

保护用电流互感器 全自动伏安特性试验仪研制

潘文诚¹, 唐根宝²

(1. 浙江科技学院 自动化与电气工程学院, 浙江 杭州 310012;

2. 湖州爱迪电气有限公司, 浙江 湖州 313023)

摘要: 介绍一种全自动伏安特性试验仪的研制过程。装置的强电和弱电环节在单片微计算机的控制下协调工作。内置的升压器由伺服电机驱动, 具有不同的升、降压速率。电压和电流双通道测量, 2 路 A/D 同时转换, 体现了真正的实时性。采样前对被测电量进行真有效值变换, 避免了试验中互感器铁芯磁饱和时, 电压、电流波形的畸变对测量准确性的影响。切换量程通道的电子模拟开关中导通电阻的处理和仪器的数字式校准技术提高了测量的准确度, 各通道全量程精度均高于 0.5 %。为在伏安特性曲线图中体现出铁芯饱和前电流值的细微变化, 试验数据的尺度变换技巧实现了特性曲线在对数坐标中的显示和打印。

关键词: 电流互感器; 伏安特性试验; 饱和曲线; 对数坐标; 量程

中图分类号: TM 452; TP 274+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)05-0050-04

1 电流互感器伏安特性试验

电流互感器铁芯质量的检测是通过鉴别互感器二次绕组磁化曲线的饱和程度判断互感器绕组有无匝间短路等缺陷。因此, 二次绕组的伏安特性(励磁特性)是决定互感器质量性能的重要因素。根据国家标准^[1-2], 对于 TPS, TPX, TPY, TPZ 级保护用电流互感器, 二次励磁特性测定试验是必须进行的型式试验和例行试验。另外, 利用被试电流互感器的伏安特性试验数据, 以及二次侧绕组的阻抗等参数, 间接求出保护用电流互感器的 10 % 误差曲线, 用于继电保护系统的校核^[3-4], 也是电流互感器伏安特性试验的重要目的。

电流互感器伏安特性是指互感器一次侧开路, 二次侧励磁电流与所加电压的关系曲线, 实际上就是铁芯的磁化曲线。伏安特性传统的试验方法接线比较复杂, 试验接线如图 1 所示。

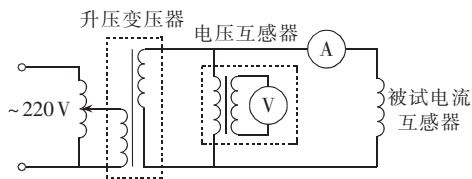


图 1 电流互感器伏安特性试验原理图

Fig.1 Principle of volt-ampere characteristic test for CT

试验时, 一次侧开路, 从二次侧施加电压。因为一般的电流互感器电流加到额定值时, 电压已达 400 V 以上, 单用调压器无法升到试验电压, 所以还

必须再接一个升压变压器(其高压侧输出电流需大于或等于被试电流互感器二次侧额定电流)升压和一个电压互感器读取电压^[3]。为保证测量准确, 试验开始时应先对被试电流互感器进行退磁, 即先调节升压器至其二次绕组额定电流值, 再降回到零值, 然后再逐点升压试验。可预先选取几个电流点, 逐点读取相应电压值。通入的电流或电压以不超过制造厂技术条件的规定为准。当电压稍微增加而电流增大很多时, 说明铁芯已接近饱和, 应极其缓慢地升压或停止试验。试验中不允许回调电压。试验后, 根据试验数据绘出伏安特性曲线。测得的伏安特性曲线与过去或出厂的伏安特性曲线比较, 电压不应有显著降低, 否则应检查二次绕组是否存在匝间短路。

可见, 传统的试验方法不但复杂费力(尤其是伏安特性曲线的绘制), 而且手动升压和人工读数都给试验带来较大误差。由此, 研制一种全自动的电流互感器伏安特性试验仪是非常必要的^[5]。实现全自动检测的试验仪, 其用于励磁的工频升压器脱离了手动操作而由伺服电机驱动, 而且为适应各种情况, 还具有变速率驱动功能; 试验仪能在波形严重畸变情况下准确测量试验电压和励磁电流; 试验仪能显示、打印和保存试验数据和曲线; 试验仪还能与上位机通信, 互传命令与数据。这种全自动的试验仪大大提高了保护用电流互感器伏安特性试验的正确率和效率, 并降低试验人员的劳动强度。下文介绍全自动试验仪的系统结构和主要环节的原理。

