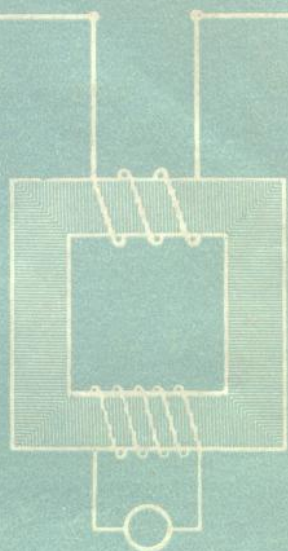


苏联 B. M. 巴尔兹洛维奇著



高压电流互感器

水利电力出版社



73.265

高压电流互感器

苏联 B.M. 巴尔兹洛维奇著

王光国翻译 王文铨校订

水利电力出版社

DS91/26
內 容 提 要

本書簡明的介紹了電流互感器的理論基礎，講述蘇聯製造的高壓電流互感器的結構并列出了它們的數據。最後一部分還專門談到了有關電流互感器的選擇、運行和修理等問題。

本書適于發電廠和變電所的工程技術人員和專業工人以及安裝企業的工作人員閱讀。

В. М. БАРЗИЛОВИЧ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1956

高壓電流互感器

根據蘇聯國立動力出版社1956年莫斯科版翻譯

王光國翻譯 王文錚校訂

*

1159D332

水利電力出版社出版(北京西郊科學院二里溝)

北京市書刊出版業營業許可證出字第105號

水利電力出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

850×1168 $\frac{1}{2}$ 開本*4 $\frac{1}{4}$ 印張*119千字*定價(第10類)0.85元

1958年9月北京第1版

1958年9月北京第1次印刷(0\01-3,800冊)

序

苏联的动力事业得到了飞跃的发展，建成並投入运行大量的发电厂和配电站，如伏尔加、卡瑪、安加拉、鄂毕和依尔德席等河流上的巨型水力发电站，建成了 400 仟伏以下的許多远距离輸电綫，广泛地开发地方动力資源等等。这样一来，一方面出現了一批新型的、运行部門尚不熟悉的高压电器，另一方面，这些电器还正在日益遍及全国。

这就使安装和运行部門的人員必須广泛地熟悉並了解苏联所生产的已有的以及新型的高压电器，其中也包括 高压 电 流互感 器。

本書的目的就是向发电厂、配电站和安装部門的工人和工程技術人員介紹电流互感器的新結構，它們的作用原理、特性和維護規則等。

由于篇幅的限制，著者不得不只敘述电流互感器的最基本的概念和一些必須談到的問題。

著者深深地感謝“电器”工厂的工程师尤金娜和霍梁夫斯基，他們在审閱本書时提供了一些宝貴的意見。也對本書的校訂者——科学技术副博士阿凡兰塞也夫表示感謝。

著 者

目 录

第一章 电流互感器的基本概念	4
§ 1. 电流互感器的用途	4
§ 2. 电流互感器的原理結綫图及其作用原 理	5
§ 3. 电流互感器的向量图和誤差公式	9
§ 4. 减小誤差的方法	15
§ 5. 电流互感器的誤差与工作条件的关系	25
§ 6. 对保护电流互感器的要求	28
§ 7. 基本定义和額定值分 級	34
第二章 高压电流互感器主要型式的結構和技术数据	40
§ 1. 电流互感器的分类	40
A 戶內式电流互感器	46
§ 2. TKΦ3型綫圈式电流互感器	46
§ 3. ТПОΦ10型穿墙单匝式电流互感器	49
§ 4. ТПШΦA10, ТПШΦA20(新型)和6000安的ТПШΦ20型 穿墙母綫式电流互感器	55
§ 5. ТПΦ10型穿墙式电流互感器	60
§ 6. ТΦ10型支持式电流互感器	66
§ 7. 特殊用途的电流互感器	70
B 戶外式电流互感器	76
§ 8. ТФН35, ТФН110和ТФН154型电流互感器	77
§ 9. ТФН220型电流互感器	88
§ 10. ТФНК400型电流互感器	93
B 裝入式电流互感器	100
§ 11. 安装在BM-35型油开关上的TB-35型电流互 感器	102
§ 12. 安装在МКП-35型油开关上的TB-35型电流互感器	103
§ 13. 安装在МГ-35型少油开关上的ТМГ-35型电流互 感器	105
§ 14. 安装在МКП-110型油开关上的TB-110和TH-110型电流互 感器	107
§ 15. 安装在МКП-220型油开关上的TB-220型电流互感器	110

