

科学技术成就

电流互感器误差补偿原理和零磁通电流互感器检定系统

山西省机械设计研究所互感器小组*

摘 要

本文介绍了我国自行设计研制的、采用新补偿方法的高精度电流互感器和零磁通电流互感器检定系统。文中对电流互感器误差补偿原理进行了全面分析,把各种补偿方法归纳为磁势补偿和电势补偿两大类,从中找出了多种新补偿方法。并据此提出了磁势补偿和电势补偿两类零磁通电流互感器,分析了它们的稳定性。说明由电势补偿零磁通电流互感器分级分段组成的零磁通电流互感器检定系统,具有稳定性好、检定数据准确和线路简单等优点,是至今比较完整的电流比例检定标准。

提高电流互感器的精度,除了选用高导磁材料的铁芯外,还可以采用补偿的方法。研制 0.05—0.01 级高精度电流互感器,一般都强调选用高导磁材料。我们通过实践证明,采用合适的补偿方法,就更能充分发挥高导磁材料的作用,使制成的高精度电流互感器不仅精度高,稳定性好,而且体积小,重量轻,成本低。

采用补偿方法,不外乎利用铁芯、线圈和 RLC 元件组成各种补偿线路,但是有关资料[1—4]介绍的各种补偿方法,都各有一套补偿理论,好象它们之间没有什么联系。毛主席教导我们,唯物辩证法主张“每一事物的运动都和它的周围其他事物互相联系着和互相影响着。”这些补偿方法之间并不是孤立的,而是紧密相联的。因此我们必须对各种补偿方法进行辩证的全面的分析。

因为电流互感器二次有负载,所以二次线圈必须提供相应的感应电势。要产生感应电势,铁芯就必须激磁。铁芯所消耗的激磁安匝,就造成电流互感器的误差。如果激磁安匝或者二次感应电势部分由外界提供,电流互感器的误差就可以相应减小。如果激磁安匝或者二次感应电势全部由外界提供,则电流互感器就有很高的精度,这就是零磁通电流互感器或电流比较仪。由此可见,对于电流互感器误差的补偿,就是研究如何通过简单的补偿线路来提供部分的激磁安匝或者二次感应电势。对于零磁通电流互感器或电流比较仪,就是研究如何通过补偿线路来提供全部的激磁安匝或者二次感应电势。

本文 1976 年 4 月 28 日收到。

* 参加研制工作的有: 山西互感器厂、天津市互感器厂、水电部电力科学研究所和西安热工研究所。

一、电流互感器误差补偿原理

如上所述,电流互感器的误差补偿,就是提供部分的激磁安匝或者二次感应电势,因此补偿方法也可归纳为两大类:一是磁势补偿,即提供磁势来代替部分的激磁安匝;一是电势补偿,即提供电势或电压来代替部分的二次感应电势。当然也可以采用两类混合的补偿方法,也就是既提供磁势又提供电势。

如果将电流互感器的向量图画在直角坐标上,并让二次电流 I_2 的向量为 0° ,如图1所示。由于精密互感器的角差小于 $20'$,因此电流互感器的误差向量 ε 为:

$$\varepsilon = \frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} = f + j\delta. \quad (1)$$

比差 f 和角差 δ 近似为:

$$f = |\varepsilon| \cos \angle I_0 \times 100 (\%), \quad (2)$$

$$\delta = |\varepsilon| \sin \angle I_0 \times 3440 ('), \quad (3)$$

式中 $\angle I_0$ 为 I_0 在直角坐标中的角度,

$$\angle I_0 = 180^\circ + \phi + \alpha. \quad (4)$$

由于补偿的数值很小,因此可以近似认为补偿

前后互感器的二次感应电势 $\dot{E}_2$ 不变(不包括补偿回路对互感器附加的负载)。对于磁势补偿,补偿前后铁芯的磁密和激磁安匝也不变。设补偿误差向量为 $\Delta\varepsilon$,则补偿后互感器的误差 $\varepsilon' = f' + j\delta'$,可以应用叠加原理求得:

