

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.008

基于温度变化特征的GIL状态辨识系统研究

李洪涛¹, 丁然¹, 赵科¹, 梁睿², 乔宇娇², 高鹏²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 中国矿业大学, 江苏 徐州 221008)

摘要: 气体绝缘输电线路(GIL)的设备温度是判断其是否正常运行的重要技术指标,目前有较少研究将监测温度信号和辨识运行状态相结合,为了基于温度变化特征实现GIL运行状态的及时准确辨识,文中建立三维有限元模型,精准分析不同工况的温度场分布,通过在GIL线路上布置红外测温传感器,以监测实际壳体温度值,设计一种能够实时监测壳体温度的方案,将数据通过无线传输至监测系统,以仿真计算的正常运行壳体温度值为标准设置状态辨识的温度门限值,实时辨识GIL运行是否处于异常状态,当改变电流和环境等运行条件时,可直接修改模型参数,即得到相应的状态辨识温度门限值,从而通过监测系统和状态辨识得到准确的运行状态,有助于GIL安全可靠运行。

关键词: GIL; 温度变化特征; 实时监测; 有限元模型; 状态辨识

Research on GIL State Identification System Based on Temperature Change Characteristics

LI Hongtao¹, DING Ran¹, ZHAO Ke¹, LIANG Rui², QIAO Yujiao², GAO Peng²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. China University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221008, China)

Abstract: The temperature of GIL equipment is an important technical index to judge whether it is in normal operation. At present, there are few researches on the combination of monitoring temperature signal and identifying operation state. Therefore, this paper establishes a three-dimensional finite element model, which can accurately analyze the distribution of temperature field under different working conditions. By arranging infrared temperature sensor on GIL line to monitor the actual shell temperature value, a real-time monitoring method is designed in the scheme of shell temperature, the data is transmitted to the monitoring system wirelessly, and the normal operating shell temperature value calculated by simulation is taken as the standard of state identification. The GIL operating state is identified in real time, which is convenient to analyze the GIL temperature state. When the current and environment and other operating conditions are changed, the model parameters can be modified directly, that is, the temperature parameter indexes of normal operation can be obtained, so as to carry out accurate state identification is helpful for the safe and reliable operation of GIL.

Key words: GIL; temperature change characteristics; real-time monitoring; finite element model; state identification

0 引言

气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission lines)输送容量大、载流水平高,但是内部电连接多,发热的问题比较突出,因此,关于GIL实时监测的研

究较多,目前局部放电检测取得较为显著的成果^[1-3],然而局部放电检测会因为放电的位置而受到GIL设备壳体结构和环境因素等的影响,从而对定位精准性产生影响^[4-5];然而,通过测温技术,能直观准确的发现设备异常,成为目前GIL状态监测重要的手段,

收稿日期:2020-02-17; 修回日期:2020-04-25

基金项目:2019年国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019009)。

Project Supported by 2019 Science and Technology Program of State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.(J2019009).

温度可以作为判断GIL设备正常运行的重要技术指标^[6-7],GIL导体的焦耳热损耗产生热量使温度升高,同时热交换使绝缘气体升温,GIL壳体感应电流热损耗与涡流热损耗共同作用,引起导体、壳体和绝缘气体温度的大幅升高。因此GIL设备温度是判断其是否处于正常运行状态的重要技术指标,且GIL承载的电流常达数千安培,有必要对温度监测,减小因温度过高引发的故障^[8-9],所以文中对温度实时监测进行研究,设计监测方案,从温度场角度实现GIL状态辨识。

但是,目前GIL在实际工程中仍然存在较多问题,其内部充有绝缘气体,导致传感器不能有效采集温度数据,常出现采集数据不准确,采集效率较低,监测系统不完善,运行的温度没有判断标准等问题^[10-12]。为解决不能及时准确的进行温度监测及状态辨识,文中通过建立三维有限元模型,并考虑环境因素,得到正常运行的壳体温度范围,提出一种能够监测壳体温度的红外测温方案,同时设计实时监测系统,以及状态辨识方法,结合现场采集温度数据,以模型计算的壳体温度正常值为状态辨识标准,可以辨识线路实际运行状态,有助于提高GIL的可靠性。

1 GIL理论与建模

1.1 GIL温度场

通过对流换热与热辐射2种方式GIL内部热量传递到外部环境,并且能够达到热平衡^[13],热交换主要方式为热传导、热对流和热辐射。热传导方式,导体内产生的热量传至导体外表面,壳体内部热量传至壳体外表面;热对流方式,绝缘气体带走导体外表面热量,将热量传到壳体内部,通过自然对流或强制对流方式,壳体外表面与周围空气之间进行热传递;热辐射方式是导体外表面与壳体内表面之间的传热。

