

具有无线测温功能的带电换表控制器设计

庄宇峰¹ 孙宇¹ 苏新² 行鸿彦³

(1. 国网常州供电公司 常州 213000; 2. 河海大学物联网工程学院 常州 213022;

3. 南京信息工程大学 南京 210044)

摘要:为减少停电换表对用户产生的用电影响,提升供电可靠性和用户用电体验,设计了一种具有无线测温功能的带电换表控制装置。该装置由带电换表装置、感应取电设备以及无线测温模块3个部分组成。可在带电的情况下辅助更换用户的低压三相电表,平衡三相电路相序,并利用温度传感器以及无线收发器实现相应的无线测温功能。经过实验验证,带电换表控制装置的电流电压平均检测误差小于0.1%,所设计的感应取电模块在低压下也可以满足低功耗测温需求,能有效地解决电池有限容量引起的传感器短寿问题,同时设备经过验证满足国家安全标准。

关键词:三相电表;相序检测;无线测温;感应取电

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Design of an uninterrupted meter replacement controller with wireless temperature measurement

Zhuang Yufeng¹ Sun Yu¹ Su Xin² Xing Hongyan³

(1. State Grid Changzhou Electric Power Supply Company, Changzhou 213000, China;

2. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

3. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To reduce the impact of power outage on customers for meter change, then improve the reliability of power supply and the experience of power consumption, we design a control device with wireless temperature measurement. The device is composed of a live meter changing device, an induction device and a wireless temperature measuring module. It can replace the low-voltage three-phase meter, balance the phase sequence of the three-phase circuit, and realize the corresponding wireless temperature measurement by using the temperature sensor and wireless transceiver. The experimental results show that the average detection error of current and voltage of the control device is less than 0.1%, and the designed module can meet the needs of low-power temperature measurement at low voltage, the short life of the sensor caused by the limited battery capacity is effectively solved, and the equipment has been verified to meet the national safety standards.

Keywords: three-phase electricity; phase sequence detection; wireless temperature measurement; induction charging

0 引言

电能表运行中存在使用寿命和一定程度的损耗,逾期或异常电表需及时更换,然而频繁地断电更换电表操作违背了用电的用电稳定性原则^[1]。当下电表大部分为直接接入式,更换不可避免地会出现短时停电,严重降低用电体验感。预约用户,停送电准备与检查工作的时间成本巨大,同时作业质量完全依赖于工作人员业务能力,错接线、

误操作与低效工作引起的触电等风险的问题无法杜绝^[2]。因此,对于直接接入式三相电能表的带电换表控制装置具有显著的经济与社会价值^[3]。

近年来,众多研究者投入到带电换表装置研发。马媛等^[1]通过剥开BV电缆的绝缘层取电,再熔融恢复电缆绝缘层,实现带电换表,但该作业方法难度较大中具有一定危险性,取电负荷也有限制;李明远等^[3]设计了一款通用型单、三相电能表不停电更换装置,但计量模

块仅考虑了换表时间、时长及防窃电功能,未实现电物理量的测量与监控,仍有安全隐患;刘洪儒等^[4]工程师根据二极管正逆向阻值不同的特性设计出单相电表的带电作业装置,但该装置仅适用于单相电表,且没有针对易起火的连接处测温模块;储海峰等^[5]设计了具备蓝牙通信功能的不停电换表装置,能应对错接线和窃电等问题,但成本较高不利于普遍部署;王叶锋等^[6]通过短接取电线夹与原电流回路保证换表时持续供电,同时利用辅助装置采集实时电能信息,但存在穿刺导线取电导致绝缘层损坏、供电不稳、安全载流量小等风险;Liu等^[7]设计了一种小巧的不停电换表装置,但一方面装置对电表型号有要求,第2换表过程中不对电压、电流和温度进行检测,存在安全隐患;朱亮等^[8]设计的换表装置有同样的问题。

综上,在不停电换表技术与装置的研究已较为全面,能克服不停电换表中取电,减少电量损失等技术难点^[1-8],

但上述研究的装置对于换表过程中电流电压信息实时监测,温度测量预警等实际需求的探索仍有不足^[9],导致上述装置难以在实际应用中推广。

基于上述内容,本文研究了带电换三相电表作业原理,将旁路带电法引入带电换表作业,同时利用感应取电供电无线测温模块,实时监测连接处温度,设计了一款具备感应取电无线测温功能的带电换表控制器。

1 具有无线测温功能的带电换表控制器

1.1 带电换表装置

1) 带电换表工作原理

国内外专家对带电换表控制器的研究未能兼顾带电换表作业的安全性与工作效率,如表1所示,对此,本文设计的带电换表控制器考虑到了实时监测电压、电流和温度,节省作业时长等需求,详细研究了三相直接表的带电换表工作原理。