$$\varepsilon' = \varepsilon + \Delta\varepsilon, \quad (5)$$

$$f' = f + \Delta f, \quad (6)$$

$$\delta' = \delta + \Delta\delta, \quad (7)$$

1. 磁势补偿

将一个或数个由 I_1 或 I_2 产生的电势或电压 $\Delta\dot{E}(I)$, $\Delta\dot{E}(I)$ 为电流 I_1 或 I_2 的函数,加在阻抗 Z_p (包括回路所有内阻抗)上,产生电流 $\Delta\dot{I}(I)$,通过互感器的某一线圈,其匝数为 W_p ,就相当于给互感器提供了 $\Delta\dot{I}(I)W_p$ 磁势,对互感器误差的补偿为:

$$\Delta\varepsilon = -\frac{\Delta\dot{I}W_p}{I_1 W_1}, \quad (8)$$

$$\Delta f = |\Delta\varepsilon| \cos \angle -\Delta\dot{I} \times 100(\%), \quad (9)$$

$$\Delta\delta = |\Delta\varepsilon| \sin \angle -\Delta\dot{I} \times 3440('). \quad (10)$$

$\Delta\dot{E}(I)$ 包括外加电势或电压 $\dot{E}_e(I)$ 以及线圈 W_p 的感应电势或电压 $\dot{E}_p(I)$ 。 $\dot{E}_e(I)$ 一般由 I_1 产生,即由互感器的一次回路供电。如果 $\dot{E}_e(I)$ 由 I_2 产生,即由互感器的二次供电,就给互感器增加了一个附加负载,线圈 W_p 可以是一次线圈、二次线圈或附加线圈(也称三次线圈),也可以是附加线圈与一次线圈或二次线圈的组合(正接或反接,两线圈匝数相加叫正接,匝数相减叫反接)。

$\dot{E}_e(I)$ 的大小和角度均可根据需要选取,且与互感器的二次负载无关。 $\dot{E}_p(I)$ 的大小和角度均与互感器的二次负载有关,

$$\Delta\dot{I} = \frac{\dot{E}_e + \dot{E}_p}{Z_p}. \quad (11)$$

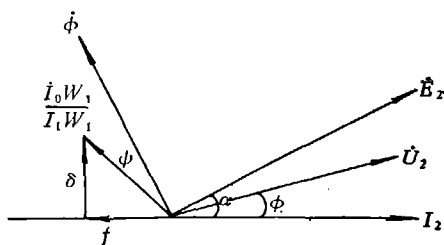


图1 电流互感器向量图

当 $E_c = 0$ 时, 补偿向量 $\Delta \varepsilon$ 与互感器二次负载 Z 的大小和功率因数有关. 只有当 $E_p \ll E_c$ 或 W_p 由附加线圈 W_1 与一次线圈 W_1 或二次线圈 W_2 反接, 且 $W_1 \approx W_1$ 或 $W_1 \approx W_2$ 时, $\Delta \varepsilon$ 与 Z 无关.

补偿线路的原理图如图 2 所示. 图中 W_p 为 W_2 和 W_1 的组合.

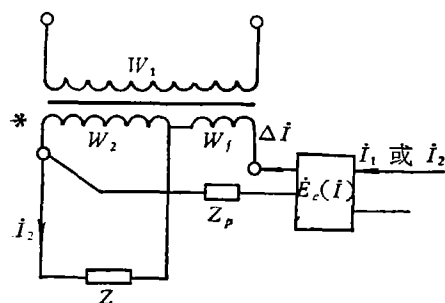


图 2 磁势补偿原理线路

当 $E_c = 0$, Z_p 分别为 R, L, C 元件, W_p 分别为 W_1, W_2 或 W_1 时, 就是一次线圈或二次线圈或附加线圈并联电阻或电感或电容补偿.

当 W_p 短路, 即 $E_c = 0$, 且外接阻抗 $Z_p = 0$ 时, 如 W_p 为 1 匝或 2 匝附加线圈, 就是短路匝补偿; 如 W_p 由 W_1 与 W_2 反接, 且 $W_1 - W_2 = -1$ 或 -2 时, 就是分数匝补偿.

匝数补偿可以认为是一种最简单的磁势补偿. 这时 $\Delta I = I_2$, $W_p = W_1 - W_{2n} = -1$ 或 -2 , 即比额定匝数少绕了 1 匝或 2 匝.