GIL产生的热量和交换出去的热量相同的时候,可以只考虑热对流与热辐射,从而存在两层热平衡关系:导体壳体的热损耗与壳体和空气间的热辐射和热对流的平衡,导体热损耗与导体和绝缘气体间热对流和导体壳体间的热辐射的平衡,具体平衡关系用公式表达为:

$$P_d + P_k = Q_{kf} + Q_{kd} \quad (1)$$

$$P_d = Q_{df} + Q_{dd} \quad (2)$$

式(1)-(2)中: P_d 为导体的电阻热损耗; P_k 为壳体的涡流热损耗; Q_{kf} 为壳体的热辐射散热量; Q_{df} 为导体的热辐射散热量; Q_{kd} 为壳体的热对流散热量; Q_{dd} 为导体的热对流散热量。

1.2 多物理场耦合

用包含电磁场、温度场以及流体场的多物理场耦合方法,对数学模型迭代求解,据初始温度计算导体以及壳体的焦耳热损耗,将这个焦耳热损耗计算值作为输入条件,再通过迭代计算导体的产热量和散热量的误差,判断是否小于设定的误差值5%,从而判断运行是否达到稳定状态,可以得到准确的温度场计算结果^[14],然后将计算值与传感器采集到的壳体温度数据进行对比,判断GIL的运行状态见图1。

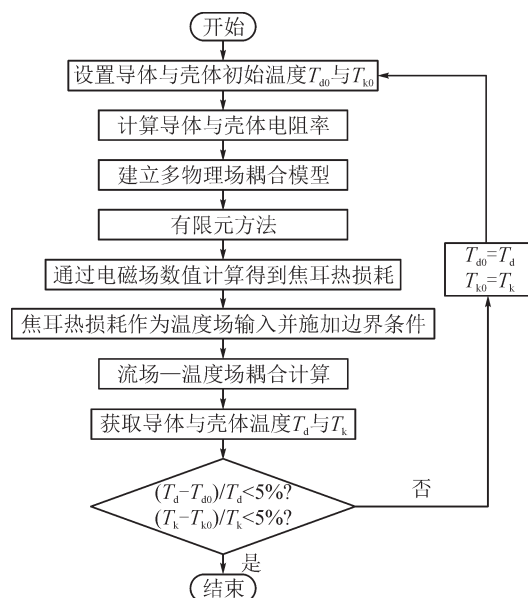


图1 高压交流GIL多物理场耦合流程图

Fig. 1 Multi physical field coupling flow chart of high voltage alternating current GIL

2 GIL模型建立与仿真

文中仿真的参数来自苏通GIL管廊工程,此工程GIL采用三相分箱的结构,使用SF₆气体作为绝缘气体,额定参数见表1。

表1 额定工况的参数

Table 1 Parameters of rated working condition

参数	数值
额定电压/V	1 100
额定电流/A	6 300
环境温度/°C	20
绝缘气体压强/MPa	0.4
导体内/外径/mm	160/200

GIL处于管廊内,不考虑太阳辐射,且忽略风速情况,本模型假设:忽略SF₆和空气的气体辐射换热;空气域外边界的温度是环境温度,不会受到GIL内部发热的影响;导体和壳体材质各向同性,热损耗均匀分布。温度场分布见图2。

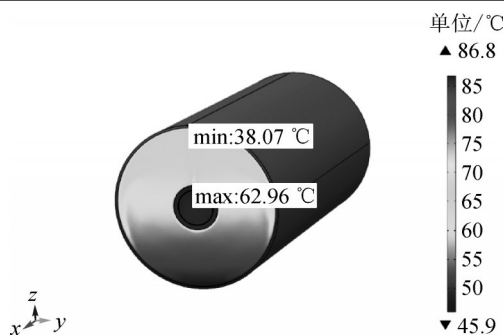
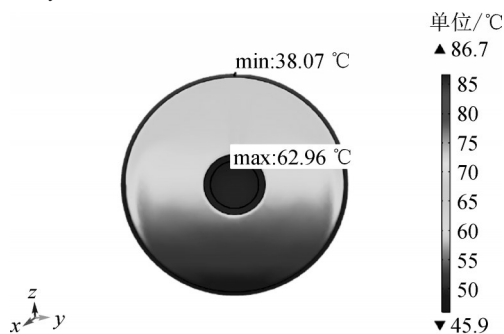


