

# 电磁式电压互感器误差矢量分析法

穆小星

(江苏省电力公司电力科学研究院 国家电网公司电能计量重点实验室,江苏 南京 211103)

**摘要:**针对目前电压互感器(TV)相关参考书中电磁式TV误差模型向量几何图建模方法存在的缺陷问题,文中提出了一种基于矢量代数的误差建模方法,并对电磁式TV误差进行了系统、全面的分析,对电磁式TV误差的计算及电能计量影响进行了阐述,从而使广大电能计量技术人员对电磁式TV误差理论有了更清晰地了解。

**关键词:**TV;比差;角差;阻抗角;空载误差;负载误差;矢量分析

中图分类号:TM 744

文献标志码:A

文章编号:1009-0665(2014)06-0030-04

电磁式电压互感器(TV)<sup>[1]</sup>有其经典的电路模型、误差数学模型,但在其相关参考书中,相应误差的数学建模、分析都是借助于参数向量图通过几何分析法进行的。但通过分析后,我们认为向量图几何分析法在理论上有一定缺陷,误差建模不清晰,计算公式推导非常牵强,严谨性、逻辑性不强。这是因为几何分析法很难处理代数符号及数学四则运算问题,不能形成逻辑上的推理、演绎,存在先天不足。此外这些文献中对误差的分析不够深入、全面,结合电能计量实际进行应用分析的内容则更少,甚至还有错误内容。本文通过矢量数学分析方法建立电磁式TV误差数学模型,并进行相应理论、应用分析。

## 1 电磁式TV电路模型

经典的电磁式电压互感器/变压器电路模型图(将TV二次回路折算到一次回路)如图1所示。

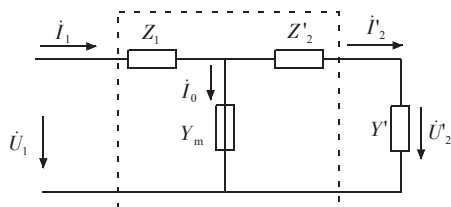


图1 TV等效电路图

图1中, $Z_1, Z_2$ 分别为一次、二次线圈阻抗, $Z_1 = R_1 + jX_1, Z_2 = R_2 + jX_2; Z'_1$ 为 $Z_1$ 折算到二次的等效阻抗, $Z'_1 = Z_1/K_n^2; Z'_2$ 为 $Z_2$ 折算到一次的等效线圈阻抗, $Z'_2 = K_n^2 Z_2; Y, Y'$ 为二次负载导纳及折算到一次导纳, $Y' = Y'/K_n^2; Y_m$ 为励磁导纳。

## 2 电磁式TV误差数学模型

按减极性原则,电压、电流参考方向定义按图1所示,依据电路理论<sup>[2]</sup>及矢量数学表示方法,则有:

$$\Delta U = U'_2 - U_1 = -I_1 Z_1 - I'_2 Z'_2 = -(I_0 + I'_2) Z_1 - I'_2 Z'_2 = -I_0 Z_1 - I'_2 (Z_1 + Z'_2) \quad (1)$$

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\Delta U}{\dot{U}_1} = -\frac{I_0 Z_1}{\dot{U}_1} - \frac{I'_2 (Z_1 + Z'_2)}{\dot{U}_1} = -Y_m Z_1 - Y' (Z_1 + Z'_2) = -Y_m Z_1 - Y (Z'_1 + Z'_2) = \tilde{\varepsilon}_0 + \tilde{\varepsilon}_f \quad (2)$$

$$\tilde{\varepsilon}_0 = -Y_m Z_1 = -|Y_m| \angle -(90^\circ - \Psi) \cdot |Z_1| \angle \Phi_1 = -|Y_m| \cdot |Z_1| \angle (\Phi_1 + \Psi - 90^\circ) = -|Y_m| \cdot |Z_1|$$