由此可见, 磁势补偿不仅包括了上述各种常见的补偿方法, 而且对于不同的 E_c , 不同的 W_p , 以及相应的 RLC 元件, 还可以组成许许多多新的补偿方法. 我们从中选择了效果良好的 RLC 补偿法, 并于 1967 年开始, 制成了多种精密电流互感器, 其中 HL52 型 0.1 级 5—5000/5 安电流互感器在额定负荷 Z_n 和下限负荷 Z_x 下的试验数据如表 1 所示, 从中可以看出补偿的效果.

表 1

补偿情况	二次负荷	$Z_n = 0.4$ 欧姆				$Z_x = 0.15$ 欧姆			
	$\cos \phi$	1		0.8		1		0.8	
	$I_n \%$	10	120	10	120	10	120	10	120
无补偿	$f(\%)$	-0.105	-0.078	-0.185	-0.123	-0.061	-0.05	-0.097	-0.069
	$\delta(\text{分})$	+9.0	+4.2	+7.2	+2.5	+5.5	+3.0	+4.9	+2.4
L 补偿	$f(\%)$	-0.045	-0.058	-0.122	-0.095	-0.002	-0.022	-0.038	-0.04
	$\delta(\text{分})$	+4.2	+3.0	+2.0	+1.4	+0.8	+2.0	0	+1.5
LC 补偿	$f(\%)$	-0.046	-0.058	-0.062	-0.036	-0.003	-0.022	-0.016	-0.017
	$\delta(\text{分})$	+0.7	-0.5	-0.7	-1.4	-1.5	+0.7	-1.0	+0.5
RLC 补偿	$f(\%)$	-0.015	-0.025	-0.033	+0.002	+0.03	+0.013	+0.015	+0.018
	$\delta(\text{分})$	+0.9	-0.5	-0.6	-1.4	-0.4	+0.7	-0.8	+0.5

2. 电势补偿

将上述外加电势或电压 $\dot{E}_c(I)$ 直接加在电流互感器的二次回路, 承担部分负载, 使互感器的二次感应电势由 $\dot{E}_2$ 下降为 $\dot{E}_u$, 从而减小互感器的误差,

$$\dot{E}_u = \dot{E}_2 - \dot{E}_c. \quad (12)$$

电势补偿的原理线路如图 3 所示. 由图 3 可见, 二次电流 I_2 通过外加电势 $\dot{E}_c$, 所以在设计 $\dot{E}_c$ 时, 必须考虑 I_2 的作用.

$\dot{E}_c$ 一般也由一个电流互感器构成。这个互感器叫辅助互感器, 它的铁芯叫辅助铁芯, 而原来的互感器叫主互感器, 它的铁芯叫主铁芯。这两个互感器的线圈一般都可以合在一起绕制, 这样电势补偿就成为双铁芯补偿。

由此可见, 在双铁芯补偿中, 电流互感器的误差由主铁芯的激磁安匝决定, 而与辅助铁芯的激磁安匝无关。辅助铁芯只是用来产生感应电势或电压 $\dot{E}_c$, 承担部分负载, 以减小主铁芯的感应电势和激磁安匝。

当两个铁芯完全相同, 且辅助铁芯上的二次线圈比额定值少绕 1 匝时, 就是半匝补偿。如果辅助铁芯少绕 4—6 匝, 主铁芯多绕 3—5 匝, 就是双铁芯的反激磁补偿。反激磁补偿并不是由于铁芯导磁率提高而起的补偿作用, 实际上是双铁芯过补偿了, 又在主铁芯上加匝补偿。当辅助铁芯少绕 6—30 匝, 且铁芯截面减至只有几片时, 就是磁分路补偿。

在双铁芯补偿中, 既然两个铁芯的作用不同, 应该根据实际情况, 分别选择合适的材料和参数。但是我们实际上见到的双铁芯补偿(除磁分路外), 两个铁芯是完全一样的。这除了要获得半匝补偿以外, 其他补偿显然都不是最合适的。

