

# 550 kV 标准电压互感器设计

焦阳<sup>1</sup>, 谷玉华<sup>2</sup>, 艾兵<sup>1</sup>, 徐灿<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045;

2. 国网四川省电力公司技能培训中心(四川电力职业技术学院), 四川 成都 610072;

3. 武汉磐电科技有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:**在500 kV长距离输电网络中,作为电源供给端的大型发电站的升压站,电压多为550 kV,对应的计量用电力电压互感器为550 kV。详细介绍了用于550 kV计量用电压互感器误差现场检定的主标准器——550 kV 0.02级标准电压互感器的铁心设计、绕组设计和误差计算的主要要点,分析了误差形成的主要原因,并且给出了550 kV标准电压互感器各点的误差计算和实测结果。

**关键词:**标准电压互感器;铁心;绕组;误差

**Abstract:**In 500 kV long-distance transmission network, as the power supply end of large-scale power station, the most voltage of booster station is 550 kV, so the corresponding electric potential transformer is 550 kV. The main points for core design, winding design and error calculation of 550 kV 0.02 standard potential transformer, which is the main standard transformer used for site error verification of 550 kV potential transformers, are introduced in detail, and the main reasons for errors are analyzed. The error calculation and the measured results in each point of 550 kV standard potential transformers are given.

**Key words:**standard potential transformer; iron core; winding; error

中图分类号:TM451 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2014)增1-0020-04

## 0 引言

电力系统中使用的电压互感器起着电压比例变换和高电压隔离作用,把一次侧的高电压变换为二次侧仪表电压或者数字信息,供给安装在二次侧的继电保护装置、电气测量和电能计量装置、自动控制装置,用以维持电力系统正常运行。为了保证电力电压互感器的电压变换准确度达到电网要求,需要对新制造、使用中和修理后的电力互感器进行误差检验。

随着电网的快速发展,在500 kV长距离输电网络中,作为电源供给端的大型发电站的升压站,电压多为550 kV,对应的计量用电力电压互感器为550 kV。目前许多550 kV计量用电力电压互感器的准确度等级为0.1级,对应于550 kV计量用电力电压互感器的现场检定主标准器则采用550 kV 0.02级标准电压互感器。

对550 kV 0.02级标准电压互感器的铁心设计、绕组设计和误差计算的主要要点进行详细阐述,分析误差形成的主要原因,并给出550 kV标准电压

互感器各点的误差计算和实测结果。

## 1 标准电压互感器原理

标准电压互感器的原理与单相变压器相近,由一次绕组、铁心和二次绕组构成,其特点是容量很小且比较恒定,正常运行时接近于空载状态,要求电压变换的准确度等级很高,都在0.05级以上。如果把标准电压互感器所有二次量均折算到一次后,可以得到标准电压互感器的“T”型等效原理电路图如图1所示。

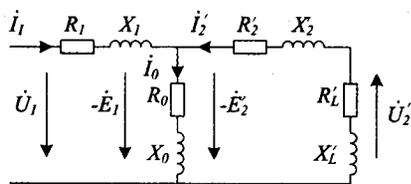


图1 标准电压互感器的等效原理图

在图1中,一次电压用 $U_1$ 表示,二次电压用 $U_2$ 表示,二次负荷用 $Z'_L$ 表示,“T”型支路表示励磁支路。箭头方向代表电压(降)、电流的正方向,

一次电源产生一个  $I'_2$ , 故  $I_1$  与  $I'_2$  的正方向均指向 T 形节点。

由图 1 可以看出, 标准电压互感器的误差主要是由于励磁电流产生的空载误差和负荷电流产生的负载误差。

## 2 550 kV 标准电压互感器基本参数

550 kV 计量用电力电压互感器准确度等级一般为 0.1 级和 0.2 级, 都是单相, 对地额定电压为  $550/\sqrt{3}$  kV, 按照 JJG 1021-2007, 标准电压互感器的准确级至少比被检互感器高两个等级。550 kV 的标准电压互感器基本参数如表 1 所示。

表 1 550 kV 标准电压互感器基本参数

名称	值	名称	值
额定一次电压/kV	$550/\sqrt{3}$	额定频率/Hz	50
额定二次电压/V	$100/\sqrt{3}$	额定负荷/VA	0.25
最高工作电压/kV	$660/\sqrt{3}$	准确度等级	0.02 级
短时耐受电压/kV	$770/\sqrt{3}$		

