

基于无源技术的变电站核心设备温度监测系统

针对现有变电站核心部位温度监测系统存在监测传感器技术落后、监测数据未能实现综合利用等不足,提出无源检测技术的变电站核心部位温度在线监测系统,该系统采用基于SAW的无源无线传感技术检测开关柜触头、户外刀开关、变压器和GIS等核心设备的温度信息,并研发出综合智能管理平台,满足前端各种不同类型的传感器与后台统一数据平台的标准化接口,进而实现核心部位温度数据的统一管理和综合利用。

高久国 吴国强 何峰 赵磊/浙江省安吉县供电公司
姜敏/山西电力公司电力科学研究院

随着电网规模、容量的增大,对供电可靠性的要求越来越高。为保障电网的安全运行,稳定、可靠的变电设备状态监测系统必不可少。变电设备在大电流、高电压的状态下运行时,其工作稳定性与自身的发热程度密切相关,在以往的电力事故中,大部分事故的发生与核心部位过热问题有关。因此,对变电站核心部位进行温度检测并实现过热报警是预防电力事故的有效手段。

基于声表面波的无源无线温度传感器与普通类型温度传感器相比,具有无须电源供电、数据无线传输、维护简单以及适用恶劣环境等优点,迎合了电力设备检测仪器小型化、高性能和多功能的发展趋势,具有较大的应用前景。

本文根据各类声表面波传感器特点,确定选用单端口声表面波谐振器作为系统的传感器单元。通过对传感器的声表面波谐振器信号进行特征分析,建立无源无线声表面波传感器温度测量系统。设计法向模螺旋天线代替以前采用

的短偶极子天线以提高效率,并对系统的整体功能进行测试。

系统建设方案

变电站核心部位温度在线监测系统结构如图1所示。

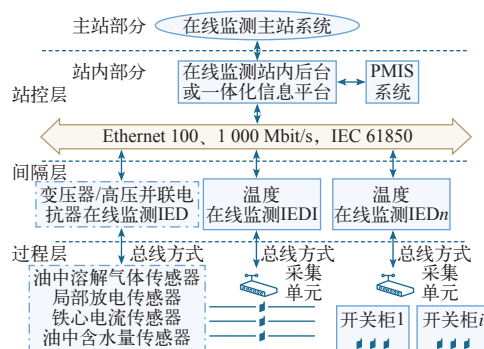


图1 温度在线监测系统结构

变电站核心部位温度在线监测系统包括无源无线温度传感器、温度采集器、测温主控终端和综合数据智能管理平台。无源无线温度传感器作为测温元件直接安装在被检测核心设备的表面,其负责接收温度采集器发出的探寻射频信号和检测设备温度,并将检测数据转化为射频信号发送给温度采集器;温度采集器负责与对应的温度传感器通信,用于发射测温探测射频信号、接收温度传感器返回的射频信号,并将返回的射频信号解析成温度信息发送至温度监测主站;温度监测系统主要完成无源无线传感器和温度采集器的档案管理、参数设定、温度数据存储以及提供与自动化系统的数据接口;综合数据智能管理平台应用实时历史数据库技术,实现在线



高久国/高级工程师

关键词/Keywords

变电站·
温度监测·
无源无线·
声表面波·

监测数据的统一管理和综合利用。实时历史数据库技术将实现各类在线监测数据的统一管理,同时实现设备的状态诊断、电网设备运行状态分析等高级应用,从而使状态监测数据具有更大的价值。

基于声表面波的无源无线温度传感器设计

本温度检测系统使用的传感器采用声表面波传感技术设计。声表面波传感技术的工作原理是将射频信号发射到待检测设备的表面,反射波受检测设备温度的影响导致声波的频率和振幅发生变化,将发生变化的反射波转化为电信号进而获取温度信息^[2]。基于声表面波技术的传感器适用于非常规的运行环境下(高电压、高电流),用以实现无源无线温度数据的采集。采用声表面波技术的无源无线温度传感器主要由压电基片、叉指换能器、反射栅和传感器天线组成^[3]。