由此可见, 电势补偿不仅包括了上述各种常见的补偿方法, 而且采用不同的线路和元件, 可以得到不同的 $\dot{E}_c(I)$, 从而获得各种新的补偿方法。我们从中选择了效果良好的双铁芯 RC 补偿法, 并于 1967 年开始, 制成多种高精度电流互感器, 其中 HL46 型 0.01 级 5—5000/5 安电流互感器的试验数据如表 2 所示, 从中可以看出补偿效果。

表中在额定负荷下有两组数据: 上面的数据为电流均匀上升时测得, 下面的数据为电流均匀下降时测得。两数据之差即为电流互感器的变差。

表 2

补 偿 情 况	二次负荷 $I_n\%$	$Z_n = 0.2$ 欧姆					$Z_x = 0.15$ 欧姆				
		10	20	50	100	120	10	20	50	100	120
无 补 偿	$f(10^{-4})$	-0.8	-0.7	-0.65	-0.62	-0.62	-0.68	-0.6	-0.55	-0.53	-0.53
	$\delta(\text{分})$	-0.88	-0.76	-0.7	-0.6	-0.62	-0.68	-0.6	-0.55	-0.53	-0.53
		+0.86	+0.72	+0.59	+0.48	+0.42	+0.73	+0.61	+0.48	+0.41	+0.38
		+0.73	+0.6	+0.52	+0.45	+0.42	+0.73	+0.61	+0.48	+0.41	+0.38
双 铁 芯 R 补 偿	$f(10^{-4})$	+0.07	+0.04	0	-0.03	-0.03	+0.17	+0.11	+0.09	+0.07	+0.07
	$\delta(\text{分})$	+0.09	+0.06	0	-0.03	-0.03	+0.17	+0.11	+0.09	+0.07	+0.07
		+0.095	+0.095	+0.09	+0.08	+0.08	+0.025	+0.02	+0.015	+0.015	+0.015
		+0.11	+0.1	+0.09	+0.08	+0.08	+0.025	+0.02	+0.015	+0.015	+0.015
双铁芯 RC 补 偿	$f(10^{-4})$	-0.04	-0.05	-0.07	-0.1	-0.1	+0.02	+0.02	0	-0.02	-0.02
	$\delta(\text{分})$	-0.03	-0.06	-0.07	-0.1	-0.1	+0.02	+0.02	0	-0.02	-0.02
		+0.025	+0.025	+0.02	+0.01	+0.01	+0.015	+0.015	+0.01	+0.01	+0.01
		+0.04	+0.025	+0.015	+0.01	+0.01	+0.015	+0.015	+0.01	+0.01	+0.01

二、零磁通电流互感器的基本原理

1. 磁势补偿零磁通电流互感器

磁势补偿零磁通电流互感器的线路是很多的, 国外从五十年代后期开始研究的各种电流

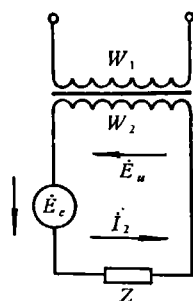


图 3 电势补偿原理线路

比较仪,实际上都是这种零磁通电流互感器. 其典型线路如图 4 和图 5 所示.

图 4、5 中 S_u 为主铁芯, S_b 为辅助铁芯,指零线圈 W_u 绕在主铁芯上,接检流计 J ,用来监视主铁芯的磁通.

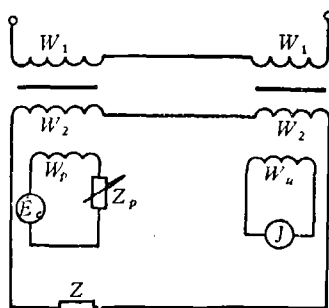


图 4 磁势补偿零磁通电流互感器原理线路(一)

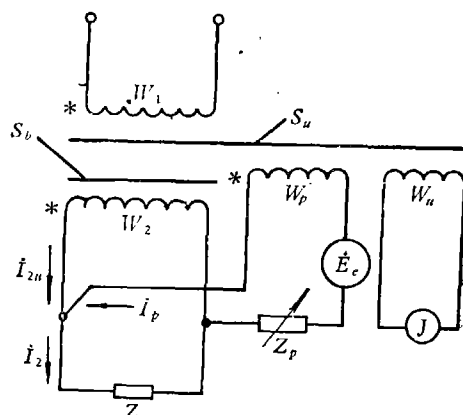


图 5 磁势补偿零磁通电流互感器原理线路(二)

图 4 与图 5 的区别主要在于附加线圈 W_p , 在图 4 中 W_p 绕在辅助铁芯上, 其匝数不限; 而在图 5 中, W_p 绕在主铁芯上, 其匝数必须等于二次线圈, 即 $W_p = W_2$.