因为标准电压互感器工作时间短, 作为试品被校验时最高工作电压为 1.2 倍的额定电压, 作为标准检验时最高工作电压为 1.1 倍额定电压, 所以短时耐受电压按照 1.4 倍额定电压来选取, 其内外绝缘也按此要求来设计。标准电压互感器的负载主要是互感器校验仪百分表的输入阻抗, 电工式校验仪百分表一般为 50 k $\Omega$ , 数字式校验仪百分表的输入端阻抗都大于 50 k $\Omega$ ; 设计标准电压互感器二次负荷为 0.25 VA, 满足实际使用要求。

## 3 铁心设计

铁心设计是标准电压互感器设计的关键, 要综合考虑误差、成本、制造水平和绝缘要求等多方面的内容。铁心截面积过大, 绕组匝数少, 励磁阻抗小, 励磁电流大, 空载误差大; 铁心截面积过小, 匝数多, 线包大, 电阻和漏抗大, 误差大, 绕制难度也大。铁心材料选择优质的低损耗、高工作磁密硅钢材料。

### (1) 匝电势确定

匝电势即绕组的每匝感应电压, 是标准互感器设计中的一个重要参数, 一般指额定电压下的匝电势。匝电势值会影响互感器的误差性能、结构尺寸、铜铁材料的组成比例, 对误差也有决定性的影响。

匝电势选取需要考虑铁芯截面、误差性能及二次绕组匝数等多方面因素。根据法拉第电磁感应定律, 匝电势可表示为

$$E = 4.44 B \cdot F \cdot S \quad (1)$$

式中,  $E$  为匝电势, V/匝;  $B$  为铁心的磁通密度, T;  $F$  为额定频率, Hz;  $S$  为铁心截面积,  $m^2$ 。

在额定磁密  $B$  一定的情况下,  $E$  值过大, 铁心截面积会相应增大, 硅钢片用量增多, 励磁阻抗减小, 励磁电流增加, 从而导致互感器的空载误差增加; 而  $E$  值过小, 则绕组额定匝数将增多, 导线长度增加, 电阻和漏抗会增大, 阻抗压降增大, 也会导致互感器误差增加。对于低电压的互感器, 一次匝数本身少,  $E$  值要选取小一些; 对于高压电压互感器, 一次匝数多,  $E$  值选取大一些, 本设计中, 额定电压下  $E$  值选择为 2.886 V/匝。

### (2) 匝数计算

对于 550 kV 标准电压互感器, 属于试验设备, 试验时短时工作, 由于不需要考虑冲击过电压和短路过电流的影响, 额定工作磁通密度可选  $B = 1.1$  T。根据上述选择的匝电势和额定磁通密度, 利用法拉第电磁感应定律可以推导计算出铁心的截面积。  $S = E/4.44BF = 2.886/4.44 \times 1.1 \times 50 = 0.0118 m^2 = 118 cm^2$

铁心选用阶梯 R 型铁心, 材料选用 23ZH90 优质硅钢片, 铁心截面按接近圆面考虑, 填充系数和叠片系数构成的综合系数为 0.83, 则截面直径  $D = \sqrt{(4S/0.83\pi)}$ , 经计算后选择铁心直径为 135 mm。

一次绕组匝数  $N_1 = U_1/E = 110032$ , 结合一、二次匝数的整数比例关系, 选取一次匝数为 110000 匝, 一、二次的匝比为 5500, 所以二次绕组匝数为 20 匝。

铁心窗口为矩形, 因为电压高, 绕制后, 窗高选择要大一些。铁心的心柱图和外形图如图 2。

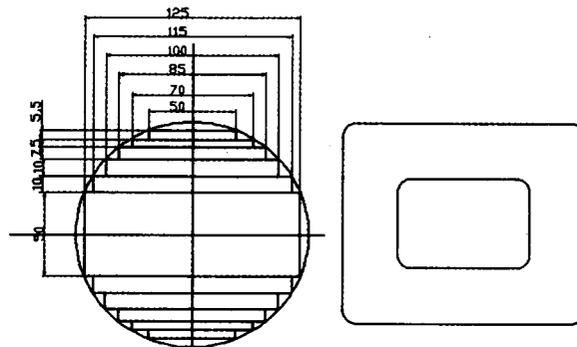


图 2 铁心心柱和外形图

## 4 线包设计

高压标准电压互感器大都为电磁式,采用 SF<sub>6</sub> 气体为主绝缘介质,层间绝缘采用聚酯薄膜等介质,属于固体和气体共同组成的绝缘结构。标准电压互感器绕组结构分为矩形绕组结构和梯形绕组结构。梯形绕组结构电容分布特点使得它具有较好的抗冲击性能,但楔形的存在导致在气体与固体共同构成的绝缘结构上电场难以分布均匀;矩形绕组结构虽然抗冲击性能稍差,但在这种固体与气体共同构成的绝缘中通过恰当的均压和屏蔽,易形成稍不均匀电场。SF<sub>6</sub> 气体的绝缘对于电场均匀度要求较高,综合考虑,本设计采用矩型绕组结构。绕组连同铁心的结构如图3所示。