图2 GIL三维温度场分布

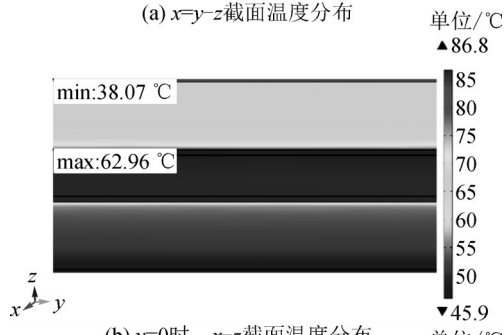
Fig. 2 Three dimensional temperature field distribution of GIL

在整个求解区域内温度场分布呈横轴对称,最高 62.96 °C,最低 38.07 °C。上部分气体通过热辐射和热对流进行传热,下部分气体通过热辐射和热传导进行传热,热传导的效率比热对流低,因此壳体与导体有温差,并使绝缘气体上下部分存在温度梯度,温度场呈阶梯状非等温分布。

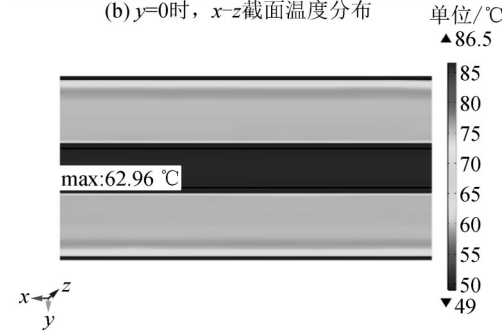
分析 GIL 温度场分布特点,在结果中绘制 y - z 、 x - z 和 x - y 截面温度分布与趋势,见图 3。



(a) x - y - z 截面温度分布



(b) $y=0$ 时, x - z 截面温度分布



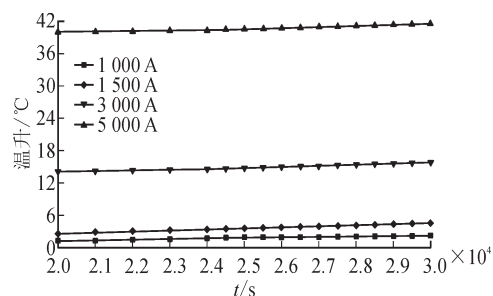
(c) $z=0$ 时, x - y 截面温度分布

图3 GIL 截面温度场分布与趋势

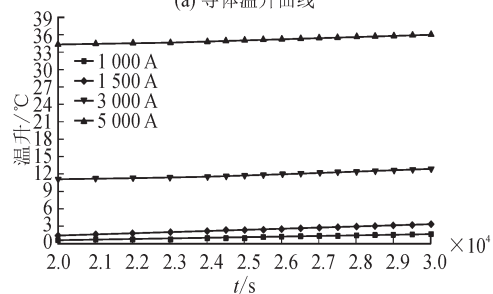
Fig. 3 Temperature field distribution and trend of GIL section

由图 3 可知,整体温度上下部分温差较大,上部高于下部,且由导体向壳体降低,是因为绝缘气体在温差下自然对流散热。同时在 x 轴方向温度分布一致且在 y 轴方向上沿 $x=0$ 对称,因此,通过仿真得到 GIL 壳体正上方温度为壳体温度最高点,以此为正常状态标准值可以对现场采集的温度数据进行处理。

为研究不同线路电流情况下导体和壳体的温升,设定线路电流值为 1 000、1 500、3 000、5 000 A 4 种情况,通过仿真得到正常温升曲线图,见图 4。



(a) 导体温升曲线



(b) 壳体温升曲线

图4 线路电流不同时 GIL 温升情况

Fig. 4 GIL temperature rise at different line current

由图 4 可以看出,在不同线路电流情况下,导体和壳体的温升情况不同,线路电流越大,导体和壳体的温升越明显,并且导体和壳体的温度差越大。当线路电流为 1 000 A 时,导体和壳体稳定运行时的温差仅为 0.7 °C,而当线路电流为 5 000 A 时,导体和壳体的温差增大为 5.59 °C,变化幅度明显增加。

环境温度影响 GIL 正常运行,通过研究不同环境温度下的 GIL 温度场,得到导体和壳体正常温升情况见图 5。导体和壳体的温升随环境温度升高而升高,但导体和壳体的温差却随环境温度的增加而减小。

