

一种新型介质损耗 $\tan \delta$ 测量系统研究

李怀龙, 孟志强, 王同业, 陈燕东

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了提高测量介质损耗和准确度, 对介质损耗测量中存在的误差进行了研究, 介绍过零点时差法测量介质损耗的原理。详细讨论了过零点测量时失调与温飘误差和电网波动误差的形成机理, 针对过零点时差法测量 $\tan \delta$ 时存在的主要误差——过零比较器的失调与温飘误差和电网波动产生的误差, 设计了一种基于 AT89C51 单片机、采用双向过零平均鉴相技术和锁相技术的介质损耗 $\tan \delta$ 测量系统, 给出该测量系统的详细工作过程, 得出了样机对试品的测量结果, 对试品测量结果分析后证明该系统可有效消除过零点失调与温飘误差和电网波动误差的影响。

关键词: 介质损耗; 平均鉴相; 单片机; 双向过零; 失调

中图分类号: TM 934

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)11-0055-03

0 引言

为了提高高压电气设备的运行可靠性, 减少因故障及事故引起的经济损失, 必须定期进行电气绝缘性能的预防性实验测量。介质损耗角正切 $\tan \delta$ 对绝缘的劣化和故障有较高的灵敏度, 因此, 绝缘性预防实验主要是测量 $\tan \delta$ 。但是, 高压电气设备的介质损耗具有高电压、微电流、小角度的特点^[1], 对测量的精度要求高, 有些绝缘介质损耗因数的测量分辨率要求达到 0.01%, 且 $\tan \delta$ 测量易受各种形式的干扰, 要精确、稳定地测量 $\tan \delta$ 存在较大的难度。

$\tan \delta$ 的测量主要采用传统的电桥测量仪, 典型代表为 QS1 型西林电桥^[2], 该方法测试过程复杂、操作量大、抗干扰能力差、易受人为因素影响。因此, $\tan \delta$ 的测量新技术、新方法是近年来研究的重点。随着电子技术和微计算机技术的飞速发展, 以过零点时差法为代表的数字式介损测量技术逐步走向成熟。过零点时差法的关键是获得准确的过零点, 否则造成时差测量不准确。因此, 该方法对过零点要求很高^[3], 但过零比较器的失调与温飘和电网畸变均会影响过零点, 使 $\tan \delta$ 测量存在较大的误差^[3-4]。

本文通过对过零点时差法测量误差的分析, 采用双向过零平均鉴相技术和锁相技术, 以高性能的 AT89C51 单片机为核心, 研究与设计了一种新型介损 $\tan \delta$ 单片机测量系统, 测试结果表明新系统能有效地减少测量误差、提高 $\tan \delta$ 的测量精度。

1 过零点时差法测量原理

通常电气绝缘设备可以用无损电容 C_x 和电阻 R_x 串并联电路的等效模型表示, 如图 1 所示, 当设备外加工频正弦高电压 u 时, 产生工频微电流 i 。 i 滞后 u 的相位角 φ 为绝缘介质产生的相位滞后。

过零点时差法通过过零比较器, 把电压 u 和电流 i 的检测信号 u_u, u_i 分别转化为方波信号 u_0, u_{i0} , 用数字时间测量技术测量过零点时刻 t_1, t_2 之间的相位差为

$$\varphi = 2\pi(t_1 - t_2)/T = 2\pi\Delta t/T \quad (1)$$

式中 T 为工频周期; Δt 由高频脉冲计数产生。

介质损耗角

$$\delta = \pi/2 - \varphi = \pi/2 - 2\pi\Delta t/T \quad (2)$$

相应波形如图 2 所示。用计数器对频率为 f 的高频脉冲计数, 若 Δt 时间内的高频脉冲数为 n , 则

$$\Delta t = n/f \quad (3)$$

显然, δ 的分辨率为 $2\pi/Tf$, 在电源周期 T 和 u_u, u_i 过零点准确的条件下, 只要计数脉冲频率 f 够高, 就可以保证介质损耗测量对分辨率的要求。

