

基于磁通门原理的高精度电流传感器的研制

宜昌测试技术研究所 吕冰 陈正想 曹平军

【摘要】 分析了磁通门式电流传感器的原理。该电流传感器由晶振产生方波驱动磁芯，改善了传统RC模拟激励磁电路的稳定性问题；用结构更加简单的峰值检波电路取代传统复杂的谐波法电路，简化了电路设计，并降低了系统功耗；实验结果表明，该电流传感器实现了预期功能，性价比较高，具有良好的推广价值。

【关键词】 磁通门；峰值检波；电流传感器

1. 引言

用电流传感器作为电气设备绝缘在线检测系统的采样单元，已得到业内人士的共识。目前，电流传感器有多种类型，如霍尔传感器、无磁芯电流传感器、高导磁非晶合金多谐振荡电流传感器、电子自旋共振电流传感器等。由于电力系统使用环境的特殊性，许多传感器存在自身的局限性。目前应用于电力系统的电流传感器多是以电磁耦合为基本工作原理的，从采样方式上分，这类传感器主要有直接串入式、钳式、闭环穿芯式三种。大量的研究试验表明，基于“零磁通原理”的小电流传感器更适合电力系统绝缘在线检测的要求。本文所述小电流传感器即是以磁通门技术为基本原理，加上闭环控制在电子电路中的应用，使小电流传感器具有高精度、高稳定性、抗干扰能力强等优点。

2. 磁通门原理与电流传感器系统组成

2.1 磁通门原理

磁通门传感器是利用被测磁场中高导磁率磁芯在交变磁场的饱和激励下，其磁感应强度与磁场强度的非线性关系来测量弱磁场的。这种物理现象对被测环境磁场来说好像是一道“门”，通过这道

表1 灵敏度试验结果

| 序号 | 测量电流/A | 输出电压/V | 灵敏度S | 误差/% |
|----|--------|---------|-------|-------|
| 1 | 0.0201 | 0.0802 | 3.994 | -0.16 |
| 2 | 0.0399 | 0.16072 | 4.033 | 0.81 |
| 3 | 0.0600 | 0.24128 | 4.018 | 0.46 |
| 4 | 0.0802 | 0.32142 | 4.006 | 0.16 |
| 5 | 0.1000 | 0.40181 | 4.018 | 0.45 |
| 6 | 0.1499 | 0.60206 | 4.018 | 0.44 |
| 7 | 0.2001 | 0.80392 | 4.017 | 0.43 |
| 8 | 0.2500 | 1.0041 | 4.017 | 0.43 |
| 9 | 0.3002 | 1.20548 | 4.015 | 0.38 |
| 10 | 0.3501 | 1.40568 | 4.015 | 0.39 |
| 11 | 0.4003 | 1.60702 | 4.014 | 0.36 |
| 12 | 0.4502 | 1.80689 | 4.014 | 0.34 |
| 13 | 0.5000 | 2.00622 | 4.012 | 0.31 |

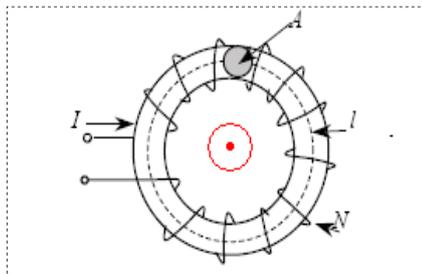


图1 磁通门绕组结构

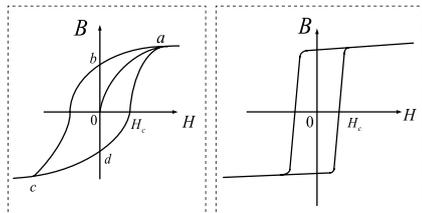


图2 普通磁环的B-H曲线 图3 高μ磁环的B-H曲线

“门”，相应的磁通量即被调制，并产生感应电动势。利用这种现象来测量电流所产生的磁场，从而间接的达到测量电流的目的。

本文采用现有技术中结构简单应用较广泛的一种单绕组磁通门。环形磁芯上绕有线圈，此绕组即作为激励绕组又作为测量绕组。所测电流从磁环中间穿过。如图1所示。

一般磁性材料都有S形状曲线的特性，称之为磁滞回路(hysteresis loop)，如图2所示。此磁滞回路曲线建立在B-H的坐标轴上，为磁性材料遭受完全磁化与非磁化周期，下图所示为典型磁滞曲线的铁心，如果曲线由a点开始，此点表示最大正磁化力，至b点磁化力为零，然后下降至c点为最大负磁化力，再至d点磁化力为零，最后返回最大正磁化力的a点，此即为整个磁性周期。高导磁率、低矫顽力磁芯的磁滞回线如图3所示。