表1 带电换表技术方案对比

方案	作业时间/min	优点	缺点
文献[1]	10	杜绝作业时电缆破损	需要对绝缘层开口熔融修复
文献[3]	3	型号通用	不监测换表时电压、电流和温度
文献[4]	5	能自动电量检测	仅针对单相电表
文献[5]	7	蓝牙通信,防窃电	不监测换表时电压、电流和温度
文献[6]	3	监测换表时电压、电流	不监测温度,不通用
文献[7]	1	装置小巧,操作简便	不监测换表时电压、电流和温度
文献[8]	5	操作简便	不监测换表时电压、电流和温度
本文	2	实时监测电压、电流和温度,长续航	—

三相直接表带电更换相比单相的操作更加复杂,但主要原理一致。三相表直接表用户多为通信基站、商铺、政府相关部门等二类及以上用户,对持续、可靠供电需求相较单相表用户更高。

本文设计的带电换电表装置针对三相电表,主要包括旁路供电箱和线路固定座;旁路供电箱由核心器件检测主控模块和线控继电器等器件组成;线路固定座由支架、专用接线柱组等器件组成。该装置具有相序判别、电压监测、电流监测、温度监测、漏电保护、故障报警等功能^[7]。如图1所示,①为用户表箱线路;②为旁路供电箱核心;③为线控继电器;④为线路连接器;⑤为线路连接器;⑥为电流监测;⑦为相序监测;⑧、⑨、⑩分别表示电源指示灯;⑪为进线开关;⑫为用户开关。

用户表箱①内进线开关⑪为本装置提供工作电源。本装置具有纠错保护功能的带电换表装置包括检测主控②模块和线路继电器③^[6]。用户表箱①进线开关⑪前的A相、B相、C相和N相分别通过进线电缆④接入连接线控继电器③的输入端,用户表箱①出线开关⑫的A相、B相、C相及N相分别通过出线电缆⑤连接线控继电器③的

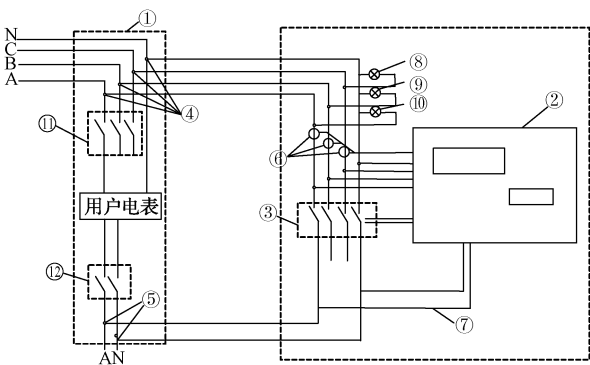


图1 带电换表模块原理

输出端^[6]。连接线控断路器的输入端的A相、B相、C相电路上分别设有一个电流互感器⑥,3个电流互感器均与检测主控模块②相连接。连接线控继电器③的输入端的A相、B相、C相及N相分别接入检测主控模块②的三相进线电压接口和零线接口。线控断路器③接入检测主控模块②的断路器口、C相进线电压接口和零线接口。线控继电器③接入检测主控模块②的继电器控制接口。连接

线控继电器③的输出端的A相、B相、C相分别接入检测主控模块②的A相出线电压接口、B相出线电压接口、C相出线电压接口^[7]。

2) 带电换表装置检测模块

本文所采用的电路检测回路分别设置于A相、N相电缆所连接的开关⑫两处,并经过线路⑦接入相序监测主控模块,与L相、N相电表电压接口及相序检测接口^[8]。输入端的A与N相之间、B与N相之间、C与N相之间分别连接了一个电源相序指示灯,并接入连接线控继电器③。在相序检测过程中,主控模块②会比较表箱进线开关⑪与出线开关⑫的相位,确定对应的相位,向线控继电器③发送对应相位及其关闸信号。若此时该表接入A相,线控继电器③将自动闭合对应开关,构建旁路系统^[8]。