§ 16. 安装在电力变压器上的 TBTJ-110、TBTH-220、TBTJ-220、TBTH-400和TBTJ-400型电流互感器	110
第三章 电流互感器的选择	112
第四章 电流互感器的安装	116
§ 1. 户内式电流互感器的安装	116
§ 2. 户外式电流互感器的安装	120
§ 3. 装入式电流互感器的安装	125
§ 4. 在电流互感器安装过程中的检查	129
第五章 电流互感器的运行	131
第六章 在运行条件下对电流互感器修理的方法(推荐性質)	139
§ 1. 户内式电流互感器的修理	139
§ 2. 户外式电流互感器的修理	141
§ 3. 电流互感器的試驗	143

附 录

1. 电流互感器的誤差計算	145
2. 电流互感器的10%倍数的計算	146
3. 341和342号变压器矽鋼片Γ形冲片制成的鉄心的激磁曲綫	148
4. 341和342号变压器矽鋼片制成的退火帶鉄心的激磁曲綫	149
5. 346和348号变压器矽鋼片退火冲片制成的鉄心的激磁曲綫	150
6. 3310号变压器矽鋼片制成的退火帶鉄心的激磁曲綫	151
7. 各号变压器矽鋼片制成的退火冲片及帶鉄心在大磁感应强度时的激磁曲綫	152
8. 341和342号变压器矽鋼片Γ形冲片制成的退火以及未退火的鉄心的损失角对比安匝的关系曲綫	153
9. 341和342号变压器矽鋼片制成的帶鉄心的损失角对比安匝的关系曲綫	153
10. 346和348号变压器矽鋼片Γ形冲片制成的退火以及未退火的鉄心的损失角对比安匝的关系曲綫	153
11. 3310号变压器矽鋼片制成的帶鉄心的损失角对比安匝的关系曲綫	154
12. 342和3310号变压器矽鋼片制成的退火帶鉄心的导磁率对磁感应强度的关系曲綫	154

第一章 电流互感器的基本概念

§1. 电流互感器的用途

电流互感器是任何现代电气设备中必不可缺的一个部分。不论是生产电能、变换电能或是传输电能的电气设备，以及从低压较小功率的设备到400千伏巨大功率的高压动力系统中，都需要电流互感器。电气设备或系统的电压愈高、功率愈大，则电流互感器的作用也愈重要。因为它动作的正确性不仅影响到对工业企业、住宅、医院等等的电能的不间断供应，同时还影响到发电厂和变电站中最贵重的设备的保护，如发电机、电力变压器以及其它电机与电器等等的保护。

电流互感器属于静止的(没有运动部分的)交流电器一类。

按照它的功用来说，电流互感器可以分成两类，测量电流互感器和用作继电保护的(保护)电流互感器。

测量电流互感器用在高压线路或大电流电路中，以测量电流；亦即用在不能直接接入测量仪表的电路内。因此，测量电流互感器具有两重任务：

- 1) 将任意数值的电流变换成便于用标准仪表直接测量的电流值(通常为5安培或1安培)；
- 2) 使测量仪表及值班维护人员对高压隔离。

很明显，要保证测量结果正确，电流的变换就必须尽可能的准确，因此测量电流互感器的基本特性就是它的准确等级，即电流互感器测量时所造成的误差。

考虑到不同运行情况对电流互感器的准确度有各种不同的要求，同时又考虑到经济的一方面，故测量电流互感器是按多种准确等级制造的。

准确度最小的是3級电流互感器^①，它們用来供电給主要綫路中的控制电器和仪表；准确度較高的是1和0.5級，它們用来供电給电度表、瓦特表和配电盘用电流表；最后，准确度特別高的是0.2級，它用于实验研究，当作标准电流互感器。