图 4 和图 5 获得零磁通的条件是:

$$I_p W_p = I_0 W_1, \quad (13)$$

$$I_p = \frac{\pm \dot{E}_e + \dot{E}_p}{Z_p}. \quad (14)$$

图 5 线路也就是补偿式电流比较仪^[5]. 这种比较仪在检定电流互感器时, 通过校验仪代替 $\dot{E}_p$ 和 Z_p 调节零磁通, 见图 9, 只要一次平衡, 检定比较方便. 但是在比较仪检定比较仪时, 必须把比较仪变成零磁通互感器才能进行检定, 主要采用图 4 或图 5 线路, 也有采用其他线路; 但不管哪种线路, 实际上都属于磁势补偿零磁通电流互感器线路.

2. 电势补偿零磁通电流互感器

电势补偿零磁通电流互感器的原理线路如图 6 所示. 获得零磁通的条件是:

$$\dot{E}_e = \dot{E}_2, \quad (15)$$

$$\dot{E}_u = \dot{E}_2 - \dot{E}_e = 0, \quad (16)$$

电势补偿和磁势补偿的 $\dot{E}_e$ 基本一样, 都是由一个辅助电流互感器构成. 为了获得与电流

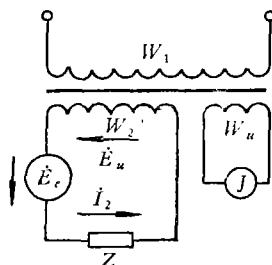


图 6 电势补偿零磁通电流互感器原理线路

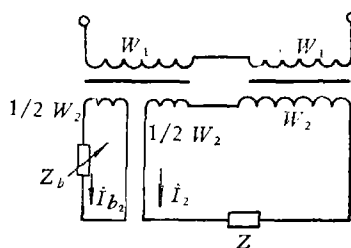


图 7 零磁通补偿原理线路

成线性关系的 $\dot{E}_e$, 这个辅助互感器必须接有负载 Z_b , 而 $\dot{E}_e$ 就是这个负载的阻抗压降, 或是这个辅助互感器的二次感应电势. 因此调节负载 Z_b 的大小和角度, 就可以相应地改变 $\dot{E}_e$ 的大小和相角.

1922 年哈伯逊 (Hobson) 提出的零磁通补偿, 也叫做哈伯逊补偿法, 如图 7 线路所示^[1]. 就是一种电势补偿零磁通电流互感器线路. 如略去辅助互感器的误差, 则获得零磁通的条件是:

$$Z_{0b} = Z_{02}, \quad (17)$$

式中 Z_{02} , Z_{0b} 分别为主、辅互感器二次回路总阻抗.

1953 年, 哈伯逊在国际电工学会上宣读了零磁通电流互感器的论文, 会议认为这种互感器需要一套庞大的辅助设备, 只能在试验室里做试验用^[6]. 直到 1964 年, 国外资料所介绍的零磁通补偿, 仍然是图 7 的线路^[4,7], 至今未见在生产实际中正式使用.

3. 零磁通电流互感的稳定性

零磁通电流互感器的误差, 主要取决于主铁芯所能达到的零磁通程度, 以及磁性误差和电容误差, 而与辅助互感器的误差无关. 但是, 辅助互感器的误差却影响零磁通互感器对电流的稳定性, 这是因为辅助互感器的误差和一般电流互感器一样, 其大小和角度均与电流的大小有关.

如果零磁通电流互感器的稳定性很高, 那么不仅调节零磁通很方便, 而且测量准确, 互感器的精度也可能做得比较高. 反之, 如果零磁通电流互感器的稳定性很低, 那么不仅调零困难, 而且测量也不易准确, 互感器的精度也很难做得很高. 因此, 必须对各种零磁通电流互感器线路的稳定性进行分析.