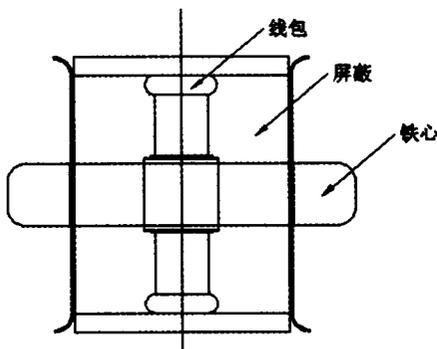


图3 铁心上的绕组俯视图

由于二次匝数较少,电压低,把二次绕组绕在里边,绕宽为50 mm,导线直径为1 mm,均匀绕制一层。一次绕组采用直径为0.1 mm的QZ-2漆包圆铜线,绕宽为50 mm,分308层均匀绕制。前面已经阐述,标准电压互感器不考虑承受冲击电压,层间绝缘按照承受工频电压来计算,层间绝缘采用0.07 mm的聚酯薄膜两层。

## 5 误差计算

标准电压互感器的误差由电压误差(比差) $f$ 和相位差(角差) $\delta$ 两部分组成,每个部分又由空载误差和负荷误差组成。

标准电压互感器的电压误差(比差) $f$ 由空载电压误差和负载电压误差 $f_f$ 两部分组成,即为

$$f = f_k + f_f \quad (2)$$

$$f_k = -\frac{I_0 R_1 \sin\psi + I_0 x_1 \cos\psi}{U_1} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$f_f = -\frac{I'_2 (R_1 + R'_2) \cos\Phi + I'_2 (x_1 + x'_2) \sin\Phi}{U_1} \times 100(\%) \quad (4)$$

相位差(角差) $\delta$ 也由空载相位差 $\delta_k$ 和负载相位差 $\delta_f$ 两部分组成,即为

$$\delta = \delta_k + \delta_f \quad (5)$$

$$\delta_k = \frac{I_0 R_1 \cos\psi - I_0 x_1 \sin\psi}{U_1} \times 3438(') \quad (6)$$

$$\delta_f = \frac{I'_2 (R_1 + R'_2) \sin\Phi - I'_2 (x_1 + x'_2) \cos\Phi}{U_1} \times 3438(') \quad (7)$$

由上述可知,标准电压互感器的误差与绕组的电阻、漏抗和空载电流密切相关。绕组的电阻 $R$ 为

$$R = \rho \frac{Nl}{A} (\Omega) \quad (8)$$

式中, $\rho$ 为电阻率,对于室温20℃下的铜导线 $\rho = 0.0176 (\Omega \cdot \text{mm}/\text{m})$ ;  $N$ 为绕组匝数; $l$ 为绕组每匝平均长度, $\text{m}$ ;  $A$ 为导线截面, $\text{mm}^2$ 。

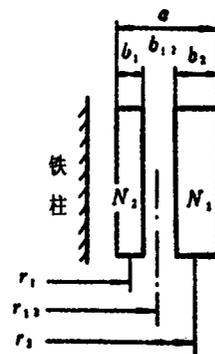


图4 绕组位置示意图

绕组位置如图4所示时, $N_1$ 和 $N_2$ 绕组之间的漏抗折算至二次为

$$\begin{aligned} x'_{12} &= 0.248 N_2^2 \frac{K_{Rz}}{h_x} \left( \frac{1}{3} b_1 r_1 + b_{12} r_1 + \frac{1}{3} b_2 r_2 \right) K_{Rk} \times 10^{-4} (\Omega) \\ &\approx 0.248 N_2^2 \frac{K_{Rz}}{h_x} \left( \frac{1}{3} b_1 + b_{12} + \frac{1}{3} b_2 \right) r_{12} K_{Rk} \times 10^{-4} (\Omega) \quad (9) \end{aligned}$$

式中, $h_x$ 为两绕组净高度平均值, $\text{cm}$ ;  $b_1$ 、 $b_2$ 为 $N_1$ 和 $N_2$ 绕组的厚度, $\text{cm}$ ;  $b_{12}$ 为 $N_1$ 和 $N_2$ 绕组间的距离, $\text{cm}$ ;  $r_1$ 、 $r_2$ 为 $N_1$ 和 $N_2$ 绕组的平均半径, $\text{cm}$ ;  $r_{12}$ 为 $N_1$ 和 $N_2$ 绕组间隙的平均半径, $\text{cm}$ ;  $K_{Rz}$ 为纵向洛氏系数

