

基于红外成像技术的发电机断路器导体温度监测系统

刘慧武¹, 贺儒飞², 张伟¹, 王方², 王海强¹, 蒋军²

(1. 西安西电开关电气有限公司, 西安 710017; 2. 南方电网调峰调频发电有限公司, 广州 510635)

摘要: 随着近年来中国电力系统的持续发展, 简化电厂的运行操作、提高机组的可用率以及提高系统安全性和稳定性等问题越来越被重视。发电机断路器的优越性能能够充分满足相关需求, 因此逐渐发展成为电力系统中最重要的组成设备之一。发电机断路器具有额定电流大、开断短路电流直流分量高、操作频繁等特点, 运行过程中容易出现因设备导体温度过高而导致的故障, 严重时甚至引发爆炸事故。文中提出了一种基于红外成像技术的发电机断路器温度监测系统, 精确还原发电机断路器导体周围的热场分布, 通过数据分析对高温点进行实时定位和温度异常报警, 实现发电机断路器故障隐患的及时处理。

关键词: 温度监测; 红外成像; 发电机断路器

Temperature Monitoring System for Generator Circuit Breaker Conductor Based on Infrared Imaging Technology

LIU Huiwu¹, HE Rufe², ZHANG Wei¹, WANG Fang², WANG Haiqiang¹, JIANG Jun²

(1. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710017, China; 2. CSG Power Generation Co., Ltd., Guangzhou 510635, China)

Abstract: With the continuous development of power system in China in recent years, increasing attention has been paid to such issues as simplifying power plant operations, improving generating unit availability and enhancing safety and stability of system. The superior performance of generator circuit breaker (GCB) can fully meet the relevant requirements, thus they have developed gradually into one of the most important components in the power system. The GCB is characterized by high rated current, high DC component of interrupted short-circuit current and frequent operation. During operation, faults caused by excessively high temperature in the equipment conductor temperature are prone to occurring and, in severe cases, can even lead to explosions. In this paper, a generator circuit breaker temperature monitoring system based on infrared imaging technology is proposed, which accurately restores the heat field distribution around the GCB conductor, and performs real-time location of high temperature points and abnormal alarm of temperature through data analysis so to achieve the timely handling the potential faults of the GCB.

Key words: temperature monitoring; infrared imaging; generator circuit breaker

0 引言

发电机断路器(GCB)是安装在发电机和变压器之间的断路器, 可以高效地开断发电机电源和系统源短路故障, 保护发电机和变压器, 避免事故扩大。通过发电机断路器可实现输电系统倒送电, 减少厂用变电源和启动/备用变电源切换操作次数, 保证厂用电系统稳定运行。发电机断路器可简化运行操作规程, 提供低电压并网点, 快速切断失步故

障, 与高电压并网点形成双保险^[1]。

发电机断路器是发电机主回路的重要设备, 在国外发电厂中已得到广泛应用。近年来, 发电机断路器在国内的应用程度也逐步提升。随着发电机断路器研发设计水平的持续提高, 其性能日趋完善, 机械寿命、开断电流等核心性能参数不断提升, 而设备体积、噪音、价格等参数却在不断降低, 并且发电机断路器具有提高机组可用率和厂用电可靠性等优点。基于上述优势, 目前发电机断路器已广

收稿日期: 2026-02-18; 修回日期: 2026-05-09

基金项目: 南方电网公司重点科技项目(STKJXM20190198)。

Project Supported by Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid(STKJXM20190198).

泛应用于各大水电、火电、核电等各种类型的大型电厂^[2-4]。

不同于变压器高压系统侧的开关设备,发电机断路器属于低电压、大电流断路器,在实际运行过程中,发电机断路器通常满负荷运行。由于其额定电流大、相关机组启停频繁等特点,导致发电机断路器零部件长期处于温度较高的运行条件下^[5-6]。

基于长期的运行经验我们得知,设备的发热现象通常蕴含着潜在的故障隐患。有研究表明,温度过高往往会造成高压开关设备的触头绝缘老化甚至击穿,严重威胁电网安全稳定。近年来,由于发电机出口断路器故障导致设备发生绝缘事故,甚至发生爆炸的重大事故,危及电力系统安全,造成了极大的经济损失。因此,对发电机断路器运行温度进行监测,在故障发生前排除隐患,对工程应用具有重大价值^[7-10]。

发电机断路器在运行时的环境是全封闭的,内部空间狭小,并且铜排裸露带有高压,人工无法进入内部巡视、测量温度。在电力行业的发展中,红外测温技术得到了普遍的发展,通过红外测温技术可以更加直观的、更加快速的、更加准确的检查电力设备出现温度变化导致设备出现的故障,而且红外测温不需要将设备停电即可检查出故障是否存在、故障所在部位。发电机断路器具有电流大、温度高、电磁场强等工作特点,其触头温度监测方法必须具备:采用非接触式传感元件测量;不破坏设备本身的绝缘、密封性;温度监测设备抗电磁干扰能力强等特点^[8,11-12]。基于以上要求,文中提出一种基于红外成像技术的发电机断路器温度监测方案。