如图2所示,除了交流电线路检测模块,带电换表装置还有扫码器模块,电流感应取电及无线测温模块,USB文件管理模块,电参数采集模块等。

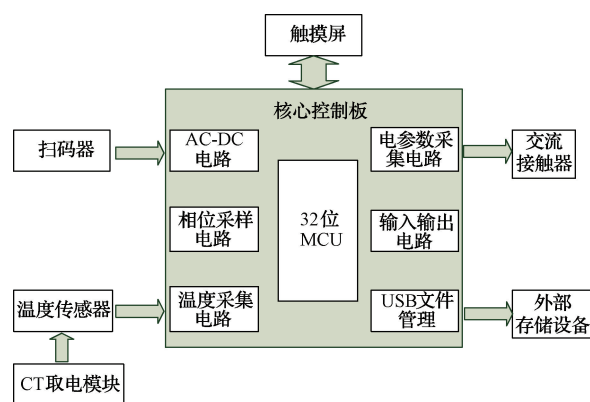


图2 带电换表装置方案设计框图

1.2 基于感应取电的红外测温模块

1) 感应取电模块

电流互感器(current transformer, CT)取电,利用电磁感应原理中负荷电流变化,产生磁场进而感应取电^[10],最终进行电压变换(或者电流变换)。通过CT取电的基本结构如图3所示,

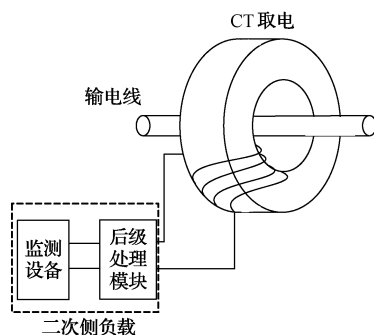


图3 CT取电基本结构

CT取电原理基于电磁感应原理,整流、稳压等后续电

能处理模块和用电设备可视为等效负载,CT取电原理如图4所示。

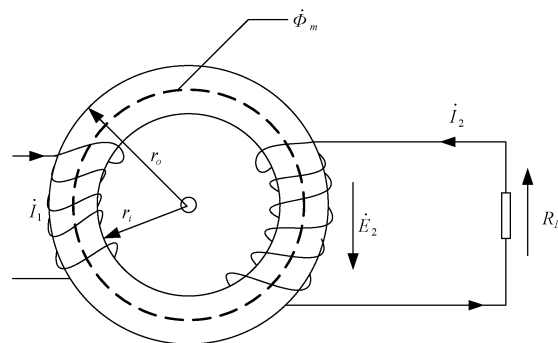


图4 CT取电原理

其中 $\dot{I}_1$ 为输电线中的工频交流电,频率为50 Hz; r_i 和 r_o 分别为绕组磁芯的内外半径; R_L 为电路的等效负载。若输电线电流 $\dot{I}_1$ 变化时,电流互感器的磁芯会产生磁通 Φ_m ,其幅值为 Φ_m 。由电磁原理可知,当穿过绕组线圈的磁通发生变化时,绕组线圈两端会产生电动势,并且与磁通变化率成正比,因此CT二次侧输出端空载时,电动势表达为:

$$\dot{E}_2 = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1)$$

其中,电动势的方向与磁通的变化趋势相反,副边绕组的匝数为 N_2 时,可得到感应电动势 E_2 。所以得出二次侧绕组感应电压幅值 E_2 为:

$$E_2 = 2\pi f N_2 \Phi_m \quad (2)$$

式中: f 为工频电流频率; $\dot{B}_m$ 为磁感应强度,即磁芯中磁场强弱物理量。磁通 Φ_m 表达式为:

$$\Phi_m = \dot{B}_m S \lambda \quad (3)$$

式中: S 为磁力线穿过的面积,可认为是绕线圈磁芯的横截面积; λ 为该磁芯的叠片系数^[11-12]。电流互感器工作时,根据磁动势平衡定理得出 $N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_m$,其中 $N_1 \dot{I}_1$ 为一次侧电流 $\dot{I}_1$ 产生的磁动势为一次磁动势,由二次侧电流 $\dot{I}_2$ 产生的 $N_2 \dot{I}_2$ 为二次磁动势,方向与一次磁动势相反。此外,由于励磁电流 $\dot{I}_m$ 的存在,还会产生励磁磁动势 $N_1 \dot{I}_m$ 。根据电磁感应定律及安培环流定律,有以下关系式:

$$\begin{cases} \dot{B}_m = \mu \dot{H}_m = \mu_0 \mu_r \dot{H}_m \\ \dot{H}_m L = \sqrt{2} N_1 \dot{I}_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: μ 为磁芯磁导率; μ_0 为真空磁导率; μ_r 为磁芯相对磁导率; $\dot{H}_m$ 为磁场强度; L 为有效磁路长度。取电CT直接套在输电线上进行取电,所以 N_1 空载时 $\dot{I}_2 = 0$,由式 $N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_m$ 可得 $\dot{I}_1 = \dot{I}_m$ 。联立上述所有公式可