$$[\sin(\Psi + \Phi_1) - j \cos(\Psi + \Phi_1)] = -|Y_m| \cdot |Z_1| \sin(\Psi + \Phi_1) + j |Y_m| \cdot |Z_1| \cos(\Psi + \Phi_1) = f_0 + j \delta_0 \quad (3)$$

$$f_0 = -|Y_m| \cdot |Z_1| \sin(\Psi + \Phi_1) = -|Y_m| [R_1 \sin \Psi - x_1 \cos \Psi] \quad (4)$$

$$\delta_0 = |Y_m| \cdot |Z_1| \cos(\Psi + \Phi_1) = |Y_m| [R_1 \cos \Psi - x_1 \sin \Psi] \quad (5)$$

$$\tilde{\varepsilon}_f = -Y (Z'_1 + Z'_2) = -|Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \angle (-\Phi + \Phi_2) = -|Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \cos(\Phi - \Phi_2) +$$

$$j |Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \sin(\Phi - \Phi_2) = f_f + j \delta_f \quad (6)$$

$$f_f = -|Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \cos(\Phi - \Phi_2) = -|Y| [(R'_1 + R_2) \cos \Phi + (x'_1 + x_2) \sin \Phi] \quad (7)$$

$$\delta_f = |Y| \cdot |Z'_1 + Z'_2| \sin(\Phi - \Phi_2) = |Y| [(R'_1 + R_2) \sin \Phi + (x'_1 + x_2) \cos \Phi] \quad (8)$$

$$f = f_0 + f_f \quad (9)$$

$$\delta = \delta_0 + \delta_f \quad (10)$$

式(1—10)中: $\tilde{\varepsilon}_0, \tilde{\varepsilon}_f$ 分别为TV(复)误差; $\Phi_1, \Phi_2$ 分别为一次绕组、二次端折算绕组阻抗角(感性, $>0$ ),

$\Phi_1 = \arctan \frac{x_1}{R_1}, \Phi_2 = \arctan \frac{x_1/K_n^2 + x_2}{R'_1/K_n^2 + R_2}; \Psi$ 为TV铁心磁

滞角(感性, $>0$ ); $\Phi$ 为TV二次负载阻抗角(感性或容性); $f_0, \delta_0$ 分别为TV空载比差、角差; $f_f, \delta_f$ 分别为TV负载比差、角差。

以上即TV误差的矢量(代数)分析法,其结论与几何分析法等同。但它没有传统分析法中复杂的(向量)几

何图;公式中代数符号依据电工理论和数学推理自然生成,而非几何分析法中靠“人工”处理(在一个等式前莫名加一个“-”);公式推导完全依据矢量代数运算法则,而非几何分析法中牵强地制造相等式。

### 3 电磁式 TV 误差特性分析

(1) 电磁式 TV 误差由两部分组成 $\tilde{\varepsilon}_0, \tilde{\varepsilon}_f$ ;  $\tilde{\varepsilon}_0$  为空载时误差(零负载误差),与二次负载无关,仅与一次电压(励磁导纳)有关; $\tilde{\varepsilon}_f$  为负载误差,仅与二次负载有关,与一次工作电压无关。

(2) 空载误差、负载误差都是复数(矢量)误差,其实部即复数误差的同相分量,称比差;虚部即复数误差的正交分量,称角差。

(3) 式(3)表明,所有阻抗角不影响误差(误差矢量模)的大小,只影响矢量误差的角度,通过改变二次负载阻抗(功率因数)角的大小即可改变误差的比差(同相分量)、角差(正交分量)分配比例。阻抗角大,比差小,角差大;阻抗角小,比差大,角差小。

(4) 空载误差为固有误差,由于 $Y_m$ 不是常数,且是一次电压的函数,故空载误差也是一次电压的函数;此外,由于 $Y_m$ 非线性,故空载误差随一次电压的变化也为非线性,呈现为双曲线型,如图2所示。