1 系统结构

发电机断路器测温系统采用三级架构,见图1。底层(传感器层)用于采集导体温度的红外图像信息,传感元件安装在发电机断路器本体上;中间层(信息集成层)用于汇总、传输所有传感器上送的监测数据,并将全部数据统一传送到后台;顶层(后台监测层)用于处理所有传感器的信号,通过数据解析将各路信号全部转化为红外图像显示,并通过数字化手段实现任意时刻图像上任意点的温度实时可读取,自动定位高温点并进行阈值超限报警^[13]。

1.1 传感器层

热成像传感器通过定制的金属过渡件安装并固定在发电机断路器预留的接口处,并进行了充分的密封处理。传感器镜头正对发电机断路器导体

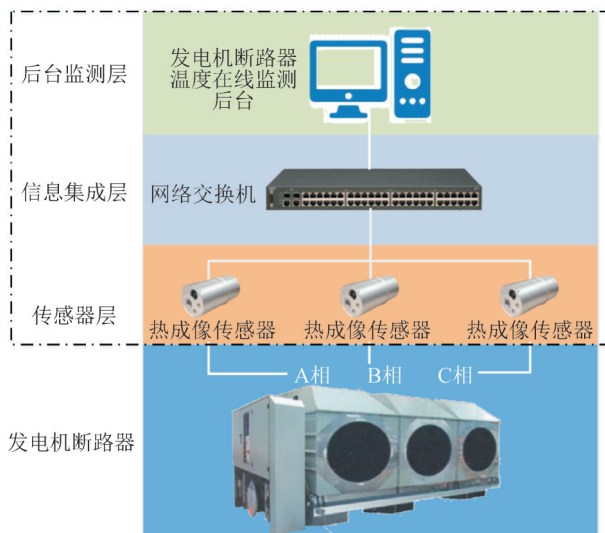


图1 测温系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram for temperature measurement system

高温区间,通过前置的红外感光元件采集导体表面温度场信息和图像信息,经过内置芯片处理后转换为数字信号通过电缆传出。传感器安装示意图见图2。

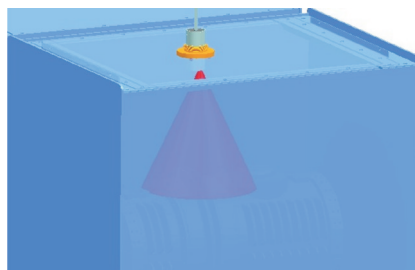


图2 传感器安装位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sensor installation location

1.2 信息集成层

热成像传感器输出数字信号,通过电缆传输至信息集成层,以RJ-45接口形式接入网络交换机。网络交换机将所有传感器数据汇总后,通过TCP/IP(网络通讯协议)将温度、视频数据传输至后台监测层,采用网线连接。后台系统通过解码将红外图像还原展现出来,显示发电机断路器导体温度场的分布情况,并提供温度异常报警。

1.3 后台监测层

后台监测层由数据服务器组成,对热成像传感器采集的温度数据和视频数据进行分析、计算和存储。其硬件依托计算机完成,通过以太网口与网络交换机连接。经过解析还原的导体温度场红外图像,通过人机交互界面实时更新显示,运维人员可通过改变光标位置获取任意时刻任意点的温度值。温度监测系统通过分析计算得到监控区域内

最高温度点,在人机交互界面对高温点进行定位和温度显示并实时更新。此外,监测系统还具备低温点、平均温度点的定位、数据显示功能以及预指定靶点的温度显示功能。所有数据保存在服务器设立的数据库中,提供历史数据检索功能。

2 关键技术研究

2.1 热成像传感器设计

2.1.1 原理设计

自然界任何高于绝对零度($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$)的物体都有热量(电磁波)向外辐射,温度越高辐射的能量越大。其中,波长范围在 $0.76\sim 1\,000\text{ }\mu\text{m}$ 的红外线,无法被人眼感知,但可以被特制设备监测到。热成像传感器利用这一原理,将物体的热辐射通过红外探测模块进行采集,转换成电信号,然后在显示设备上生成红外图像,见图3。