( $K_{Rz} \approx 1 - \frac{\lambda}{\pi h_x}$ );  $K_{Rk}$ 为两绕组高度不同时附加电抗系数, $K_{Rk} = 1 + \frac{h_1 - h_2}{2h_1} \left( 1 + 0.5 \pi \frac{h_1 - h_2}{\lambda} \right)$ ;  $\lambda$ 为漏磁

场总宽度, cm;  $h_1, h_2$  为  $N_1, N_2$  绕组净高度 (不包括端绝缘, 此处  $h_1 > h_2$ )。

一次绕组漏抗  $x_1$  和二次绕组漏抗  $x_2$  一般按下式计算。

$$x'_1 \approx x_2 \approx \frac{1}{2} x'_{12} \quad (10)$$

$$\frac{r_1 x'_1}{r_1 + r_2} + \frac{r_2 x_2}{r_1 + r_2} = x'_{12} \quad (11)$$

空载电流为

$$I_0 = HL_p / N_1 \text{ (A)} \quad (12)$$

式中,  $L_p$  为铁心平均磁路长度; 计算中,  $H$  和  $\Psi$  根据铁心  $B-H$  和  $\Psi-H$  曲线查得。

空载误差采用减匝数补偿, 减少匝数为 40 匝, 补偿量为 0.036。经计算一次电阻约为 227 k $\Omega$ , 一次漏抗约为 361 k $\Omega$ , 各点的误差计算如表 2 所示。

表 2 各点的误差计算结果

$U_1/U_{1n}$	$\frac{550\,000/\sqrt{3}}{100/\sqrt{3}}$			
	$f/\%$	$\delta/(\circ)$	$f/\%$	$\delta/(\circ)$
0.2	-0.001	-0.326	-0.002	-0.335
0.5	0.006	-0.396	0.005	-0.404
0.8	0.010	-0.468	0.009	-0.477
1.0	0.012	-0.515	0.011	-0.523
1.2	0.013	-0.557	0.012	0.565
二次负荷/VA	0		0.25	

由此参数可以看出满足 0.02 级误差要求。制造完成后实测误差结果如表 3 所示。

表 3 各点的实测误差结果

$U_1/U_{1n}$	$\frac{550\,000/\sqrt{3}}{100/\sqrt{3}}$	
	$f/\%$	$\delta/(\circ)$
0.2	-0.003 1	0.027
0.5	0.001 7	0.013
0.8	0.003 7	0.012
1.0	0.004 5	0.019
0.2	0.004 5	0.032
二次负荷/VA	0.08	

实测误差结果数据满足 0.01 级。铁心曲线和实际铁心有差别, 漏抗计算不够准确, 空载误差的减匝数补偿匝数不好准确统计, 分布参数的影响等因素是计算误差与实际误差有差别的主要原因。

## 6 结 语

前面系统地阐述了标准电压互感器的原理、550 kV 0.02 级标准电压互感器的铁心设计、绕组设计和误差计算, 分析了误差形成原因。对于 550 kV 标准电压互感器设计, 总结得到了如下的经验。

(1) 标准电压互感器的设计铁心的选择是互感器设计的关键, 匝电势的选择是铁心选择的关键。

(2) 高压标准电压互感器线包的结构适宜选用矩形的结构。

(3) 漏抗的计算是标准电压互感器误差计算的难点。

(4) 漏抗、电阻和空载电流是标准电压互感器误差构成的主要因素。

### 参考文献

- [1] JJG 314-2010, 测量用电压互感器[S].
- [2] JJG 1021-2007, 电力互感器[S].
- [3] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] 赵修民. 电压互感器[M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1987.
- [5] 王毓东. 电机学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [6] 麦克莱曼 著, 龚绍文 译. 变压器与电感器设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

### 作者简介:

焦阳(1955), 高级工程师, 主要从事互感器检测及其相关技术的研究;

谷玉华(1960), 工程师, 主要从事电力检测设备及其相关技术研究;

艾兵(1985), 工程师, 主要从事数字电能计量和互感器相关的研究。

(收稿日期: 2014-08-05)

## 550 kV标准电压互感器设计

作者: 焦阳, 谷玉华, 艾兵, 徐灿

作者单位: 焦阳, 艾兵(国网四川省电力公司计量中心, 四川成都, 610045), 谷玉华(国网四川省电力公司技能培训中心(四川电力职业技术学院), 四川成都, 610072), 徐灿(武汉磐电科技有限公司, 湖北武汉, 430000)

刊名: 四川电力技术

英文刊名: Sichuan Electric Power Technology

年, 卷(期): 2014, 37(z1)

引用本文格式: 焦阳. 谷玉华. 艾兵. 徐灿. 550 kV标准电压互感器设计[期刊论文]-四川电力技术 2014(z1)