

互感器丛书

赵修民 编著

# 电压比例标准

山西科学技术出版社

·互感器丛书·

# 电压比例标准

赵修民 赵屹涛 编著

山西科学技术出版社

(晋)新登字5号

**电压比例标准**

赵修民 赵屹涛 编著

※

山西科学技术出版社出版发行 (太原并州北路十一号)

太原千峰科技印刷厂印刷

※

开本 787×1092 1/32 印张, 5.125字数, 106千字

1993年7月第1版 1993年7月太原第1次印刷

印数: 1—4000册

※

ISBN 7—5377—0780—4

T·141 定价: 3.60元

## 编者的话

山西省机电设计研究院互感器所所长赵修民高级工程师潜心从事互感器科研工作逾三十年，取得了显著的成绩，他领导的互感器所，获三十多项科技成果奖和近十项专利权，发表论文六十多篇，设计产品三百多种规格，生产精密互感器中试产品畅销全国，享有较高的声誉。

为了总结经验和普及提高，本社约请赵修民同志主编这套《互感器丛书》，本丛书共五分册，各分册为《电流互感器》、《电压互感器》、《互感器校验仪的原理和应用》、《电流比例标准》和《电压比例标准》。其中前四分册业已出版，这次出版的是最后一分册。丛书中除基础知识、基本原理以及有关标准和规程的内容外，不少篇幅介绍了该所的科研成果及其实际应用。

《电压比例标准》主要介绍电磁式电压比例标准，其中包括空载电压互感器、双级电压互感器、感应分压器、带升压器的电压比例标准和带补偿装置的高压电压比例标准。在基本原理的基础上，系统地阐述了有关的线路和特点，以及相互之间的内在联系。同时介绍了电压比例标准的应用和检定，以及由感应分压器、双级电压互感器和带补偿装置的电压比例标准组成的电压比例标准检定系统。对电压比例标准的设计以及结构和参数的选择，结合国内有关产品，也做了较详细的叙述。其中可自校的多盘感应分压器、高压双级电

压互感器、带升压器的电压比例标准和带补偿装置的电压比例标准及检定系统，都是该所的科研成果。

电压比例标准是高准确度的电磁仪器。《电压比例标准》是丛书的最后一分册，按照由浅入深的原则，其内容进一步加深。有了前四分册的基础和专业知识，再学本书就容易理解。本书适合于从事电压比例标准和电压互感器设计、制造、使用和试验的科技人员，以及具有高中以上文化程度的试验员和工人参考，也可供从事交流电测量的有关人员阅读。

# 目 录

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 概 述                     | ( 1 )  |
| 空载电压互感器                 | ( 3 )  |
| 一、空载电压互感器的误差            | ( 3 )  |
| 二、带供电绕组的空载电压互感器         | ( 7 )  |
| 三、空载电压互感器误差的补偿          | ( 9 )  |
| 四、空载电压互感器误差计算举例         | ( 16 ) |
| 五、空载电压互感器检定线路           | ( 21 ) |
| 双级电压互感器                 | ( 23 ) |
| 一、双级电压互感器的基本原理          | ( 23 ) |
| 二、双级补偿电压互感器             | ( 26 ) |
| 三、带升压器双级电压互感器           | ( 29 ) |
| 四、双级电压互感器的容性<br>误差和磁性误差 | ( 33 ) |
| 五、双级电压互感器计算举例           | ( 36 ) |
| 六、双级电压互感器的检定线路          | ( 41 ) |
| 感应分压器                   | ( 47 ) |
| 一、感应分压器的基本原理            | ( 47 ) |
| 二、感应分压器的结构              | ( 51 ) |
| 三、感应分压器的检定              | ( 56 ) |
| 可自校的多盘感应分压器             | ( 67 ) |
| 一、原理和结构                 | ( 67 ) |

