

电流互感器

陈 璧 光 著

水利电力出版社



內 容 提 要

本書敘述电流互感器的基本原理，誤差特性，制造工艺，試驗方法，選擇和使用。

本書可供地方电器制造工业的人員和电气运行試驗方面的工人和技术員参考。

电 流 互 感 器

陈 璧 光著

*

1793D516

水利电力出版社出版 (北京西郊科舉路二號)

北京市書刊出版登記證出字第106号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 开本 * 2 $\frac{1}{16}$ 印張 * 48千字

1958年12月北京第1版

1958年12月北京第1次印刷(0001—5,100册)

統一書号: 15143·1404 定价(第9类)0.24元

DS91/27
目 录

第一章	电流互感器的基本原理.....	3
第二章	电流互感器的誤差特性.....	13
第三章	电流互感器的制造工艺.....	32
第四章	电流互感器試驗.....	45
第五章	电流互感器的選擇和使用.....	58

DS91/27
目 录

第一章	电流互感器的基本原理.....	3
第二章	电流互感器的誤差特性.....	13
第三章	电流互感器的制造工艺.....	32
第四章	电流互感器試驗.....	45
第五章	电流互感器的選擇和使用.....	58

第一章 电流互感器的基本原理

一、一次电流和二次电流的关系

图1-1是电流互感器的原理图。电流互感器的一次线圈2与被测线路1串接，二次线圈4与测量仪表5连接构成二次回路。如果通过一次线圈的电流 I_1 （或称一次电流）与二次线圈回路中由感应而产生的电流 I_2 （或称二次电流）有一定的比例关系，那么只要测量出 I_2 值， I_1 值也就可以知道了。理想的电流互感器 I_1 和 I_2 的比值是一常数，称为电流互感器额定电流比，通常以符号 K_H 表示，按定义：

$$K_H = \frac{I_{1H}}{I_{2H}}$$

其中 I_{1H} 称为额定一次电流， I_{2H} 称为额定二次电流，在每一电流互感器的铭牌上都标明这两个值的比。如果已测知 I_2 值，则线路上的真实电流 I_1 就可以用 $K_H \times I_2$ 计算而得。所以电流互感器的作用简单说来就是使得测量电流的仪表可以不要直接连接到被测的线路上去。

采用了电流互感器可以解决下述几个问题：

(1) 测量仪表可以不直接连接到被测量的线路上，也就是仪表所连接的线路（或称二次回路）与

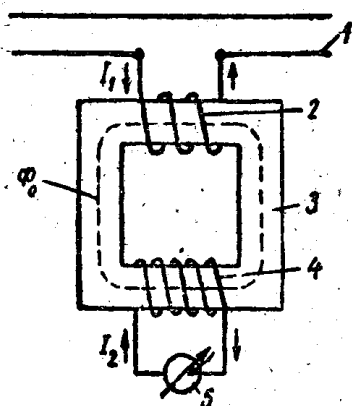


图 1-1 电流互感器原理图
1—被测线路；2—电流互感器一次线圈；3—电流互感器铁心；4—电流互感器二次线圈；5—测量仪表。

DS91/27

被測的綫路有電的隔離。因此，二次回路可以按需要接成任何方式的接綫圖，例如可以接成三相星形也可以接成三角形，這一點在繼電保護中非常重要。此外還可以把二次回路接地，保證操作上的安全。

(2) 可以用低壓型的儀表測量高壓綫路的電流，因此儀表可以設計成低壓的，不但經濟而且輕巧。

(3) 可以用標準儀表(例如額定電流為 5 安的)測量任何大小的綫路電流，使儀表的設計大為簡化。此外也解決了配電盤的接綫問題，如果各種儀表都直接連接到大電流的綫路上，那末必須全部用粗大的連接綫，這不但增大配電盤體積，同時也增加行綫的困難。

實際上電流互感器的二次電流 I_2 與感应的二次電流 I_2 的比不可能象上面所說的在任何條件下都等於 K_H ，而是隨不同的條件而變，因此必須研究 I_1 和 I_2 間的真正關係。下面就研究沒有“補償”的電流互感器，圖 1-1 就是這種電流互感器的原理圖。至於有補償的電流互感器雖 I_1 和 I_2 間的關係隨不同的補償方式而異，但下面所述的基本方法還是普遍適用的。

沒有補償的電流互感器的基本原理和一般單相變壓器或電壓互感器的原理相同。從圖 1-1 中可知這樣的電流互感器主要包括三部分：即鐵心、一次綫卷和二次綫卷。此外，有一負載連接在二次綫卷上。