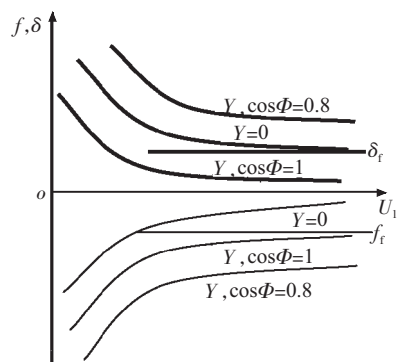


图2 电磁式 TV 误差—电压曲线(非补偿)

(5) 电磁式 TV 误差是一次电压、二次负载及功率因数角的函数,但由于 TV 一般只工作在额定电压这一点,可认为实际误差与电压无关,仅是二次绕组外接负载的函数。

(6) 按匝数比等于额定电压比设计的电磁式 TV 的空载比差值永远为负,空载角差一般为正。

(7) 对任一电压、固定阻抗角,其比差、角差分别是二次负载阻抗值的一次线性函数:

$$\begin{cases} f = f_0 + k_1 |Y| \\ \delta = \delta_0 + k_2 |Y| \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $k_1 = -|Z'_1 + Z_2| \cos(\Phi - \Phi_2)$ ;  $k_2 = |Z'_1 + Z_2| \sin(\Phi - \Phi_2)$ 。

(8) 对任一电压、阻抗(值),仅二次负载阻抗角(功率因数)变化时,比差、角差分别是二次负载阻抗角的正余弦函数:

$$\begin{cases} f_f = -A \cos(\Phi - \Phi_2) \\ \delta_f = A \cos(\Phi - \Phi_2) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $A = |Y| \cdot |Z'_1 + Z_2|$ 。

### 4 电磁式 TV 误差影响量分析

对于现场应用的电磁式 TV,其本身参数、性能在出厂时,已经固定,其现场运行又只工作在额定电压附近,在忽略环境影响条件下,可以认为 TV 误差仅是二次绕组外接负载的函数。对其应用误差的分析,具有一定的实际意义。

#### 4.1 阻抗大小对误差影响(阻抗角不变)

由式(11)可知,比差、角差都是导纳值的一次线性函数,误差图形均为直线,如图3所示。图中粗曲线为角差,细的曲线为比差。

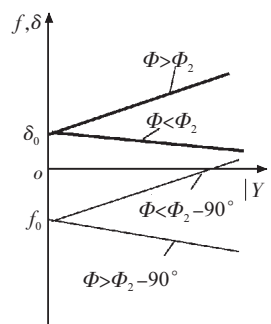


图3 电磁式 TV 误差—负载曲线(非补偿)

从图3可见,依二次负载阻抗角的不同,误差直线向不同方向发散。阻抗角决定了斜率的正负(直线的辐射方向)及大小,空载误差值决定了直线的起点。当二次负载为感性时,比差随导纳值增大(阻抗值减小)而增大,角差则可能增大( $\Phi > \Phi_2$ ),也可能不变( $\Phi = \Phi_2$ )或减小( $\Phi < \Phi_2$ );当二次负载为容性时,其情况可能与感性负载正好相反。

#### 4.2 二次负载阻抗(功率因数)角对负载误差影响

由式(12)可知,比差、角差是二次负载阻抗角的正余弦函数,误差曲线为正弦曲线,如图4所示。图中粗曲线为角差,细曲线为比差。

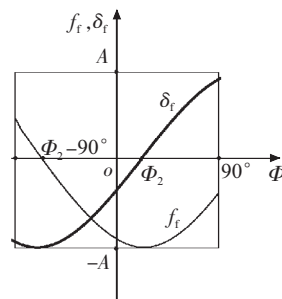


图4 TV 误差阻抗角曲线图

由图4可见,阻抗角有2个重要分界点:角差分界点“ $\Phi_2$ ”,比差分界点“ $\Phi_2-90^\circ$ ”。

(1) 对于角差:①  $\Phi=\Phi_2$  时,  $\delta_f=0$ , 角差分量最小;②  $\Phi<\Phi_2$  时,  $\delta_f<0$ , 当  $\Phi=\Phi_2-90^\circ$  时为负最大值(-A);③  $\Phi>\Phi_2$  时,  $\delta_f>0$ , 当  $\Phi=90^\circ$  时(纯电感)为正最大值( $A\cos\Phi_2$ )。

