

# 测量非正弦波电压误差的分析与修正

雷 天 友

(计算机及自动化系)

**提 要:** 利用DA—16型毫伏表测量非正弦电压——尖顶波电压时,由谐波引起的测量误差特别显著。本文对此进行了分析,并提出了修正误差方法,给出了尖顶波电压的波形误差公式,较好地解决了这一实际问题。

**关键词:** DA—16型毫伏表,非正弦波电压,谐波

DA—16型毫伏表(本文以下简称DA—16表)具有许多优点,被广泛用于工厂、实验室进行交流电压测量。实验结果表明:当被测电压是纯正弦波时,DA—16表的测量精度一般较好,但是当被测电压为非正弦波时,其测量误差非常显著,甚至会导致所得结果和理论值相矛盾。如何进行误差分析,修正测量数值,对工程技术人员十分重要。本文从实际出发,对这一问题进行了详细的理论分析,并给出了尖顶波电压的波形误差公式及修正方法。

## 1 问题的提出

在对称三相正弦电路中,线电压的有效值是相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍,而在非正弦电路中,线电压有效值应小于相电压有效的值 $\sqrt{3}$ 倍<sup>[1]</sup>。如图1所示,铁磁三倍器电路,当原边接一对称三相正弦电压时,由于铁芯的非线性作用,付边绕组的相电压成为非正弦波,则其线电压不含三次及三次倍数的谐波<sup>[2][3]</sup>。其付边电压波形如图2所示:

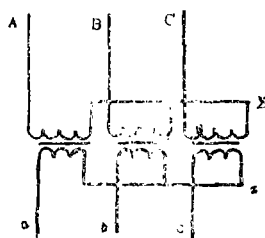
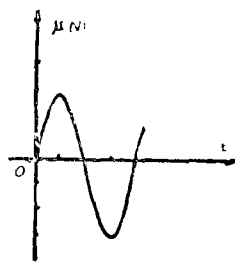
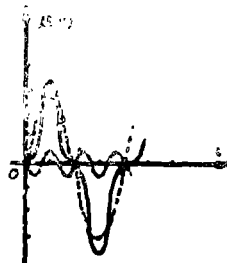


图1 电路图



(a) 线电压



(b) 相电压

图2 输出电压波形

在教学实验中,我们利用图1所示电路来验证式

$$U_l < \sqrt{3} U_{ph} \quad (1)$$

的正确性。用DA—16表测量电压,测量结果见表1。

收到日期: 1987. 09. 12.

电 压 次 数	$U_{.x}$	$U_{bx}$	$U_{.x}$	$U_{.b}$	$U_{.c}$	$U_{.b}$
1	6.30	6.30	6.50	12.5	12.2	12.5
2	6.20	6.20	6.50	12.0	12.1	12.2
3	6.40	6.20	6.60	12.5	12.5	12.8
取值	6.20			12.0		
$\sqrt{3} U_{ph}$	$\sqrt{3} \times 6.20 = 10.74$					
结 果	$U_1 = 12.0 > \sqrt{3} U_{ph} = 10.74$					

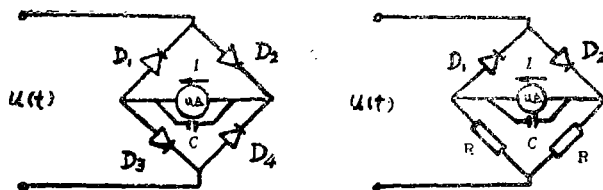
注：所选取值为最优值

上表结果表明：实验结论与理论相矛盾，即得到 $U_1 > \sqrt{3} U_{Ph}$ 的错误结论。

## 2 原因分析及修正方法

DA—16表内部有一个AC/DC变换器——全波平均值检波器[6]，如图3所示，它是DA—16表进行交流电压测量的关键部件。测量时，被测交流电压首先经AC/DC变换器变为直流电流，然后驱动直流电流表指针转动，在表盘上指示出读数[4][5]。

设被测电压为 $u(t)$ ，则流过电表的正向电流平均值为[4]。



(a)基本电路

(b)实际电路

图3 AC/DC变换器

$$\begin{aligned} \overline{I} &= \int_0^T \frac{|u(t)|}{2R_d + r_m} dt \\ &= \frac{\overline{U}}{2R_d + r_m} \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $R_d$ ——二极管正向电阻