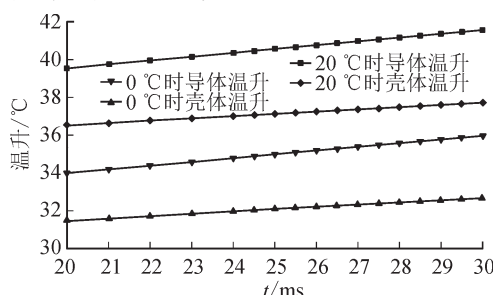


图5 环境温度不同时 GIL 温升情况

Fig. 5 GIL temperature rise at different ambient temperature

3 温度监测方案设计

通过监测 GIL 运行时的壳体温度,实时通过温度反映全线路运行情况。GIL 包括多个不同的线段:补偿线段、垂直线段,水平线段、转角线段及定向线段^[20],划分线段有利于整条线路的信号采集,实现多维度监测,准确反映线路状态。在线段基础上划分气室,盆式绝缘子为相邻气室的隔离,不同气室各自封闭,气室均有采集壳体温度的传感器。

3.1 壳体温度监测方案

对 GIL 温度采集用精密的温度传感器在壳体外表面处测量,文中选用红外线式测温方法,红外传感器测温速度快、范围广、高精度且高灵敏度,而且对被测温度场没有影响,对被测对象的限制小^[15-17]。考虑到 SF₆ 气体的密闭性特点,红外式测温探头应安装在被测点的壳体外表面上,并密封敷设有机材料,可解决 GIL 结构复杂不易安装探头问题。

GIL 结构中包括特殊部位,如法兰连接、伸缩节,因内部导体触头接触面不平整会使接触面积减少,会在接触面附近电流线发生收缩,使接触电阻大于母线部分,电阻损耗的发热增大,温度高于母线温度^[18-19]。因此将温度测量方案分为正常状态和异常状态两种。正常状态时,检测特殊部位法兰和伸缩节等包含导体触头的温度数据,采集周期为 1~2 s;当数据波动出正常范围,启用故障状态的监测方案,加快采样频率及采样范围,上传所有采集点的温度数据,100 ms 为周期,确保数据采集的精确度和提高故障辨识的效率。两种方案配合从而快速准确地进行故障辨识。

3.2 红外测温仪的安装

为保证 GIL 运行的可靠性,更换红外测温仪应不影响正常运行且满足易拆装的要求,因此用红外测温仪直接测壳体温度^[20-21],取代在壳体开孔对内部导体测温的方案。通过之前仿真选择壳体正上方为测温点,通过固定支架安装红外测温仪,见图 6。

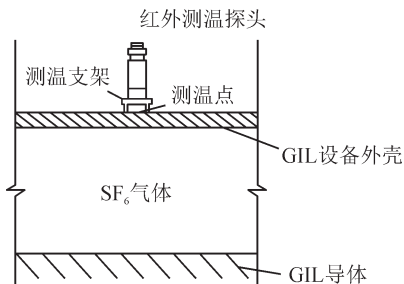


图 6 红外测温仪安装示意图

Fig. 6 Installation diagram of infrared thermometer

为满足测温及计算准确度的要求,在输电方向

上间隔安装,该间隔可根据现场情况优化调整。

3.3 温度实时监测系统

温度监测系统分为下位机和上位机,下位机系统主要是运行状态的温度采集、预处理并传送到上位机,上位机是基于 LabVIEW 环境对采集到的温度数据处理、分析、存储及显示状态辨识的结果见图 7。

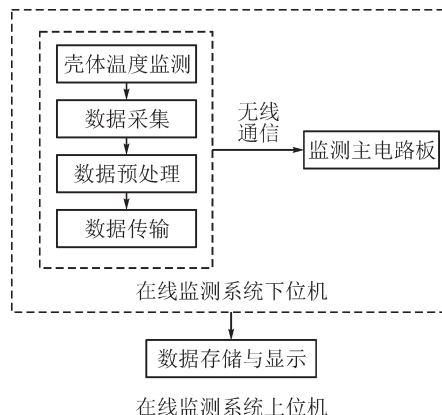


图 7 GIL 实时监测系统

Fig. 7 GIL real time monitoring system

GIL 实时监测系统的完整工作流程为:红外传感器采集的温度信号经无线网络传到下位机系统的无线通信电路板,实时温度数据再经无线网络传到下位机系统的主电路板,再传给上位机系统去处理,可以实现实时的全线路温度状态监测。