根據原理圖可以推导出 I_1 和 I_2 間的關係公式。首先在二次綫卷和連接的負載回路中，可以根據電路定律直接寫出用復量表示的第一個關係式：

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 [(R_2 + r_2) + j(X_2 + x_2)] \quad (1-1)$$

式中 $\dot{E}_2$ —— 二次綫卷的感應電壓；

$\dot{I}_2$ —— 通過負載的二次電流；

R_2 和 r_2 —— 分别为二次负载电阻和二次线卷内电阻；

X_2 和 x_2 —— 分别为二次负载电抗和二次线卷漏抗。

其次根据磁路定律在铁心的回路中可写出第二个关系式：

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{\Phi}_0 Z_0 \quad (1-2 \text{ 甲})$$

式中 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ —— 分别为一次和二次电流；

W_1 和 W_2 —— 分别为一次线卷和二次线卷的匝数；

$\dot{\Phi}_0$ —— 铁心中的主磁通；

Z_0 —— 铁心磁阻。

最后根据电磁感应原理得第三个关系式：

$$\dot{E}_2 = -j4.44fW_2\dot{\Phi}_0 \quad (1-3)$$

假使上面公式(1-2甲)的右边等于零，即铁心中的磁阻 Z_0 或磁通 $\dot{\Phi}_0$ 为零，则 I_1 和 I_2 之间的关系变为非常简单，即

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = 0$$

$$\text{或} \quad \frac{\dot{I}_1}{-\dot{I}_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1}$$

通常称二次线卷匝数与一次线卷匝数的比为匝数比，用 K_w 表示。

$$\text{所以} \quad \frac{\dot{I}_1}{-\dot{I}_2} = K_w (\text{常数}).$$

因 K_w 为一常数，所以从上式可知 I_1 和 I_2 不但在比值上永远等于 K_w 不变，在相位上也永远相差 180° 不变，这一情况就是上面所谓的理想情况。但因实际上铁心的磁阻 Z_0 永不可能为零，所以 I_1 和 I_2 的关系就随 $\dot{\Phi}_0$ 和 Z_0 的大小而变，不再为一常数了。如用铁心励磁安匝的表示方式以代替 $\dot{\Phi}_0 Z_0$ ，即令 I_0 表示铁心励磁电流，则得：

$$W_1 \dot{I}_0 = \dot{\Phi}_0 Z_0$$

$$\text{代入(1-2甲)式即得：} \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_0 W_1 \quad (1-2 \text{ 乙})$$

$K_H I_2$ 大于 I_1 时比差为正，反之为负。比差为正的电流互感器表示从连接在该电流互感器上的测量仪表读得的电流数值，乘以电流比 K_H 后比线路上实际电流大，比差为负的意义则相反。同一电流互感器在不同电流和负载时比差可能为正也可能为负。

无疑，电流互感器的误差愈小愈好，因此，必须尽量使铁心的励磁电流 I_0 小，但 I_0 的大小主要决定于铁心磁通密度的大小，所以设计电流互感器时磁通密度都是取得甚小，这也是电流互感器与变压器不相同的一点。因 I_0 与 I_1 比较甚小，所以上节图 1-2 中的 $\overline{OB}$ 与 $\overline{OC}$ 大小近于相等，用 $\overline{OC}$ 代替 $\overline{OB}$ ，则 I_1 和 I_2 间的数值关系以算式表示时可大为简化，如下式所示：

$$I_1 W_1 = I_2 W_2 + I_0 W_1 \sin(\alpha + \varphi_0) \quad (1-4 \text{ 甲})$$

$$\begin{aligned} \text{或 } I_1 &= \left(\frac{W_2}{W_1} \right) I_2 + I_0 \sin(\alpha + \varphi_0) \\ &= K_w I_2 + I_0 \sin(\alpha + \varphi_0) \quad (1-4 \text{ 乙}) \end{aligned}$$

如以 (1-4 乙) 式代入上面比差定义的公式中即得电流互感器比差的计算公式，但这样的公式仍太繁复，假使再加以下述的一些变换，可以使公式再简化而又足够准确。通常为了调整比差使最小，所以实际的 K_w 值都稍小于 K_H 值，但两者一般仍近于相等，所以如令 $K_w \approx K_H$ 代入比差定义公式中即得：

$$f_i \approx \frac{K_w I_2 - I_1}{I_1} \times 100\%$$

再以 (1-4 乙) 式代入上式即得下式所示的最常用的比差计算公式：

$$f_i \approx - \frac{I_0}{I_1} \sin(\alpha + \varphi_0) \times 100\% \quad (1-5 \text{ 甲})$$

