



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103267958 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 20

(21) 申请号 201310154185. 7

GB 424810 A, 1935. 02. 28, 全文 .

(22) 申请日 2013. 04. 27

SU 1171725 A1, 1985. 08. 07, 全文 .

(73) 专利权人 广东电网公司电力科学研究院  
地址 510080 广东省广州市东风东路水均岗  
8号

SU 737883 A1, 1980. 05. 30, 全文 .

赵屹榕 . 利用互感器校验仪测小型变压器的  
参数 . 《实用测试技术》. 1996, ( 第 2 期 ), 第 27、  
34-36 页 .

(72) 发明人 宋强 胡嘉 孙卫明 潘峰

审查员 黄金霞

(74) 专利代理机构 广州知友专利商标代理有限  
公司 44104

代理人 周克佑

(51) Int. Cl.

G01R 35/02(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 201145737 Y, 2008. 11. 05, 全文 .

CN 102253257 A, 2011. 11. 23, 全文 .

CN 202110270 U, 2012. 01. 11, 全文 .

CN 2280919 Y, 1998. 05. 06, 全文 .

DD 122729 A1, 1976. 10. 20, 全文 .

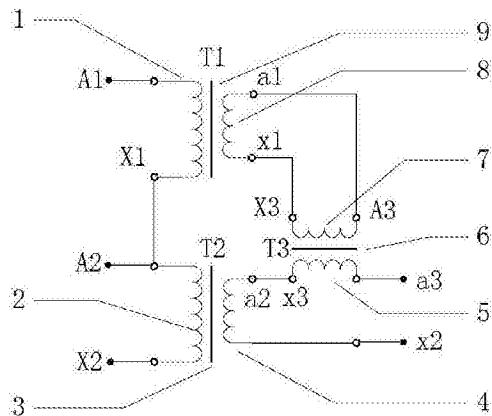
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

测量电压互感器电压系数的线路及方法

(57) 摘要

本发明涉及测量电压互感器电压系数的  
线路:包括由第一、第二单级电压互感器 (T1)、  
(T2), 以及隔离变压器 (T3) 组成的一个无源线性  
电路:(T1) 和 (T2) 的额定变比均等于 K, 隔离变  
压器 (T3) 的额定变比等于 1;(T1) 的一次低压端  
子 X1 与 (T2) 的一次高压端子 A2 连接、二次高  
压端子 a1 与 (T3) 的一次高压端子 A3 连接、二次低  
压端子 x1 与 (T3) 的一次低压端子 X3 连接;(T3)  
的二次低压端子 x3 与 (T2) 的二次高压端子 a2 连  
接。本发明还包括采用上述线路进行测量电压互  
感器电压系数的方法。本发明可克服电压互感器  
屏蔽误差对串联加法线路的影响, 使得工频电压  
加法能在 220kV 的高压区间甚至 330kV ~ 1000kV  
的超高压与特高压区间有效使用。



1. 一种测量电压互感器电压系数的线路,其特征是:包括由额定电压相同、屏蔽型接地的第一单级电压互感器(T1)和第二单级电压互感器(T2),以及隔离变压器(T3)组成的一个无源线性电路;第一单级电压互感器(T1)和第二单级电压互感器(T2)的额定变比均等于K,隔离变压器(T3)的额定变比等于1;所述的第一单级电压互感器(T1)的一次低压端子X1与第二单级电压互感器(T2)的一次高压端子A2连接、第一单级电压互感器(T1)的二次高压端子a1与隔离变压器(T3)的一次高压端子A3连接、第一单级电压互感器(T1)的二次低压端子x1与隔离变压器(T3)的一次低压端子X3连接;隔离变压器(T3)的二次低压端子x3与第二单级电压互感器(T2)的二次高压端子a2连接。

2. 一种采用如权利要求1所述线路测量电压互感器电压系数的方法,其特征是包括以下步骤:

S1 以第二单级电压互感器(T2)的一次低压端子X2为参考节点,第一步在无源线性电路的一次高压端子A1和第二单级电压互感器(T2)的一次高压端子A2施加电压U,隔离变压器(T3)的二次高压端子a3和第二单级电压互感器(T2)的二次低压端子x2之间的输出以参考电压互感器的二次输出为参考,输出用比例误差的方法测量,表示为 $\alpha$ ;