|                           |        |
|---------------------------|--------|
| 二、自校和数据处理·····            | ( 72 ) |
| 三、实际应用·····               | ( 76 ) |
| 高压空载电压互感器·····            | ( 80 ) |
| 一、高压空载电压互感器的误差·····       | ( 80 ) |
| 二、高压空载电压互感器误差的补偿·····     | ( 88 ) |
| 三、高压空载电压互感器误差的测定·····     | ( 90 ) |
| 高压双级电压互感器和带升压器            |        |
| 高压电压比例标准·····             | (100 ) |
| 一、高压双级电压互感器·····          | (100 ) |
| 二、带升压器的高压电压比例标准·····      | (108 ) |
| 高压电压比例标准检定系统·····         | (118 ) |
| 一、带补偿装置的高压电压比例标准·····     | (118 ) |
| 二、高压电压比例标准检定系统的检定·····    | (124 ) |
| 附录Ⅰ 感应分压器自校误差计算程序清单·····  | (133 ) |
| 附录Ⅱ 感应分压器自校误差计算程序的使用····· | (146 ) |
| 附录Ⅲ 仿真负荷箱电压转换器·····       | (153 ) |
| 参考文献·····                 | (158 ) |

## 概 述

随着电能计量准确度的提高，对扩大电压量限装置电压互感器的准确度也提出了更高的要求。目前我国已能设计制做一次电压范围由 $100/\sqrt{3}$  V至 $220/\sqrt{3}$  kV，二次电压由 $100/\sqrt{3}$  V至380V的各种规格高准确度电压互感器。

为了保证这些高准确度电压互感器的准确度，就必须有更高准确度的标准设备对它进行检定。这种更高准确度的标准器就是电压比例标准，其准确度一般在 $5 \times 10^{-5}$ 以上，可以用来检定0.01级及以下的高准确度电压互感器。

同时，随着电阻、电容、电感等元件准确度提高，对测量这些元件的电桥也提出了更高的要求。过去各种电桥的比例臂，主要用的是电阻比例，其准确度一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，改用电压比例臂或电流比例臂，其准确度可提高1~2个数量级，达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 以上。

实际上，电压互感器就是一种简单的电压比例仪器，其电压比正比于绕组的匝数比，但是由于电压互感器的二次有负荷，使二次和一次绕组上都产生压降，从而带来了误差，而电磁式电压比例标准，其电压比也正比于绕组的匝数比，一般不带负荷或接近为零负荷，绕组压降很小，或者一次和二次压降相互抵消，没有或极少电压互感器误差，因此具有很高的准确度。

由于电压比例标准的二次不带负荷或接近为零负荷，因



此一般电磁式电压比例标准不能作为电压互感器，用来扩大测量仪表的量限，而主要作为电压比例的标准，用来检定包括电压互感器在内的各种电压比例仪器。

电压比例标准包括电磁式电压比例标准、电阻分压器和电容分压器，后两者一般只用作高电压比例标准。

电阻分压器，国内曾用感应分压器在低压下校准，要求在恒温下工作，并通过分析计算推到高压下使用；电容分压器，国外用电容电桥在低压下校准，要求电容线性好，并通过分析计算推到高压下使用；电磁式电压比例标准，结构比较简单，特别是稳定性好，工作条件要求低，使用最为方便。

最常用的电磁式电压比例标准有空载电压互感器、双级电压互感器、感应分压器和各种补偿的电压比例标准等，以下分别加以介绍。同时还介绍提高电压比例标准准确度的方法和电压比例标准的检定方法。

电压比例标准的电压比 $K_N$ 为额定一次电压 $U_{1N}$ 与额定二次电压 $U_{2N}$ 之比，也是一次与二次比例绕组匝数 $N_1$ 与 $N_2$ 之比，即

$$K_N = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

电压比例标准的复数误差 $\tilde{\varepsilon}$ 是一次和二次比例绕组非极性端处于地电位下，二次输出电压 $\dot{U}_2$ 旋转 $180^\circ$ 并折算后与一次输入电压 $\dot{U}_1$ 的相量差对一次输入电压 $\dot{U}_1$ 的比值，即

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{-K_N \dot{U}_2 - \dot{U}_1}{\dot{U}_1} \quad (2)$$

$$\tilde{\varepsilon} = f + j\delta \quad (3)$$

式中  $f, \delta$ ——比差和角差。

# 空载电压互感器

## 一、空载电压互感器的误差

空载电压互感器是最简单的电压比例标准，其原理线路如图 1。图中  $N_1$  为一次绕组， $N_2$  为二次绕组。它的额定电压比  $K_N$  为额定一次电压  $U_{1N}$  与额定二次电压  $U_{2N}$  之比，由于电压互感器的匝数与电压成正比，故满足式 (1)。