(2) 对于比差:①  $\Phi=\Phi_2-90^\circ$  时,  $f_f=0$ , 比差分量最小;②  $\Phi<\Phi_2-90^\circ$  时,  $f_f>0$ , 当  $\Phi=-90^\circ$  时(纯电容), 为正的极大值( $A\sin\Phi_2$ );③  $\Phi>\Phi_2-90^\circ$  时,  $f_f<0$ , 当  $\Phi=\Phi_2$  时为负的极大值(-A)。

以上是负载误差的特性,最终比差、角差的正负决定于与空载比差、角差合成的结果。电磁式TV二次端应工作在额定负载及相应范围功率因数内,否则整个TV精度难以保证。合理选择、配置二次工作负载,使电磁式TV工作在最小误差状态。通过上述曲线及模型,对各种影响量都可以直观地进行分析,

## 5 电磁式TV误差的计算

### 5.1 实际负载误差的计算

电磁式TV线圈、铁心参数一般在其参数中都不会给出,如用上述公式计算某实际负载下误差,则不可能,也不客观。误差一般要通过仪器来测量,但是测量仪器通常只能在离线状态下测量模拟(虚)负荷误差,由于实际负载都在运行状态下才能呈现出二次电气系统复杂性,通常无法在实际负载下测量互感器误差。然而测量实际负载误差又很必要,为此可先测量出任两虚负荷点在某电压下误差及现场运行时实际二次负载导纳值及其阻抗角,再据误差公式可算出TV在此电压下的实际负载误差。选空载及功率因数为1的额定负载这2个特殊负载点,对任意负载误差计算最为方便。其误差计算公式为:

$$\begin{cases} f=f_0-\frac{|Y|}{Y_n}[(f_0-f_n)\cos\Phi+0.029(\delta_0-\delta_n)\sin\Phi]\times 100 \\ \delta=\delta_0-\frac{|Y|}{Y_n}[(\delta_0-\delta_n)\cos\Phi-34.38(f_0-f_n)\sin\Phi] \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: $f_0, \delta_0$ 分别为待测电压下空载比差、角差测量值; $f_n, \delta_n$ 分别为待测电压下功率因数为1的额定负载下的比差、角差测量值; $|Y|$ 为实际负载导纳值,  $|Y|=\frac{I_2}{U_2}$ ,  $I_2, U_2$ 分别为TV二次端的电流、电压测量值,通过相应仪表测出; $\Phi$ 为实际负载阻抗角,可通过相位表或专用测试仪测出; $Y_n$ 为功率因数为1时,额定容量对应的额定导纳值,  $Y_n=\frac{S_n}{U_n^2}$ ;  $S_n, U_n$ 分别为额定电压、额定容量, V·A。

### 5.2 三相线路中TV二次导纳的计算

三相线路中TV误差计算,关键要知道每相(每只)TV二次等效负荷。对于三相四线制电气系统,与单相线路等效,每相或每只TV二次负荷就是其二次绕组外接二次回路所有导纳之和,测量相应导纳并用此代入上述公式即可算出相应TV负载误差值;而在三相三线制电气系统中,每相或每只TV等效导纳往往不能直接测量,通常只能测量出“线导纳” $Y_{AB}, Y'_{AB}, Y_{CB}$ ,从而无法直接计算相应相TV误差。因此,还必须依据电工理论,换算出每相等效导纳,或通过伏安相位表测量相应电工参数计算出“相导纳”。