保护电流互感器用来供电給繼电保护綫路。因此保护电流互感器要完成下列任务：

1) 将任意数值的交流电流变换成便于供給繼电保护綫路的电流值(普通为10、5或1安培)；

2) 使繼电器及值班维护人員对高压隔离。

由于保护电流互感器照例只在綫路发生事故，同时有短路电流流过时才开始有效的工作，因而对保护电流互感器來說，准确度的要求就局限在有短路电流作用的范围内。

因此保护电流互感器的基本特性就是所謂百分之十倍数，它表明当电流互感器的綫圈中流过系統的短路电流时，互感器工作的准确度和可靠性^②。

目前生产的保护电流互感器用来供电給各种不同的繼电保护綫路：电流的、差动的、距离的、短路接地保护的以及其它。

尽管測量电流互感器和保护电流互感器在工作条件上有很大的差别，但它們在原理上没有什么不同。它們有相同的結構、相同的作用原理和相同的原理結綫图。

§2. 电流互感器的原理結綫图及其作用原理

图1就是电流互感器的原理結綫图，可以很清楚地看出它的基本元件之間电磁关系的特点。这里只指出直接参与电流变换过程的基本元件，它們是：

①全苏标准OCT 314-40中还有一种最低准确級，就是10級。但是，在实际上，电器制造工业不把这种10級的电流互感器当成独立的产品生产。在二次負荷超过了額定值时，以及在二次綫圈的輔助支路中，才允許用10級准确度的誤差等級。

②在很多情況下，保护电流互感器也具有某一准确等級，以备必要时当作測量互感器用。

- 1) 一次线圈;
- 2) 磁导体(铁心)①;
- 3) 二次线圈。

为使结构整齐,也就是说使它的外形和尺寸合理,保证安装和运行的质量,互感器有时还有相当多的其他元件,但是它们並不直接参与电流变换的过程。

从原理接线图看出,电流互感器的两个线圈(一次和二次)绕在同一个磁导体(铁心)上,因而使线圈之间产生了磁的联系。线圈间没有电的联系。也就是由于电流互感器具有这个特点,才能保证仪表及值班维护人员与一次线圈的高电压隔离开来。

从这个图还可以看出,电流互感器的一次绕组串接在需要测量电流的线路中,因此它经常有线路的全部电流流过。电流互感器的二次线圈上接有测量仪表或继电器。当二次线圈中的仪表或继电器由于某种原因而未接入时,线圈就必须短接起来。

因此,电流互感器在工作时,它的二次线路始终是闭合的。

电流互感器的作用原理如下。

当一次线圈通过一次电流 I_1 时,铁心内就产生了磁通 Φ_0 ,它既穿过一次线圈,又穿过二次线圈(见图1)。变化的磁通切割线圈匝时,就在一次线圈内感应出反电势 E_1 ,在二次线圈内感应出感应电势 E_2 。在后者影响下,二次线圈的封闭回路中就出现了电流 I_2 ,我们称之为二次电流。这样一来,磁通 Φ_0 就成为转换环节,它在电流变换的过程中把一次线圈的能量传递到二次线圈。

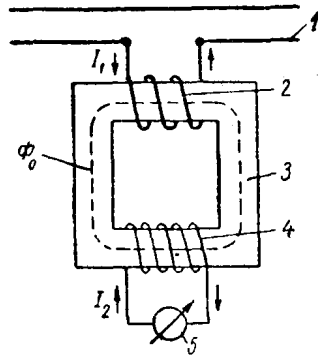


图1 电流互感器的原理接线图

1—线路; 2—一次线圈; 3—铁心; 4—二次线圈; 5—仪表。

①在这裏不讨论无铁心(空气的)电流互感器,因为在工业用电气装置及系统中不采用这种电流互感器。

为了阐明电流互感器的基本参数之间的关系，我們可以看一个理想的电流互感器的工作情况。所谓理想的电流互感器，这是指这样一种电流互感器，它在电流变换的过程中，线圈和铁心材料里都没有能量的损耗。