空载电压互感器的等值电路如图 2 所示，图中  $Z_1$ 、 $\dot{E}_1$ 、

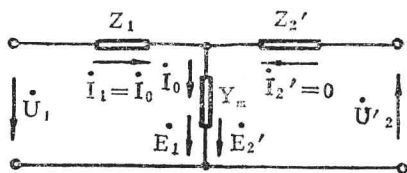
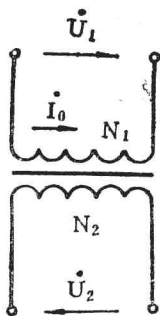


图 1 空载电压互感器原理线路      图 2 空载电压互感器等值线路

$\dot{I}_1$ 、 $\dot{Y}_m$  分别为一次绕组内阻抗、电动势、电流和励磁导纳， $Z_2'$ 、 $\dot{E}_2'$ 、 $\dot{I}_2'$  分别为折算至一次的二次绕组内阻抗、电动势和电流，折算关系为

$$E_2' = K_N E_2 = \frac{N_1}{N_2} E_2$$

$$I_2' = \frac{1}{K_N} I_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2$$

$$Z_2' = K_N^2 Z_2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2$$

空载电压互感器二次不带负荷，因此  $\dot{I}_2' = 0$ ， $E_2' = U_2'$ 。

要产生感应电势，铁心就要励磁，励磁电流

$$\dot{I}_0 = -\dot{E}_1 Y_m = -\dot{E}_2' Y_m \quad (4)$$

一次电流  $\dot{I}_1$  为  $\dot{I}_0$  和  $-\dot{I}_2'$  的相量和

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2' = \dot{I}_0 \quad (5)$$

即一次电流就是励磁电流。 $\dot{I}_1$  通过一次绕组内阻抗  $Z_1$ ，产生阻抗压降  $\dot{I}_1 Z_1$ ，

因此  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$

$$= -\dot{E}_2' + \dot{I}_0 Z_1$$

$$= -\dot{U}_2' + \dot{I}_0 Z_1 \quad (6)$$

由式(4)和式(6)就可得到空载电压互感器的误差计算公式

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon} &= - \frac{\dot{U}_2' + \dot{U}_1}{\dot{U}_1} \times 100\% \\ &= - \frac{\dot{U}_2' - \dot{U}_2' + \dot{I}_0 Z_1}{\dot{U}_1} \times 100\% \\ &= - \frac{\dot{I}_0 Z_1}{\dot{U}_1} \times 100\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&\approx -Y_m Z_1 \times 100\% \\
&= -(G_m - jB_m)(R_1 + jX_1) \\
&\quad \times 100\% \\
&= -[(G_m R_1 + B_m X_1) + \\
&\quad j(G_m X_1 - B_m R_1)] \times 100\% \quad (7)
\end{aligned}$$

式中  $G_m$ 、 $B_m$ ——励磁电导和励磁电纳；

$R_1$ 、 $X_1$ ——一次绕组内阻和漏抗。

式(7)中第一项和第二项分别为比差和角差：

$$f = -(G_m R_1 + B_m X_1) \times 100\% \quad (8)$$

$$\delta = (B_m R_1 - G_m X_1) \times 3440(') \quad (9)$$

同时，根据磁路和电磁感应定律

$$\dot{I}_0 N_1 = \dot{H} l_p \quad (10)$$

$$\mu = \frac{0.8 \dot{B}}{\sqrt{2} \dot{H}} \quad (11)$$

$$\dot{B} = j \frac{\dot{E}_2 \times 10^4}{222 N_2 S k} \quad (12)$$

式中  $H$ ——铁心磁场强度(A/cm)；

$l_p$ ——铁心平均磁路长度(cm)；

$\mu$ ——铁心磁导率(T/Oe)， $H$ 为有效值，应乘以  $\sqrt{2}$ ，且1Oe=0.8A/cm；

$B$ ——铁心磁通密度峰值(T)；

$S$ ——铁心截面(cm<sup>2</sup>)；

$k$ ——铁心叠片系数，对冷轧硅钢片为0.9~0.95。

将式(10)~(12)代入式(7)可以得到：

$$\tilde{\varepsilon} = j \frac{25.5 l_p Z_1}{N_1^2 \mu S k} \times 100 \% \quad (13)$$