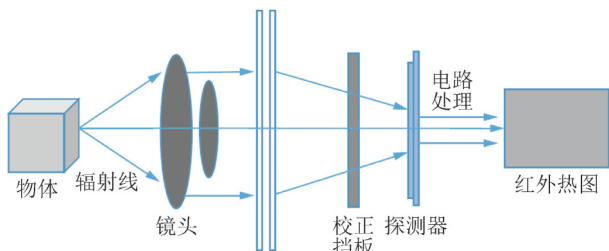


图3 红外成像原理

Fig. 3 Theory of infrared imaging

光学系统接受被测目标的红外辐射,经光谱滤波将红外辐射的能量分布图形反映到焦平面上的红外探测器阵列的各光敏元上,探测器再将红外辐射能量转换成电信号,并放大注入到读出电路,以便进行多路传输。高密度、多功能的互补金属氧化物半导体(complementary metaloxidesemiconductor, CMOS)多路传输器的读出电路能够执行稠密的线阵和面阵红外焦平面阵列信号积分、传输、处理和扫描输出,并进行A/D转换,以送入微机进行视频图像处理,最终显示红外热像图^[14]。以上为常规热成像传感器技术方案,文中提出的热成像传感器采用可见光+红外光双镜头设计。其优势在于,红外图像虽然可以捕捉、显示温度场区间,但对于图像细节的保留能力较差,不符合人员的视觉特性;而可见光图像则弥补了这一缺陷,二者通过算法进行图像融合(在文中2.2.2节中述及),提供更优异的解决方案。

可见光镜头负责采集波长在 $0.38\sim 0.75\text{ }\mu\text{m}$ 范围的光波;红外光镜头由锗制成,高纯度的锗折射系数较高,可见光和紫外线无法通过,但对红外光是透明的,主要采集波长在 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 范围的红外光

波。此外,为可见光镜头增设补光灯,保证暗光环境下可实现清晰拍摄。

感光元件将光信号转换为电信号,在信号处理单元经过信号放大、转换后进行伪彩色编码,最后通过电缆输出码流。可见光镜头采集的信息经过后台处理后还原为导体图像信息,红外光镜头采集的信息经过后台处理后还原为导体温度信息。传感器采用外部供电模式,通过电缆输入DC 24 V电压,实现对传感器芯片以及各光学元件的供电。同时在传感器内部增设了外挂式存储卡用于存储传感器配置信息,防止意外断电导致的信息丢失。热成像传感器的原理见图4。

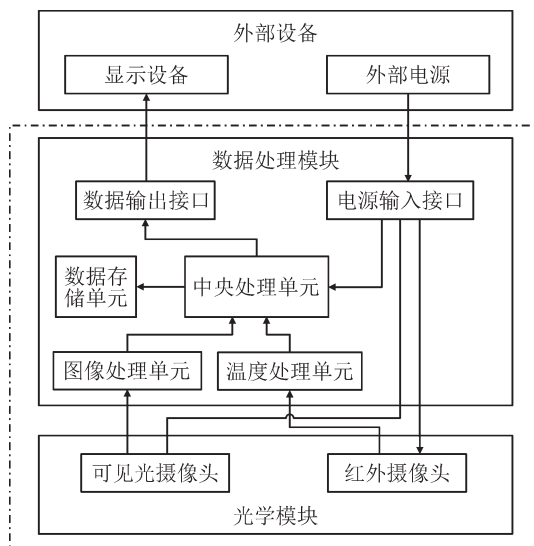


图4 传感器原理图

Fig. 4 Sensor schematic

2.1.2 结构设计

根据传感器的功能需求,传感器的光学模组(可见光摄像头、红外摄像头、补光灯)将集成在前端盖上,用于对发电机断路器内部导体的温度、图像数据进行采集;出线端则集成在后端盖上,用于实现数据的传输、供电系统的控制。传感器内部则布置电路板、CPU、电源模块、存储卡等硬件,以及光学模组与各模块之间的电气连接和固定模块。同时,为保证电子元件不受发电机断路器强电磁环境的干扰,传感器内部采用了足够的绝缘模块设计。考虑到高压开关设备内部充有 SF_6 气体,为防止气体通过传感器向外泄漏,传感器在前后端盖上均采用了高度密封设计。传感器侧端进行了棱台设计,为其与发电机断路器集成时进行限位做准备(在文中2.1.3节中述及)。热成像传感器外部结构见图5。

2.1.3 接口设计

除传感器自身结构外,还要解决传感器与发电机断路器本体的融合装配问题。装配结构既要保

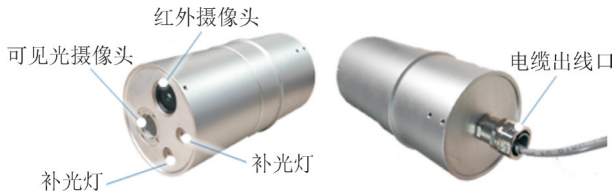
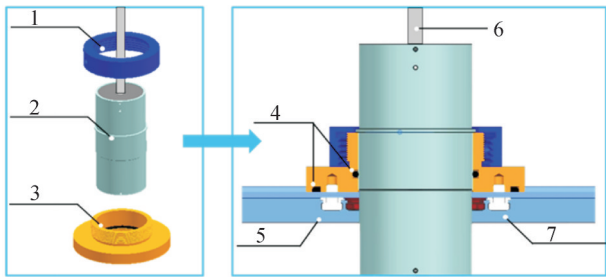