在理想电流互感器中，由一次线圈输入的能量和由二次线圈所得到的能量，根据能量守恒定律，它们应该相等，即

$$\Delta U_1 I_1 = E_2 I_2,$$

式中 ΔU_1 是加于一次线圈的电压，在理想电流互感器中，它就等于反电势 E_1 。

很明显，在我們讨论的情况中

$$E_1 I_1 = E_2 I_2. \quad (1)$$

根据普通电工基础中已学过的感应电势的公式，我們可以写出：

$$E_1 = 4.44 f B Q w_1 \cdot 10^{-8} \text{ [伏特]},$$

$$E_2 = 4.44 f B Q w_2 \cdot 10^{-8} \text{ [伏特]},$$

式中 f ——电流频率，以赫芝计；

B ——磁感应强度，以高斯计；

Q ——铁心截面，以平方公分计；

w_1 ——一次线圈的匝数；

w_2 ——二次线圈的匝数。

将 E_1 和 E_2 的式子代入(1)式中，同时注意到在两个式子中， f 、 B 和 Q 都是相同的，经过简化之后，我們就可以得到电流互感器的一个很重要的等式：

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 \quad (2)$$

或

$$AW_1 = AW_2, \quad (3)$$

式中 AW_1 为乘积 $I_1 w_1$ 的标记，我們称它为一次安匝；

AW_2 为乘积 $I_2 w_2$ 的标记，我們称它为二次安匝。

从等式(2)可以得出

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}, \quad (4)$$

即是說，电流互感器的电流和它的綫圈的匝数成反比。

一次电流对二次电流的比值 $\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$ 或二次匝数对一次匝数的比值 $\left(\frac{w_2}{w_1}\right)$ 称为电流互感器的变比。

由于匝数比 $\frac{w_2}{w_1}$ 是一个常数(对已給定的电流互感器)，式(4)就說明，电流互感器的一次电流和二次电流之間存在着比例关系。这个关系表明了电流互感器的突出的特点，同时也就是測量互感器測量电流的基础。

从等式(2)还可以得出另一个对測量技术很重要的关系：

$$I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_1}, \quad (5)$$

它可以以下列文字說明：一次电流 I_1 就等于由仪表測出的二次电流 I_2 乘上电流互感器的变比。

再回到等式(2)和(3)来。这两个等式还指出，理想电流互感器的一次安匝和二次安匝在数值上(仅只在数值上！)相等。

实际上，一次电流和二次电流，以及和它們相对应的安匝，在時間上彼此相差电角度180度。因之，一次安匝和二次安匝之間的关系就不能用算术等式，而需以几何等式来表示。

表明一次安匝和二次安匝之間的关系的几何等式称为安匝方程式，其形式如下：

$$\overline{AW_1} = -\overline{AW_2}, \quad (6)$$

与理想电流互感器不同，实际的电流互感器在工作时还有能量损耗，它們消耗在：使鉄心中产生磁通、鉄心发热、磁滯以及二次綫圈的发热。变换电流过程的同时产生能量损耗，就破坏了上面所得到的安匝等式(3)和(6)。因而在实际的电流互感器中，一次安匝不只应保証产生所需要的二次安匝，如在理想电流互感器中一样，而且还需要一些附加的安匝，以供給鉄心激磁和其它一些能量损耗。

因之，对于实际电流互感器，下列安匝方程式才是正确的：

$$\overline{AW}_1 = -\overline{AW}_2 + \overline{AW}_0, \quad (7)$$

式中 $\overline{AW}_0$ 称为总激磁安匝，为消耗在铁心激磁、铁心发热和磁滞的安匝总数。将(6)和(7)式加以比较，可以看出，实际电流互感器和理想电流互感器的安匝方程式的不同点就在于 $\overline{AW}_0$ 一项。

