

[控制系统]

# 基于磁场检测原理的变压器监测预警系统设计

文/三峡大学电气与新能源学院 岳明奕 杜于龙 田志鹏 吴 馨 谢天宇

为了更可靠地解决变压器潜在故障的预警问题，提出了一种基于磁场检测原理的变压器在线监测预警装置的设计方法。在对变压器的潜在故障及其漏磁场特性分析的基础上，采用模块化设计方法，给出了磁场检测模块电路，数据中心模块电路，传输模块及电源模块电路。该设计从漏磁角度解决变压器潜在故障预警问题，具有一定实际参考价值。

随着电力需求的强劲增长，电力设备的容量也越来越大。变压器体积越大，检修也越不方便。变压器在长久运行后，由于受到热场、机械力、雨水、阳光等因素的影响，会伴随着绝缘老化、绕组变形的潜在故障。老化或者变形程度的不同，变压器会出现不同的现象，在还没有出现明显故障现象时，往往很难检测其达到了何种程度。

目前对变压器进行故障检测有：①振动检测，用于判断变压器是否出现部件松动。②油量检测（油式变压器），通过油量来判断是否出现漏油，过度发热以及短路。③温度检测，来判断变压器温度是否过高。④短路电路检测，用于判断变压器内部相间，单相匝间是否出现短路故障。对于②、④常用于短路故障发生，而并非针对变压器老化做出预警。①、③可以用来以某个方便来反映变压器某种特定的正常现象。但对于变压器容量的增大，这几种检测往往不能满足变压器的发展。本文是通过磁场检测技术来检测变压器漏磁量，从而判断变压器的老化及绕组变形水平，并提前做出预警。

## 变压器潜在故障及其漏磁变化

### 1. 变压器的绝缘老化

在实际变压器中，除了通过铁心并与一次和

二次绕组同时相交链的主磁通外，还有一部分仅与一个绕组交链且主要通过空气或油路而闭合的漏磁通。由于漏磁磁路的磁阻较大，故漏磁通比主磁通少得多。绝缘介质为电气元件提供机械支持，并使元件之间、元件与地之间绝缘。变压器线圈的绝缘介质老化是主要的潜在绝缘故障，绕组的绝缘介质的长期老化积累会引起绝缘介质的泄漏电流增加，最终引起绝缘介质的击穿。变压器由于制造技术的原因，不可能将漏磁完全消除，因此，在运行中漏磁的出现，会使变压器外壳出现磁损耗并伴随着发热。而这种现象长期存在则会造成变压器漏磁回路中部件出现老化，进一步提高漏磁阻抗，使漏磁量进一步增加。

### 2. 变压器的绕组变形

变压器绕组的几何结构和相对位置会影响漏磁通的分布。可近似认为漏磁场磁感线与心柱轴线平行，忽略在绕组端部弯曲部分，应用安培回路定律，可得磁感应强度的幅值

$$B_m = \mu \rho I_m N / H \quad (1)$$

在距绕组线圈内侧 $x$ 处的磁感应强度为

$$B_x = B_m / D = \mu \rho I_m N x / (HD) \quad (2)$$

式中， $\mu$ 为空气中的磁导率； $\rho$ 为罗果夫斯基系数； $I_m$ 为绕组线圈电流幅值； $N$ 为线圈匝数； $H$ 为绕组径向高度； $D$ 为绕组轴向宽度。

由数学推导可知,变压器绕组的变形也将引起漏磁场磁感应强度的变化,以圆筒式绕组的配电变压器,一次绕组分别发生-1 cm、0 cm、1 cm的轴向偏移为例,通过ANSYS软件的仿真,可看出漏磁场分布的改变,如图1所示。

综合上述,以漏磁场的改变来检测预警变压器的老化、变形等潜在故障有充分的理论依据。

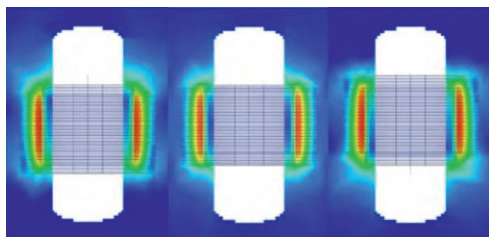


图1 轴向位移时漏磁场分布的改变

## 变压器在线监测预警装置设计

### 1. 系统的组成

本系统包含三个部分:磁场检测、数据采集中心、计算机接收。“磁场检测”部分主要是通过三维磁场传感器HMC1023对周边磁场进行检测,测量变压器的漏磁量变化。磁场传感器个数可以根据用户要求增加或减少,而“数据采集中心”将自动对磁场采集模块进行搜索,连接成功的“磁场采集模块”,在“数据采集中心”模块上将会有对应LED灯显示。传输线路采用RS485总线进行传输,其传输距离足够将变压器到监控室的距离。计算机监控部分,可以直接用串口调试小助手进行接收。结构示意图如图2所示。