或
$$f_i \approx -\frac{I_0}{K_w I_1} \sin(\alpha + \varphi_0) \times 100\% \quad (1-5 \text{ 乙})$$

比差是表示测量仪表讀出的电流 I_1 与实际电流 I_1 之間的数值誤差。此外，必須注意 I_1 和 I_1 之間还有相位角的差別，一般簡称“角差”，角差用絕對值表示，單位为分。角差的定义如下：“一次电流向量与反轉 180° 后的二次电流向量的夾角称为相角差或簡称角差”。图1-2中的 δ 角如單位用分表示时就是角差。角差也有正負之分：当反轉后的二次电流向量超前于一次电流向量时，角差指定为正，反之，滯后于一次电流向量时为負，图1-2所示的角差 δ 就是正值的。

从图1-2可得：

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{BO}{OC} \approx \frac{I_0 W_1 \cos(\alpha + \varphi_0)}{I_1 W_1} = \frac{I_0 \cos(\alpha + \varphi_0)}{I_1} \quad (1-6)$$

因为 δ 值甚小，可令 $\delta \approx \operatorname{tg} \delta$ ，又因 $I_0 \sin(\alpha + \varphi_0)$ 与 $K_w I_1$ 相比甚小可忽略，則角差計算公式簡化如下式所示，式中角差 δ 的單位为分。

$$\delta \approx 3438 \frac{I_0 \cos(\alpha + \varphi_0)}{I_1} \approx 3438 \frac{I_0}{K_w I_1} \cos(\alpha + \varphi_0) (\text{分}) \quad (1-7)$$

作为量电用的电流互感器比差和角差的大小直接影响测量結果的正确程度，因此，比差和角差是量电用电流互感器最主要的特性。和测量仪表的分級一样，把作为量电用的电流互感器按比差和角差大小的范围分为几級，称为准确等級。分級的方式以及每一等級的比差和角差的极限值，世界各国所規定的并不完全相同。我国还未頒布有关电流互感器的国家标准，制造厂目前所生产的电流互感器在設計和驗收时均以苏联国家标准为依据。苏联在1955年所頒布的有关电流互感器的国家标准 GOST 7746-55 中对各准确等級的比差和角差极限值的規定如表

1-1所示:

表 1-1

准确等级	一次电流对 额定电流的 (%)比	极 限 值		当 $\cos \varphi = 0.8$ 时二次负荷极限 为额定次级负荷的百分比
		比差(%)	角差(分)	
0.2	10	± 0.50	± 20	25~100
	20	± 0.35	± 15	
	100~120	± 0.20	± 10	
0.5	10	± 1.0	± 60	25~100
	20	± 0.75	± 50	
	100~120	± 0.5	± 40	
1	10	± 2.0	± 120	25~100
	20	± 1.5	± 100	
	100~120	± 1.0	± 80	
3	50~120	± 3.0	不规定	50~100
10	50~120	± 10	不规定	50~100

当额定二次负荷在0.1~0.4欧以内时,其下限值不再按照表1-1中的规定,而是按表1-2的规定:

表 1-2

额定二次负荷(欧)	0.1	0.15	0.2	0.4
二次负荷下限(欧)	0.05	0.1	0.15	0.15

图1-3中的实线表示电流互感器准确等级为1.0级标准的比差极限值曲线,虚线a和b表示某电流互感器实际比差曲线,由计算或试验而得。曲线a在准确等级为1级的极限范围以内,但曲线b的一部分已超出1级标准的下极限,也就是该电流互感器比差已达不到1级标准。角差的标准极限曲线的绘制与比

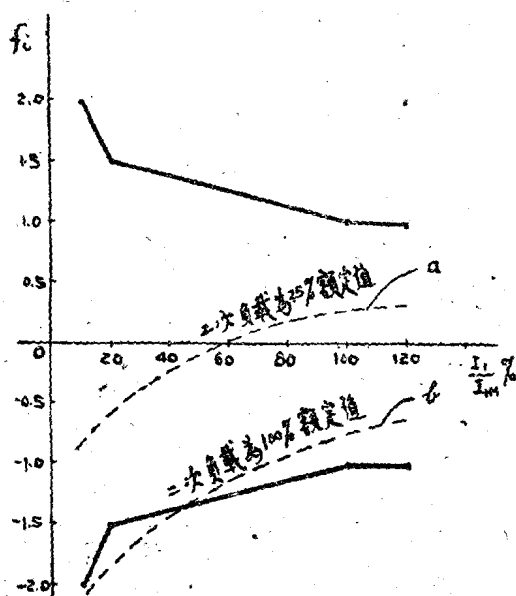


圖 1-3

差相似，不再詳述。

从表 1-1 中可知一次电流大于 120% 額定电流时，比差和角差的极限值在标准中已沒有規定，也就是說当一次电流超出規定的范围时，比差和角差就不保証符合規定。由于电流互感器鉄心具有逐漸飽和的特性，一次电