很明显，安匝方程式的变化，也使得由这个方程式所推出的一些关系有了变化，其中包括(4)式和(5)式。

然而，由于在设计电流互感器时采取了一些减少能量损耗的措施^①，使方程式(7)中的安匝 $\overline{AW}_0$ 所佔的比重大大下降，结果就使得首先由理想电流互感器所导出的关系式(4)和(5)，对实际的电流互感器仍然保持了它们的意义。不过，即令如此，电流变换过程中所产生的能量损耗仍会在互感器的工作中反映出来。在某些情况下，它们使电流互感器出现了误差，而使工作的准确度降低。

由实际电流互感器的向量图中可以对它的工作情况得到一个清晰的概念。

§3. 电流互感器的向量图和误差公式

为了详细地了解图2所示的电流互感器的向量图，我们从它的绘制过程讨论起。

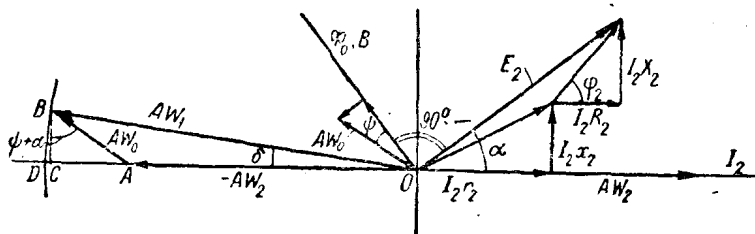


图2 电流互感器的向量图

① 参看§4。

从§2已经知道，一次安匝消耗在：第一是产生二次安匝，它由已给定的流过二次线圈的二次电流 I_2 决定；第二是产生附加安匝，来供给铁心激磁及电流变换过程中发生的所有可能的能量损耗。

要满足上面所提出的要求，究竟需要多大的一次安匝呢？借助图2的向量图就可以回答这个问题。绘制向量图时，我们从二次电流 I_2 出发。

一般除了额定电流 I_1 和 I_2 已知之外，绘制向量图时还应给出：

- 1) 二次线圈的数据——匝数 w_2 、有效电阻 r_2 和感抗 x_2 ；
- 2) 铁心的尺寸——磁路的平均长度 L 和计算截面 Q ；
- 3) 铁心材料及其磁的性能；

4) 二次(外部)负荷 Z_2 ，包括接入互感器二次线路中的所有继电器和仪表的阻抗；以及负荷的功率因数 $\cos \varphi_2$ 。

画一个直角坐标，以它的横坐标作为二次电流向量的方向。画出二次线圈的电压降三角形(按电压比例)。从坐标原点出发，在横坐标向右截取线圈中电压降的有效分量($I_2 r_2$)，它和二次电流 I_2 的方向相同。在向量 $I_2 r_2$ 的末端成 90° 截取线圈中电压降的感抗分量 $I_2 x_2$ 。在这个向量的末端，以同样的方法，平行于横坐标画出外负荷电压降的有效分量 $I_2 R_2$ ($I_2 Z_2 \cos \varphi_2$)，再平行于纵坐标画出外负荷电压降的感抗分量 $I_2 X_2$ ($I_2 Z_2 \sin \varphi_2$)。最后的封闭向量就是二次线圈的电动势：

$$E_2 = I_2 \sqrt{(r_2 + R_2)^2 + (x_2 + X_2)^2} \quad (8)$$

知道了电动势的大小，就不难按下式求出产生这个电动势所必需的磁感应强度(最大值)：

$$B_{\max} = \frac{E_2 \cdot 10^8}{4.44 f w_2 Q} = \frac{45,000 E_2}{w_2 Q} \text{ [高斯]} \quad (9)$$

其中 E_2 应以伏特代入，而铁心截面则为平方公分。频率 f 等于50赫芝。

从普通电工学已经知道，磁通以及和它方向相同的磁感应强

度越前于它們所产生的电动势 90° 。因而，产生电动势 E_2 的磁通 Φ_0 和磁感应强度 B 在向量图上以向量的方式表示时，就应越前电动势 $E_2, 90^\circ$ 。但是，在繪制向量图时，一般不利用 Φ_0 和 B 两向量，因此在图上我們只标出它們的方向。