空载电压互感器的相量图如图 3 所示。

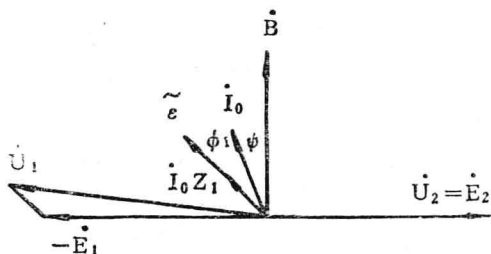


图 3 空载电压互感器相量图

图中  $\dot{E}_2 = \dot{U}_2$  画在正  $x$  轴上, 磁密  $\dot{B}$  超前于  $\dot{E}_2$   $90^\circ$ ,  $\dot{I}_0$  超前于  $\dot{B}$  角  $\psi$ ,  $\psi$  为铁心损耗角,  $\dot{I}_0 Z_1$  超前于  $\dot{I}_0$  角  $\phi_1$ ,  $\phi_1$  为  $Z_1$  的阻抗角, 误差  $\tilde{\varepsilon}$  与  $\dot{I}_0 Z_1$  同相。

$$\phi_1 = \cos^{-1} \frac{R_1}{Z_1} \quad (14)$$

$Y_m$  的导纳角为  $\psi - 90^\circ$ , 因此,

$$\psi = \cos^{-1} \frac{B_m}{Y_m} \quad (15)$$

由相量图可见, 误差  $\tilde{\varepsilon}$  落在第 2 象限, 比差  $f$  为负值, 角差  $\delta$  为正值, 即式 (9) 中  $B_m R_1 > G_m X_1$ , 随着  $\psi$  角增大即  $G_m$  增大, 或者  $X_1$  增大, 如  $G_m X_1 > B_m R_1$ , 则  $\tilde{\varepsilon}$  落在第 3 象限,  $\delta$  为负值。

由式 (7) 可以看出, 提高空载电压互感器的准确度, 只有减小  $Z_1$  或  $Y_m$  两种方法。

若采用环形铁心, 则  $X_1 \approx 0$ 。因此  $Z_1$  只由  $R_1$  决定, 若一

次绕组导线长为 $L$ ，截面积为 $A$ ，则

$$Z_1 \approx R_1 = \rho \frac{L}{A} \quad (16)$$

式中  $\rho$ ——导线的电阻率。

由式(16)可以看出，减小 $Z_1$ 的方法是缩短导线长度或增大导线截面，即选用尽可能短且尽可能粗的导线。

若要减小 $Y_m$ ，就必须减小 $\dot{I}_0$ ，而减小 $\dot{I}_0$ ，就只有减小 $I_p$ 或 $H$ 。减小 $I_p$ ，就是尽可能地减小铁心的窗口，但这是有限度的。减小 $H$ 就要减小 $B$ ，也就是要增大 $N_1$ 或 $S_1$ ，从而导致 $Z_1$ 增大，更是不可取的。当然，选用好铁心，在 $B$ 不变的情况，减小 $H$ ，这是最好的。

综上所述，适当地选取铁心和绕组的各个参数，可以减小空载电压互感器的误差，但仅这样是不够的。因为各个参数之间相互制约，因此，提高空载电压互感器准确度的一种好方法是采用误差补偿。

## 二、带供电绕组的空载电压互感器

用作电压比例标准的空载电压互感器是不能带负荷的。在检定电压互感器时，需要给校验仪供电，而空载电压互感器不能直接供电，因此需要在空载电压互感器的二次增绕一个与二次电压相同的绕组，作为供电绕组，这就构成了带供电绕组的空载电压互感器，原理线路如图4所示，等值电路如图5所示。

图4中，空载电压互感器的供电绕组匝数 $N_{2e} = N_2$ 。检定互感器时，它接在校验仪上，带上了一个负荷 $Y_e$ ，在供电绕组中产生一个电流

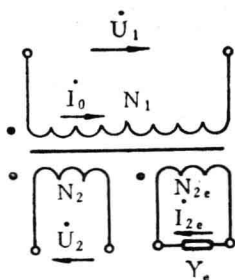


图4 带供电绕组的空载电压互感器

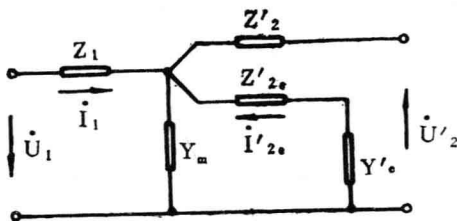


图5 带供电绕组的空载电压互感器等值电路

$$\dot{I}_{2e} = \dot{U}_e Y_e \approx \dot{U}_2 Y_e \quad (17)$$

一次绕组  $N_1$  通过的电流为  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_{2e}$ ，这时空载电压互感器的误差