(1)对三相对称电路,导纳的变换公式为Y—V型线路系统(TV Y型接法,负载 V型接法):

$$\begin{cases} Y_a = \frac{\dot{I}_A}{\dot{U}_{AB}/\sqrt{3}} \angle 30^\circ = \sqrt{3} Y_{ab} \angle 30^\circ = \\ \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{ab}+30^\circ) = \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_a \\ Y_c = \frac{\dot{I}_C}{\dot{U}_{CB}/\sqrt{3}} \angle -30^\circ = \sqrt{3} Y_{cb} \angle -30^\circ = \\ \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{cb}-30^\circ) = \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_c \\ Y_b = \frac{\dot{I}_B}{\dot{U}_{ab}/\sqrt{3}} \angle 150^\circ = \sqrt{3} Y'_{ab} \angle 150^\circ = \\ \frac{I_B}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{ab}+150^\circ) = \frac{I_B}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_b \end{cases} \quad (14)$$

即等效导纳值等于每相电流与其相电压比值,等效阻抗角等于对应线电压阻抗角再加一个修正值。如果不测量B相电流及其与线电压夹角,则 $Y_b$ 用A相、C相测量数据按下式导出:

$$\begin{aligned} Y_b &= \frac{I_A}{\dot{U}_{AB}/\sqrt{3}} \angle 30^\circ + \frac{I_C}{\dot{U}_{AB}/\sqrt{3}} \angle 30^\circ = \\ &= \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{ab}-30^\circ) + \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \angle (-\Phi_{cb}-30^\circ) = \\ &= \left[ \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \cos(-\Phi_{ab}-30^\circ) + \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \cos(-\Phi_{cb}+30^\circ) \right] + \\ &= j \left[ \frac{I_A}{U_1/\sqrt{3}} \sin(-\Phi_{ab}-30^\circ) + \right. \\ &= \left. \frac{I_C}{U_1/\sqrt{3}} \sin(-\Phi_{cb}+30^\circ) \right] = \frac{I_B}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_b = \\ &= \frac{\sqrt{I_A^2+I_C^2+2I_A I_C \cos(\Phi_{ab}-\Phi_{cb}+60^\circ)}}{U_1/\sqrt{3}} \angle \Phi_b \quad (15) \end{aligned}$$

$$\Phi_b = \arctan \left[ \frac{I_A \sin(-\Phi_{ab}-30^\circ) + I_C \sin(-\Phi_{cb}+30^\circ)}{I_A \cos(-\Phi_{ab}-30^\circ) + I_C \cos(-\Phi_{cb}+30^\circ)} \right] \quad (16)$$

二次导纳计算相当复杂,且还易出错。因此除非特殊情况,TV二次导纳尽量用仪器直接测量,避免间接测量与计算。需说明的是,以上公式的相角按阻抗角定义,即电压相对电流夹角(电压超前电流相位角)。

(2) 对三相对称电路,导纳的变换公式为Y— $\Delta$ 型线路系统(TV Y型接法,负载 $\Delta$ 型接法):

$$\begin{cases} Y_a = \sqrt{3} Y_{ab} \angle 30^\circ + \sqrt{3} Y_{ca} \angle -30^\circ = \\ Y_{ab} \left( \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + Y_{ca} \left( \frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ Y_b = \sqrt{3} Y_{bc} \angle 30^\circ + \sqrt{3} Y_{ab} \angle -30^\circ = \\ Y_{bc} \left( \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + Y_{ab} \left( \frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ Y_c = \sqrt{3} Y_{ca} \angle 30^\circ + \sqrt{3} Y_{cb} \angle -30^\circ = \\ Y_{ca} \left( \frac{3}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + Y_{cb} \left( \frac{3}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \end{cases} \quad (17)$$