图5 传感器外部结构图

Fig. 5 External structure diagram of the sensor

证传感器的固定、限位以及与发电机断路器外壳之间的密封,又要保证传感器探头可有效采集到监测量信息并通过信号线传出。此外,传感器的植入不能破坏发电机断路器原有的绝缘性能、密封性能和机械性能。传感器与发电机断路器融合装配结构见图6。



1—限位法兰; 2—热成像传感器; 3—过渡安装法兰; 4—O型圈(分为圆柱面径向密封和端面密封); 5—发电机断路器箱体顶盖板; 6—热成像传感器电缆; 7—为螺钉。

图6 传感器安装结构图

Fig. 6 Sensor installation structure diagram

图6中:3通过7固定在5上;3中留有密封槽,通过4与2和5进行密封;5预留开孔,为2的镜头侧的深入及监测提供空间;2的外壳侧面具有棱台设计,2通过自身棱台卡在3上实现轴向的限位;1、3通过内、外螺纹配合旋紧连接;2、3之间通过4实现密封;同样的,3、5之间通过4实现密封;数据通过6输出,供电通过6输入。

2.2 算法设计

2.2.1 红外图像处理算法

由传感器直接采集还原的初始红外图像的空间分辨率低、对比度低、边缘模糊、细节缺失和易受噪声干扰等^[15]。需要采用有效的图像处理算法,使其成像质量得到改善后,才可以作为图像样本被监测系统使用。文中采用的红外图像处理算法主要包括:中值滤波、直方图、伪彩色变换等^[16]见图7:①对原始红外影像进行中值滤波处理,保留原始清晰度,同时有效消除部分图像噪声;②采用直方图均衡化算法对滤波后的图像做增强处理,使其细节的对比度得到增强;③采用伪色彩变换算法对增强后的图像做进一步处理,使其色彩变化更柔和,图像细节更清晰,温度明暗变化连续,对比度更高。处

理后的红外图像可直接应用于监测系统的图像显示、融合。

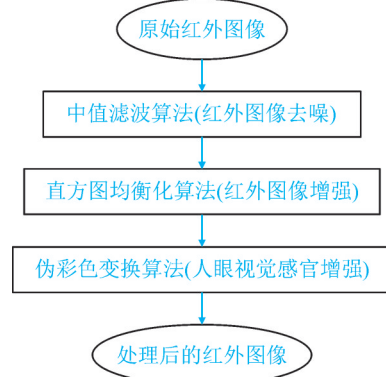


图7 红外图像处理算法流程图

Fig. 7 Flowchart of infrared image processing algorithm

2.2.2 可见光、红外光图像融合算法

对于测温系统来说,红外光探测传感器检测到的高温区间是我们的关注目标,但它有一个明显的缺陷,即红外图像无法保留足够的细节信息^[17]。可见光图像包含丰富的图像细节,恰好可以弥补这一缺陷,并且其更加符合人眼的视觉特性。如果可以使用某种融合技术将不同波段的图像信息加以融合,得到兼顾两者优点的融合图像,就能完美的实现红外测温系统的成像效果。

红外光与可见光图像光谱差异较大,文中采用基于LatLRR和PCNN的多尺度图像融合算法进行图像处理^[18],见图8。

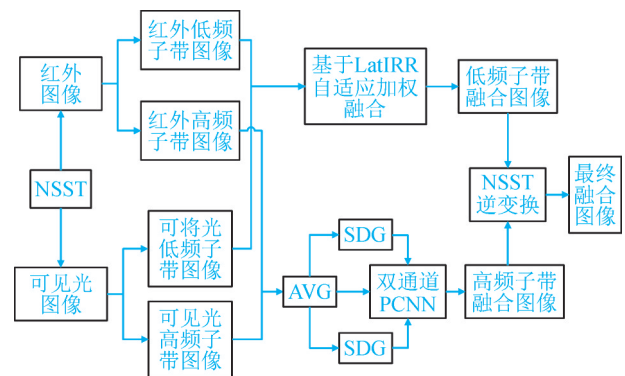
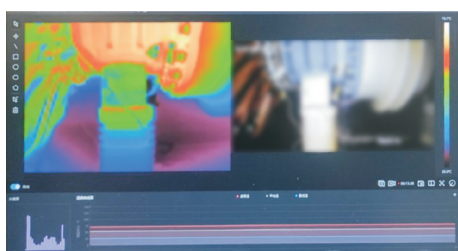


图8 图像融合算法流程图

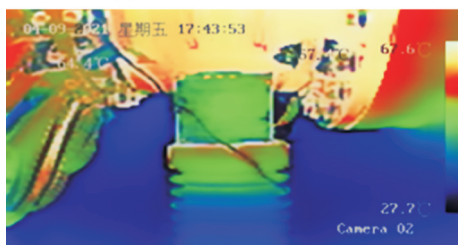
Fig. 8 Flowchart of image fusion algorithm