S2 第二步在无源线性电路的一次高压端子A1施加电压U,第二单级电压互感器(T2)的一次高压端子A2施加零电压,隔离变压器(T3)的二次高压端子a3和第二单级电压互感器(T2)的二次低压端子x2之间的输出以参考电压互感器的二次输出为参考,差值用比例误差的方法测量,表示为 $\beta$ ;

S3 第三步在无源线性电路的一次高压端子A1施加电压2U,第二单级电压互感器(T2)的一次高压端子A2施加电压U,隔离变压器(T3)的二次高压端子a3和第二单级电压互感器(T2)的二次低压端子x2之间的输出以参考电压互感器的二次输出为参考,差值用比例误差的方法测量,表示为 $\gamma$ ;

S4 如果参考电压互感器在电压2U下的误差为 $\varepsilon(2U)$ ,在电压U下的误差为 $\varepsilon(U)$ ,则有:

$$\varepsilon(2U) - \varepsilon(U) = \frac{\alpha + \beta}{2} - \gamma$$

## 测量电压互感器电压系数的线路及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种测量电压互感器电压系数的线路。本发明还涉及采用所述线路测量电压互感器电压系数的方法。

### 背景技术

[0002] 工频电压比例量值需要根据计量学的比例定义导出,其过程需要两个试验步骤,一是进行两个电压量值的比较,确定它们相同的程度,用比值误差与相位误差表示,其核心技术是误差的精密测量;二是把名义值相同的若干个电压量相加,得到两个电压量值的倍数关系。其核心技术是叠加工频电压。通常把这两种技术合称为工频电压加法技术。目前电压低于 2kV 的工频电压加法普遍使用参考电势法,使用一个与一次电压有固定比例关系的二次电压作为参考电压,依次测量从一次电压分割出来的若干个与参考电压名义值相同的段电压的偏差。根据测量得到的误差值计算出参考电势的比例误差值以及各段分压的比例误差值,不确定度可以达到  $10^{-7}$  量级。更高电压等级的感应分压器,其绝缘结构复杂,制造困难,因此高于 2kV 的工频电压加法一般使用电压互感器进行。

[0003] 历史上有两种线路可以实施电压互感器的工频电压加法,一种是串并联加法线路,1956 年由联邦德国物理技术研究院(PTB) Zinn 等学者完成。另一种是串联加法线路,1989 年由国家高电压计量站王乐仁等学者完成。由于串联加法线路只需要进行一个回路的平衡调节,容易实施,在我国已得到推广应用。1993 年 5 月 13 日授权的中国发明专利 ZL90100301.8“电压互感器串联加法线路”对该线路进行了描述。其特点是使用标准电压互感器分别与两台标称电压比相同,额定电压为二分之一的不接地电压互感器在某个电压下互校,然后再与背靠背串联的这两台接地电压互感器在两倍于先前的电压下互校,根据以上三次比较测量得到的数据,计算出标准电压互感器的误差在该倍压区间的变化,即电压系数。由于该标准电压互感器需要在接地与不接地两种状态下使用,其一次绕组的电位发生转换,需要有完善的电场屏蔽结构消除绕组电位变化引入的屏蔽误差。当电压超过 110kV 时,电场屏蔽的设计与制造十分困难,不完善的屏蔽会使屏蔽误差显著增加,从而限制了串并联加法和串联加法在超高压与特高压下的应用。

### 发明内容

[0004] 本发明所要解决的第一个技术问题,就是提供一种测量电压互感器电压系数的线路。

[0005] 本发明所要解决的第二个技术问题,就是提供一种测量电压互感器电压系数的方法。

[0006] 本发明的线路和方法,可克服电压互感器屏蔽误差对串联加法线路的影响,在屏蔽误差完善的情况下也能有效地实施工频电压加法,使得工频电压加法不但能在 2kV 到 110kV 的中压与高压区间有效使用,也能在 220kV 的高压区间甚至 330kV ~ 1000kV 的超高压与特高压区间有效使用。

[0007] 解决上述技术问题,本发明采用的技术解决方案如下:

[0008] 一种测量电压互感器电压系数的测量线路,其特征是:包括由额定电压相同、屏蔽型接地的第一单级电压互感器 T1 和第二单级电压互感器 T2,以及隔离变压器 T3 组成的一个无源线性电路;第一单级电压互感器 T1 和第二单级电压互感器 T2 的额定变比均等于 K,隔离变压器 T3 的额定变比等于 1;所述的第一单级电压互感器 T1 的一次高压端子 X1 与第二单级电压互感器 T2 的一次高压端子 A2 连接、二次高压端子 a1 与隔离变压器 T3 的一次高压端子 A3 连接、二次低压端子 x1 与隔离变压器 T3 的一次低压端子 X3 连接;隔离变压器 T3 的二次低压端子 x3 与第二台单级电压互感器 T2 的二次高压端子 a2 连接。

[0009] 由此组成的无源线性电路,其中第一单级电压互感器 T1 的一次高压端子 A1,第二单级电压互感器 T2 的一次高压端子 A2、一次低压端子 X2,隔离变压器 T3 的二次高压端子 a3,第二单级电压互感器 T2 的二次低压端子 x3 均是所述的电路支路中的节点。

[0010] 本发明的原理是:使用两台额定电压比相同的屏蔽型接地电压互感器和一台隔离变压器组成一个无源线性电路,利用线性电路激励与响应的叠加性,通过合理的测量步骤得到被测电压互感器的电压系数。虽然电压互感器的励磁电流具有非线性,不能算是线性器件,但是如果限定它的工作状态,也可以构造出符合线性特性的电压互感器。具体来说,如果限定电压互感器的工作状态是零电压和某一规定电压,我们就可以在规定的电压与零电压之间全部填充线性点,从而构造出线性的电压互感器。除此之外,还需要满足稳态条件。在暂态过程中,不能认为中间的填充点不起作用,但就稳态而言,虽然电压与电流按正弦规律变化,电压互感器的励磁参数也可以认为与磁化过程无关,即励磁阻抗是常数。

[0011] 采用上述线路测量电压互感器电压系数的方法,包括以下步骤:

[0012] S1 以节点 X2 为参考节点,第一步在无源线性电路的节点 A1 和 A2 施加电压 U,节点 a3 和 x2 之间的输出以参考电压互感器的二次输出为参考,输出用比例误差的方法测量,表示为  $\alpha$ ;

[0013] S2 第二步在无源线性电路的节点 A1 施加电压 U,节点 A2 施加零电压,节点 a3 和 x2 之间的输出以参考电压互感器的二次输出为参考,差值用比例误差的方法测量,表示为  $\beta$ ;

[0014] S3 第三步在无源线性电路的节点 A1 施加电压 2U,节点 A2 施加电压 U,节点 a3 和 x2 之间的输出以参考电压互感器的二次输出为参考,差值用比例误差的方法测量,表示为  $\gamma$ ;

[0015] S4 如果参考电压互感器在电压 2U 下的误差为  $\varepsilon(2U)$ ,在电压 U 下的误差为  $\varepsilon(U)$ ,则有:

$$[0016] \quad \varepsilon(2U) - \varepsilon(U) = \frac{\alpha + \beta}{2} - \gamma$$

[0017] 所述的步骤 S1 具体做法如下:

[0018] 将无源线性电路的 X2 和 x2 节点接地,A1、A2 两个节点均与升压变压器 TB 的中心电压抽头 B2 连接,a3 — x2 端子与 HEJ 的差压回路端子  $U_x - U_n$  连接,T4 的二次端子 a4 — x4 与 HEJ 的工作电压回路  $U_p - 0$  端子连接,TB 的 N 端子及 x4 端子接地;

[0019] 当 TB 的中心电压抽头 B2 输出电压 U 时,HEJ 有测量示值  $\alpha$ ,设此时 TV3 的误差为

$\varepsilon(U)$ , 则  $a3 - x2$  的输出  $\dot{U}_{31}$  可表示为:

$$[0020] \quad \dot{U}_{31} = \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U)](1 + \alpha) \approx \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U) + \alpha] \quad (1);$$

[0021] 其中:  $T4$  是额定电压等于第一单级电压互感器  $T1$  (或  $T2$ ) 的两倍、且额定变比等于  $K$  的参考电压互感器,  $HEJ$  是精密电压互感器校验仪  $11$ ,  $TB$  是有中心抽头的试验变压器。

[0022] 所述的步骤  $S2$  具体做法如下:

[0023] 将无源线性电路的  $A2$ 、 $X2$  及  $x2$  节点接地,  $A1$  节点与升压变压器  $TB$  的中心电压抽头  $B2$  连接,  $a3$  节点与  $HEJ$  的差压端子  $U_x$  连接,  $x2$  节点与  $T4$  的  $x4$  端子连接。  $T4$  的二次端子  $a4 - x4$  与  $HEJ$  的工作电压回路  $U_p - 0$  端子连接, 同时  $a4$  端子与  $HEJ$  的差压端子  $U_n$  连接。  $TB$  的  $N$  端子及  $x4$  端子接地;

[0024] 当  $TB$  的中心电压抽头  $B2$  输出电压  $U$  时,  $HEJ$  有测量示值  $\beta$ , 设此时  $T4$  的误差为  $\varepsilon(U)$ , 则  $a3 - x2$  的输出  $\dot{U}_{32}$  可表示为:

$$[0025] \quad \dot{U}_{32} = \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U)](1 + \beta) \approx \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U) + \beta] \quad (2);$$

[0026] 所述的步骤  $S3$  具体做法如下:

[0027] 无源线性电路的  $A1$  节点与升压变压器  $TB$  的  $B1$  端子连接,  $A2$  节点与  $TB$  的  $B2$  端子连接,  $X2$  及  $x2$  节点接地,  $a1$  节点与  $HEJ$  的差压端子  $U_x$  连接,  $x2$  节点与  $T4$  的  $x4$  端子连接。  $T4$  的二次端子  $a4 - x4$  与  $HEJ$  的工作电压回路  $U_p - 0$  端子连接, 同时  $a4$  端子与  $HEJ$  的差压端子  $U_n$  连接。  $TB$  的  $N$  端子及  $x3$  端子接地。当  $TB$  的  $B1$  端子输出电压  $2U$  时,  $HEJ$  有测量示值  $\gamma$ , 设此时  $T4$  的误差为  $\varepsilon(2U)$ , 则  $a3 - x2$  的输出  $\dot{U}_{33}$  可表示为:

$$[0028] \quad \dot{U}_{33} = \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(2U)](1 + \gamma) \approx \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(2U) + \gamma] \quad (3)。$$

[0029] 所述的步骤  $S4$  具体做法如下:

[0030] 根据线性电路激励与响应的叠加性, 当  $A1-X2$  节点之间施加电压  $2U$ , 同时  $A2-X2$  节点之间施加电压  $U$  时, 节点  $a3-x2$  之间的输出是以下两个输出响应的叠加: 一个是  $A1-X2$  和  $A2-X2$  节点之间都施加电压  $U$ ; 另一个是  $A1-A2$  和  $A1-X2$  节点之间都施加电压  $U$ 。于是下式成立:

$$[0031] \quad \dot{U}_{33} = \dot{U}_{31} + \dot{U}_{32} \quad (4)$$

[0032] 把(1)、(2)、(3)式代入(4)有:

$$[0033] \quad \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(2U) + \gamma] = \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U) + \alpha] + \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U) + \beta]$$

[0034] 整理得到:

$$[0035] \quad 2[1 + \varepsilon(2U) + \gamma] = 1 + \varepsilon(U) + \alpha + 1 + \varepsilon(U) + \beta$$

$$[0036] \quad \varepsilon(2U) - \varepsilon(U) = \frac{\alpha + \beta}{2} - \gamma \quad (5)。$$

[0037] 有益效果：本发明的优点是利用无源线性电路激励与响应的叠加性实现对参考电压互感器的倍压测量，组成该无源线性电路的电压互感器的屏蔽误差在叠加的过程中相互抵消，不会对参考电压互感器电压系数的测量结果造成影响。该线性电路中的隔离变压器 T3 保证了线路输出电压的稳定，提高了测量的准确性。即使是屏蔽误差比较大的 220kV ~ 500kV 屏蔽型电压互感器也可以按本申请的方法组合成超高压与特高压的无源线性电路，按本申请提出的测量步骤实施工频电压加法。