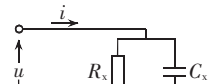


图 1 电气设备介损等效模型

Fig.1 Equivalent model of dielectric loss of electric equipment

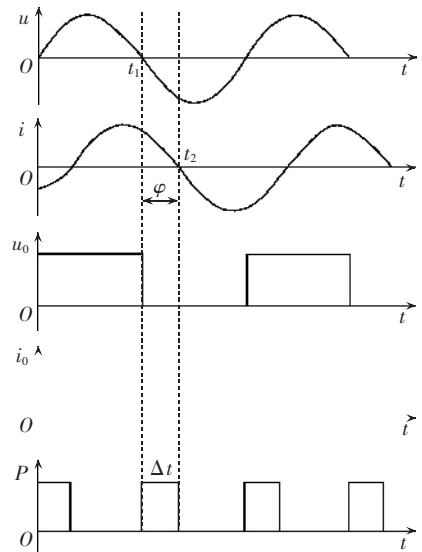


图 2 过零点时差法测量原理

Fig.2 Measuring principle of crossing-zero time difference method

2 比较器失调和飘移误差及双向过零平均鉴相技术

由测量原理可知;实现高精度 $\tan\delta$ 测量的条件是 u 和 i 的过零点必须准确。但是,过零点易受电网畸变、比较器失调与飘移和电网频率波动的影响,产生较大的测量误差。其中,比较器失调与飘移影响最严重^[5-7]。

2.1 比较器失调和漂移的影响

图 3 说明了比较器失调和飘移对过零点的影响。设 2 路比较器过零点电平飘移分别为 U_{01} 和 U_{02} , 正弦信号 u 和 u_i 的幅值为 U_u 和 U_i , φ_F 为测量下降沿过零点得到的相位差, φ_R 为测量上升沿过零点得到的相位差, φ 为真实的相位差, U_{01} 和 U_{02} 对过零点的影响可能存在 4 种情况。

a. $U_{01}=0, U_{02}=0$ 时, 有

$$\varphi_F = \varphi_R = \varphi \tag{4}$$

b. $U_{01}\neq 0, U_{02}=0$ 时, 有

$$\begin{aligned} \varphi_F &= \varphi - \arcsin(U_{01}/U_u) \\ \varphi_R &= \varphi + \arcsin(U_{01}/U_u) \end{aligned} \tag{5}$$

c. $U_{01}=0, U_{02}\neq 0$ 时, 有

$$\begin{aligned} \varphi_R &= \varphi - \arcsin(U_{02}/U_i) \\ \varphi_F &= \varphi + \arcsin(U_{02}/U_i) \end{aligned} \tag{6}$$

d. $U_{01}\neq 0, U_{02}\neq 0$ 时, 有

$$\begin{aligned} \varphi_F &= \varphi - \arcsin(U_{01}/U_u) + \arcsin(U_{02}/U_i) \\ \varphi_R &= \varphi + \arcsin(U_{01}/U_u) - \arcsin(U_{02}/U_i) \end{aligned} \tag{7}$$

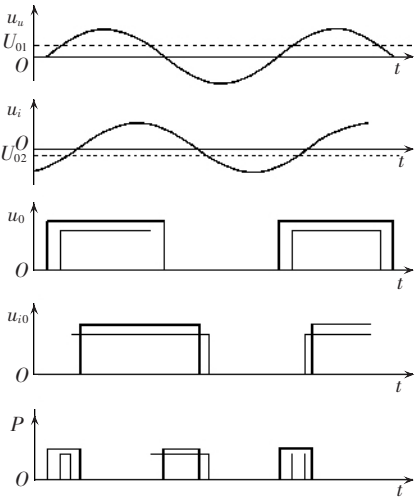


图 3 过零点漂移的影响

Fig.3 Influence of excursion of crossing-zero point

2.2 双向过零平均鉴相技术

显然,不管是采用上升沿鉴相还是下降沿鉴相,失调与温飘都产生误差。由式(4)~(7)可知,若在 u 的一个周期同时测量 φ_F 和 φ_R ,则无论 U_{01} 和 U_{02} 在何种情况下,平均相位差 $(\varphi_F + \varphi_R)/2$ 都非常接近真实相位差 φ ,实现失调和飘移误差的消除。这一测量方法可称为双向过零平均鉴相技术。