首先,本方案利用NSST来分别获得红外图像、可见光图像的低频子带和高频子带。其次,针对两者的低频子带,采用基于LatLRR方法对二者进行自适应加权融合;针对两者的高频子带,采用改良的双通道PCNN模型指导两者进行融合。最后,针对已获取的低频子带融合图像、高频子带融合图像,采用NSST逆变换获取最终的融合图像。图像融合效果见图9。图9(a)分别为红外图像(左)、可见光图

像(右),图9(b)为二者的融合图像。



(a) 左: 热成像, 右: 视频



(b) 合成图

图9 图像融合效果示意

Fig. 9 Schematic diagram of image fusion effect

2.2.3 温度还原算法

红外成像的作用是给运维人员以直观的视觉体验,方便操作者了解监测设备表面的热场分布情况,实现直观的定位高温区间及温度异常区间。但对于温度监测系统来说,仅对用户提供的监测物的红外图像是不够的。系统还必须将被测设备的热场分布情况进行量化,准确提供设备各点的温度数值。具体来说,就是将红外图像上各个像素点的伪色彩值通过一系列算法还原为温度值。

红外图像的伪色彩值和它的温度值之间存在着——对应的关系,热值 I 为^[19-20]

$$I = \frac{X - 128}{256}R + L \quad (1)$$

式(1)中: I 为设备热值; X 为图像的伪色彩值; R 为红外成像传感器的热范围; L 为传感器的热电平。由此可知,在 R 、 L 固定后, X 、 I 呈线性关系。由于伪彩色和灰度之间同样为线性关系,因此灰度和热值 I 也呈线性关系。

实际的热值 I_0 为

$$I_0 = \frac{I}{\tau \varepsilon} \quad (2)$$

式(2)中: I_0 为实际的热值; τ 为透射率; ε 为物体发射率,一般取0.9。

最后,再利用实际热值与绝对温度的关系,就可计算出红外图像各点的温度 t 为

$$t = \frac{B}{\lg\left[\frac{A}{I_0} + 1/F\right]} - 273.15 \quad (3)$$

式(3)中, A 、 B 、 F 为红外成像传感器标定曲线常数,对于短波系统, F 为1。

基于上述换算方法,可将红外图像热值完全转化为设备温度分布。

2.3 后台软件设计

发电机断路器温度监测系统的后台软件,由用户管理、主程序、数据管理及数据库、信息交互模块以及温度/视频信息采集、温度/图像信号解码处理几个模块组成。视频和温度信号基于IP/TCP协议输入主程序模块(输入前需经过特殊解码处理);主程序模块对输入的全部数据进行分析、计算、显示和存储;全部在线监测数据经过数据管理模块存储在数据库中,作为历史数据随时可被调用;同时主程序模块通过用户管理、信息交互模块接受用户的登录、查看、修改、导出等操作。软件原理图见图10。

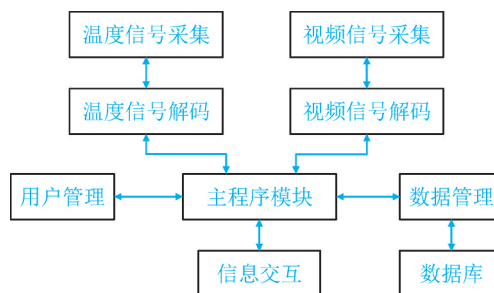


图10 发电机断路器温度监测系统软件原理图

Fig. 10 Software schematic diagram of generator circuit breaker temperature monitoring system

软件提供的基本功能为:在监测视野范围内,显示最高温度和最低温度值,通过色温指示条可以得到各位置的温度;可对高温预警值进行自定义,当系统监测到温度超标时发出报警。通过红外热像图可以直观的观测到被测设备的高温点在哪里,以及对应的温度值。此外,系统还设置了高级监测功能,具体包括:对关注的若干位置添加锚点,在设备运行时,系统实时计算显示锚点的温度值;通过软件设置可以实现自动对监测范围内的最高温度点(最低温度点/平均温度点)进行实时动态定位;对设备运行过程中生成红外图像的录像文件,后期可通过软件回放录像,并通过光标的移动读取任意时刻任意点的温度值。

3 系统应用

3.1 系统性能、参数

基于上述步骤搭建的红外测温系统的技术参数见表1。

表1 监测系统参数

Table 1 Monitoring system parameters

序号	参数	数值
1	测温范围/℃	-20~150
2	测温误差/℃	±1
3	热成像(测温) 响应波段/μm	8~14
4	热成像镜头焦距/mm	3
5	视场角/(°)	50.0×37.2
6	分辨率	1 920×1 080
7	可见光(视频) 可见光镜头焦距/mm	6
8	补光功能	双LED补光
9	工作环境	温度-30~70℃ 湿度<93% RH
10	其他功能	抗电磁干扰
11		数据存储量
12		电源输入(直流)/V
13		输出