得 CT 空载时二次侧输出电压幅值 E_2 为:

$$E_2 = 4.44fN_2\mu_0\mu_rS\lambda\frac{\sqrt{2}}{L}I_1 \quad (5)$$

根据不同用途,磁芯的形状和材质也是多种多样的。为了保证在输电不断电的情况下安装,本文采用环形磁芯由两个半圆组成,通过螺栓固定外壳,内径为 60 mm,外径为 115 mm,高 45 mm,开气隙为 1 mm,最大磁感应强度 $B_m = 1.5 \text{ T}$,二次线圈匝数为 300。

2)改进的能量管理模块

为加快换表装置中 CT 取电模块的初次取电速度,以及实际的取电放电需求,本文基于 CN3052A 芯片设计了能量管理模块。取电模块在导线周围感应取得的电量分为两块,本模块用电和锂电池充放电。当取电量较低时,由锂电池放电,保证稳定的电路输出;当取电量较高时,首先,需满足自身电路和负载的需求;其次,若有多余能量并且锂电池需要充电,则为锂电池充电,再有多余的能量则通过保护电路中的 MOS 管泄出。

如图 5 所示,LM339 迟滞比较器将比较检测输出电压与基准电压,其输出端用来控制芯片 CN3052A 的开断,高电平使得芯片处于正常工作状态,同时控制锂电池的工作状态。当输出电压未达到额定值时,表明线圈取电量不足,需要接入锂电池进行供电,当输出电压达到额定值时,表明取电量充足,由取电支路供电。当第一次初始取电,锂电池中无电时,应将感应取电得到的所有能量输出至电路供电。TEMP 引脚用于检测电池温度,与电池的热敏(negative temperature coefficient, NTC)传感器的输出端相连,当电池温度过高时,充电暂停,管脚 FAULT 输出信号,表明电池进入故障状态。

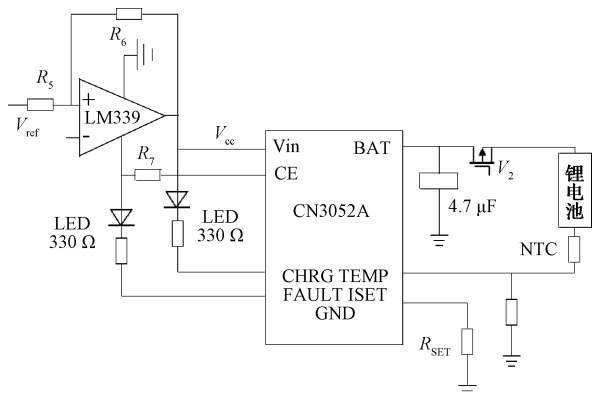


图5 改进的能量管理模块电路

3)无线测温模块设计

电流感应取得电后,经整流滤波电路、电压检测模块、线性稳压模块为工作电路板供电,电路如图6所示。本文设计低功耗的无线测温程序,利用单片机CC430F6137芯片实现整个电路电流的控制,利用温度传感器NTC10K进行温度测量,利用低功耗,集成的CC1101RF收发器制作为无线模块,433 M低频宽带通信技术穿透力强,传输

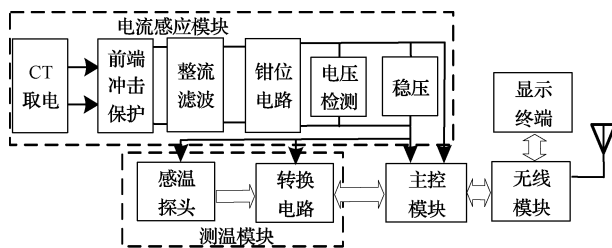


图6 无线测温节点电路简图

距离远。

本文装置的感温探头为温度敏感元件,后接的转化电路可将采集的物理信息转化为电信号并输出至主控芯片。主控芯片将测温模块输出的电信号通过片内模数转换器(ADC)转换成数字信号,然后利用温度值公式计算出数字信号对应的温度值^[13]。主控模块会将测温节点的位置和温度值加载成数据包,并通过无线模块发送到显示终端^[13]。

测温节点微控制器采用了低功耗无线单片CC430F5137芯片。CC430延续了前几代超低功耗和高性能的传统,并在低功耗 sub-1 GHz 频段集成了业界领先的CC1101RF收发器^[14]。CC430平台通过降低系统复杂性、将封装和印刷电路板尺寸减半以及简化射频设计,实现了低功耗数据采集、工业监控和无线传感器网络,经采用了万用表测量,该节点平均功率低于0.1 W,所需直流电压需高于1.8 V即可。