2 全自动试验仪的系统结构

图 2 是电流互感器全自动伏安特性试验仪包括强电部分在内的系统结构原理图。

收稿日期: 2005-10-09; 修回日期: 2005-12-19

基金项目: 浙江省科技计划资助项目(2005C31069)

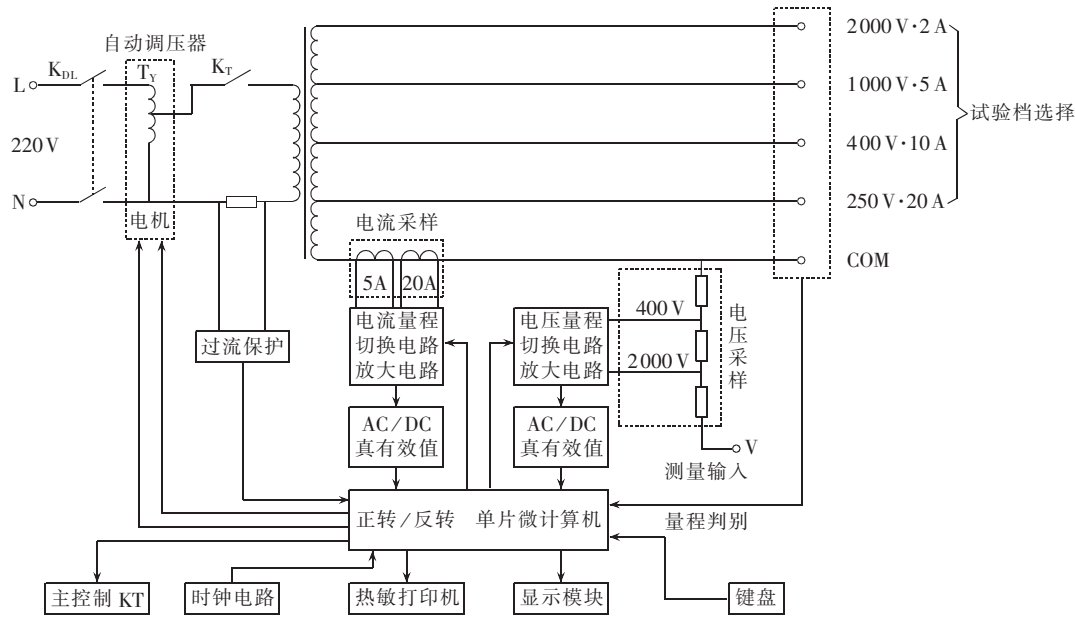


图 2 系统原理图

Fig.2 The block diagram of system principle

自动调压器的正转和反转由可逆直流电机驱动,反转(降压时)取较快的速度;正转(升压时)取快和慢 2 种速度,快速用于退磁和铁芯磁饱和前的试验采样,慢速用于铁芯磁饱和后试验采样。升压变压器次级的各绕组提供试验所需的 4 个试验档的电压、电流输出,各档输出经试验人员接线选定后,系统能通过接线插孔中微动开关的闭合情况自动判别处在哪个试验档。电压采样由电阻分压电路承担,电流采样由 2 个微型穿心精密电流互感器变流后承担。

试验开始前,必要的参数设置通过测试仪的点阵液晶屏给出的汉字选择菜单和 4 个面板按钮进行人机交互。试验进行时,点阵液晶屏随试验电流、电压的变化同步绘出励磁曲线。试验结束后,测试仪所带的微型热敏打印机可输出试验数据、特性曲线和试验时间。测试仪由单片机微计算机控制,2 路 A/D 转换器对电流、电压进行同步采样,采样前置电路消除了模拟开关导通电阻的影响,经数字校准后的测量精度优于 0.5%。电流测量回路的 A/D 转换有 5A 和 20A 的量程,并有 1A,2A,3A,4A,5A,10A,15A,20A 等 8 个电流试验上限,用于不同规格电流互感器试验;电压测量回路的 A/D 转换具有 400V 和 2000V 量程,有 250V,400V,1000V 和 2000V 4 个试验档。电流、电压的 A/D 转换量程能自动切换,电流试验上限则在人机交互时按键设定,试验档由操作人员接线时选定。测试仪带有由 Philips 公司的时钟芯片 PCF 8583 构成的实时时钟电路,方便试验时间的记录。测试仪还带有 2 片共 64 KByte 的 E²PROM 芯片 AT24C256,可失电不丢失地保存 15 次试验的全部采样数据和有关信息,供随时复现试验结果(查阅、打印数据与曲线)。