知道了向量 Φ_0 和 B 的方向以及磁感应强度的数值之后，不难画出总激磁安匝 AW_0 向量。后者应越前 Φ_0 和 B 两向量 ψ 角， ψ 角表示有功能量损耗对无功能量损耗的比值，因而称为损耗角。

ψ 角可由实验曲线(按給定的磁性材料求出)，亦即对磁感应强度(最大值)的关系求出：

$$\psi = f(B_{\text{max}}).$$

图3就是一个具体例子，它是中等质量的3310号变压器矽鋼片①的损耗角对磁感应强度的关系。

总安匝 AW_0 的绝对值可以由下式計算：

$$AW_0 = AW_0 / \text{公分} \times l,$$

这里 $AW_0 / \text{公分}$ ——比激磁安匝，即一公分长的磁导体磁路所

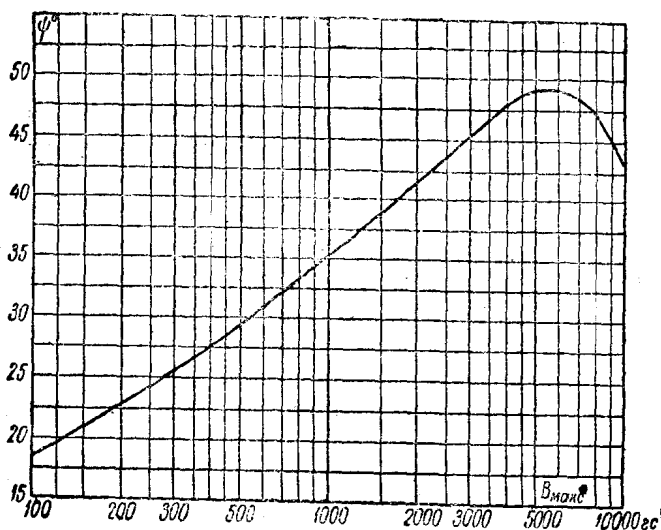


图3 中等质量的3310号矽鋼片的损耗角对磁感应强度的关系曲线

①将在§4内较詳細地談到各种型号的变压器鋼片。

需的安匝数，而 L ——磁导体磁路的平均长度，以公分計。

比安匝 AW_0 /公分可由激磁曲綫求出，激磁曲綫就是磁感应强度(最大值)对激磁安匝的关系曲綫：

$$B_{\text{max}} = f(AW_0/\text{公分}).$$

图4是一个具体例子，它是3310号变压器矽鋼片的激磁曲綫。

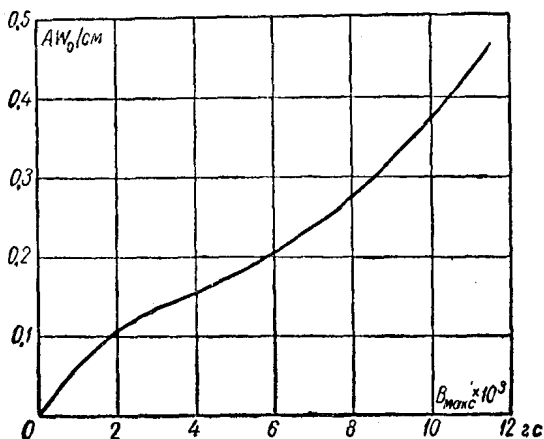


图4 中等質量的3310号矽鋼片的比安匝对磁感应强度的关系曲綫(激磁曲綫).

按已算出的磁感应强度求出 ψ 和 AW_0 的数值之后，不难画出 AW_0 向量(按安匝比例)。为方便起见，我們就把坐标原点作为它的起点。然后，从坐标原点开始，在横坐标上向右截取二次安匝向量 AW_2 (和 AW_0 的比例相同)，再在相反的方向截取向量 $-AW_2$ ，它的数值和 AW_2 相等。在向量 $-AW_2$ 的端点，按向量 AW_0 的方向和数值画出向量 AW_0 。封閉向量 OB 就是要求的一次安匝 AW_1 。