结合表格数据和产品特点可知,本监测系统具有以下优点及技术先进性:

1)系统测量准确度较高:测量温度与实际温度误差在±0.5℃以内(有第三方试验认证机构出具的检验报告,详见表3)。

2)系统可连续监测、存储5年数据量:系统可24 h不间断监测发电机断路器,并实时生成红外云图录像文件并存储在NVR设备中,以便用户随时调用、查看近5年的历史数据。

3)区间测温:与传统红外定点测温方案相比,监测范围大大增加,视场角达到50°×37.2°,且无需对被测设备进行特殊涂漆处理。

4)非接触式测温。系统前端采用红外测温技术,与接触式测温方案相比,能够保护传感器较少受到导体附近强电磁环境的干扰。

5)抗干扰设计。传感器内部电路元件经过EMC设计,可抵抗被监测设备主回路通流时的电磁干扰(有第三方试验认证机构出具的检验报告,详见表2)。

6)用户界面友好。以红外云图的形式展示温度场分布,非常直观易读。

本监测系统已通过第三方机构的试验认证,并出具了性能试验报告(No.200867G)及准确度试验报告(No.200081G-M)。

检验报告封面见图11。

监测系统性能试验检测报告的主要内容见表2。

试验对工程现场各种恶劣的运行环境进行了模拟,证明各种工况下,基于红外成像技术的发电机断路器导体温度监测系统均可安全、稳定运行。

准确度试验的内容为:依托一台发电机断路



图11 监测系统检验报告

Fig. 11 Test reports of monitoring system

表2 监测系统性能试验参数表

Table 2 Parameter table of monitoring system

项目	数值	标准	结果
低温试验/℃	-30	GB/T 2423.1—2008	符合
高温试验/℃	70	GB/T 2423.2—2008	符合
恒定湿热试验	40℃ 93%	GB/T 2423.3—2016	符合
工频电磁场抗扰度试验	5级	GB/T 17626.8—2006	符合
静电放电抗扰度试验	4级	GB/T 17626.2—2018	符合
脉冲磁场抗扰度试验	5级	GB/T 17626.9—2011	符合
阻尼振荡磁场抗扰度试验/Class	3级	GB/T 17626.10—2017	符合
射频电磁场辐射抗扰度试验/Class	3级	GB/T 17626.3—2023	符合

器,在数小时内对其导体进行通流实现温升,使用文中搭建的断路器导体温度监测系统全程进行监测。在导体上选择2个固定位置点作为监测对象,在温升过程中随机抓取4个时间点作为数据采样时刻,试验结束后将各点各时刻的监测系统采样温度值与标准温度值进行对比,试验数据见表3。

表3 试验数据

Table 3 Test data

采样位置	采样时刻	标准温度值/℃	监测系统测量温度值/℃	偏差值/℃
测量点1	采样时刻1	64.9	64.4	-0.5
	采样时刻2	65.1	64.7	-0.4
	采样时刻3	65.3	65.0	-0.3
	采样时刻4	65.4	65.2	-0.2
测量点2	采样时刻1	67.9	67.4	-0.5
	采样时刻2	68.1	67.7	-0.4
	采样时刻3	68.4	68.0	-0.4
	采样时刻4	68.5	68.3	-0.2

试验结果显示:该发电机断路器导体温度监测系统的温度测量误差在 1°C 以内,系统测量精度较高,可以满足发电机断路器温度监测的需求。

3.2 系统的工程应用

由于发电机断路器大电流、运行温度高的特点,很多采用了发断设备的水电站、抽蓄电站的用户对发电机断路器温度在线监测功能提出了迫切的需求。由西安西电开关电气有限公司研发的基于红外成像技术的发电机断路器导体温度监测系统在多个电站得到了工程应用见表4。