系统采用无线传输方案,按设定的周期经无线采集设备从温度传感器中获得数据,经 Sub-GHz 短距离无线电波传送至无线接收传输设备,再经 433 MHz 无线短距离技术把数据传至上位机,见图 8。

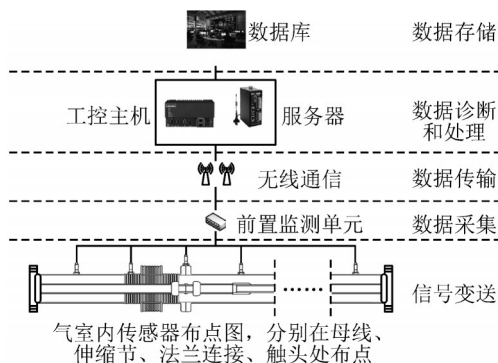


图 8 系统总体结构图

Fig. 8 Overall structure of the system

无线接收传输设备与上位机经 RS-485 方式通信^[22-23],在 GIL 的无线监测中,高压电产生很强的电磁场,会对无线电波产生较大干扰,选择主从通信方式具有良好的抗干扰性,能有效减少 GIL 环境下的电磁干扰,可以实现通信距离较远的要求,有效提高了长距离 GIL 管廊通讯传输的可靠性。

4 状态辨识

4.1 软件设计

软件系统依据实时性,有效性,可扩展性及模块化的原则设计。GIL实时监测系统软件设计是将采集到的数据经过实时分析、处理和存储,将状态辨识的结果显示在界面,依据设定的状态量对非正常运行状态预警,实时监测系统要具备的模块主要为数据采集、数据分析与处理、数据存储、用户界面,见图9。

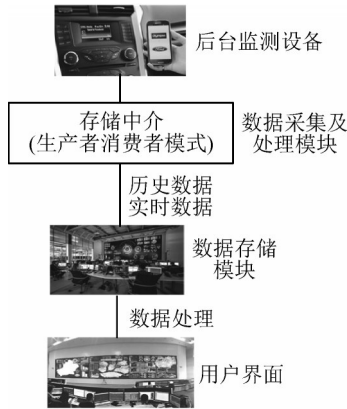


图9 软件设计总体结构图

Fig. 9 Overall structure of software design

数据采集及处理模块用生产者/消费者的模式结构,为GIL温度实时监测系统提供数据采集与分析处理,能提高监测系统的性能以及硬盘资源的利用率,有利于GIL海量温度数据的实时处理,由生产者进行温度数据的采集,消费者进行分析,多线程并行运作,温度数据采集与处理同时进行,经GIL状态辨识方法,实现数据采集与分析的实时性并给出线路状态。

数据分析与处理模块能对接收到的温度数据实时分析处理,与温度数据库中的仿真计算的正常运行状态范围进行对比,为现场检修与故障排查提供参考,数据分析处理流程图见图10。

数据存储模块是数据存储与调用,系统运行状态辨识的基础是实时数据与历史数据,所以系统需要存储各测量点的实时数据和历史数据,存储量相对较大。

显示系统的主窗口是界面显示模块,可以显示GIL状态辨识的结果,从通讯模块得到实时温度数据,经校验、数据预处理、越线检查后,显示状态辨识结果,有利于现场专家对线路状态实时了解。