$r_m$ ——电表内阻

由式(2)知：平均电流 $\overline{I}$ 正比于 $u(t)$ 的平均值 $\overline{U}$ ，而与 $u(t)$ 的波形无关。虽然DA—16表是平均值响应，但考虑到正弦波电压应用的普遍性，同时又考虑到有效值的实际意义。因此，DA—16表仍以正弦电压有效值进行刻度。即

$$\alpha = U_{\infty} = K_F \overline{U} \quad (3)$$

$\alpha$ ——电压表读数

$K_{F\infty}$ ——正弦波的波形因数

$\bar{U}$ ——电压表实际指示的被测电压平均值

也就是, 只有当被测电压是正弦波时, DA—16表的读数才为被测电压的有效值。

$$\alpha = U_{\infty} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \bar{U} = 1.11\bar{U} \quad (4)$$

当被测电压是尖顶波时, 如图2(b)所示, 其读数则无直接的物理意义, 只有把读数乘以 $1/K_{F\infty}$ , 才为尖顶波电压的平均值。如果把DA—16表的读数误认为是尖顶波的有效值, 则推出的结论必然会出现错误。

为把尖顶波电压的平均值换算成有效值, 要进行波形误差修正。定义: 交流电压的有效值与平均值之比称为波形因数[4]。

$$K_F = \frac{U}{\bar{U}} \quad (5)$$

我们测得尖顶波(如图2(b)所示)的波形因数 $K_F = 1.362$ , 则尖顶波电压有效值为:

$$U' = \frac{K_F}{K_{F\infty}} \cdot \alpha = \frac{1.362}{1.11} \times 6.20 = 7.608 \quad (6)$$

再用 $U' = 7.608$ 来验证式(1), 则不等式

$$U_I = 12.0 < \sqrt{3} U' = 13.18$$

显然成立。

因此由波形引起的误差

$$\frac{\Delta U}{\bar{U}} = 1 - \frac{K_F}{K_{F\infty}} = -0.2270 = -22.7\% \quad (7)$$

### 3 DA—16表对波形响应及波形误差公差

以上, 本文对由谐波引起DA—16表的误差进行了分析计算, 并进行了误差修正。下面, 本文将再从理论上来验证以上分析的正确性。

首先, 假设被测电压 $u_x(t)$ 为任意波形, 它含有各次谐波,  $u_x(t)$ 可用下式表示[5]。

$$U_x(t) = U_{m1} \sin \theta + \sum_{i=2}^n U_{mi} \sin(i\theta + \phi_i) \quad (8)$$

式中:  $\theta = \omega t$

$U_{mi}$ ——第 $i$ 次谐波电压最大值

当被测电压只含有基波和三次谐波时, 则其平均值为:

$$\bar{U}_x = \frac{1}{T} \int_0^T |u_x(t)| dt = \frac{2U_{m1}}{\pi} \left(1 - \frac{K_3}{3}\right) \quad (9)$$

式中 
$$K_3 = \frac{U_{m3}}{U_{m1}}$$

如果把  $u_x(t)$  当作正弦波电压, 根据式(4), 则尖顶波电压的读数为:

$$\alpha = U_x = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \overline{U_x} \quad (10)$$

但实际上,  $u_x(t)$  是非正弦波——尖顶波, 其有效值应为:

$$U' = \sqrt{U_1^2 + U_3^2} = \sqrt{\frac{1+K_3^2}{2}} \cdot U_{m1} \quad (11)$$

则波形误差为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U}{U} &= \frac{U_x - U'}{U'} \\ &= \frac{1}{\sqrt{1+K_3^2}} \left(1 - \frac{K_3}{3}\right) - 1 \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $K_3$  也称为正弦波的失真度  $v$ , 其值可由实验测得, 我们测得  $K_3 = 0.4285$

$$\therefore \left(\frac{\Delta U}{U}\right) = \frac{1}{\sqrt{1+0.4285^2}} \left(1 - \frac{0.4285}{3}\right) - 1 = -21.2\% \quad (13)$$

比较(13)和(7)两式, 二者结果基本一致。

#### 4 结 论

在利用DA—16表测量非正弦电压时, 对其读数必须要进行换算。当被测电压确定以后, 基波和各次谐波的幅值及之间的相位也就相应确定, 其波形误差则为一系统误差。这时, 可利用本文分析方法进行波形修正。这一结论对其他检波式交流电压表测量非正弦波电压亦适用。

本文给出的公式(9)、(11)、(12)、(13)能精确地分析本文提出的问题。至于利用DA—16表测量包含各次谐波的非正弦电压, 其误差分析及修正方法将另文给出。

#### 参 考 文 献

- [1] 邱关源 《电路》(修订本)
- [2] 郑州工学院电机系电路组编《电路实验指导书》
- [3] 夏承铨 《非线性电路》 人民邮电出版社
- [4] [美]B.M奥列弗, J.M卡奇, 《电子测量和仪器》 科学出版社
- [5] 蒋焕文, 孙续 《电子测量》 计量出版社
- [6] 上海无线电仪表厂DA—16型晶体管毫伏表技术说明书,