1. 叉指换能器 (IDT)

应用声表面波技术的无源无线温度传感器的核心部件是IDT, IDT是一种在压电晶体上激发和检测声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)的声-电转换器,金属铝经半导体平面工艺使其沉积在压电基片上,并根据需求使用光刻技术将金属薄膜刻成特定的尺寸及形状的结构,如图2所示。

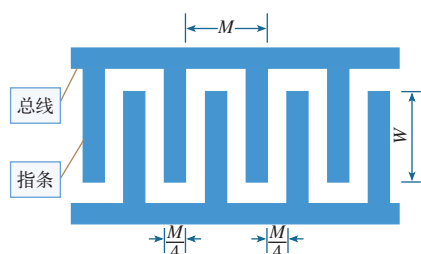


图2 典型的IDT结构示意图

决定IDT性能的主要参数有指条长度 M 、指条对数 N 以及声孔径 W 。对于一般的IDT,其指条间距、指条宽度均为 $M/4$ 。由于IDT的逆压电效应,当在其两根总线上加上射频电压时, IDT将电能转化为声波能,从而引起指条振荡。每对指条励磁的SAW都比较弱,但当IDT的周期长度是SAW波长整数倍时,它们相互叠加增强并产生谐振,此

时IDT对应的角频率 ω_0 称为声同步频率,即

$$\omega_0 = \frac{2\pi V_{SAW}}{k\lambda} \quad k=1,2,3 \quad (1)$$

式中, V_{SAW} 为声表面波在基片上的传播速度; k 为IDT的工作模式,通常SAW器件工作在基模,即取 $k=1$ 。

从式(1)可以看出, IDT具有选频特性,其中频率与指条的周期密切相关,在相同的声速下, IDT的指条间距越小,其工作的频率越高;而IDT激发的SAW强度与传感器指条对数的二次方成正比,即指条对数越多,励磁的SAW越强。本文所设计的传感器中,为了得到较强的SAW,指条对数应大于200。

IDT的集合形状直接影响着其脉冲响应,脉冲响应周期和指条空间周期相同,且相对应。脉冲响应的包络与指条重叠包络完全一样,重叠多的地方,励磁振幅大;重叠少的地方,励磁振幅小。均匀IDT的脉冲响应表达式为

$$h(t) = 4K_s C_s^2 f_0^2 \sin \omega_0 t \quad 0 \leq t \leq N\tau_0 \quad (2)$$

式中, $f_0 = \omega_0/2\pi$; $\tau_0 = \frac{1}{2f_0}$; K_s 为SAW的有效机电耦合系数,其大小取决于基片材料; C_s 为每对指条的静态电容,与声孔径和指条间距等有关。

IDT具有压电效应与逆压电效应,其在小信号下满足互易定理,故式(2)描述的既是声电关系,也是电声关系。

2. 反射栅

SAW反射栅是实现SAW谐振器的关键器件,它有反射沟槽和反射金属条带两种,其中金属条反射栅阵最易实现。金属条反射栅阵列示意图如图3所示。

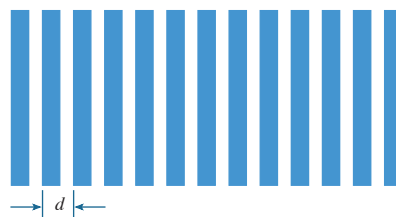


图3 反射栅阵列示意图

当SAW传播至栅阵时,每遇到一根反射条都有一部分被反射,这些反射波会相互叠加并抵消。但在一定的条件下,当各个反射条反射的波同相位时,它们会相互叠加增强,形成很强的反射波,称为布拉格反射^[4]。相位匹配条件为

