

[环网柜]

环网柜内置式电缆连接套管在线测温系统研究与应用

文/杭州电力设备制造有限公司临安恒信成套电气制造分公司 王万亭 徐 石 张教练 毛海鸣 李红英 蓝勇琴 张琪英

受现场施工条件和安装人员施工工艺的影响，环网柜经常发生因电缆连接不良引发接头持续超高温而导致其烧毁事故，从而发生非预期停电事件。介绍了一种预埋在环网柜电缆进出线套管内的在线监测接头温升的系统。该系统避免了现场安装的不可控因素，同时解决了对环网柜电缆接头温度的在线实时监测问题。该系统采用超低功耗硬件和智能化软件控制，解决了测温传感器的供电问题，满足智能化电网的建设要求。

随着经济全球化的进程，电网系统的发展非常迅速。环网柜由于结构简单可靠，在配电网中的配电站和室外站中得到了广泛的应用。但环网柜在运行过程中，电缆附件连接器故障率较高。发生频率最高的故障事件是由于电缆连接点的接触不良造成的温度升高，导致各种配电设备和电缆的使用寿命极大缩短，更为严重的是可能导致电缆接头爆炸、绝缘击穿以及燃烧等灾害，最终造成大规模停电或者火灾事故。为了监测电缆接头的温升，及时发现电缆温升故障，实现预警和早期维护，本文提出了一种应用于环网柜电缆接口套管及其无源无线温度监测装置，实时监测电缆接头的温度和环境温度，得到电缆接头温度与环境温度的变化趋势，并根据电缆接头之间温升的变化实现对电缆接头温升失效的准确判断。

在线测温系统研发路线

1. 内置式温度传感器的设计实现

内置数字式温度传感器（主要由测温芯片、RF发射模块和控制部分等组成）以嵌入式创新方式配置于环网柜电缆套管座端口，利用先进的ZigBee射频技术完成温度测量，并将测量数据发送给接收装

置，达到安装方便可靠、温测点准确有效以及免维护等效果。

2. 无源供电的设计实现

在环网柜电缆套管内随内置式温度传感器贴近套管铜导体以环流方式获取温度测量单元的启动用电，向温度传感器提供所需电能。电源模块尽可能低功耗，电源与温度传感器电能需求相匹配。

3. 接收装置的设计实现

接收装备主要由RF接收模块、液晶显示和控制部分组成，应具有测量数据的接收并显示及数据上传功能。

4. 通信网络的设计实现

通过Internet、GPRS网、电力专用网或光纤通道组成覆盖系统（局域）内所有环网柜进线电缆头连接点的温度无线或有线监测网络，将所获取的温度数据发送到后台监控软件系统进行分析应用和处理。

GPRS在现有的GSM网络基础上增加一些硬件设备和软件升级，形成一个新的网络逻辑实体。它以分组交换技术为基础，采用IP数据网络协议，提高了现有的GSM网的数据业务传输速率，最高可达170 KB/s。GPRS把分组交换技术引入现有GSM系

统,使得移动通信和数据网络合二为一,具有极速传送、永远在线以及价格实惠等特点。CDMA网络采用扩展频谱技术,使用多种分集接收方式,具有容量大、通信质量好、保密性高和抗干扰能力强等特点。

5. 后台监控软件系统的设计实现

后台监控系统是整个系统运作的核心,负责前端感知信息的监测和分析应用。通常情况下,供电部门具有系统性的监控后台,环网柜内置式电缆连接套管在线测温系统所获取的温度信息,只要在其接收装置上对应设置与供电部门监控后台相同的通信规约(RS 485或IEC 61850),就可有效传输信息。