当我们在磁环导线中加入电流分量后，电流所产生的磁场会使原本对称的B-H磁滞回线会改变中心线变成如图4所示形状。

假设激励磁场强度为： $H_m \cos \omega t$ ，就能

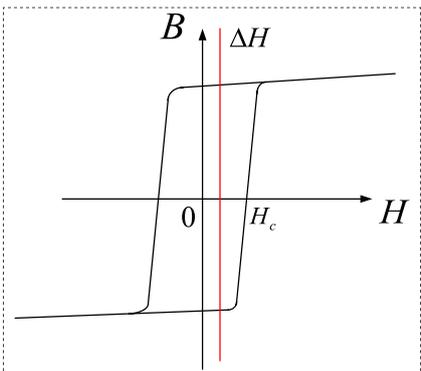


图4 加入直流的高μ磁环B-H曲线

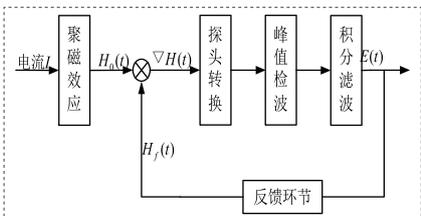


图5 电流传感器系统框图

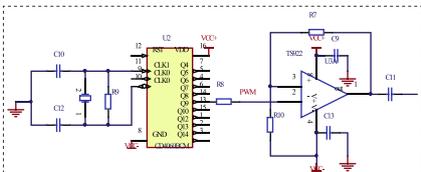


图6 激励电路

得到磁通门磁芯上的总磁场强度为：

$$H(t) = H_0 + H_m \cos \omega t \quad (1)$$

式中： H_0 为导线电流在环形磁芯上的磁场强度； H_m 为激励磁场强度幅值； ω 为激励场角频率。则线圈中的感应电动势：

$$E(t) = -NS \frac{dB}{dt} = -NS \frac{dB}{dH} \frac{dH}{dt} = -NS \mu_{rd} \frac{dH}{dt} \quad (2)$$

式中： N 为绕组线圈匝数； S 为环形磁芯的截面积； μ_{rd} 为磁芯物质的微分磁导率。

根据磁饱和特性，当 $H_0 = 0$ 时， $H(t) = H_m \cos \omega t$ ，在磁饱和作用下磁感应强度为：

$$B(t) = \begin{cases} \mu_d H_m \cos \omega t, & |H| < H_s \\ \mu_d H_m \cos \omega t + B_s, & |H| > H_s \end{cases} \quad (3)$$

式中： B_s 为磁化曲线饱和及段延长线在B轴上的截距，显然， $B(t)$ 是对时间轴上下对称的平顶波，根据傅里叶级数分析，它只含奇次谐波不含偶次谐波。

当外磁场 $H_0 \neq 0$ 时， $H(t) = H_0 + H_m \cos \omega t$ ， $B(t)$ 的表达式为：

$$B(t) = \begin{cases} \mu_d H_0 + \mu_d H_m \cos \omega t, & |H| < H_s \\ \mu_d H_0 + \mu_d H_m \cos \omega t + B_s, & |H| > H_s \end{cases} \quad (4)$$

这时， $B(t)$ 成为上下不对称的平顶波，根据傅里叶级数分析可知，它不仅含有奇次谐波还含有偶次谐波。而由式(2)可知， $E(t)$ 和 $B(t)$ 应含有相似的波形成分，因此，可以根据 $E(t)$ 在激励周期内的振幅的上下不对称来检测外电流所产生的磁场 B_0 ，从而达到测量电流的目的。

整个过程可以概括为：当磁通门式电流传感器工作时，激励线圈中加载一固定频率、固定波形的交变电流进行激励，使磁芯往复磁化达到饱和。在不存在外在电流所产生的被测磁场时，则检测线圈输出的感应电动势只含有激励波形的奇次谐波，波形正负上下对称。当存在直流外在被测磁场时，则磁芯中同时存在直流磁场