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon} &= -\frac{\dot{I}_0 - \dot{I}'_{2e}}{\dot{U}_1} Z_1 \times 100\% \\ &= -(Y_m + Y_e') Z_1 \times 100\% \end{aligned} \quad (18)$$

式中  $Y_e'$  ——折算至一次的  $Y_e$  导纳。

$$Y_e' = \frac{-\dot{I}_{2e}}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{I}'_{2e}}{\dot{U}_2'} = \left( \frac{N_{2e}}{N_1} \right)^2 Y_e \quad (19)$$

相量如图6所示。

图中  $\tilde{\varepsilon}$  一般仍在第2象限，比差  $f$  为负值，角差  $\delta$  为正

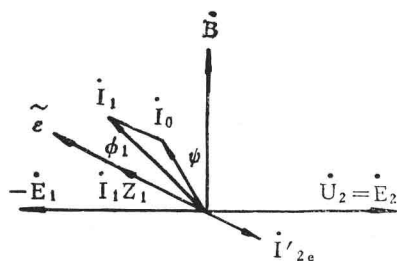


图 6 带供电绕组的空载电压互感器相量图

值。

如果 $Y_e$ 直接加在电压互感器的二次，则由电压互感器误差计算公式<sup>[1]</sup>可见，负载 $Y_e$ 带来的误差为 $-Y_e(Z_1 + Z_2')$ 。在空载电压互感器中，一般 $Z_2' > Z_1$ ，甚至 $Z_2' \gg Z_1$ ，因此，带供电绕组的空载电压互感器只要 $Y_e' \ll Y_m$ ，则负载 $Y_e$ 带来的误差 $-Y_e' Z_1$ 可略去不计。

例如，以带供电绕组的空载电压互感器为标准来检定电压互感器，采用标准电压互感器回路负荷 $Y_e$ 很小的校验仪，这类校验仪常用的是比较仪式互感器校验仪（如HEG2、HEG4和HEG5）等。

### 三、空载电压互感器误差的补偿

提高空载电压互感器准确度最有效的方法是补偿，常用的误差补偿方法有以下几种：

#### 1. 二次绕组并联电容补偿

如果在空载电压互感器的二次并联一个导纳 $Y_p$ ，相当于互感器二次有了负载，原理线路和等值电路分别如图7和图8所示。



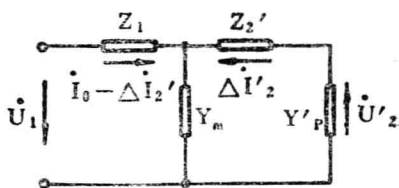
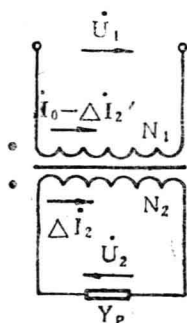


图7 二次并联导纳补偿原理线路 图8 二次并联导纳等值电路

在二次回路产生一补偿电流

$$\Delta \dot{I}_2 = Y_p \dot{U}_2 \quad (20)$$

同时在一次绕组中产生与  $\Delta \dot{I}_2$  相平衡的电流  $-\Delta \dot{I}_2'$ 。

补偿电流  $-\Delta \dot{I}_2'$  和  $\Delta \dot{I}_2$  分别在一次和二次绕组中产生的压降折算至一次为

$$\Delta \dot{U}_p = -\Delta \dot{I}_2' Z_1 - \Delta \dot{I}_2' Z_2' \quad (21)$$

对误差补偿为

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{\varepsilon} &= -\frac{\Delta \dot{U}_p}{\dot{U}_1} \times 100\% \\ &= -\frac{-Y_p' \dot{U}_2' (Z_1 + Z_2')}{\dot{U}_1} \times 100\% \\ &= -Y_p' (Z_1 + Z_2') \times 100\% \end{aligned} \quad (22)$$

当二次并联电容  $C$  时,

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_2 &= \dot{I}_C \\ Y_p' &= jB_c' = j\omega C' \end{aligned} \quad (23)$$