如果是非供电部门的独立监控系统,后台监控软件的实现形式,一般除了界面模块外,其余各个功能模块均可设计成动态连接库文件(.dll)。人机接口界面模块可以为该无线远程监控系统的实际应用进行定制,满足界面美观、操作方便等特殊要求。采用C/C++语言在VC开发环境下设计这样的系统软件涉及的技术包括内存管理、网络通信、多线程管理、数据库编程以及ActiveX等。后台监控系统可用普通微型计算机、工作站或工控机实现,软件开发基于现有的Windows或UNIX操作系统。前端温度传感装置可根据不同的应用目的和应用环境,采用特定的技术形式,例如单片机、DSP或者Intel X86系列的微处理器等。无线远程监控系统的组网方式很灵活,可利用现有的无线通信网,如GSM/GPRS网络、CDMA移动网络等,也可利用电力专用网或光纤通道。

在线温度监测系统的总体设计方案

在环网柜出(进)线电缆A、B和C三相电缆套管座端口(该部位温度上升速度最快)嵌入内置式温度传感器(该传感器要求具备无源启动、电耦合测温以及无线传输等功能)作为温度采集模块。环网柜正面面板上安装具有ZigBee(专用于传感控制的射频技术)无线传输功能的2.4 GHz高性能射频收发器作为收发模块(通信协议为RS 485或IEC 61850,网络通信为4 G或者5 G上网模块)。接口、信号线与DTU前端设置的交换机相连,随后通过通信传输模块与主站前置机连接,由主站前

置机呈现各个电缆头的温度信息,数据传输亦可配合云平台App使用,然后通过前置机的设置对环网柜进、出线电缆接头的异常故障温度进行预警和记录。

电缆接头温度在线监测系统包括9~18个测温传感器和1个接收装置。温度测量传感器与接收装置之间采用点-多点无线射频技术进行数据传输。环网柜通常有9~18个电缆接头。监测位点按6面环网柜、18个监测点进行计算。在进行无线数据传输时,容易引起网络各模块之间的信号冲突,所以在设计中采用轮询的方法,所有温度传感器都不会主动发送信息,始终处于接收状态。只有当接收设备向某个温度传感器发送查询命令时,温度传感器才会回复一条消息,然后立即将其设置为接收状态。避免了多个模块随机产生的频繁碰撞问题,每次通信都安全可靠。

考虑到环网柜中复杂的电磁环境,为了更有效地传输数据,需要选择相应的调制方法。由于幅移键控(ASK)调制带宽太低,移频键控(FSK)调制频谱过宽,相移键控(PSK)调制难度大,而高斯频移键控(GFSK)调制难以实现,所以考虑在FSK调制的基础上增加一个高斯低通滤波器来缩小频谱,具有幅度包络恒定、功率谱集中以及频谱窄等优点,可以有效提高抗干扰能力。因此,FSK和高斯低通滤波器的组合是最合适的调制方式。基于上述原因,在线监测装置采用工业级NRF 24L01无线通信模块。工作温度为 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$,内部加载FSK调制模块,满足在线监控装置的通信需求。

系统设计关键性技术

1. 微功率无线组网技术

微功率无线组网技术是环网柜电缆接点在线测温的核心技术之一,温度传感器配置在10 kV环网柜电缆套管端口内,需要与二次测量回路的电气隔离。温度传感器与二次测量回路之间的通信采用无线传输方式。接收装置电能采用就地220 V交流电转换为直流电取电,而无线通信时功耗较大,需进行低功耗处理。因此低功耗设计是无线组网的难点之一。

2. 无线通信防强电磁场干扰技术

温度传感器通常安装在环网柜内部连接电缆插座端口内,对无线网络的路由和通信管理要求高。因环

网柜内存在强电磁场,环境恶劣复杂,要求无线通信能够有效防止干扰和信号阻隔,实现可靠通信。

3. 温度传感器嵌入式装置技术

普通温度传感器通常为附着式安装,由于安装工艺及质量原因,极容易脱落,造成温度监测信号中断,因此,改为在连接电缆插座端口内安装,需要解决嵌入位置、运行电源配置、安装位置及信号对接等一系列问题。

无线数字测温传感器各模块设计

无线数字测温传感器主要包括CT功率采集模块、温度传感器模块、无线射频通信模块和微处理器模块四个部分。CT功率采集模块主要利用流经电缆接头的电流作为供电能量,结合小窄截面CT饱和技术,获取温度传感器的电能供连续运行。测温模块主要用于测量电缆接头连接处的温度。无线射频通信模块用于将测温传感器测得的电缆接头温度数据发送到接收设备。