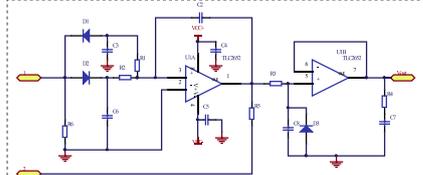


图7 信号处理电路

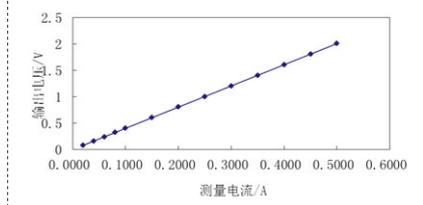


图8 输出电压与测量电流的关系曲线

和激励交变磁场,直流被测磁场在前半周期内促使激励场使磁芯提前达到饱和,而在另外半个周期内使磁芯延迟饱和。因此,造成激励周期内正负半周不对称,从而使输出电压曲线中出现振幅差。该振幅差与被测电流所产生的磁场成正比,因此可以利用振幅差来检测磁环中所通过的电流。

2.2 电流传感器的系统组成

电流传感器的系统框图5所示。电流所产生的的磁场在磁通门探头内经激励信号调制后,通过峰值检波和积分滤波电路产生有用的电压信号,然后经过反馈,使电流传感器工作在零磁通状态。

3. 硬件电路的设计

3.1 激励电路

传感器激励信号对探头和整个系统都产生很大的影响,一般从频率稳定度、信号幅值稳定度、相位稳定度、波形稳定度这几个方面来考虑激励信号的选择。此外,激励信号频率的高低很大程度影响着传感器的工作性能,频率太高,则会增大噪声;频率太低则会降低传感器的灵敏度,通常,激励最佳频率会在几百到几千赫兹。综合以上各个因素,选择了频率为9.6KHZ的方波作为传感器的激励信号,同正弦波相比,方波可以由石英晶体直接产生,能比较容易的获得,且有更好的稳定度,更重要的是方波只有正负电平两个电压幅值,这比正弦波的电压幅值的稳定度要好很多。电路如图6所示,由晶振和分频器CD4006组成。频率源产生稳定的方波激励信号由耦合电容C11送给探头绕组。另外,此处选用了高驱动能力、高精度、低噪声、低温漂的运放TS922,并采用双电源供电。

3.3 变压器智能控制

数据处理软件通过动态扩容处理模型,综合处理导线温度、导线电流、环境温度、湿度、风速、风向等数据,计算出输电线路潮流与线路热稳定限额的变化,通过与线路热稳定温度预警值的比较,分析线路输送余量,然后将分析结果发送给智能调节变压器,变压器对比分析数据和设定的容量限值,动态调整输送能量,实现改善线路电能质量及输送容量的目的。

4. 现场应用情况

2012年11月在新疆乌鲁木齐市10KV苍九二线#48、#113、#130号杆安装输电线路导线温度在线监测装置, #48号杆单独安装微气象监测装置对周边区域的气象环境进行监测。

监测装置主要由主机装置和导线温度监测装置两部分组成,主机装置采用不锈钢支架将主机箱和太阳能板固定在杆塔上,距离地面4米以上。

主机内部包括数据处理终端、GPRS数据传输单元和433MHZ短距离无线通信模块。数据处理终端通过GPRS数据传输单元

3.2 磁信号放大处理电路

电路如图7所示,其目的是提取出由外电流产生的磁场所调制的电信号。由峰值检波电路、积分滤波电路放大电路和闭环反馈电阻等组成。1、2号端子分别接磁环绕组的两根引线,被调制后的电信号从1号端子经两个对称的检波二极管D1、D2,电阻 R_1 、 R_2 组成的正负峰差检波电路,基本滤掉单纯由激励磁场产生的正负上下对称的信号,得到由外测电流磁场被调制而产生的脉动的磁通门信号,再经运放U1A和C2等组成的积分滤波放大电路处理后,得到平滑的直流磁通门信号。为提高系统的抗干扰能力,采用反馈电阻将信号回馈到探头的2号端子,形成深度负反馈电路,使绕组线圈始终工作在零场状态下。最后由U1B和D3组成的钳位跟随电路产生最终的输出信号。

在本电路中,两个峰值检波二极管D1、D2和电阻 R_1 、 R_2 务必尽量选用一致性较好的器件,否则难于滤掉单纯由激励磁场产生的正负上下对称信号,这将严重影响峰值检波的性能;另外,在滤波积分环节,尤其要注意积分运放U1A和积分电容C2的温度特性和噪声特性。设计选用低噪声、低温漂的TLC2652精密运放,一路作为积分滤波用,另一路作为电压跟随用。再者,反馈电阻选用高精度、低温漂电阻,实际上还负责调节系统的增益即系统的灵敏度。在阻值的选择上,即不宜过大也不宜过小。过大则达不到深度负反馈的目的,太小则无法满足系统灵敏度要求。