$$2d = n\lambda \quad n=1,2,3 \quad (3)$$

式中, d 为反射栅周期长度。

变换一种形式可表达为

$$\omega = n\pi V_{\text{SAW}} / d \quad n=1,2,3 \quad (4)$$

式中, ω 为布拉格频率。当声波频率 $\omega_0 = \omega$ 时,反射栅阵将产生最强的反射SAW。

3. 谐振型SAW温度传感器

常见的SAW谐振器主要分为单输出口和双输出口两种不同结构^[5],本文采用单输出口,如图4所示。

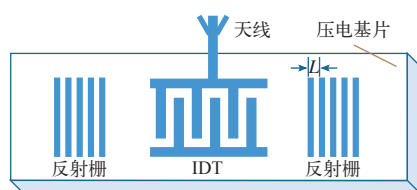


图4 谐振型SAW无源无线传感器示意图

IDT左右的两个反射栅阵对称分布,构成一个声学谐振腔。IDT将励磁信号能量引入,将谐振腔中的能量引出。其工作原理是:在基片表面激发与电磁波同频的SAW,声波在两个反射栅组成的谐振腔内来回多次反射,当励磁信号的频率与声学谐振腔的尺寸匹配时,在腔内形成驻波并发生谐振。谐振频率 f_0 直接反映了被测信息,是SAW传感器的重要特征参数,其表达式为

$$f = \frac{V_{\text{SAW}}}{2L} \quad (5)$$

式中, L 为反射阵周期; V_{SAW} 为基片表面激发的声表面波的波速。

当SAW谐振器压电基片表面的温度发生变化时,SAW的传播速度 V_{SAW} 和发射栅的间距 L 发生改变,从而引起谐振器的谐振频率发生变化。谐振频率的变化即可反映出被测温度的信息,通过测量频率的变化量可实现对温度参数的监测。SAW谐振器的谐振频率随温度的变化关系为

$$f = f_0 \left[1 + a_0(T - T_0) + b_0(T - T_0)^2 + c_0(T - T_0)^3 + \dots \right] \quad (6)$$

式中, T 为被测温度; T_0 为参考温度; f_0 为参考温度处的谐振频率; a_0 、 b_0 和 c_0 分别为参考温度 T_0 时的一阶、二阶和三阶频率温度系数。

本系统使用的传感器采用石英衬底的压电基片镀上压电薄膜,使频率温度系数中的高阶系数 b_0 、 c_0 相比于一阶系数 a_0 可以忽略,即频率温度曲线呈线性关系,测温计算更简便,测温准确度更高,可达 0.1°C ,实测的温度频率如图5所示。

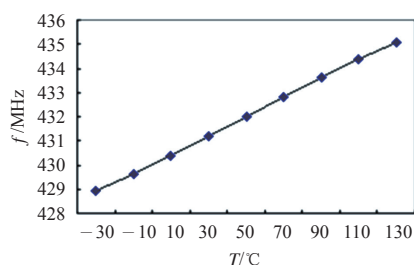


图5 传感头温度随频率变化

4. 天线设计

天线是无线通信系统中不可缺少的部件,也是连接发射装置和接收装置的重要工具,其基本功能为接收和辐射电磁波。天线最重要的参量是定向性 D 和增益值 G 。其定向性可以定义为在远场区的某一球面上最大辐射功率密度与其平均值之比,是大于等于1的无量纲比值^[6],即

$$D = \frac{P(\theta, \phi)_{\max}}{P(\theta, \phi)_{\text{av}}} \quad (7)$$

增益值 G 与定向性 D 的关系为

$$G = kD \quad (8)$$

式中, k ($0 \leq k \leq 1$) 为效率因子,是无量纲的。增益值因为天线或天线罩的欧姆损耗而小于定向性,在发射状况下,天线增益还包括天线馈送功率的损耗,天线馈线的失配也会减小增益。设计良好的天线 k 值可以接近于1。