### 附图说明

[0038] 图 1 是本申请提出的无源线性电路结构示意图；

[0039] 图 2 是测量步骤 1 所使用的接线图；

[0040] 图 3 是测量步骤 2 所使用的接线图；

[0041] 图 4 是测量步骤 3 所使用的接线图。

[0042] 图中：1. 第一单级电压互感器 T1 的一次绕组，2. 第二单级电压互感器 T2 的一次绕组，3. 第二单级电压互感器 T2 的铁芯，4. 第二单级电压互感器 T2 的二次绕组，5. 隔离变压器 T3 的二次绕组，6. 隔离变压器 T3 的铁芯，7. 隔离变压器 T3 的一次绕组，8. 第一单级电压互感器 T1 的二次绕组，9. 第一单级电压互感器 T1 的铁芯，10. 带高压中心抽头的升压变压器 TB，11. 电压互感器校验仪，12. 参考电压互感器 T4 的铁芯，13. 参考电压互感器 T4 的一次绕组，14. 参考电压互感器 T4 的二次绕组，参考电压互感器 -T4。

### 具体实施方式

[0043] 下面，结合附图对本发明作进一步描述。

[0044] 如图 1 所示，本发明的无源线性电路实施例由额定电压相同的单级电压互感器第一单级电压互感器 T1、第二单级电压互感器 T2 和隔离变压器 T3 组成，第一单级电压互感器 T1 和第二单级电压互感器 T2 的额定变比均等于 K，隔离变压器 T3 的额定变比等于 1。第一单级电压互感器 T1 的一次绕组末端 X1 与第二单级电压互感器 T2 的一次绕组始端 A2 连接，第一单级电压互感器 T1 的二次输出作为隔离变压器 T3 的一次输入，隔离变压器 T3 的二次绕组末端 x1 与第二单级电压互感器 T2 的二次绕组始端 a2 连接。

[0045] 采用上述线路测量电压互感器电压系数的方法，包括以下步骤：

[0046] S1 测量的第一步如图 2 所示，T4 是额定电压等于第一单级电压互感器 T1（或 T2）的两倍且额定变比等于 K 的参考电压互感器，HEJ 是精密电压互感器校验仪 11，TB 是有中心抽头的试验变压器。测量时无源线性电路的 X2 和 x2 节点接地，A1、A2 两个节点均与升压变压器 TB 的中心电压抽头 B2 连接，a3 - x2 端子与 HEJ 的差压回路端子  $U_x - U_n$  连接。T4 的二次端子 a4 - x4 与 HEJ 的工作电压回路  $U_p - 0$  端子连接。TB 的 N 端子及 x4 端子接地。当 TB 的中心电压抽头 B2 输出电压 U 时，HEJ 有测量示值  $\alpha$ ，设此时 TV3 的误差为  $\varepsilon(U)$ ，则 a3 - x2 的输出  $\dot{U}_{31}$  可表示为：

$$[0047] \quad \dot{U}_{31} = \frac{U}{K} [1 + \varepsilon(U)] (1 + \alpha) \approx \frac{U}{K} [1 + \varepsilon(U) + \alpha] \quad (1);$$

[0048] S2 测量的第二步如图 3 所示，无源线性电路的 A2、X2 及 x2 节点接地，A1 节点与升

压变压器 TB 的中心电压抽头 B2 连接, a3 节点与 HEJ 的差压端子 U<sub>x</sub> 连接, x2 节点与 T4 的 x4 端子连接。T4 的二次端子 a4 - x4 与 HEJ 的工作电压回路 U<sub>p</sub> - 0 端子连接, 同时 a4 端子与 HEJ 的差压端子 U<sub>n</sub> 连接。TB 的 N 端子及 x4 端子接地。当 TB 的中心电压抽头 B2 输出电压 U 时, HEJ 有测量示值 β, 设此时 T4 的误差为 ε(U), 则 a3 - x2 的输出  $\dot{U}_{32}$  可表示为:

$$[0049] \quad \dot{U}_{32} = \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U)] (1 + \beta) \approx \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U) + \beta] \quad (2);$$

[0050] S3 测量的第三步如图 4 所示, 无源线性电路的 A1 节点与升压变压器 TB 的 B1 端子连接, A2 节点与 TB 的 B2 端子连接, X2 及 x2 节点接地, a1 节点与 HEJ 的差压端子 U<sub>x</sub> 连接, x2 节点与 T4 的 x4 端子连接。T4 的二次端子 a4 - x4 与 HEJ 的工作电压回路 U<sub>p</sub> - 0 端子连接, 同时 a4 端子与 HEJ 的差压端子 U<sub>n</sub> 连接。TB 的 N 端子及 x3 端子接地。当 TB 的 B1 端子输出电压 2U 时, HEJ 有测量示值 γ, 设此时 T4 的误差为 ε(2U), 则 a3 - x2 的输出  $\dot{U}_{33}$  可表示为:

$$[0051] \quad \dot{U}_{33} = \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(2U)] (1 + \gamma) \approx \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(2U) + \gamma] \quad (3)。$$