4. 实验结果与误差分析

电流传感器主要关心分辨力、灵敏度、测量范围、温度特性和稳定性等。通过安捷伦公司的6645A电源给电流传感器通

入高精度的电流,改变输入电流,用万用表测量电流传感器的输出电压 U_0 ,经过试验得到表1的数据,可以看出灵敏度与理论计算的误差在0.5%左右,灵敏度和稳定性较好。

对结果进行最小二次拟合,作出试验曲线如图8所示。

5. 结论

本电流传感器采用环形磁芯作为传感器的磁敏元件,基于峰差法信号处理电路,由晶振产生激励方波,有效改善了传统RC模拟激励电路的温度性能,提高了传感器输出信号的稳定性,简化了电路设计,降低了传感器的成本和功耗。试验表明,本电流传感器的测量精度、温度稳定性等都达到了预期的设计要求,且成本低廉、调试方便,有很强的工程实用价值。本电流传感器的测量精度能够达到1mA,如何进一步提高传感器的分辨力和降低传感器生产成本将是下一步的研究工作。

参考文献

- [1]张学孚,陆怡良.磁通门技术[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [2]石智勇,王怀光,庞发亮.磁通门信号处理电路分析与设计[J].测控技术,2006,25(6):82-88.
- [3]丁璐,胡永红.数字电流传感器的设计[J].计算机测量与控制,2009,17(1):249-251.
- [4]臧殿红,康忠健,赵友俊.有源补偿零磁通电流传感器的研制[J].电力电子技术,2009,46(6):56-58.
- [5]包军,田建华,张秀阁.基于零磁通原理的高精度小电流传感器的研究[J].继电器,2002,30(20):32-35.

作者简介:吕冰(1987—),硕士,现供职于宜昌测试技术研究所,研究方向:磁场探测与信息技术。

(上接第59页)可根据监测要求随时修改便于对某些特定区域进行密集监测。

监测装置系统构成详见图2:监测装置结构图。

与PC工作站进行数据的传输,将现场数据传输到工作站进行数据处理。

导线温度监测装置包括数据处理器、PT1000温度传感器、取电CT三部分组成。温度传感器固定在导线的接口处或者薄弱处,数据处理器将采集到的导线温度和导线电流通过433MHZ无线通信模块传输给主机,并且接收主机发送的控制指令,进行休眠或者修改采集时间和采集间隔。监测装置内置低温锂电池,能够在-40°保持正常工作,并且能够从CT中获取电源补充到锂电池中,维持电池电量充足。

微气象监测单元能够采集风速传感器、风向传感器、温度传感器、湿度传感器、光照辐射传感器,用于采集现场的气象环境数据为动态扩容提供参考。苍九二线#48、#113、#130号杆距离较近,周边环境相似,能够影响温度、湿度等微气象环境的因素基本一致,所以在#48号杆安装了一台微气象监测装置提供周边区域作为参考。本系统采用分体式结构设计理念,各监测装置之间互相独立与监测子站通信,所以微气象监测单元可以与导线温度监测装置使用同一个主机系统,并且使用主机系统的电源。

PC工作站后台实现输电线路导线温度、导线电流,环境温度、湿度、风速、

风向及日照辐射等数据的实时监测、分析及预警、显示、查询、信息发布、数据转发、打印等用户所需要的一系列功能。后台主站通过曲线方式显示导线温度。

5. 结束语

项目成功实施后可广泛应用于我国配电网线路以及其它各电压等级线路,不仅掌握线路实时温度,保障线路运行安全,还能提高线路输送效率,节约输电成本;可以缓解电源建设步伐的加快与电网规划建设滞后、输电能力不足之间的矛盾,还能避免因新建线路引起的诸多社会矛盾。

参考文献

- [1]张启平,钱之银.输电线路实时动态扩容的可行性研究[J].电网技术,2005,29(10):31-32.
- [2]叶涛声,龚大卫,黄伟中等.提高导线允许温度的可行性和工程实践[J].电力建设,2004,25(9):1-7.
- [3]马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [4]东北电力设计院.架空送电线路基础设计技术规定DL/T5219-2005[S].北京:中国电力出版社,2005.
- [5]徐文进,张阿卜.智能温度传感器Ds18B20在多路测温中的应用[J].现代电子技术,2004(22):3-7.
- [6]曹秀玉,李学良.电网实时信息转发系统的设计与分析[J].微计算机信息(测控自动化),2006,22(11):15-17.