测温模块采用恒压分段测量法,来适应 NTC 电阻在大范围测温下的高精度要求^[13],其简化电路如图7所示。

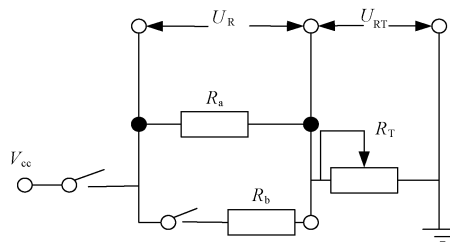


图7 无线测温节点电路简图

由图7可得,NTC热敏电阻的电压值 U_{RT} 的公式如下:

$$U_{RT} = \frac{U_{ref}ADC_{RT}}{ADC_{V_{cc}}} \quad (6)$$

式中: U_{ref} 为STM8L内部基准电压值; $ADC_{V_{cc}}$ 为内部供电电压 V_{cc} 的ADC采样值; ADC_{RT} 为NTC热敏电阻ADC采样值。同时,可得到串联电阻电压值 U_R :

$$U_R = \frac{U_{ref}(2^n - ADC_{RT})}{ADC} \quad (7)$$

上述电路为纯电阻电路,由伏安特性曲线推导出NTC热敏电阻的阻值 R_T :

$$R_T = \frac{ADC_{R_T}}{2^n - ADC_{R_T}} R \quad (8)$$

式中: R 为串联电阻阻值。鉴于 ADC 的采样精度, NTC 热敏电阻精度与串联电阻精度等, 可推导出 NTC 热敏电阻阻值的相对误差值 δ_{RT} :

$$\delta_{RT} = \delta_R + \delta_{ADC} + \delta_{cmos} + \delta_{Ref} \quad (9)$$

式中: 相对误差值 δ_R 、 δ_{ADC} 、 δ_{cmos} 、 δ_{Ref} 和 δ_{RT} , 依次为 0.1%、0.098%、0.396%、1% 和 1.594%。

NTC 热敏电阻的校对方程 R-T 为:

$$T = a + b \ln R_T + c \ln^2 R_T + d \ln^3 R_T + e \ln^4 R_T \quad (10)$$

$$\begin{cases} a = 359.606 \\ b = -29.101 \\ c = 0.002 \\ d = 0.831 \\ e = -0.140 \end{cases} \quad (11)$$

由此推导出测温的绝对误差值 $\epsilon^*(T)$ 为:

$$\epsilon^*(T) = \delta_{RT} |T'| + \xi \quad (12)$$

$$\xi = 0.286 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (13)$$

为了无线测温模块尽可能节省功耗, 主控模块将在定时配置无线及测温模块进入掉电状态, 节点即处于活跃待机模式。当收到触发唤醒中断时, 主控再进行温度数据传输, 具体流程如图 8 所示。

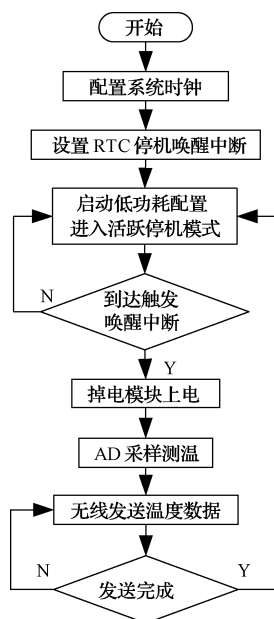


图 8 无线测温节点软件流程

单片机初始化后, 设定实时时钟 (real-time clock, RTC) 唤醒中断时隙。若未到唤醒中断, 单片机各模块掉电进入活跃待机模式, 此时单片机功耗较低。当定时器 RTC 时钟到达唤醒中断时, 唤醒单片机并对测温及无线收发模块上电, 接着进行温度采样并保存数据, 控制无线

发送模块传输温度数据至主机^[14]。微控制器芯片采用 STM8L 系列芯片, 该单片机有 4 种低功耗模式, 其中待机活跃模式下可以达到 350 nA, 可有效节约耗电。从中待机活跃模式唤醒的时间也非常快, 仅需要 5 μ s。这样只要软件程序合理, 在实际测试中母线电流 4 A 无线测温模块即可启动工作^[14]。

1.3 低压带电换表设备弧闪安全研究

考虑带电作业中实际工况, 按照三相短路情况下的电弧进行研究, 当作业点距离配电变压器低压侧出线处越远, 其系统短路阻抗越大, 因此其短路电流也就越小^[15]。因此, 为充分保证低压带电作业的安全性, 选择短路电流最大的情况来考虑三相短路故障, 即取 10/0.4 kV 配电变压器低压侧的短路电流值作为故障电弧短路电流的取值。

$$I_b = \frac{S}{\sqrt{3} U_2 U_k \%} \quad (14)$$

式中: I_b 为三相短路电流; S 为变压器额定容量; U_2 为二次侧额定电压; U_k 为变压器短路阻抗。电弧的伤害程度首先取决于其释放的能量大小, 而影响释放能量的因素包括电弧电流、电弧电压和电弧持续时间等。