3 新型测量系统结构与实现

新型 $\tan\delta$ 测量系统功能结构如图 4 所示。

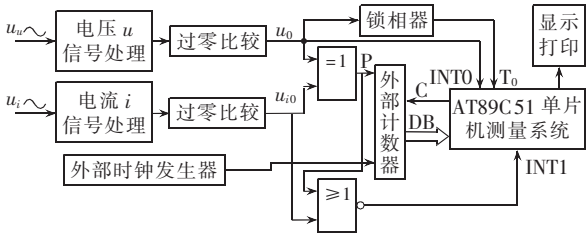


图 4 测量系统框图

Fig.4 Block diagram of measuring system

因 u_u 和 u_i 伴随着很多干扰信号及谐波信号,用信号处理通道完成对 u_u 和 u_i 的放大和滤波,消除噪声干扰和电网畸变对过零点的影响,过零比较电路获得相应的方波信号 u_0 和 u_{i0} ,由异或门把方波信号经过异或后得到 2 路信号的相位差信号 P,其中 P 信号的宽度对应电压 u 和电流 i 的相位差。由式(3)可知,介质损耗的测量精度和分辨率与计数脉冲频率 f 有关,当 f 越大时,分辨率就越高,测量结果就越精确,因 AT89C51 单片机本身的计数器受其时钟信号频率限制,系统采用外部计数器计数,同时使用外部高频脉冲 f 满足测量分辨率的要求^[8-15]。

为实现双向过零平均鉴相,以 u_0 方波信号为同步脉冲作 AT89C51 的外部中断 0 输入信号 INT0,由 u_0 上升沿触发 INT0 中断,AT89C51 在 INT0 中断服务程序中启动外部计数器,以方波信号 P 作为门控信号启动计数,显然,在 u_u 的一个周期内,外部计数器记录了 φ_F 和 φ_R 对应的外部高频时钟 T_c 的脉冲数之和。同时,由图 3 可知, u_{i0} 和 P 经或非门后产生一个上跳,此时外部计数器在 P 门控下已停止计数,此信号作 AT89C51 的外部中断 1 的输入信号 INT1,使 AT89C51 在 INT1 中断服务程序中读取外部计数器的计数值,计算移相角 φ 和介损 $\tan\delta$,并对中断过程的指令进行延时予以补偿计算。

用锁相电路对 u_0 进行锁相跟踪,并作为 AT89C51 定时器 T_0 的输入,由内部定时器 T_0 对电网半周期 $T/2$ 进行测量。 T_0 测得的 $T/2$ 作为实际电网频率用于计算介质损耗,可消除电网波动的影响。表 1 为新型介损 $\tan\delta$ 单片机测量系统对被测试品进行测试的统计结果,达到并超过了有关测试标准的要求,比电桥测量方法和原有使用过零点时差法的单片机测量系统测量精度提高了 5% 以上。

表 1 介质损耗仪试验结果

Tab.1 Measuring results of dielectric loss tester

试品标定值	实际测量值	相对误差/%
0.07	0.066	-5.7
0.50	0.517	3.4
1.20	1.231	2.5
2.50	2.544	1.7

4 结语

采用双向过零平均鉴相技术和锁相技术,用外部计数器测量上升沿相位差和下降沿相位差的总和,可有效地减少或消除比较器失调与飘移以及电网波动产生的测量误差,提高绝缘介质损耗 $\tan\delta$ 的测量精度。对被测试品的测量结果证明了双向过零平均鉴相技术的有效性和新型 $\tan\delta$ 单片机测量系统的实用价值。

参考文献:

- [1] 王超,吕小静,黎文安. 现代介质损耗测量技术分析[J]. 中国仪器仪表,2004(1):1-3.
WANG Chao,LÜ Xiao-jing,LI Wen-an. Analysis of modern dielectric loss measurement technology [J]. China Instrumentation,2004(1):1-3.
- [2] 陈鹏云,贺景亮,赵生和,等. 绝缘介质损耗因数在线监测的研究[J]. 高电压技术,1994,20(4):36-38.
CHEN Peng-yun,HE Jing-liang,ZHAO Sheng-he,et al. A study of on-line monitoring measurement of $\tan\delta$ [J]. High Voltage Engineering,1994,20(4):36-38.
- [3] 吕延锋,钟连宏,王建华,等. 电气设备绝缘介质损耗测量方法的研究[J]. 高电压技术,2000,26(5):38-40,42.
LÜ Yan-feng,ZHONG Lian-hong,WANG Jian-hua,et al. Study on the dielectric loss measurement of power equipment [J]. High Voltage Engineering,2000,26(5):38-40,42.
- [4] 马为民,吴维韩. 电源谐波对介质损耗测量的影响[J]. 清华大学学报:自然科学版,1997,37(1):95-98.
MA Wei-min,WU Wei-han. Effects of harmonic components of power supply on the dielectric loss measurement [J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1997,37(1):95-98.
- [5] 刘小波. 电气设备介质损耗测量误差的分析与处理[J]. 广东工业大学学报,2005,22(1):92-94.
LIU Xiao-bo. Analysis and process on error of dielectric loss measure in electrical equipment[J]. Journal of Guangdong University of Technology,2005,22(1):92-94.
- [6] 唐兴祚. 高电压技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,1996.
- [7] 胡雁,彭楚武,崔春来. 新型全自动绝缘油介质损耗数字测量仪[J]. 绝缘材料,2004(2):38-40.
HU Yan,PENG Chu-wu,CUI Chun-lai. A new type of automatic digital tester for insulating oil dielectric loss [J]. Insulating Materials,2004(2):38-40.
- [8] 林国庆,万蕾迎. 电子移相调幅器在数字式介质损耗测量中的应用[J]. 电测与仪表,2002,39(7):30-33.
LIN Guo-qing,WAN Lei-ying. Application of electronic phase shift and amplitude modulation in digital dielectric loss measurement system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2002,39(7):30-33.
- [9] 林国庆. 介质损耗数字化测量方法研究[J]. 高电压技术,2002,28(2):3-4,7.
LIN Guo-qing. The investigation of a digital dielectric loss measurement method [J]. High Voltage Engineering,2002,28(2):3-4,7.
- [10] 文康珍,黎文安,何斌. 介质损耗变频测量仪原理与实现[J]. 工业仪表与自动化装置,2003(3):36-38,62.
WEN Kang-zhen,LI Wen-an,HE Bin. The principle of a frequency conversion instrument for dielectric loss measurement [J]. Industrial Instrumentation & Automation,2003(3):36-38,62.
- [11] 祁硕,张菊鹏,吴集光,等. 介质损耗因数的自动数字测量系统[J]. 电子技术应用,2001(2):34-35.
QI Shuo,ZHANG Ju-peng,WU Ji-guang,et al. The automatic digital measuring system of the dielectric dissipation factor loss tangent [J]. Application of Electronic Technique,2001(2):34-35.
- [12] 王维博,吴自恒,王恕恒. 绝缘介质损耗在线测量系统的设计[J]. 西华大学学报:自然科学版,2005,24(6):60-62.
WANG Wei-bo,WU Zi-heng,WANG Shu-heng. Design of on-line measurement system for dielectric loss [J]. Journal of Xihua University:Natural Science,2005,24(6):60-62.
- [13] 丁远杰. 单片机原理及应用[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,1999.
- [14] 康华光. 电子技术基础:模拟部分、数字部分[M]. 3版. 北京:高等教育出版社,1992.
- [15] 《实用电子电路手册》编写组. 实用电子电路手册:模拟部分[M]. 北京:高等教育出版社,1995.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

李怀龙(1982-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,研究方向为现代仪器与智能化信息处理(E-mail:hlhcxh1120@126.com);

孟志强(1964-),男,湖南益阳人,副教授,博士,研究方向为电力电子、测控技术、自动化;

王同业(1975-),男,山东蓬莱人,硕士研究生,研究方向为测控技术;

陈燕东(1979-),男,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为测控技术。

Measuring system for dielectric loss $\tan\delta$

LI Huai-long,MENG Zhi-qiang,WANG Tong-ye,CHEN Yan-dong

(College of Electrical and Information Engineering,Changsha 410082,China)

Abstract: To improve the accuracy of dielectric loss measurement,measurement errors of the dielectric loss are studied,and the measuring principle of crossing-zero time difference method is introduced. The generating mechanism of maladjustment and temperature excursion errors of crossing-zero measurement and power network undulation is discussed. To avoid main errors in measuring the dielectric loss $\tan\delta$,caused by maladjustment and temperature excursion errors of crossing-zero comparator and power network undulation,a new measuring system based on AT 89C 51 micro-controller is presented,which uses bidirectional crossing-zero mean phase demodulation and phase-locked technology to eliminate the maladjustment and excursion errors and frequency tracking to reduce error induced from the power network undulation. The operating process is described in detail and measurements of a prototype achieved. The analysis shows its effectiveness.

Key words: dielectric loss; mean phase demodulation; bidirectional crossing-zero; maladjustment