3 电压、电流测量环节

电压测量环节和电流测量环节的原理是类似的,图 3 给出了系统的电压测量原理图。

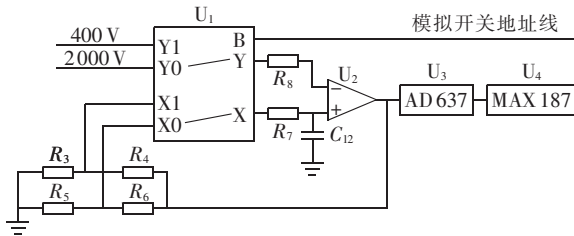


图 3 电压测量环节

Fig.3 The voltage measuring circuit

U₁ 是双模拟开关,其开关 X,Y 的地址切换线 B 由单片机的 1 根 I/O 口线控制,可在 400V 量程和 2000V 量程间切换。众所周知,常用的 CMOS 集成模拟开关并不是理想开关,它接通时一般具有几十欧姆到几百欧姆的导通电阻 R_{on} 。 R_{on} 的值不固定,它随使用电源电压的不同可以相差很大,而且 R_{on} 还受温度影响,当温度上升时, R_{on} 随温度上升而增大。 R_{on} 的存在和变化给在量程切换电路中使用模拟开关带来了麻烦。无论将模拟开关设置在运放的反馈电阻回路,还是输入电阻回路, R_{on} 都将影响测量精度。在图 3 电路中,将 U₂ 运放同相放大电路的电流汇集点移至模拟开关的输入端,即将用于量程切换的模拟开关接入同相放大运放电路电流汇集点的内侧。这样,模拟开关的导通电阻 R_{on} 将被归并入运放的输入电阻,运放本身的高输入阻抗使 R_{on} 可以忽略^[6]。

图 3 中器件 U₃ 是真有效值转换电路 AD 637。在电流互感器的伏安试验中,当铁芯接近饱和时,励磁电压和电流的波形有较为严重的畸变发生^[7]。为

了克服波形畸变对测量精度的影响,电路中先用 AD 637 将被测交流量转换成真有效值后,再送模/数转换器进行模/数转换。AD 637 是美国 AD 公司推出的 RMS/DC(有效值/直流)变换器^[8],它的工作原理是严格地按照 RMS 的定义,通过模拟计算电路得到被测信号的 RMS 值,能计算任何复杂的波形,综合变换精度可达 0.2%。 U_4 是 12bit 串行 A/D 转换器 MAX 187^[9],内含电压基准和采样保持电路,单电源 DIP8 封装,使用十分方便,特别是它的三线串行接口,容易与中央处理单元实现光电隔离。单片机系统通过 1 根 I/O 口线同时拉低 2 个通道 MAX 187 的 CS 片选线,同时启动电压和电流通道的 A/D 转换,实现了真正意义上的实时采样。每次试验采样 1 000 次。电压、电流采样值在供液晶屏实时描绘励磁曲线的同时,还随试验时间、试验编号等信息存入 I²C 串行总线的 E²PROM 24C 256 中,以供即时或日后的数据显示和曲线打印。

为提高试验仪的测量精度,试验仪采用数字校准技术^[10]消除仪器的零值误差,消除由放大环节中的可动元件——电位器引起的长期不稳定性。数字校准一般利用外标准源作为定点输入,采用软件方法实现仪器的零值误差和幅值系数校准,并将得到的校准参数存在非易失存储器中,以用于实时测量中的实时校准。数字校准消除了系统零值误差和部分随机误差对仪器测量精度和性能的影响。

4 人机交互部件

作为人机交互部件,试验仪的点阵液晶屏除了在每步操作中给出汉字的选择菜单以及在试验后给出结果数据外,还在试验仪的自动调压器的升压试验过程中,实时描绘励磁曲线。在菜单中选择打印操作后,可由微型打印机打印出各次试验的结果数据和励磁曲线,以供分析用。