为获得不同短路电流下的电弧入射能量曲线, 搭建了开放环境下低压带电作业中弧闪实验平台, 如图 9 所示, 由如下部分组成: 1) 电源母线; 2) 电弧控制装置; 3) 数据采集装置; 4) 电弧电极; 5) 物理量传感器。



图 9 低压带电作业电弧试验平台

通过传感器采集数据后, 可得不同短路电流下电弧入射能量曲线, 如图 10 所示。利用二元多项式拟合可得开放环境电弧入射能量 E_m 与三相短路电流 I_b 的关系为:

$$E_m = 0.001 1 I_b^2 - 0.025 9 I_b + 0.976 8 \quad (15)$$

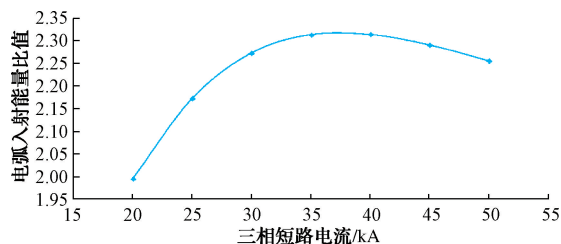


图10 不同短路电流下的电弧入射能量

2 实验结果与分析

2.1 带电换表装置性能测试

为验证设计结果,加工制作了带电换表装置样机,如图11、12所示,搭建了带电换三项表测试平台,操作流程如下。

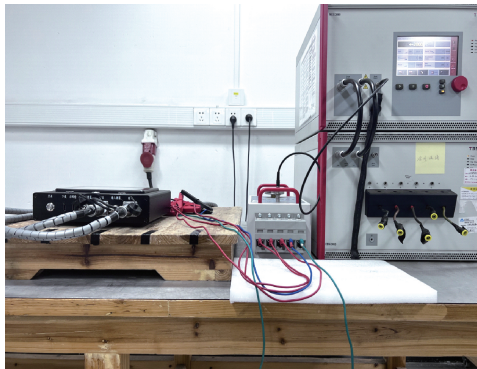


图11 组件连接实物



图12 出线连接实物

1)组件连接,将智能带电换表装置稳固放置在地面,正确连接带电换电表装置组件,包括进线组件插头、进线测温插头、出线组件插头、出线测温插头及扫码器(图11)。

2)测电流、接地,通过电表按显或者使用钳形电流表测量用户实时电流,确认处于安全工作范围(不大于12 A)。将接地线夹与表箱接地排连接,确认接地可靠。

3)连接进线,将接地线夹与表箱接地排连接后确认接地,将进线零线线夹连接零线排确保接触可靠。将进线线夹依次连接进线开关接线柱,确保进线线夹与开关的接线柱紧密接触。用电笔检测进线线夹电压,确认接触良好,电压正常可靠。

4)设备通电,确认智能带电换表装置的进线连接完好,打开装置开关予以通电,设备启动、自检,观察进线接入指示标志是否正常。

5)出线连接,将智能带电换表装置的出线连接器固定到所需更换电能表对应的出线开关处。用电笔检测电压情况,确认接触良好,电压正常。观察装置出线接入指示标志是否正常(图12)。

6)扫码记录,使用扫码器扫描待更换电表的条形码。

7)旁路构建,按下“连接”按钮,智能带电换表装置自动匹配待更换电能表相位,连接相应的相线。屏幕显示“连接成功”后,即可开始换表操作。

8)拆旧换新表,断开待更换电表的出线开关,拆下电表进出线,套好绝缘护套,拆除原有电表。安装电表安装新换电表,连接电表进出线,合上电表出线开关,通过电表按显或使用钳形电流表测量流过电能表的电流,确保分流正常,电能表更换工作完成^[16]。

9)拆除设备,按下智能带电换表装置的“脱离”按钮,断开连接,关闭电源。拆除电表出线开关处的出线连接器,取下电表进线开关处的进线线夹、零线线夹,取下接地排处的接地线夹。拆除进线组件插头、进线测温插头、出线组件插头、出线测温插头,依次收纳入手提箱。

换表装置外接于三项电表,并输入不同程度的电压,进行测量精度与供电稳定性测试,测试结果如表2所示,换表装置对于电流电压的测量误差低于0.1%,如图13、14所示,标记点表示不同相线接断线时段,在换表过程中,装置保证了电压与电流的稳定性,在缺相时匹配待更换电能表相位,保证相位平衡,防止停电。