4.2 状态辨识算法

文中使用固定门限辨识算法^[24]对红外温度传感器采集的数据进行辨识,当上位机接收的实时温度

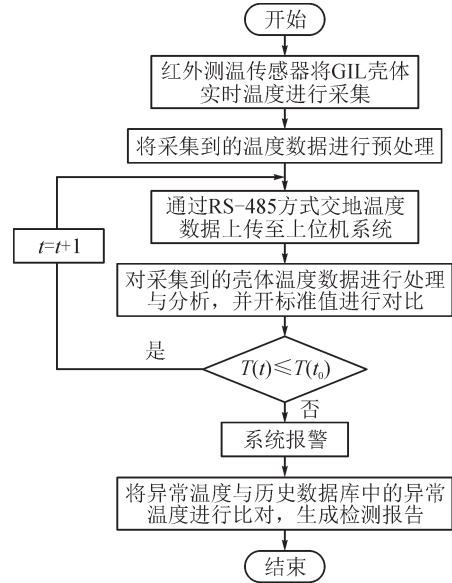


图10 数据分析处理的流程图

Fig. 10 Flow chart of data analysis and processing

数据超出预先设定的固定门限温度值时,上位机会发送指令报警。固定门限辨识算法流程图见图11。

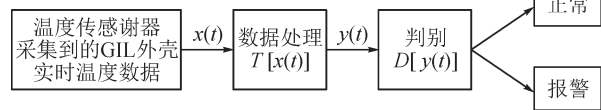


图11 固定门限辨识算法流程图

Fig. 11 Flow chart of fixed threshold identification algorithm

由图11可知,将传给上位机系统的温度数据作为输入信号 $x(t)$,经信号处理模块对上传的原始温度数据进行处理并输出信号 $y(t) = T[x(t)]$,然后将输出信号与设定好的门限温度值比较,判断温度数据是否正常。判别公式为

$$\begin{cases} y(t) = T[x(t)] \\ D[y(t)] = \begin{cases} 1 & y(t) \geq S \\ 0 & y(t) \leq S \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $D[y(t)]$ 的取值为1或0,分别为GIL的工作状态为报警或正常; S 为事先设定好的门限值。

在实际GIL工程中,有许多干扰信号,为提高辨识算法的稳定可靠性,设计时要考虑GIL所处环境的干扰信号也要考虑线路电流因负荷增加而在正常范围波动引起的外壳温升。所以上位机系统的数据信号要进行平均延时处理,同时考虑线路电流的正常波动,需合理设定温升门限值。对温度数据信号 $x(t)$ 在特定时间间隔内做积分运算,取平均值为

$$\begin{cases} \bar{X}(t) = \frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t x(t) dt \\ y(t) = T[\bar{X}(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $\Delta t = t - t_0$ 是监测系统设置的平均时间间隔。当上位机接收到温度数据在某一段时间内的平均值 $\bar{X}(t)$ 高于设定的固定门限值 S 后, 就会发送报警指令。文中 Δt 的选取要满足检测系统稳定性的要求, 即能对外界环境的干扰信号有效抑制, 又要保证监测的实时性, 所以将 Δt 设定为3个监测周期。

4.3 状态辨识

通过仿真模型得到GIL运行时壳体正上方的正常温度, 将此温度作为标准值存储在实时监测系统的数据存储模块中。考虑到线路电流会随负荷的变化而发生波动, 壳体温升会存在一个临界温升, 通过仿真确定线路电流在正常范围内变化时, 取GIL温升稳定时的温度为基准值, GIL壳体的临界温升是1.5℃, 所以系统设定的温升门限值为1.5℃。系统通过分布在壳体上的红外温度传感器得到GIL工作时的实时温升, 将采集到的温升与临界温升进行比对, 判断温度是否超过正常范围。

异常状态时温升监测情况, 见图12。线路电流日常运行维持在1 000 A左右, 当温度监测系统监测到GIL壳体温度上升, 但又未超过系统设定的门限值时, 系统不报警, 表明GIL的温度变化是由于用电负荷的增加引起的线路电流正常波动, 监测下一时间间隔内的温升状态。

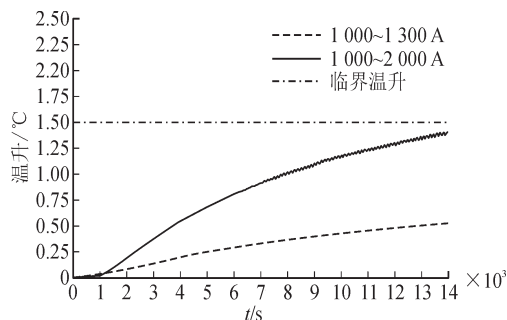


图12 线路电流正常变化时温升监测情况

Fig. 12 Temperature rise monitoring when line current changes normally

异常状态时温升监测情况, 见图13。当监测系统监测到GIL壳体温升逐渐升高并且超过系统所设定的门限值时, 会触发警报并在后台界面显示线路异常状态, 但温升数值与门限值相差不大, 表明GIL线路虽发生异常, 电流有一定程度的升高, 但远没有达到短路故障的严重情况。同时将温升数据与数据库中的历史数据对比后, 显示状态辨识结果, 认为线路为异常状态但未到短路故障状态。运维人员应加强监视, 避免发生严重的故障。

