line temperature measurements with infrared technology on high voltage device[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 114-118.
- [16] XU D, XIONG B, WANG Y. Micromachined thermopile IR detector module with high performance[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(3): 150-151.
- [17] 李钊, 方勇华, 雒静, 等. 红外微弱信号的放大与调理电路设计[J]. 大气与环境光学学报, 2013, 8(5): 385-394.
- LI Zhao, FANG Yonghua, LUO Jing, et al. Design of an amplifying and conditioning circuit for weak infrared signal[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2013, 8(5): 385-394.
- [18] 赵勇, 郭亮, 成永红. 微弱直流信号测量电路设计[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 356-358.
- ZHAO Yong, GUO Liang, CHENG Yonghong. Design of measurement circuit for weak DC signal[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 356-358.
- [19] 刘夫亮. 热电偶冷端补偿的实验与研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- LIU Fuliang. Experiment and research on cold junction compensation of thermocouple[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [20] HAN Jianqiang, WANG Xiaofei, YAN Tianhong, et al. A novel method of temperature compensation for piezoresistive microcantilever-based sensors[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(3): 35002-35004.
- [21] 李明. 热电偶的冷端补偿及线性处理[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(2): 20-23.
- LI Ming. Cold end compensation and linear treatment of thermocouple[J]. Coal Science and Technology, 1996, 24(2): 20-23.
- [22] 张可, 张凌, 胡燕玲, 等. 输电线路行波测距数据的正弦拟合自动筛选方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 58-64.
- ZHANG Ke, ZHANG Ling, HU Yanling, et al. Transmission line traveling wave data automatically screening method based on sine fitting[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 58-64.
- [23] 行鸿彦, 彭基伟, 吕文华, 等. 一种湿度传感器温度补偿的融合算法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1711-1716.
- XING Hongyan, PENG Jiwei, LÜ Wenhua, et al. A fusion algorithm for humidity sensor temperature compensation[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(12): 1711-1716.
- [24] 马民, 汪春峰. 基于最小二乘谐波拟合的置信水平计算方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 22-23.
- MA Min, WANG Chunfeng. A method for confidence level calculation based on the least square harmonic fitting[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 22-23.
- [25] 侯忠生, 韩志刚. 改进的非线性系统最小二乘算法[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(3): 271-276.
- HOU Zhongsheng, HAN Zhigang. Modified nonlinear system least-squares algorithm[J]. Control Theory and Applications, 1994, 11(3): 271-276.
- [26] 武安波, 王建华, 耿英三. 密集型母线槽磁场-温度场综合有限元分析[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 7-10.
- WU Anbo, WANG Jianhua, GENG Yingsan. Finite element analysis of coupled magneto-thermal fields for compact busbar trunking system[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 7-10.

收稿日期: 2016-12-03; 修回日期: 2017-03-17

作者简介:

黄新波(1975—), 男, 博士(后), 教授, 研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术、无线网络传感器; E-mail: huangxb1975@163.com

张杰(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术; E-mail: 550882396@qq.com

田毅(1985—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术。E-mail: 78750598@qq.com

(编辑 周金梅)