2.2 感应取电及无线测温模块测试

1)感应取电输出稳压测试

为验证所设计感应取电模块供电能力及低功耗测温模块,对感应取电的稳压输出单元进行了测试。采用升流器模拟一次侧母线电流的变化,末端连接5 W的小灯泡,可以实现稳定的电压输出。如图15所示,结果表明当一侧绕组电流有效值为3.4 A时,取电模块稳压输出3.36 V,足够满足无线测温模块工作电压需求。此外,当引入改进的能量管理方法后,感应取电输出电流的稳压时刻提前了5 s,避免了初始取电电量流向电池充电,提高了带电换表的工作效率。

2)无线测温模块测试

通过装置中内置计量模块,在构建完旁路后,从该旁路流通的电能将精确计量。监测换表过程中的触点温度、匹配相位及其他电路参数,微处理模块会将传感器采集的

表 2 换表装置基本测量参数

相线	电压			电流		
	实际值/V	测量值/V	误差/%	实际值/A	测量值/A	误差/%
A	180	180.22	0.10	5	5.006	0.11
B	180	179.32	-0.03	5	4.999	-0.03
C	180	178.40	-0.09	5	5.001	0.02
A	200	200.10	0.05	10	9.998	-0.02
B	200	199.58	-0.01	10	10.003	0.03
C	200	200.30	0.05	10	10.005	0.05
A	220	219.93	-0.03	15	14.994	-0.04
B	220	220.31	0.04	15	15.012	0.08
C	220	221.17	0.03	15	15.003	0.02
A	240	240.14	0.06	20	19.998	-0.01
B	240	240.26	0.01	20	20.006	0.03
C	240	237.17	-0.08	20	20.002	0.01

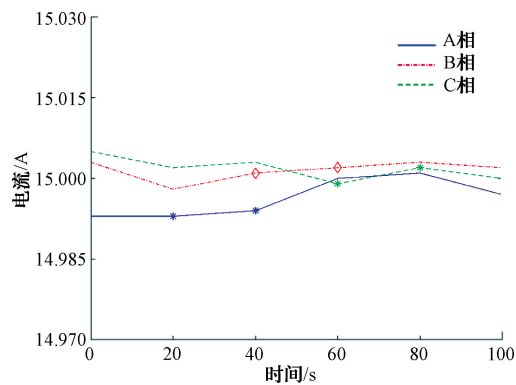


图 13 带电换表过程三相电流变化曲线

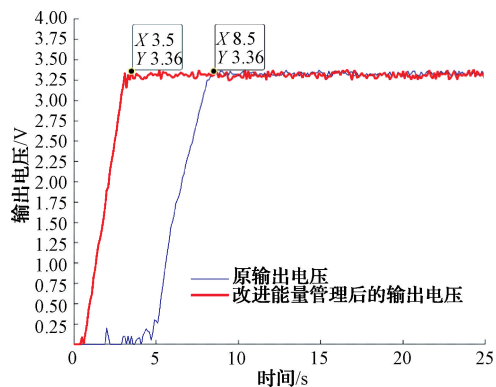


图 15 感应取电稳压输出波形

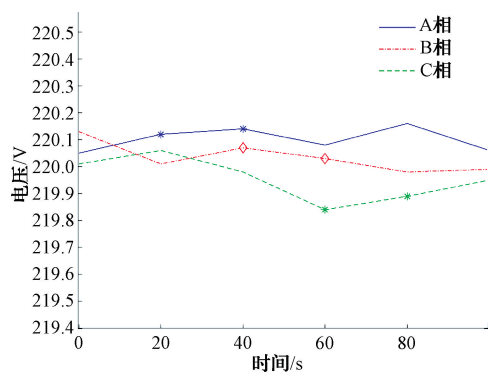


图 14 带电换表过程三相电压变化曲线



图 16 带电换表装置软件界面

信息输出至显示模块,实时显示并提示告警(图 16 右侧红框),显示了接触线头温度,当温度超过固定阈值,温度显示模块将告警。

为验证所设计测温模块的准确性,对其进行了绝对温度测量测试。环境温度 26.7℃,采用恒温加热台作为热源,K 型热电偶采样温度作为标称值。恒温加热台从 27℃~94℃加热过程中,测温节点随机采样 20 组数据,计算与标称值之间的绝对误差,如图 17 所示。实验结果