4.1 液晶屏实时曲线绘制

显示液晶屏采用现代公司的 HG 19501 型液晶显示模块。HG 19501 是以 SEIKO EPSON 公司的液晶显示控制芯片 SED 1330 为核心、2 片 8 KByte 的 6264(VRAM)作为显示缓冲器的 192×128 点阵图形式液晶显示模块,其点尺寸(dot size)仅为 0.33 mm×0.33 mm,能极其细腻地显示图形曲线。SED 1330 指令丰富,在单屏显示时可把显示区最多分成 3 个区,2 个文本区和 1 个图形区,它的指令可对单一显示区、2 个显示区或 3 个显示区根据不同逻辑关系进行合成显示,通过合成显示,可实现文本图形混合显示。

在试验仪的设计中,数字和字母采用文本方式,由显示 1 区完成;汉字和曲线采用图形方式,由显示 2 区完成,经合成后混合显示。SED 1330 拥有一个内部字符发生器,具有 160 种 5×7 点阵字体的字符,可在文本方式时显示常用的 ASCII 码字符。SED

1330 在图形方式时,液晶屏上的每个点都有对应的 RAM 地址,192×128 的点阵屏对应于每点行 24 个字节共有 128 点行,对某点进行写“1”或“0”,即控制了该点的显示与否。将要显示的汉字的 16×16 点阵的字模编码存于单片机的程序存储器中,在液晶屏上要显示的位置,逐字节写入字模编码,即可显示对应的汉字。

实时曲线绘点的操作也在图形方式下进行,只是要先用 SED 1330 的读指令读出“绘点”所在的字节地址的数据,然后与“绘点”相或后重新将字节写入原地址,以免丢失已有的“绘点”。试验仪的设计中,取横轴为电流,纵轴为电压。电流互感器的伏安特性决定了励磁曲线的特点:铁芯磁饱和前电压增加快、电流增加慢,铁芯接近饱和时微小的电压增加就带来电流的急剧增加。根据此特点,使试验仪的调压电机在被试电流互感器铁芯饱和前取较快的速度,在饱和后取较慢的速度,以便能在电流急剧增加时获得较多的测试数据。通过判断电压、电流变化率 $dU/dt, dI/dt$ 的相对大小判断铁芯是否已磁饱和。

4.2 特性曲线在对数坐标中的显示与打印

试验仪中特性曲线的点阵液晶屏显示和微型打印机打印,都是以横坐标作为电流轴,纵坐标作为电压轴。由于电流互感器伏安特性曲线的特点是铁芯饱和前电压变化大、电流变化小,铁芯饱和后是电压变化小、电流变化大,所以在普通线性坐标上难于体现出铁芯饱和前电流量的细微变化,见图 4(a)。而用指数作为横坐标的单位刻度值的十进制对数坐标,则十分清晰地描绘了铁芯饱和前那部分的伏安特性曲线,见图 4(b)。

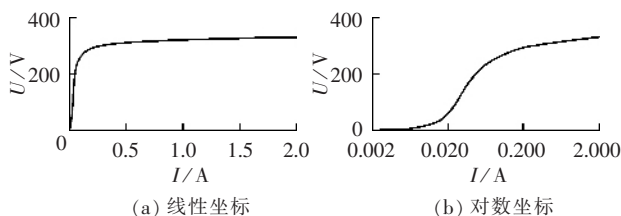


图 4 电流互感器伏安特性曲线图

Fig.4 The volt-ampere characteristic curve of CT

不管是在线性坐标还是对数坐标上描绘曲线,都要将测量数据进行尺度变换。以横坐标为例,线性坐标的尺度变换式为

$$X = px / N \quad (1)$$

式中 x 为被测电流的 A/D 转换值; N 是某个电流试验上限时的 A/D 输出最大值,例如 2 A 时为 2048,4 A 时为 4096; p 为横坐标的最大点数,试验仪的点阵液晶屏上横坐标的最大有效点数为 160,微型打印机输出的横坐标的有效点数为 320,上位机屏幕显示横坐标的有效点数为 960; X 为数据的横坐标点。