表4 工程应用

Table 4 Application of power station engineering

工程名	首次运行时间
向家坝水电站	2020-12
广东梅州抽水蓄能电站	2022-05
白鹤滩水电站	2022-05

某电站现场的测温传感器安装实物照片见图12,监测系统的软件界面见图13。



图12 传感器安装实物图

Fig. 12 Sensor installation physical map

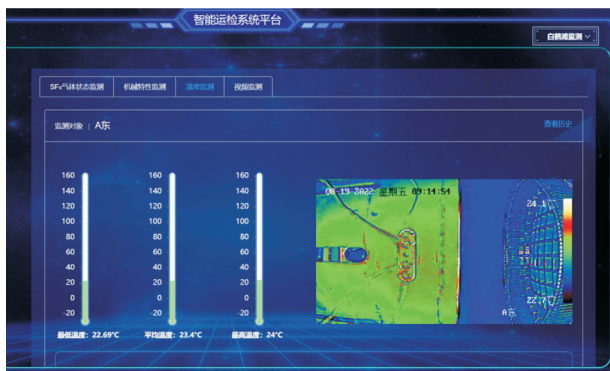


图13 实时监测界面

Fig. 13 Real time monitoring interface

在监测视野范围内,显示最高温度和最低温度值,通过右侧色温指示条可以得到各位置的温度;可对高温预警值进行自定义,当系统监测到温度超标时发出报警。

系统自动计算监测范围内各点温度的平均值,并以温度计形式实时显示更新最高温度、最低温度、平均温度值。经过一段时间的监测数据累积,可将最高温度、最低温度、平均温度数据自动绘制

成曲线,见图14。

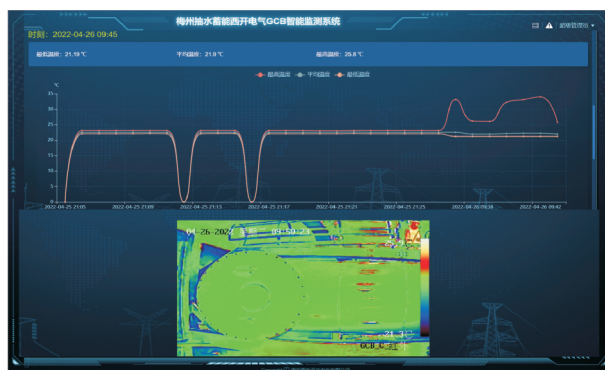


图14 温度曲线绘制

Fig. 14 Temperature curve drawing

通过移动光标位置,可读取任意曲线上的任意点的数据。

此外,由于系统前端的传感器具备可见光监测功能,因此在后台可选配可见光图像/红外图像的显示模块,当二者都被选中时,见图15。

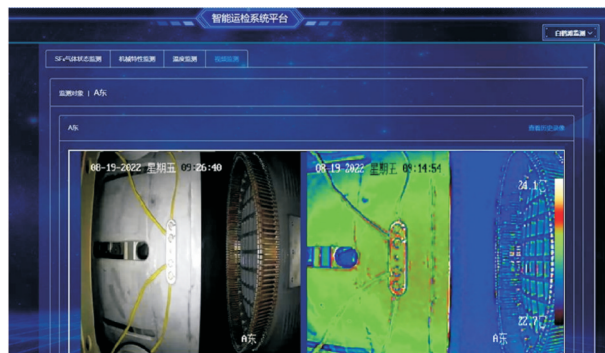


图15 双通道图像显示

Fig. 15 Dual channel image display

该系统已经在多个电站依托发电机断路器产品进行了应用,系统对设备导体温度及触头状态实时进行在线监测并提供故障预警,为发电机断路器的调试、运行、维护和检修提供指导,保障了水电站相关水轮机组的稳定、可靠运行,应用效果良好。

4 结语

文中提出了基于红外成像技术、图像处理技术、不同波段图像的融合技术、计算机和网络技术搭建的发电机断路器导体温度监测系统,实现了对发电机断路器内部导体的非接触式测温,后台算法实时生成导体表面温度场分布的红外图像直观易读,还原的测量温度数值与实际温度数值差值小,测温数据可以作为依据进行高温报警、指导检修。该温度监测系统为发电机断路器的运行状态提供了有效的在线监测方法。

参考文献:

- [1] 张鑫,程立,何晨光,等. 国产大容量发电机断路器的发展与应用[J]. 电气时代,2022(10):63-66.
Zhang Xin, Cheng Li, He Chenguang, et al. The development and application of domestic large-capacity generator circuit breakers[J]. Electric Age, 2022(10):63-66.
- [2] 李春雨. 发电机出口断路器的应用[J]. 自动化应用, 2013(11): 32-33.
Li Chunyu. Application of generator circuit breaker[J]. Automation Application, 2013(11): 32-33.
- [3] 蔡炳高,罗浩,胡俊杰. 大型水轮发电机组 GCB 非全相运行分析与处理[J]. 人民长江, 2022, 53(s2): 177-180.
Cai Binggao, Luo Hao, Hu Junjie. Analysis and treatment of GCB open phase operation of large hydrogenerator units[J]. Yangtze River, 2022, 53(s2): 177-180.
- [4] 周道军. 大型机组发电机断路器配置分析[J]. 电气技术, 2016(2): 102-105.
Zhou Daojun. Configuration analysis of generator circuit breaker for large generator[J]. Electrical Engineering, 2016(2): 102-105.
- [5] 张会杰,黄小凤,唐成,等. 大容量发电机断路器铸铝外壳在高温条件下的性能分析[J]. 电气技术, 2022, 23(9): 35-39.
Zhang Huijie, Huang Xiaofeng, Tang Cheng, et al. Performance analysis of large capacity generator circuit breaker with cast aluminum housing under high temperature[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(9): 35-39.
- [6] 石良,程诗明,周赞,等. 浅谈抽水蓄能电站发电机断路器低频开断能力[J]. 水电站机电技术, 2022, 45(11): 86-89.
Shi Liang, Cheng Shiming, Zhou Zan, et al. Talk about the low-frequency opening capacity of the generator of the pumping storage power station[J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2022, 45(11): 86-89.
- [7] 徐丽华,张龙. 变电站电力设备红外智能巡检、诊断与高效预警系统的应用研究[J]. 四川电力技术, 2016, 39(5): 5-8.
Xu Lihua, Zhang Long. Research on the application of infrared intelligent inspection, diagnosis and high-efficiency early warning system for substation in power equipment[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2016, 39(5): 5-8.
- [8] 陈强,李庆民,丛浩熹,等. 高压开关设备触头温度监测技术研究进展[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 146-153.
Chen Qiang, Li Qingmin, Cong Haoxi, et al. Advancement of temperature monitoring techniques for HV switchgear contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 146-153.
- [9] 郭伟. 基于 FTW 无线技术在发电机出口断路器测温中的应用[J]. 电工技术, 2021(21): 20-21.
Guo Wei. Application of FTW wireless technology in temperature measurement of generator outlet circuit breaker[J]. Electric Engineering, 2021(21): 20-21.
- [10] 杨兴富. 硕中水电站发电机出口断路器故障分析[J]. 小水电, 2020(6): 79-81.
Yang Xingfu. Analysis of the faulty analysis of the exit of the generator exit of Shuozhong hydropower station[J]. Small Hydro Power, 2020(6): 79-81.
- [11] 钱峰,杨波,贾荣义,等. 基于 FTW 型的 GCB 无线测温装置[J]. 价值工程, 2021, 40(5): 225-226.
Qian Feng, Yang Bo, Jia Rongyi, et al. GCB wireless temperature measuring device based on FTW[J]. Value Engineering, 2021, 40(5): 225-226.
- [12] 马文章. 变电站运行中红外测温技术的应用[J]. 环球市场, 2019(27): 139-140.
Ma Wenzhang. Application of infrared temperature measurement technology during the operation of the substation[J]. Global Market, 2019(27): 139-140.
- [13] 贾敬礼,张永强,张伟,等. 发电机断路器在线监测技术研究与应用[J]. 人民长江, 2022, 53(s1): 166-169.
Jia Jingli, Zhang Yongqiang, Zhang Wei, et al. Research and application of on-line monitoring technology of generator circuit breaker[J]. Yangtze River, 2022, 53(s1): 166-169.
- [14] 龙东川,雷霆,钟力强,等. 基于热成像技术的非接触式柜内设备状态监测系统[J]. 广东电力, 2022, 35(3): 108-115.
Long Dongchuan, Lei Ting, Zhong Liqiang, et al. Research on condition monitoring system of non-contact switchgear equipment based on thermal imaging technology[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(3): 108-115.
- [15] 凡遵林,管乃洋,王元之,等. 红外图像质量的提升技术综述[J]. 红外技术, 2019, 41(10): 941-946.
Fan Zunlin, Guan Naiyang, Wang Zhiyuan, et al. Infrared image quality improvement technology: A review[J]. Infrared Technology, 2019, 41(10): 941-946.
- [16] 高美静,彭春阳,李时雨,等. 基于 FPGA 的红外成像系统及图像处理算法[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(2): 160-167.
Gao Meijing, Peng Chunyang, Li Shiyu, et al. Infrared imaging system and image processing algorithm based on FPGA[J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(2): 160-167.
- [17] Liu Yu, Chen Xun, Wang Zengfu, et al. Deep learning for pixel-level image fusion: Recent advances and future prospects[J]. Information Fusion, 2018(42): 158-173.
- [18] 谢艳新. 基于 LatLRR 和 PCNN 的红外与可见光融合算法[J]. 液晶与显示, 2019, 34(4): 423-429.
Xie Yanxin. Infrared and visible fusion algorithm based on latLRR and PCNN[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2019, 34(4): 423-429.
- [19] 李云红,孙晓刚,王延年,等. 改进神经网络的红外成像测温算法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 801-805.
Li Yunhong, Sun Xiaogang, Wang Yannian, et al. Algorithm of measuring temperature with infrared imager based on improved neural network[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 801-805.
- [20] 陈达,唐文虎,牛哲文. 基于深度学习的电力设备红外图像故障诊断方法[J]. 广东电力, 2021, 34(1): 97-105.
Chen Da, Tang Wenhui, Niu Zhewen. Fault diagnosis method for power equipment infrared images based on deep learning[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(1): 97-105.

刘慧武(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为高压开关设备在线监测技术(通信作者)(E-mail:529564154@qq.com)。