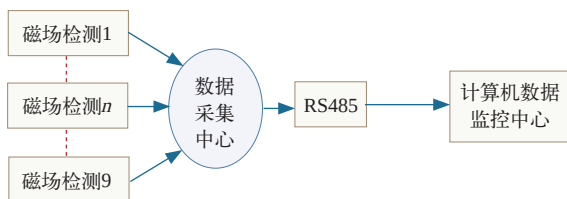


图2 系统结构示意图

### 2. 磁场检测模块电路

“磁场检测”模块内部电路可以划分成三个部分,即磁场检测电路、无线传输电路、单片机。

磁场检测电路采用三维磁场检测传感器HMC1023来检测变压器漏磁。HMC1023型磁感传感器是以单一组件设计的高性能3轴式磁阻传

感器。INA128是仪表放大器具有高输入阻抗,高共模抑制比,低偏置而且有最高可达1 000倍的放大能力,仪表放大器只需要一个电阻即可以调节放大倍数。 $VD_1$ 、 $R_6$ 、 $C_{10}$ 和 $VD_2$ 、 $R_7$ 、 $C_{11}$ 以及 $VD_3$ 、 $R_8$ 、 $C_{12}$ 分别组成U3、U4、U5的6号引脚所接的半波整流电路。HMC1023磁场传感器输出的微弱信号通过仪表放大器INA128放大后,再经半波整流输出单片机,然后单片机通过模数转换成数字信号读取。U1的13号引脚通过IRF7509驱动芯片U6连接至U2的10号引脚。U2 (HMC1023) 10号引脚为脉冲复位引脚,由于HMC1023长期暴露于地磁场下,可能会存在偏置,因此在每次测量之前通过脉冲对其进行一次复位,保证测量准确性。

无线传输电路采用NORDIC公司生产的nRF24L01无线收发芯片,该芯片工作在2.4~2.5GHz频段。该芯片功耗极低,主要有4种工作模式:接收模式、发送模式、待机模式、掉电模式。nRF24L01的1~6号引脚与ATMEGA8PB7~PB2号引脚相连,之间通过SPI协议进行数据传输。ATMEGA8通过SPI对nRF24L01进行发送数据、待机等控制。在控制器中nRF24L01只工作在发送模式和待机模式。当距离检测模块检测到障碍物时,单片机通过nRF24L01向“方位指示器”发送方位信号。

处理器为英特梅尔公司生产的ATMEGA8低功耗微处理器。ATmega8是一款采用低功耗CMOS工艺生产的基于AVR RISC结构的8位微处理器,可以达到接近1 MIPS/MHz的性能,运行速度比普通CISC微处理器高出10倍。该处理器通过引脚与上述两个部分相连,来控制各个电路。

### 3. 数据采集中心模块电路

数据采集中心内部电路由4个部分组成:无线传输电路、按键电路、指示灯电路和RS485传输电路。

1) 无线传输电路与采集模块中电路一致,此处不再赘述。

2) 按键电路有两个控制按键,电路由按键SB1、SB2、电阻 $R_{13}$ 、 $R_{14}$ 组成。按键B1功能是在新增加或减少“磁场检测模块”后,用于对模块重新搜索。按键SB2功能用于开通或关闭采集功能。当SB1按下后,+5 V电源导通,U1的12号引脚上为5 V,表示按键按下;当按键SB1