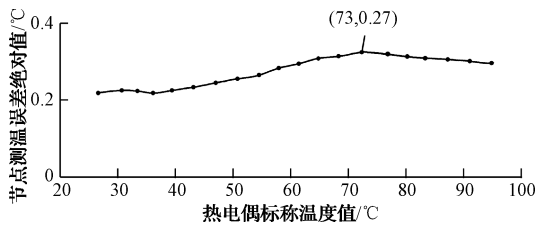


图 17 实测绝对温度曲线

表明,当热电偶标称温度值为 73 ℃时,节点测温绝对误差值的最大值为 0.27 ℃,在测温绝对误差 0.286 ℃范围内。

2.3 换表装置弧闪安全性测试

为验证换表装置绝缘材料耐受内部电弧引起的非正常发热和着火时的安全性,搭建了开放性弧闪实验平台(图9),根据 GB/T 7251.1—2013 中 10.2.3.2 的绝缘材料耐受内部电效应引起的非正常发热和着火验证条例进行实验。

实验结果如表3所示,最终样品没有燃烧或灼热,符合国家的低压成套开关设备和控制设备的安全标准。

表3 安全性测试结果

检测项目	要求	测量结果
样品放置处的温度/℃	+15~+35	23.7
相对湿度/%	45~75	62
放置时间/h	≥24	25
灼热丝顶部的温度/℃	650±10	653
持续时间/s	39±1	30

3 结 论

本文设计了一款具备感应取电无线测温功能的带电换表控制器,由带电换表装置、感应取电模块以及无线测温模块3个部分组成。该方法可以在用户带电的情况下更换低压三相电表,并在换表过程中实现检测电路相序和无线测温。同时可利用感应取电作为测温模块电源,有效解决了电池容量限制导致的传感器寿命较短的问题。经实验结果验证,本文设计的控制器能有效降低停电换表带来的用电影响,测温模块寿命长且稳定,且能满足国家安全标准,相比现有的换表方案具有更好的可靠性与安全性,具有很高的实用价值。

参 考 文 献

- [1] 马媛,杨哲询,王钰楠,等. 新型电力系统背景下的不停电换表作业现状分析与技术研究[J]. 上海节能, 2022(5):611-615.
- [2] 段俊峰,李宁,唐求,等. 基于 CK-GPR 的多应力环境智能电表剩余寿命预测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4):102-110.
- [3] 李明远,李少娟,唐楚凡. 一种通用型单、三相电能表不停电更换装置[J]. 中国新技术新产品, 2020(21): 66-68.
- [4] 刘洪儒,郑庆阳,阮召安. 具有不停电换表功能的单相电能表接插件的研制[J]. 农村电气化, 2019(4): 73-75.
- [5] 储海峰,朱勇,郭鹏程,等. 具有蓝牙通信功能的不停电换表装置研制[J]. 通信电源技术, 2020, 37(4):

17-18.

- [6] 王叶锋,马媛,虞琰文,等. 三相直接接入式电能表的不停电换表辅助装置研发与应用[J]. 上海节能, 2020(8):922-928.
- [7] LIU T, HAO M, CAI M, et al. Measures to replace the electric energy meter without power failure[C]. 2022 IEEE 4th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS). IEEE, 2022: 729-733.
- [8] 朱亮,周雷,杨志宇,等. 基于智能电网中不停电换表装置的研发设计[J]. 东北电力技术, 2022, 43(4): 32-35.
- [9] 王永超,唐求,马俊,等. 基于复合核 SVM 的智能电表基本误差预测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10):209-216.
- [10] 张勇,叶青,许安杰,等. 750 kV 交流输电线路架空地线感应取电研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 32-37.
- [11] 张桂林,王毅颖,刘建功,等. 基于电力电子变压器隔离变压的复合矿用变频器[J]. 工矿自动化, 2021, 47(10):70-76.
- [12] 高浚凯,齐红丽,王天泽,等. 一种应用于不同轴径转轴的感应供电平面阵列线圈结构[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4):65-71.
- [13] 丁柏文,沈金荣,唐启阳,等. 基于电流感应取电的无线测温节点[J]. 仪表技术与传感器, 2020(12): 21-25.
- [14] 林凡强,马晓茗. 基于 CC430 无线传感网络实验平台的开发[J]. 测控技术, 2012, 31(8):16-19.
- [15] 张婷,王海淇,张认成,等. 基于自归一化神经网络的电弧故障检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 141-149.
- [16] 朱楷. 浅谈高压电能计量装置的故障原因及处理措施[J]. 科学与财富, 2016(9):502-503.

作 者 简 介

庄宇峰,本科,工程师,主要研究方向为不停电作业技术。

孙宇,本科,高级工程师,主要研究方向为装表接电技术。

苏新,博士,教授,主要研究方向为配电物联网云边协同。

E-mail:leos8622@136.com

行鸿彦,博士,教授,主要研究方向为智能化电子测量技术与仪器和设计。