由图 4 至图 7 不论哪种零磁通电流互感器线路, 基本上都是通过调节阻抗 Z_p 或 Z_b , 而使主互感器(或主铁芯)达到零磁通的. 所以只要推导出可调阻抗 Z_p 或 Z_b 与辅助互感器误差的关系, 就能看出零磁通电流互感器对电流的稳定性.

在图 4 和图 5 磁势补偿零磁通电流互感器线路中, 一般 $\dot{E}_e$ 都是取自另外一个电源电流互感器的感应电势或电阻压降, 因而

$$E_e \propto I_2. \quad (18)$$

由 (13) 式得到:

$$\frac{\dot{I}_p W_p}{\dot{I}_1 W_1} = \frac{\dot{I}_0 W_1}{\dot{I}_1 W_1} = f_b + j\delta_b. \quad (19)$$

再将 (18) 式和 (14) 式代入 (19) 式, 略去 W_p 的内阻抗不计, 就可以得到外接阻抗 Z_p 与辅助互感器误差的关系:

$$Y_p = \frac{1}{Z_p} \approx K_p(f_b + j\delta_b), \quad (20)$$

式中 K_p 为一常数.

对于图 7 电势补偿零磁通电流互感器的零磁通条件为:

$$Z_{0b} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_{b2}} Z_{02}, \quad (21)$$

$$\dot{I}_{b2} = \dot{I}_2(1 + f_b + j\delta_b). \quad (22)$$

如略去辅助互感器二次线圈的内阻抗不计,则

$$Y_b = \frac{1}{Z_b} = K_b(1 + f_b + j\delta_b), \quad (23)$$

式中 K_b 为一常数。

比较 (23) 与 (20) 式可见,电势补偿零磁通电流互感器对电流的稳定性,比磁势补偿零磁通电流互感器高得多。如磁势补偿辅助互感器误差的数量级为 10^{-3} , 电势补偿辅助互感器的误差大,数量级为 10^{-2} , 则电势补偿比磁势补偿零磁通互感器的稳定性约高 100 倍。

在上述磁势补偿零磁通电流互感器稳定性的推导过程中,还略去了电源 $\dot{E}_c$ 的稳定性,电源 $\dot{E}_c$ 一般由另外一个电源电流互感器产生。因此很明显,电源的稳定性实际上与 (23) 式电势补偿零磁通互感器的稳定性相同。这时电源电流互感器的误差就是 (23) 式中辅助互感器的误差。

这也就是说,在电势补偿零磁通电流互感器中,电源电流互感器就作为辅助互感器,它所产生的感应电势或电压降直接串联在二次回路中,承担二次回路电压降,使主互感器(或主铁芯)得到零磁通。而在磁势补偿零磁通互感器中,电源电流互感器所产生的感应电势,先变成激磁电流,给辅助互感器激磁,而让辅助互感器的感应电势,再来承担二次回路电压降,使主互感器(或主铁芯)得到零磁通。由此可见,在磁势补偿零磁通互感器中,增加了由感应电势变激磁电流,再由激磁电流变感应电势的两次转换,因而不仅增加了电源电流互感器这个辅助设备,而且更重要的是使零磁通互感器对电流的稳定性显著下降。

1968 年,我们研制成功了第一台 5—10000/5 安电势补偿零磁通电流互感器,并设计成了重约 2—3 公斤由同相和正交各四个盘组成的调零阻抗箱,使这种稳定性很好的零磁通电流互感器,在实际生产中得到应用。

后来为了检定互感器的方便,我们又在这种零磁通电流互感器上,加上补偿式电流比较仪线路,制成了既是零磁通电流互感器又是电流比较仪的电流比例标准。

三、零磁通电流互感器检定系统

1. 关于检定系统的绝对校准问题

零磁通电流互感器和电流比较仪,由于精度很高,除了电流比率 $n = 1$ (例如 5/5) 可以采用自校的方法,求得这个电流比率的误差外,对于其他电流比率,要得到准确的误差数据是很困难的。国外一般都采用一套电流比较仪线路,即用三台电流比较仪组成了一个绝对校准的检定系统。但是“这种绝对的校准是很费时间和麻烦的,并且因为在校准过程中误差的积累,绝对校准只有很低的准确度。”^[5]