1. CT功率采集模块

为了使测温传感器获得持续工作的电能,通常采用电池供电。电池供电的主要问题是温度传感器不能连续工作,只能间歇发送数据。温度传感器安装在电缆的热部,如果电缆头产生热量,电池寿命会大大降低,并且有爆炸的危险。为了解决测温传感器的供电问题,在环网柜电缆套管内,随内置式温度传感器贴近套管铜导体,以环流方式获取温度测量单元的启动用电,向温度传感器提供所需电能。电源模块应尽可能低功耗,电源应与温度传感器电能需求相匹配。提出采用窄段CT,并利用窄段CT的饱和技术在工作电流较大时限制二次电流输出。设计采用宽12 mm、厚0.23 mm的硅钢片缠绕5圈。缠绕时,硅钢片穿过线圈骨架,在线圈骨架上连续缠绕600匝漆包线形成次端。在使用中,窄截面CT被护套在电缆连接器外面。当电流在电缆接头内部流动时,在第二端有一个感应交流电流。然后,通过整流、滤波和稳压获得温度测量传感器连续运行所需的能量。

2. 温度传感器模块

测温传感器通常安装在电缆接头的外表面。由于环形网络柜内电磁环境恶劣,数字温度传感器无法保证温度测量的准确性。为了提高测温准确度和

对干扰的依赖能力,提出采用NTC热敏电阻,配合555多谐振荡电路,将温度变化转化为频率变化,然后利用光耦进行隔离,大大提高测温电路的抗干扰能力。使用NTC10k常数为3 950的热敏电阻作为温度测量元件。当热敏电阻的温度变化时,其电阻发生变化,NE 555N输出处的频率 f 也发生变化,变化规律为 $f=1.443/(R_1+2R_2)C_1$ 。当NE 555N的输出端处于高电平时,晶体管被打开以开启光耦合器。相反,当输出端处于低电平时,光耦合器关闭。微处理器通过中断技术得到光耦开关的个数、振荡频率以及测温值。根据已知的NTC 10 k热敏电阻温度与电阻比较表和振荡电路频率计算公式,计算出不同电阻值下对应的频率,得到不同温度下对应的频率。

需要指出的是,振荡频率和温度具有很大的非线性特性。虽然曲线拟合和神经网络的方法可以有效提高温度计算结果的准确度,但微处理器对浮点数的计算准确度有限,处理高阶拟合方程和神经网络计算更加困难。因此,根据曲线的导数将频率-温度曲线划分为几个频率区间,在每个区间内建立频率-温度线性方程,并建立频率-温度分割函数,微处理器得到的频率是根据频率所在的频率区间内的频率-温度方程计算出来的。

3. 温度传感器控制流程

测温传感器控制流程为:系统初始化时,在没有收到温度读取指令情况下,将系统设置为低功耗模式。从接收设备接收到温度测量命令后,则设置为发送模式并返回应答命令。然后,微处理器定期收集1 s内外部中断发生的次数,得到频率值,根据频率-温度分割功能确定当前频率段,并计算温度值,温度传感器返回到接收模式;从接收设备接收到read命令后,温度值通过NRF 24L01发送给接收设备,温度传感器返回到接收模式。

接收装置设计

接收装置主要包括无线射频通信模块、显示模块、电源模块、环境温度传感器模块、485通信模块和微处理器模块;电源模块降压稳定后,采用220 V交流电为接收装置供电;显示模块用于显示测量的电缆接头温度;RS 485通信模块用于将温度报警信息发送到后台;环境温度测量模块与测温传感器模块具有相同的设计并用于测量环境温度;