[0052] 在图 2、图 3 和图 4 三个线路中, 实际施加给第一单级电压互感器 T1 和 T2 的试验电压不是 U 就是零, 第一单级电压互感器 T1 和 T2 在工作过程中始终保持着唯一的传输特性, 由第一单级电压互感器 T1、T2 和 T3 组成的支路在前面的三个测量步骤中满足无源线性电路的条件。

[0053] S4 根据线性电路激励与响应的叠加性, 当 A1-X2 节点之间施加电压 2U, 同时 A2-X2 节点之间施加电压 U 时, 节点 a3-x2 之间的输出是以下两个输出响应的叠加: 一个是 A1-X2 和 A2-X2 节点之间都施加电压 U; 另一个是 A1-A2 和 A1-X2 节点之间都施加电压 U。于是下式成立:

$$[0054] \quad \dot{U}_{33} = \dot{U}_{31} + \dot{U}_{32} \quad (4)$$

[0055] 把(1)、(2)、(3)式代入(4)有:

$$[0056] \quad \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(2U) + \gamma] = \frac{\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U) + \alpha] + \frac{2\dot{U}}{K} [1 + \varepsilon(U) + \beta]$$

[0057] 整理得到:

$$[0058] \quad 2[1 + \varepsilon(2U) + \gamma] = 1 + \varepsilon(U) + \alpha + 1 + \varepsilon(U) + \beta$$

$$[0059] \quad \varepsilon(2U) - \varepsilon(U) = \frac{\alpha + \beta}{2} - \gamma \quad (5)。$$

[0060] 虽然在公式的推导中, U 和 2U 是准确的倍压关系, 但由于测量值 α、β、γ 是用变比误差值表示的, 因此施加的电压稍有变化对变比误差的影响可以忽略不计。另外测量值 α、β、γ 以及 T4 的变比误差 ε(2U) 和 ε(U) 均为复数量, 实部表示比值差, 虚部表示相位差, 相位差的单位是弧度(rad)。

[0061] 根据上述方法应用本发明, 得到的试验数据如下:

[0062] 第一单级电压互感器 T1 和 T2 额定一次电压  $250\text{kV}/\sqrt{3}$ , 额定二次电压  $50\text{V}/\sqrt{3}$ , T3 额定一次电压  $50\text{V}/\sqrt{3}$ , 额定二次电压  $50\text{V}/\sqrt{3}$ , T4 额定一次电压  $500\text{kV}/\sqrt{3}$ , 额定二次电压  $100\text{V}/\sqrt{3}$ 。测量时  $U=250\text{kV}/\sqrt{3}$ 。

[0063] 比值差的三次测量结果为： $\alpha=30.4\times 10^{-6}$ ,  $\beta=34.6\times 10^{-6}$ ,  $\gamma=15.2\times 10^{-6}$ 。根据式(5)计算, 得到 TV3 在 100% 额定电压下的比值差比起 50% 额定电压下的比值差增加了： $0.5\times (21.4\times 10^{-6}+34.6\times 10^{-6})-15.2\times 10^{-6}=17.3\times 10^{-6}$ 。

[0064] 相位差的三次测量结果为： $\alpha=14.4\times 10^{-6}$ ,  $\beta=27.6\times 10^{-6}$ ,  $\gamma=40.7\times 10^{-6}$ 。根据式(5)计算, 得到 T4 在 100% 额定电压下的相位差比起 50% 额定电压下的相位差增加了： $0.5\times (14.4\times 10^{-6}+27.6\times 10^{-6})-40.7\times 10^{-6}=-19.7\times 10^{-6}$ 。