短路故障时温升监测情况, 见图14。当温度监

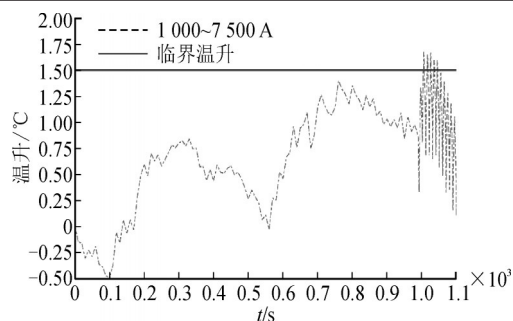


图13 异常状态时温升监测情况

Fig. 13 Temperature rise monitoring under abnormal condition

测系统监测到壳体温升大幅度上升并且温升数值远超系统所设定的门限值时, 系统报警, 并将此时的异常温度数据与数据库中的数据进行比对, 对发生的故障进行辨识, 显示线路发生短路故障, 为后续的维修与故障确定提供参考。

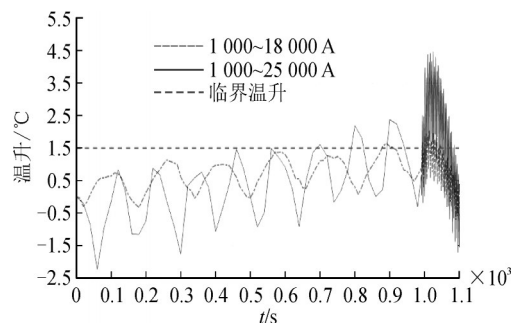


图14 短路故障时温升监测情况

Fig. 14 Temperature rise monitoring in case of short circuit fault

5 结语

通过文中设计的实时监测系统, 可以实时反映GIL线路的温度状态, 首先, 建立的仿真模型可以针对不同电流值给出相应壳体及导体的正常温度值, 作为状态辨识的判断依据, 通过仿真可知, 在稳定运行时不同电流值的线路其温度虽然有差异, 但电流波动不大时线路温度在正常范围内波动, 线路故障时其温度大幅增加, 因此温度可作为状态辨识的判断依据; 同时, 为了提高状态辨识的准确性, 模型还考虑了环境温度对壳体及导体温升的影响, 并且通过利用固定门限辨识算法, 根据实际工程参数通过仿真可确定临界温升的数值, 监测系统和模型可以对GIL的运行状态进行准确的辨识, 并在发生故障时及时报警。

通过所建立的模型以及温度监测系统, 可以对GIL线路的温度实时监测并进行及时有效的状态辨识, 对GIL安全可靠运行具有重要意义。

参考文献:

- [1] 李继胜, 赵学风, 杨景刚, 等. GIS典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2440-2445.
LI Jisheng, ZHAO Xuefeng, YANG Jinggang, et al. Measurement and analysis of partial discharge on typical defects in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2440-2445.
- [2] 姚勇, 岳彦峰, 黄兴泉. GIS超高频/超声波局放检测方法的现场应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 422-424.
YAO Yong, YUE Yanfeng, HUANG Xingquan. Field application of UHF/ultrasonic partial discharge detection scheme for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 422-424.
- [3] UMAMAHESWARI R, SARATHI R. Identification of partial discharges in gas-insulated switchgear by ultra-high-frequency technique and classification by adopting multi-class support vector machines[J]. Electric Power Components and Systems, 2011, 39(14): 1577-1595.
- [4] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [5] 李德军, 沈威, 郭志强. GIS局部放电常规检测和超声波检测方案的应用比较[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 99-103.
LI Dejun, SHEN Wei, GUO Zhiqiang. Application comparison of conventional detection and ultrasonic detection schemes for partial discharge in GIS[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2009, 45(3): 99-103.
- [6] 陈仁刚, 冯新岩, 辜超, 等. 红外测温技术在GIS故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 190-194.
CHEN Rengang, FENG Xinyan, GU Chao, et al. Application of infrared thermometry technology for the fault diagnosis in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 190-194.
- [7] 孙国霞, 关向雨, 舒乃秋, 等. 基于光纤光栅的GIS导体温度巡检方法与装置[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 316-321.
SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, SHU Naiqiu, et al. GIS conductor temperature inspection method and device based on fiber bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 316-321.
- [8] RUNDE M, LILLEVIK O, LARSEN V, et al. Condition assessment of contacts in gas-insulated substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 609-617.
- [9] MUKAIYAMA Y. Investigation on abnormal phenomena of contacts using disconnecting switch and detachable bus in 300 kV GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 189-195.
- [10] 李 睿, 汪本进, 王晓琪. GIS母线温度在线监测技术研究进展[J]. 高压电器, 2012, 48(11): 130-133.
LI Xuan, WANG Benjin, WANG Xiaoqi. Research progress on temperature monitoring of GIS bus[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 130-133.
- [11] 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. Research progress of contact temperature monitoring technology for high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 146-153.
- [12] 丛浩熹, 行晋源, 李庆民, 等. 有屏蔽罩结构的GIS触头温度红外在线监测技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 148-153.
CONG Haoxi, XING Jinyuan, LI Qingmin, et al. Infrared online temperature monitoring technology for shielded GIS contacts[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 148-153.
- [13] KIM J K, HAHN S C, PARK K Y, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetothermal finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1636-1639.
- [14] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 141-147.
WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Thermal field calculation and analysis of gas insulated busbars based on fluid multiple species transport[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(33): 141-147.
- [15] 胡红光. 电力设备红外诊断技术与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
HU Hongguang. Infrared diagnosis technology and application of power equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [16] 张良胜, 张 杰. 红外在线监测系统在封闭开关柜中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(s1): 150-153.
ZHANG Liangsheng, ZHANG Jie. Application of infrared real-time monitoring system in closed switchgear[J]. Power System Technology, 2008, 32(s1): 150-153.
- [17] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 基于光纤光栅的气体绝缘开关母线温度在线监测系统[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 155-160.
WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Online temperature monitoring system based on FBG for GIS bus[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 155-160.
- [18] 胡红光. 电力设备红外诊断技术与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 13-20.
HU Hongguang. Infrared diagnosis technology and applica-