为了提高检定系统在校准过程中的准确度,我们采用了以下两种措施:

I. 采用电势补偿零磁通电流互感器

在上述电流比较仪校准线路中,只能使用一个电流比较仪,其他比较仪都通过辅助设备变成磁势补偿零磁通电流互感器,校准线路复杂,互感器的稳定性比较差,因而每次校准的准确度也就不高。

采用电势补偿零磁通电流互感器线路简单,稳定性好,提高了每次校准的准确度。

II. 采用分级分段的办法,制作零磁通电流互感器,组成完整的检定系统。

绝对校准是从电流比率 $n = 1$ 开始的, 先开始校准电流比率 $n = 1-10$, 然后逐步扩大电流比率(增大或减小), 由于每次校准都有误差, 这样随着电流比率的扩大, 积累误差也就越来越大。

我们把检定系统中的零磁通互感器分级分段设计制作:

最高标准: 0.00005 级, 5—30/5 两台, 用 $n + 1$ 加法线路, 相互校准 $n = 1-6$, 其校准准确度约为 $\pm 10^{-7}$;

第一级传递标准: 0.0001 级, 5—50/5 和 5—100/5 各一台, 以两台 0.00005 级为标准, 用比较法校 $n = 1-6$, 用乘法校 $n = 8-20$, 其校准准确度约为 $\pm 2 \times 10^{-7}$;

第二级传递标准: 0.0002 级, 1—100/5 和 5—1000/5 各一台, 以两台 0.0001 级为标准, 用比较法校 $n = 1-20$, 用乘法校 $n = 0.2-0.8$ 和 $n = 24-200$, 其校准准确度约为 $\pm 4 \times 10^{-7}$;

工作标准: 0.001 级, 0.5—100/5、1、0.5 和 5—10000/5 各一台, 以及 0.002 级, 0.1—100/5 一台; 以 0.0002 级 1—100/5 或 5—1000/5 和 0.0001 级 5—50/5 为标准, 用比较法校 $n = 0.2-200$, 用乘法校 $n = 0.02-0.8$ 和 $n = 240-2000$, 其校准准确度, 对于 0.001 级约为 $\pm 2 \times 10^{-6}$, 对于 0.002 级约为 $\pm 4 \times 10^{-6}$ 。

这样, 全部由九台零磁通电流互感器组成了精度为 0.00005—0.002 级, 电流比率为 0.1—10000/5 和 0.5—100/5, 1, 0.5 的检定系统。并且由以上数据可见, 最高标准校准的准确度, 对于第二级传递标准的校准说来, 基本上就可略去不计, 而对于工作标准说来, 则完全可以略去不计, 所以校准过程中的积累误差显著减小, 从而保证了各级校准结果都比较准确可靠。

2. 高精度互感器校验仪

检定 0.05 级以上高精度电流互感器, 国外一般都采用专用的电流比较仪检定线路。为了检定具有更高精度的零磁通互感器和感应分压器, 我们研制成了 HEG1 型高精度互感器校验仪, 可以用来检定高至 0.00005 级和低至 10 级的电流互感器和电压互感器(包括零磁通互感器、双级互感器、电流比较仪、感应分压器)。此外, 仪器还可以用来测量小电流、小电压、阻抗和导纳(包括电感和电容)。仪器的测量读数范围如表 3 所示。

表 3

测量项目	读数范围	
校电流互感器	$10^{-8}-11.1(\%)$	$10^{-4}-1110'$
校电压互感器	$10^{-8}-11.1(\%)$	$10^{-4}-1110'$
测 阻 抗	$10^{-6}-111$ (欧姆)	$10^{-6}-111$ (毫亨)
测 导 纳	$10^{-10}-10^{-2}$ (欧姆)	$10^{-7}-10$ (微法拉)
测 小 电 流	$10^{-10}-0.0111$ U 或	$10^{-8}-1.11$ I (安)
测 小 电 压	$10^{-8}-1.11$ U 或	$10^{-6}-111$ I (伏)