由式(7)、式(8)可得,具有定向性的天线增益比全向天线要高;且方向性越明显,在其最大辐射方向上的增益越大。

由于本系统的实际需要,与温度采集器连接的天线要向多个SAW探头发送查询脉冲信号,其

安装位置可以在规定范围内随意调整，并且对安装空间没有特别要求，故将其设计为双臂式偶极子天线，以实现其定向高增益性。其实物、HFSS模型如图6所示。

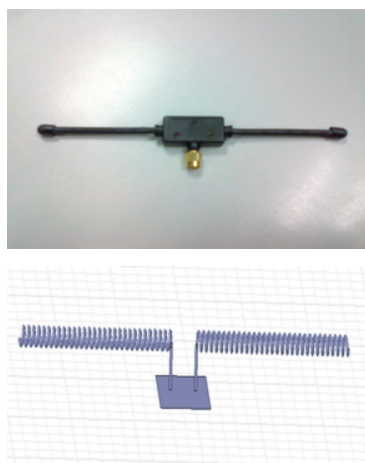


图6 螺旋臂偶极子天线实物、HFSS模型

与SAW温度传感器相连的天线位置安装是由被测点位置所决定的，安装空间可能会比较小，且各个方向上都需要能接收到来自温度采集器的查询信号，因此将偶极子天线的两臂用螺旋状的金属丝代替，并在金属丝上镀银，使螺旋状的缠绕实现了较小的横向长度，而有效长度仍然可达34 cm，其最大辐射方向增益达到2.8 dB。小螺旋天线在法向上为全方向辐射，这样可以达到最佳通信效果，并且降低了工程上调整天线之间方向性对准的难度。

工程应用

将本无源无线温度检测传感器安装在国网浙江安吉县供电公司下属110 kV变电所核心设备处，分析测量系统在传感器所处环境温度时获得的数据，验证测量系统的系统误差和通信情况。试验结果如下表所示。

试验表明，全量程范围内测量误差小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，并且本无线通信系统的稳定传输距离可达3 m；在开关柜内信号更强，保持在稳定的无线传感状态。

结束语

本文使用声表面波技术设计并实现了变电站

表 测温试验结果

环境温度	仪器测	装置测	温度测量	装置与后台通信情况	
设定值/℃	量值/℃	量值/℃	误差/℃		
高	60	60.44	60.6	0.16	无线信号发送、接收正常
温	80	80.37	80.6	0.23	无线信号发送、接收正常
测	100	100.96	100.6	-0.36	无线信号发送、接收正常
量	120	121.04	120.8	-0.24	无线信号发送、接收正常
低	-10	-10.22	-10.3	-0.08	无线信号发送、接收正常
温	-20	-20.2	-20.4	-0.2	无线信号发送、接收正常
测	-30	-30.22	-29.3	0.92	无线信号发送、接收正常
量	-40	-40.22	-39.8	0.42	无线信号发送、接收正常

核心部位的温度检测，该无源无线温度在数据采集和传输过程中无须使用电源、信号线，具有极高的安全性。可以彻底解决变电站内测温设备安装不便、工作环境恶劣、强电磁干扰和信号传输等难题。通过对变电站核心设备的温度监测现场试验，验证了该温度检测系统的实用性，具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (21): 24-27.
- [2] 李庆亮. 声表面波射频辨识标签与系统研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [3] 张朋, 常静, 范福玲. 基于无源无线声表面波RFID技术的变电站巡检系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013 (9): 2557-2559.
- [4] Fan M M, Ding X X, Liao D P, et al. Recent researches on passive radar based on opportunity illuminator [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 19 (8): 103-107.
- [5] Wan L L, Zuo W H. Research on interference mitigation of GPS-based passive radar [J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19 (8): 103-106.
- [6] 阙俊才, 王俊. 基于GSM信号的无源雷达直达波方向估计 [J]. 火控雷达技术, 2010 (4): 27-30.

(收稿日期: 2015-01-12) EA