对数坐标的尺度变换式为

$$X=\frac{p}{n}\lg\frac{x}{N/10^n}\tag{2}$$

式中 n 是横坐标上指数分度的个数,如图 4(b)中 $n=3$;其余符号的定义同式(1)。

5 结语

研制的电流互感器全自动伏安特性试验仪具有强抗干扰能力,试验现场的电源干扰、空间电磁干扰、火花干扰等均不影响试验的正常进行。试验仪除可以单机全自动工作外,也可通过 RS-232 串行通信受控于上位计算机,组成自动测试系统,数据和曲线可同时在上位机中显示、保存,或连同试验报告一起打印。

后续研制工作将包括电流互感器变比和二次绕组阻抗的自动测试,然后将获得的数据与伏安特性试验数据一起,完成保护用电流互感器 10% 误差曲线的自动绘制。

参考文献:

[1] 国家技术监督局. GB 16847-1997 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S]. 北京:中国标准出版社,1998.

[2] 国家技术监督局. GB 1208-1997 电流互感器 [S]. 北京:中国标准出版社,1998.

[3] 钟师蓉,吴维德. 怎样绘制电流互感器 10% 误差曲线[J]. 四川电力技术,1997(2):19-23.

ZHONG Shi-rong,WU Wei-de. How to draw 10% error curve of current transformers[J]. *Sichuan Power Technology*,1997(2):19-23.

[4] 曲双燕. 现场校核电流互感器的励磁特性和异常分析[J]. 湖北水力发电,2003(2):60-63.

QU Shuang-yan. Checking on exciting characteristics of

CT in-situ & analyzing on its abnormal phenomena[J]. *Hubei Water Power*,2003(2):60-63.

[5] 程玉进,达来,杨煜普,等. 基于 LabView 的电流互感器励磁特性自动测量系统[J]. 微型电脑应用,2004,20(10):15-18.

CHENG Yu-jin,DA Lai,YANG Yu-pu,et al. An automatic test system on the excitation feature of current transformers on LabView[J]. *Microcomputer Applications*,2004,20(10):15-18.

[6] 潘文诚. 精密高效的交流采样前置电路[J]. 仪表技术,1996(4):18-20.

PAN Wen-cheng. A precision high efficiency pre-stage circuit for AC sampling[J]. *Instrumentation Technology*,1996(4):18-20.

[7] CORNEY,ANDREW C. Simple absolute method for current transformer calibration[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*,2001,50(2):278-281.

[8] Analog Devices Inc. AD 637 datasheet[DB/OL]. [2005-04-15]. <http://www.analog.com>.

[9] Maxim Inc. MAX 187 Datasheet[DB/OL]. [2005-04-15]. <http://www.maxim-ic.com>.

[10] 潘文诚. 智能仪器中数字校准技术的研究[J]. 计量学报,2006,27(1):57-60.

PAN Wen-cheng. The research of digital calibration in intelligent instruments[J]. *Acta Metrologica Sinica*,2006,27(1):57-60.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

潘文诚(1952-),男,江苏宝应人,教授级高级工程师,从事信号处理、智能化测控技术的教学与研究工作(E-mail: pwch@sohu.com);

唐根宝(1966-),男,浙江湖州人,工程师,从事电力试验仪器的研发工作。

Development of automatic volt-ampere characteristic tester for current transformer

PAN Wen-cheng¹,TANG Gen-bao²

(1. Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310012, China;
2. Huzhou Aide Electric Equipment Company, Huzhou 313023, China)

Abstract: The development of an automatic volt-ampere characteristic tester is introduced. Controlled by MCU, the electrical part and the electronic part of the tester work in phase. The inner auto-transformer is driven by servomotor; with different speeds in voltage rising and falling. The voltage and current are measured and converted simultaneously through dual channels and A/D converters to reach the real time performance. The RMS/DC transform before sampling avoids the influence of voltage/current waveform distortion on measurements, which is caused by the iron core saturation of transformer. The proper disposition of the on-resistance of analog switch and the application of digital calibration technique improve the veracity of tester. The precision is better than 0.5% all over the scale. Using the skill of scale transform, the characteristic curve can be displayed and printed in logarithmic coordinates to show the tiny change of current before saturation.

This project is supported by the Technology Program of Zhejiang Province(2005C31069).

Key words: current transformer; volt-ampere characteristic test; saturation curve; logarithmic coordinates; scale