HEG1 型互感器校验仪在电流互感器、电流比较仪和零磁通电流互感器检定时的基本原理线路, 分别如图 8—10 所示。

在图 10 零磁通电流互感器检定线路中, 通过选择开关 K_p , 先将差流回路短接, 并将检流计接在零磁通电流互感器的指零线圈上, 以便先调零磁通互感器达到零磁通。然后再将检流计转接至差流回路, 测互感器的误差。

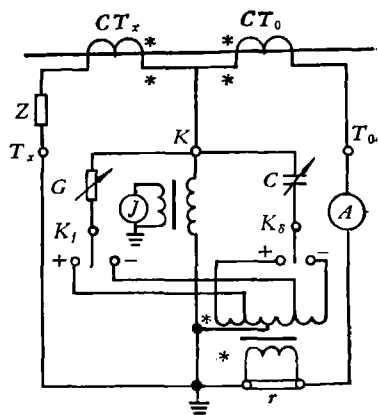


图 8 电流互感器检定线路

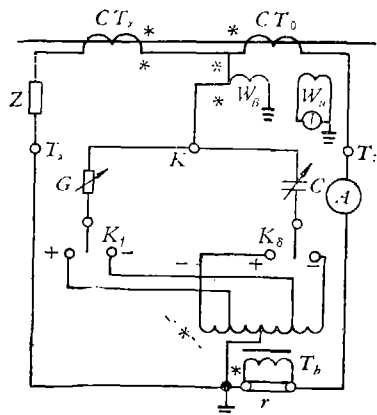


图9 电流比较仪检定线路

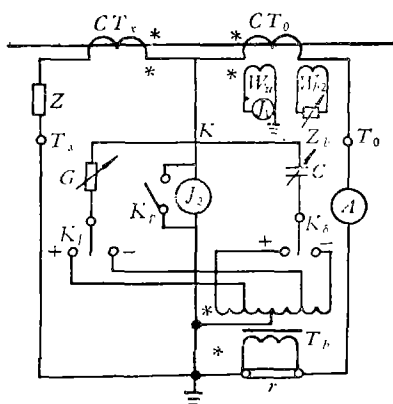


图10 零磁通电流互感器检定线路

3. 零磁通电流互感器检定系统的检定结果

1971年我们制成了由九台零磁通电流互感器和一台 HEG1 型校验仪组成的检定系统,经过检定得到九台零磁通电流互感器所有电流比的误差数据,现将其误差最大数据列于表 4。

表 4

序 号	等 级	型 号	产品序号	电流比范围(安)	电流比数目	最 大 误 差 f δ ($\times 10^{-6}$)
1	0.00005(千万分之五)	HLO-31	7101	5—30/5	6	+0.05 +0.15
2	0.00005(千万分之五)	HLO-31	7102	5—30/5	6	-0.10 +0.10
3	0.0001 (百万分之一)	HLO-21	7103	5—50/5	9	+0.2 ± 0.1
4	0.0001 (百万分之一)	HLO-22	7104	5—100/5	11	-0.2 +0.2
5	0.0002 (百万分之二)	HLO-11	7105	1—100/5	17	-0.8 +0.4
6	0.0002 (百万分之二)	HLO-12	7106	5—1000/5	21	+0.8 -0.8
7	0.002 (十万分之二)	HLO-2	7107	0.1—100/5	25	-8 +8
8	0.001 (十万分之一)	HLO-3	7108	0.5—100/5.1.0.5	57	+5 +5
9	0.001 (十万分之一)	HLO-1	7109	5—10000/5	36	+2 -3

参 考 资 料

- [1] Hague, B., *Instrument Transformers*, 1936, London, England.
- [2] Фремке, А. В., *Электрические Измерения*, Госэнергоиздат, 1954.
- [3] Бирзлов, Б. М., *Высоковольтные Трансформаторы Тока*, Госэнергоиздат, 1963.
- [4] Бачурин, Н. И., *Трансформаторы Тока*, Изд. Энергия, 1964г.
- [5] Kusters, N. L., *on Instrumentation and Measurement*, IM-13 (1964), 4, December.
- [6] Hobson, A., *Trans. AIEE*, 72 (1953), 4, August.
- [7] Пярлист, А. Р., *Известия А. Н. Эстонской ССР, Серия Тех. и Физ.-мат. Наук*, 1957, 2.