对于电能计量系统,此种负载接法可能不存在。

### 5.3 TV线电压比差和角差计算

三相三线制电能计量误差分析中,往往需要配置互感器组的线电压比差、角差,因此还需要由单相TV误差求出线电压TV(合成)误差。对V—V型一次接线系统,线电压比差、角差即对应单相TV比差、角差;而对Y—V型接线系统,则有:

$$\begin{cases} f_{ab} = \frac{1}{2} (f_A + f_B) + 0.0084 (\delta_A + \delta_B) \\ f_{cb} = \frac{1}{2} (f_C + f_B) + 0.0084 (\delta_C - \delta_B) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \delta_{ab} = \frac{1}{2} (\delta_A + \delta_B) + 9.924 (f_B - f_A) \\ \delta_{cb} = \frac{1}{2} (\delta_C + \delta_B) + 9.924 (f_B - f_C) \end{cases} \quad (19)$$

上述公式可通过余弦定理导出。

## 6 TV误差附加电能计量误差计算

(1) 单相电气系统:

$$\varepsilon_p = f - 0.0291 \delta \operatorname{tg} \Phi \quad (20)$$

(2) 三相四线制电气系统:

$$\varepsilon_p = \frac{1}{3} [(f_A + f_B + f_C) - 0.0291 (\delta_A + \delta_B + \delta_C) \operatorname{tg} \Phi] \quad (21)$$

(3) 三相三线制电气系统:

$$\varepsilon_p = \frac{f_{ab} + f_{cb}}{2} + \frac{\delta_{cb} - \delta_{ab}}{119.1} + \left( \frac{f_{cb} - f_{ab}}{3.464} - \frac{\delta_{ab} + \delta_{cb}}{68.76} \right) \operatorname{tg} \Phi \quad (22)$$

以上公式依据功率及误差公式可以得出。需说明的是,这里的 $\Phi$ 是一次线路的功率因数角,非二次负载阻抗角。可以看出,当线路功率因数为1时(一般都接近), $\operatorname{tg} \Phi = 0$ ,对单相及三相四线制电气系统,电能误差仅与比差有关,如果在此工作状态下合理调整二次负载阻抗角,使比差小、角差大,则此时电能计量装置误差就会减小。而对三相三线制电气系统,不仅误差、二次导纳计算烦琐,而且其电能误差分析也烦琐。因此对于电能计量方式,采用三相四线制计量方式,无论是对电能计量影响还是误差计算、分析都有突出优点。

## 7 结束语

依据电磁式TV电路模型通过矢量数学分析方法,提出了一种电磁式TV误差新的建模方法,较之传统复杂的误差建模方法简单、严谨,逻辑性强,是对电磁式TV误差理论的一种完善,并由此对电磁式TV误差的认知会更加清晰。电磁式TV误差各种计算方法是电能计量综合误差分析的基础:测量(计算)二次导纳及空载、额定负载下误差,再计算实际负载误差、合成误差(线电压误差),最终计算、评估互感器产生的附加电能误差。

参考文献:

- [1] GB 1207—2006, 电磁式电压互感器[S]. 北京:中国标准出版社,2006:1-5.
- [2] GB 2900.74—2008, 电工术语 电路理论[S]. 北京:中国标准出版社,2008:1-20.

作者简介:

穆小星(1963),男,江苏南京人,高级工程师,从事电力计量测试及技术研究工作。

## Vector Algebraic Analysis Method for the Errors in Inductive Voltage Transformers

MU Xiaoxing

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute

State Grid Laboratory of Electric Energy Measurement, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Targeting at the disadvantages of current modelling methods, a vector diagram is adopted to construct and analyze TV error mathematical model in this paper. With the model established using vector diagram, the errors of TV are analyzed systematically and comprehensively. Also, the influence of the TV error on the electric power energy metering is elaborated. It helps technicians of the electric energy metering to know more about TV error theory.

**Key words:** voltage transformer; ratio error; phase error; impedance phase angle; no-load error; load error; vector algebraic analysis