ZigBee无线射频通信模块用于接收测温传感器发送的测温信息。

1. 误差信息处理设计

为了克服环境温度对环网柜电缆接头温升测量的影响，在设计时考虑了电缆接头测量温度与环境温度的差异，并结合温升故障考虑三相电缆接头的温度变化。如果环境温度为 W_e ，电缆接头温度为 W_c ，则温差为 $W=W_c-W_e$ 。通过设置设定值的最大温差 W_s ，将任意一个单相电缆接头每次测量后的温差 W 与设定值 W_s 进行比较，当温差大于设定值时，发送温度报警信息。

2. 接收装置控制流程设计

接收设备编程控制流程为：设备初始化设定值，1 s后由微处理器测量当前环境温度，然后将测温指令发送给测温传感器。如果接收装置没有收到测温传感器返回的回复指令，则通信故障；如果收到应答命令，表示与温度传感器通信成功。温度传感器的地址增加1后，每隔10 ms向15个温度传感器发送温度命令，将地址清除为0；然后向温度测量传感器发送读取指令，将接收到的温度值与当前环境温度进行比较，通过与设定值进行比较，判断是否需要温度报警。在此之后，温度传感器地址计数增加1，温度读取命令以10 ms的间隔发送到下一个温度传感器，并重复这个循环。接收到15个测温传感器的温度值后，各线缆接头的温度值显示在液晶屏上。显示温度值后，程序返回起点，对电缆接头温升进行实时监控。

在线监测设备可靠性测试

为了实际测试在线监测设备的性能，采用标准电阻箱模拟热敏电阻。热敏电阻与温度值相对应，部分测试结果见表1。

表1 实验结果对照

测试序号	电阻值/kΩ	测试温度/℃	实际温度/℃	相对误差(%)
1	130.492 7	-25.0	-25.0	0
2	97.026 4	-20.0	-20.0	0
3	72.869 7	-15.0	-15.0	0
4	55.249 1	-10.0	-9.9	1
5	542.268 0	-5.0	-4.9	2
6	30.996 6	1.0	1.0	0
7	25.370 4	5.0	5.0	0
8	19.888 4	10.0	10.0	0

(续)

测试序号	电阻值/kΩ	测试温度/℃	实际温度/℃	相对误差(%)
9	15.706 1	15.0	15.1	0.6
10	12.490 5	20.0	20.1	0.5

经过实际对比实验，在线监测装置对温度的相对误差控制在3%以内。测量准确度高，测温范围宽，满足实际测温需求。热敏电阻的材料常数 B 值是热敏度的一个重要技术指标。现在选取两组温度，电阻数据 (T_1, R_1) 和 (T_2, R_2) 来求 B 值。公式为

$$B = \frac{\ln(R_1/R_2)}{1/T_1 - 1/T_2}$$

所测电阻随着 B 值的增加而增加。因此，当被测物体的温度较高时，电阻计算结果略大，导致温度计算结果较小；反之，当被测物体温度较低时，电阻计算结果略小，导致温度计算结果较大。此外，在进行分段计算时，计算公式的斜率和常数项准确度不够，使温度计算产生偏差。但是，由于低温测量的准确性并不是电缆接头温度测量的主要评价指标，电缆接头温度需要在高温下进行更准确的测量，所以设计满足实际测量要求。

结束语

本文提出利用ZigBee无线射频技术和CT电源技术实现对环网柜电缆接头温度的精确测量。采用无线射频技术解决了高低压物理隔离和现场布线的问题，采用CT供电技术解决了在线监测电缆接头时测温传感器连续供电的问题，同时窄截面CT的使用限制了初级端的大电流，解决了能量释放问题。为了克服环境温度在不同季节对电缆接头温度测量的影响，将电缆接头温度测量值与环境温度的差值作为是否发生温度失效的判据。为克服强磁场和强电场对温度的影响，创新性地提出了一种由NTC 10 K热敏电阻和555定时器组成的多谐振荡电路，将温度信息转换为振荡频率。根据温度与频率的对应关系，得到了电缆接头的准确温度信息。经实际测试，该环网柜电缆接口套管及其无源无线温度监测装置有抗干扰能力强、测温准确及实现方法简单的优点，便于推广应用，对于确保环网柜安全运行、提高电网供电质量具有重要意义。EA

(收稿日期：2021-12-22)