- tion of power equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 13-20.
- [19] 丛浩熹,李庆民,齐波,等. 基于红外传感的GIS隔离开关触头温度实时监测技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3):144-148.
- CONG Haoxi, LI Qingmin, QI Bo, et al. Research on real-time monitoring technology of contact temperature of GIS disconnecter based on infrared sensor[J]. Electric power automation equipment, 2014, 34(3): 144-148.
- [20] 阮全荣,谢小平. 气体绝缘金属封闭输电线路工程设计研究与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011.
- RUAN Quanrong, XIE Xiaoping. Research and practice of gas insulated metal enclosed transmission line engineering design[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2011.
- [21] 韩玉兰,芦兴,路灿,等. 高压开关柜隔离触头温度红外检测系统的研制[J]. 高压电器, 2008, 44(6):578-581.
- HAN Yulan, LU Xing, LU Can, et al. Temperature monitoring system for contacts of high voltage switchgear [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 578-581.
- [22] 冯子陵,俞建新. RS485总线通信协议的设计与实现[J]. 计算机工程, 2012, 38(20):215-218.
- FENG Ziling, YU Jianxin. Design and implementation of RS485 bus communication protocol[J]. Computer Engineering, 2012, 38(20): 215-218.
- [23] 毛德平,凌有铸. 一种基于RS 485总线的温度、湿度测控系统[J]. 现代电子技术, 2007, 30(2):168-170.
- MAO Deping, LING Youzhu. Temperature and humidity control system based on RS 485[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30(2): 168-170.
- [24] 李华忠. 电缆接头温度监测技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2014.
- LI Huazhong. Research on temperature monitoring technology of cable joint[D]. Harbin: Harbin University of technology, 2014.
- 李洪涛(1987—),男,高工,博士,研究方向为电力设备状态检测与故障诊断。
- 丁然(1980—),男,高工,博士,研究方向为开关设备管与检测诊断。
- 赵科(1985—),男,高工,硕士,研究方向为电网设备状态评价与检测。
- 梁睿(1981—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统自动化。
- 乔宇娇(1995—),女,硕士研究生,研究方向为高压绝缘技术。
- 高鹏(1995—),男,硕士研究生,研究方向为高压绝缘技术。

《高压电器》2020年6期广告单位

彩色广告

封一:浙江雅博自动化设备有限公司

封二:莱茵技术(上海)有限公司

封三:西安高压电器研究院有限责任公司(认证中心)

封四:深圳市沃尔核材股份有限公司

前插1:上海乐研电气有限公司

前插2:中骏智能电气科技股份有限公司

前插3:陕西龙翔电器有限公司

前插4:西安华伟电力电子技术有限责任公司

前插5:陕西维柯瑞电气有限责任公司

前插6:陕西斯瑞新材料股份有限公司

前插7:攀时(上海)高性能材料有限公司

前插8:西安高压电器研究院有限责任公司(业务)