流超出額定值并繼續增大时，比差逐漸移向負值而迅速增大。当电流增大至使比差恰等于 -10% 时，这一电流与額定电流的比即称为飽和倍数。由于繼电器的动作电流一般比額定电流大好几倍，所以作为繼电保护用的电流互感器應該保証在比額定电流大好几倍的情况下能够使繼电器可靠动作。因此，对作为繼电保护用的电流互感器的主要特性不是比差和角差而是飽和倍数。苏联国家标准对飽和倍数的大小或范围沒有規定，因此每一种型式的电流互感器的飽和倍数均由制造厂在工厂的技术条件中加以确定。

国内生产的各种型号电流互感器和它們的主要技术数据列在表 1-3 中(不包括套管型电流互感器在內)，表中各类型电 流

互感器在国内各地已使用很多年，从实际运行中证实都是很可靠的。但也还存在一些缺点有待今后改进。其中除需要不断提高产品性能外，最主要的应是如何缩小体积和减轻重量。

表 1-3

型 号	额定电压 (千伏)	额定电流 (安)	准 确 等 级	额定容量 (伏安)				飽 和 倍 数
				0.5級	1.0級	3.0級	10級	
0-49Y	0.5	5~750	0.5	5	10	—	—	6
TKM-0.5	0.5	5~750	0.5	10	15	—	—	6
THH-0.5	0.5	750 1000~5000	1.0 0.5	— 20	20 —	— —	— —	6 10~20
TKΦ-3	3	5~600	1.0 3.0	— —	30 —	100 50	— 100	15 4
THΦ-10	10	5~400	0.5 1.0 3.0	15 — —	30 15 —	75 40 30	— — 60	13~15 12~14 4~5
THOΦ-10	10	400~1000 400~1500	1.0 3.0	— —	20 —	50 50	— 100	20~25 5~9
THHΦ-10	10	2000~5000	0.5 3.0	30 —	75 —	150 50	— 100	25~32 5~8
TFH-35	35	15~1000	0.5 1.0 3.0	50 — —	100 30 —	200 75 50	400 25 100	28 30 5
TFH-110	110	50~600	0.5 1	30 —	60 30	150 100	300 150	30 15

缩小体积和重量的途径主要的不外下述几方面：

(1) 采用优质电工钢片 采用优质电工钢片可以显著缩小铁心截面，因此不但铁心重量减少，用铜量也减少。对低压电流互感器来说，因铁心和线卷所占体积比例最大，所以整个体积和重量的减少也最显著。优质电工钢片中以冷轧矽钢片应用最广，因冷轧矽钢片的性能比热轧矽钢片优良得多，而成本不高，所以最适宜用于电流互感器上。图1-4是苏联型号Д310的冷轧矽钢片和Д42热轧矽钢片导磁率的比较。从图中明显看出