从向量图上看得很清楚，向量 AW_1 的数值和方向都与向量 $-AW_2$ 有一些差别。

很明显，从绝对值来说， $AW_1 > AW_2$ 。但 $AW_1 = I_1 w_1$ ， $AW_2 = I_2 w_2$ ，因而：

$$I_1 w_1 > I_2 w_2 \text{ 或 } I_1 > I_2 \frac{w_2}{w_1},$$

式中 I_1 ——一次电流的实际(被测量的)数值;

$I_2 \frac{w_2}{w_1}$ ——一次电流的计算值, 借助电流互感器测量结果算出。

一次电流的实际数值和由测量结果计算出的数值之间的差值就表示用电流互感器测量时产生的误差。

误差有两种: α) 电流误差和 β) 角误差。

所谓电流误差就是两个电流——用电流互感器测出的电流和实际的一次电流——之算术差对实际电流值之比。电流误差照例以百分比表示。

所谓角误差就是二次电流对于它的理想方向的角偏移, 理想方向和一次电流的方向成 180° 的角度。通常角误差是以分表示的。

由定义出发, 电流误差为:

$$f_i = \frac{I_2 \frac{w_2}{w_1} - I_1}{I_1} 100\%.$$

和额定一次电流相对应的电流误差值称为电流互感器的额定电流误差。额定电流误差为:

$$f_{in} = \frac{I_{2d} \frac{w_2}{w_1} - I_{1n}}{I_{1n}} 100\%,$$

式中 I_{1n} ——电流互感器的额定一次电流;

I_{2d} ——电流互感器的实际(由仪表测得的)二次电流。

但是, 大家都知道比值 $\frac{w_2}{w_1}$ 就是电流互感器的变比 k , 因而

$$f_{in} = \frac{kI_{2d} - I_{1n}}{I_{1n}} 100\% . \quad (10)$$

将分子分母以 k 除, 我们就得到转化到额定二次电流的电流误差:

$$f_{in} = \frac{I_{2d} - I_{2n}}{I_{2n}} 100\% . \quad (11)$$

从(10)式和(11)式可以看出, 电流互感器的额定电流误差就

等于两个电流(实际的和額定的)之差值对額定电流的比值,以百分比表示。如果实际电流小于額定电流,則电流誤差認為是負的,相反則为正值。

我們需要推出以电流互感器的結構数据(鉄心的截面和材料,綫圈匝数等等)为基础的計算公式,必須再回到图 2 所示向量图来。我們注意到,向量 AW_1 和 $-AW_2$ 之間的算术差 AD 綫段,就表示电流互感器的电流誤差。从 B 点向横坐标軸引一条垂綫,与横軸交于 C 点。不难証明,角 $\angle ABC = \psi + \alpha$ 。

为簡化公式的推导,在以后的計算中我們以綫段 AC 代替綫段 AD 。如果注意到, δ 角通常很小,因而 AD 和 AC 的差值 CD 可以忽略不計,上面这样的代換是完全容許的。

从三角形 ABC 得出:

$$AC = AW_0 \sin(\psi + \alpha).$$

将等式两端以 AW_1 除之,並乘以 100,換句話說,就是将誤差轉化到一次安匝 AW_1 去,並以百分比表示,我們就得到电流互感器的額定电流誤差的最终計算公式:

$$f_{in} = \frac{AW_0}{AW_1} \sin(\psi + \alpha) 100\% \quad (12)$$

这个式子所計算出的誤差的符号本身就是負的,因为向量 AW_2 永远小于向量 AW_1 。

我們也碰到电流互感器有正的电流誤差,这是因为采取了一些人为的措施,降低了誤差或改变了它們的特性的結果。

从同一个向量图(图2)可以看出,一次安匝向量和二次安匝向量之間的角度为 180° 差一个 δ 角。这个 δ 角就是电流互感器的角誤差。

因而,电流互感器的角誤差就是一次安匝向量 (AW_1) 和轉了 180° 的二次安匝向量 ($-AW_2$) 之間的角度,以分表示。

可以从三角形 OBC 中求得角誤差。很明显,其中

$$\sin \delta = \frac{BC}{AW_1}.$$