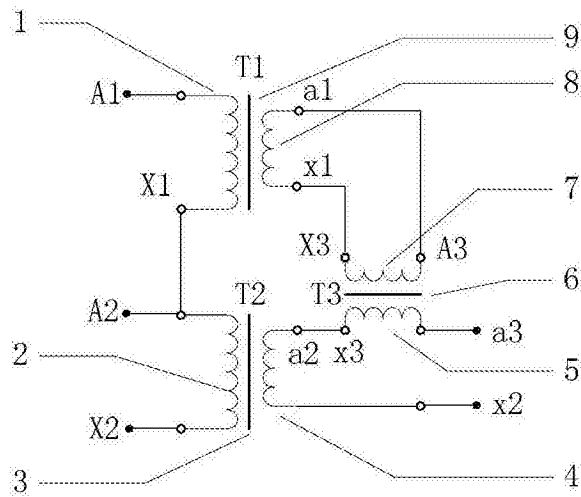


图 1

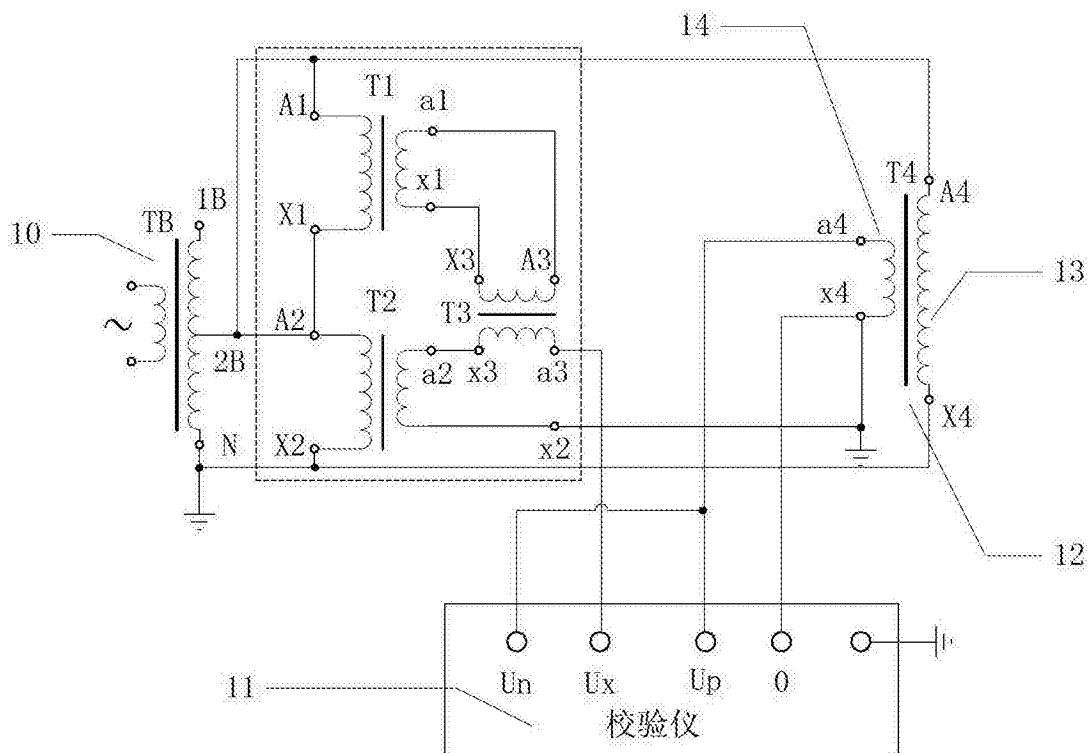


图 2