在低磁通密度时，冷轧鋼片的导磁率比热轧的高一倍以上。

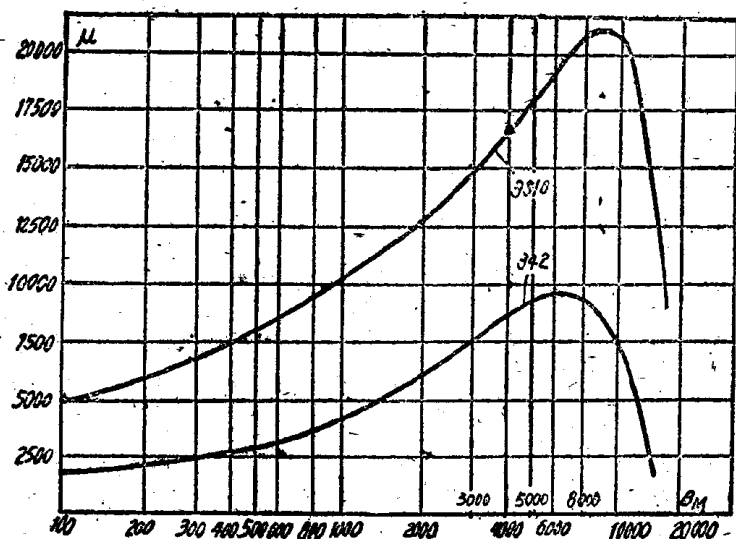


图 1-4 矽鋼片的导磁率

(2) 采用新型絕緣材料 采用絕緣性能高的新型絕緣材料对高压电流互感器特別有意义，例如目前 3 千伏以上的电流互感器多采用瓷絕緣，性能虽稳定但体积大而笨重。采用以环氧树脂为主的新型澆鑄絕緣不但可显著縮小电流互感器的体积和重量，而且由于环氧树脂所固有的許多优良性能使电流互感器在結構和制造上簡化而产品的质量却能为提高。国内已經制造成功这种新型电流互感器，应该在今后广泛推广以代替一部分現有的产品。

(3) 增加新品种 是指在現有产品的基础上增加品种和規格。对低压电流互感器來說，主要应该增加小容量的电流互感器。从表 1-3 中可知我国已生产的 1 級电流互感器鉄心容量最小的是 10 伏安，在实际使用中証实在大多数場合容量是沒有用

足的，因此，必須設計和生產1.0級的5伏安、3.75伏安和2.5伏安容量的電流互感器供用戶選擇使用。根據製造廠已制成功的1.0級5伏安電流互感器的經驗證明：比同型式10伏安的重量幾乎可減輕半，體積也相應縮小。此外還應生產額定電流在100安以上的單匝式（穿心型或母綫型）小容量電流互感器。

對高壓的電流互感器來說主要是應增加額定電壓等級，尤其6千伏一級應用還很多，目前幾乎都是以10千伏級的來代替使用，無疑必須迅速改變這種情況。用環氧樹脂澆鑄3千伏、6千伏和10千伏的電流互感器來代替現有的產品將會顯著地縮小體積、減輕重量、降低銅鐵用量和提高產品質量。

（4）設計新型系列產品 設計和生產新系列產品全面代替現有產品是從根本上克服現有產品所存在的缺點和不適應我國使用要求的情況。新產品的設計必須考慮我國地域廣大，地理和氣候的情況複雜和使用要求的不同的特點，結合採用國內外最先進的科學技術成就，使新產品能完全符合多快好省原則。

第二章 電流互感器的誤差特性

一、無補償電流互感器的誤差

電流互感器誤差的意義在上一章中已詳細說明。為了便於進一步說明影響誤差大小的因素，必須分別有補償和無補償的電流互感器。無補償的電流互感器構造簡單，製造方便。缺點是達到同樣準確等級時，用銅和用鐵量比有補償的多，因此體積也大。

沒有補償的電流互感器誤差計算公式已示於(1-5甲)和(1-7)式。下面所示的誤差公式是根據(1-5甲)、(1-7)和(1-3)

式推导而得，式中以电流互感器的参数和外负载的参数表示误差值，因此易于利用公式进行计算或说明各参数对误差的影响。

$$f_s = -\frac{10^8}{4.44fQ} [(x_2 + X_2)(AW)_r + (r_2 + R_2)(AW)_a] \frac{1}{W_2^2 B_m} \times 100\% \quad (2-1)$$

$$W_2^2 B_m = \frac{W_2 I_2 \times 10^8}{4.44fQ} \sqrt{(r_2 + Z_2 \cos \varphi_2)^2 + (x_2 + Z_2 \sin \varphi_2)^2} \quad (2-2)$$

$$\delta = \frac{3438 \times 10^8}{4.44fQ} [(r_2 + R_2)(AW)_r - (x_2 + X_2)(AW)_a] \frac{1}{W_2^2 B_m} (\text{分}) \quad (2-3)$$

式中

Q ——铁心净截面(公分²)；

$\cos \varphi_2$ ——二次负载的功率因数；

B_m ——铁心的磁通密度(高)；

W_2 ——二次线圈匝数；

I_2 ——二次电流(安)；

x_2 和 X_2 ——分别为二次线圈漏抗和负载的电抗(欧)；

r_2 和 R_2 ——分别为二次线圈电阻和负载的有效电阻(欧)；

Z_2 ——二次负载阻抗(欧)；

$(AW)_r$ 和 $(AW)_a$ ——磁通密度为 B_m 时铁心的励磁安匝(包括铁心迭片接缝安匝在内)和铁心的损耗安匝(安/公分)；

f ——一次电流频率(赫)。