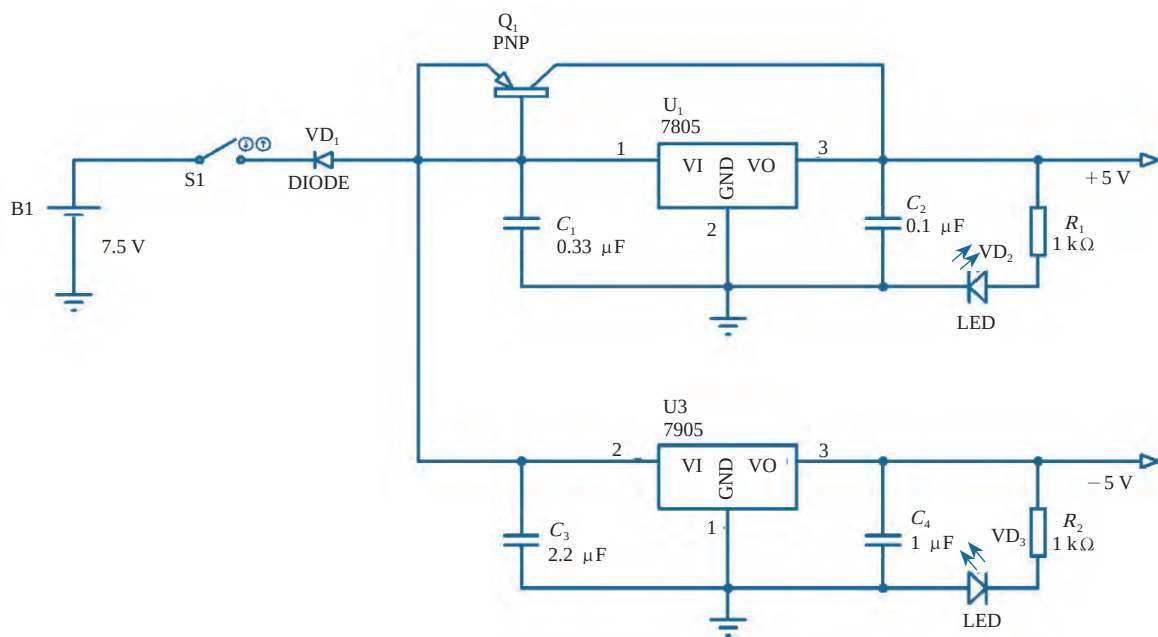


图3 电源模块电路

弹开后，5 V电源断开，电阻 $R_{13}$ 作为下拉电阻使U1上的12号引脚为0 V，表示SB<sub>1</sub>断开。按键SB<sub>2</sub>原理与SB<sub>1</sub>一致。

3) 指示灯电路主要功能是通过LED来显示那个“磁场采集模块”连接成功。该电路由排型LED灯U2，电阻 $R_3 \sim R_{12}$ 组成。U2从右至左LED灯，分别标号为D<sub>1</sub>~D<sub>10</sub>，其中D<sub>1</sub>~D<sub>9</sub>分别对应“磁场采集1~9”。采集中心与那个“磁场采集”模块连接成功，单片机就会驱动那个LED灯变亮，从而达到一种显眼的提示效果。D<sub>10</sub>是采集中心工作的指示灯。

4) RS485传输电路主要功能是将单片机自带的USART串行协议转换成RS485半双工的协议，并“采集中心”采集到的数据传送至电脑上。由于RS485是半双工通信，收和发数据不能同时进行，因此按图设计电路，可使单片机U1通过一个引脚就可以控制U3的接收和发送功能切换使能，优化资源利用。U3的7号引脚为RS485协议信号输出引脚，连接到电脑。

#### 4. 电源模块电路

如图3所示的是电源变换模块，包含9 V到+5 V降压电路，9V到-5 V变换电路。9 V电源由锂电池提供，S1为开关，VD<sub>1</sub>为方向二极管，防止电

池接反烧毁电路。该电路作为独立电路分别存在采集模块和控制模块中，提供电能。7.5 V到+5 V降压电路，包括稳压芯片7805，PNP晶体管Q<sub>1</sub>，电容C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>，电阻R<sub>1</sub>，发光二极管VD<sub>2</sub>组成。7.5 V到-5 V电压变换电路，包括稳压芯片7905，电容C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>，电阻R<sub>2</sub>，发光二极管VD<sub>3</sub>组成。

#### 结束语

本文通过分析变压器发生老化、绕组形变等潜在故障时漏磁磁通变化，结合磁场检测技术，给出了一种变压器在线监测预警装置的设计。单独设置磁场采集模块和数据采集中心并采用无线数据传输，使得磁场采集模块和数据采集中心安装简化、方便。磁场采集模块的数量可以按使用者需求添加和减少，这样可以适用于不同大小的变压器，使数据采集更加方便，通过合理设置磁场采集模块的数量还可有助于判断的准确性；采用RS485协议进行传输，方便进行远距离传输，并且可以方便使用者用计算机存储数据和绘制曲线。本设计已取得国家专利，具有一定的工程应用价值。EA

(收稿日期：2015.06.19)

(编辑：杨得润)