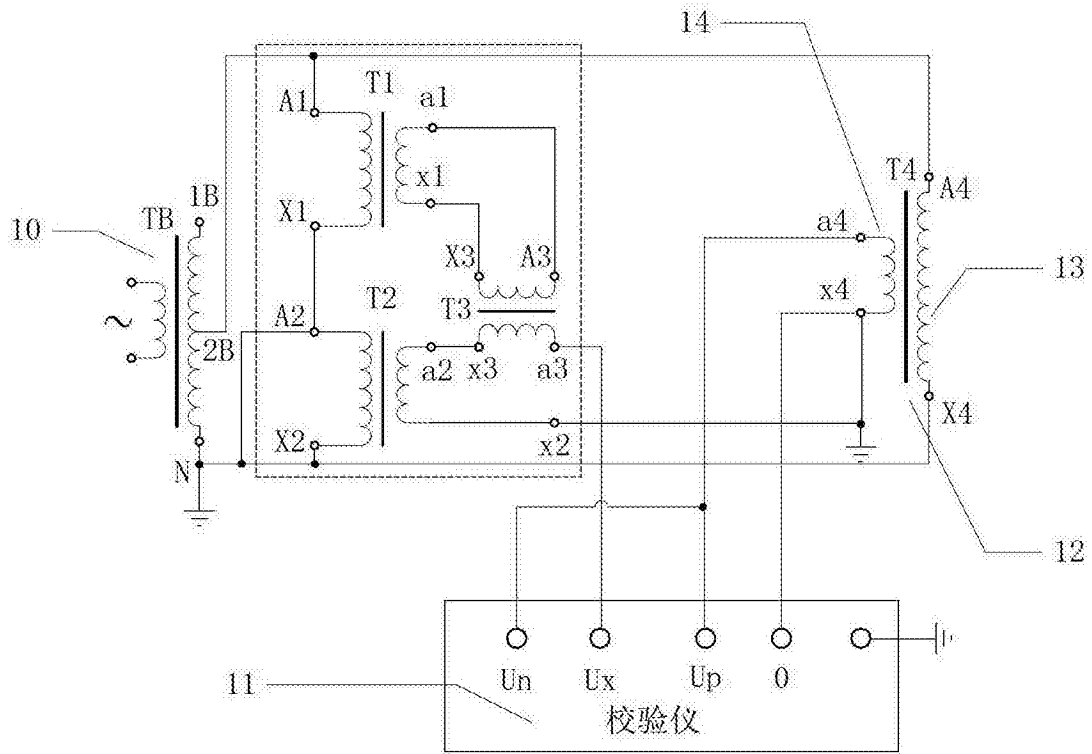


图 3

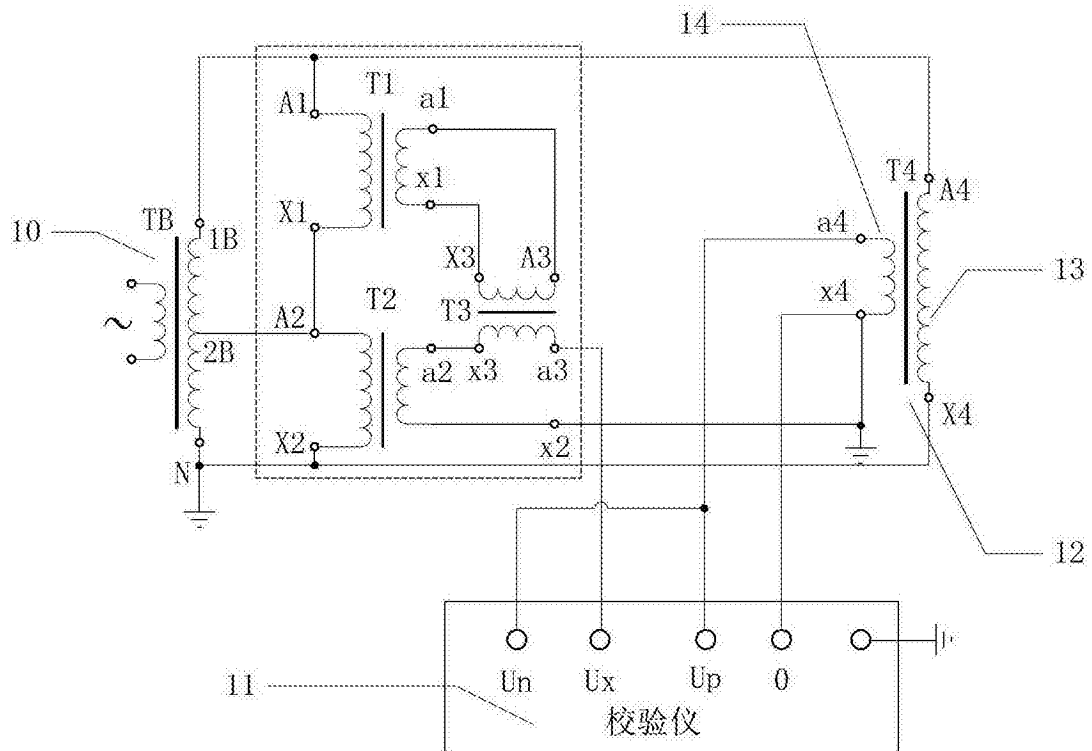


图 4