

第十一章 電流互感器

11-1 對電流互感器的要求

或大電流

在高壓裝置上電流的測量，是用電流互感器進行的。電流互感器的原繞組和被測電流的高壓導綫串聯，副繞組則接上安培計和瓦特計及電度表的電流繞組。

除開測量上的應用外，電流互感器還可以用來饋電給繼電器，該繼電器的作用和電流的數值有函數關係。往往一只互感器同時應用於測量和繼電保護上。在這種情況

下，互感器必須具有兩芯，分別安放繞組。其中一只繞組只和儀器相接，而另一只繞組則只和繼電器相接。同時，也可採用具有三芯或三芯以上的互感器。

電流互感器必須有一定的準確度，所以副電路上實在的電流應盡可能和由變流係數計算得的數值相差很小。實在的電流和計算所得的電流間的偏差，亦即電流的誤差可用公式表示：

$$f_i = \frac{kI_2 - I_1}{I_1} \times 100; \quad (11-1)$$

式中 f_i ——變流係數的誤差(%)；

k ——電流互感器的額定變流係數，它等於額定原電流對額定副電流的比值；

I_2 ——電流互感器副繞組中的電流(安培)；

I_1 ——原繞組中的電流(安培)。

原電流和副電流間的相位差也不應超出一定的範圍。

按照誤差的數值，電流互感器的五種準確度等級(表11-1)。

電流互感器必須根據標準所載的額定電壓、電流和副級負載製造，其值如表11-2中所示。

副繞組的額定電流規定為5安培或1安培；但額定副電流為1安培的電流互感器應用較少。

表11-1 電流互感器的準確度等級和額定誤差

準確度等級	原繞組電流對額定電流的比值 (%)	最大的誤差		副級負載的情況
		電流	角度	
		%	分	
0.2	從120到100	±0.20	±10	副級負載在額定值的25~100%的範圍內，同時副級的功率因數為0.8。這時，額定電流為5安培的電流互感器，最小的副級負載不應小於0.15歐姆，而對額定副電流為1安培的電流互感器，則為1.5歐姆。
	20	±0.35	±15	
	10	±0.50	±20	
0.5	從120到100	±0.50	±40	
	20	±0.75	±50	
	10	±1.0	±60	
1	從120到100	±1.0	±80	
	20	±1.5	±100	
	10	±2.0	±120	
3	從120到50	±3	沒有規定標準	
10	從120到50	±10	沒有規定標準	

附註：誤差的實際曲線不應超出通過標準誤差各點的斜綫所組成的折綫範圍。

表11-2 電流互感器的額定電壓、電流和副級負載

額定電壓(仟伏)	0.5; 3; 6; 10; 15; 20; 35; 110; 154和220
原繞組的額定電流(安培)	5; 7.5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 750; 1000; 1500; 2000; 3000; 4000; 5000; 6000; 7500; 10000和15000
額定的副級負載電阻(歐姆)	0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1; 1.2; 1.6 和 2 歐姆——對額定副電流為5安培的互感器而言; 5; 10; 15; 20; 和30歐姆——對額定副電流為1安培的互感器而言。

在額定副級負載和110%的額定原電流下，電流互感器的發熱不應超過標準(表1-5)。

表11-3 計算電流互感器誤差的公式

計算的數量和用以計算的公式	符 號	公式編號
綫圈式電流互感器副繞組的感抗(歐姆) $x_{206} = 8\pi^2 k n_2^2 \frac{l}{h} f \left(\frac{a}{2} + \frac{b_2}{3} \right) 10^{-9}$ $n_2 = \frac{I_1}{I_2} n_1$	k — 羅夫斯係數,可按表10-2的公式(10-7)求得; n_1 — 原繞組的匝數; n_2 — 副繞組的匝數; l — 漏磁路徑的長度(公分); h — 副繞組的高度(公分); f — 頻率(赫芝); a — 漏磁路徑的寬度(公分); b_2 — 副繞組的寬度(公分); I_1 — 原繞組中的電流(安培); I_2 — 副繞組中的電流(安培)。	(11-5) (11-5a)
副繞組的有效電阻(歐姆) $r_{206} = \rho_{50} \times \frac{l_{m2}}{q_2}$	ρ_{50} — 銅在50°C時的電阻係數; l_{m2} — 副繞組綫匝的平均長度(公尺); q_2 — 副繞組導綫的截面積(公厘 ²)。	(11-6)
副級負載的感抗(歐姆) $x_2 = z_2 \sin \varphi_2$	z_2 — 副級負載的總阻抗(歐姆)(已給的); φ_2 — 在負載電路中電流和電壓的位移角($\sin \varphi_2$ 由已給的 $\cos \varphi_2$ 求得)。	(11-7)
副級負載的有效電阻(歐姆) $r_2 = z_2 \cos \varphi_2$	$\cos \varphi_2$ — 已給的。	(11-8)
副繞組中電動勢和電流間的相角(度數) $\psi = \arctg \frac{x_2 + x_{206}}{r_2 + r_{206}}$	符號見前述。	(11-9)
副電路的總阻抗(歐姆) $z_{02} = \sqrt{(x_2 + x_{206})^2 + (r_2 + r_{206})^2}$	同上	(11-10)
副電路中的電動勢(伏特) $E_2 = I_2 z_{02}$		(11-11)
導磁體中的磁感應(高斯) $B = \frac{450000 E_2}{Q n_2}$	Q — 導磁體的有效截面積(公分 ²)。	(11-12)
無載的總磁動勢 $I_0 w = H_0 l_c$	H_0 — 導磁體中的磁場強度(由表3-3求得); l_c — 磁力綫的平均長度(公分)。	(11-13)
無載總磁動勢和磁化磁動勢間的角度(度數) $\alpha = \arctg = \frac{H_n}{H_u}$	H_n — 無載時磁場強度的有功分量; H_u — 無載時磁場強度的磁化分量[這些數值可由按公式(11-12)所計得的磁感應的表3-3中找到]。	(11-14)
電流的誤差(%) $f_i = \frac{I_0 w_1}{I_1 w_1} 100 \sin(\psi + \alpha)$	$I_1 w_1$ — 原繞組的磁動勢。	(11-15)
角度的誤差(分) $\delta = 3440 \frac{I_0 w_1}{I_1 w_1} \cos(\psi + \alpha)$		(11-16)

11-2 電流互感器誤差的計算

設計電流互感器的任務書應包括有：

- 1) 電壓；
- 2) 額定變流係數；
- 3) 準確度等級；
- 4) 額定副級負載（歐姆或伏安）；

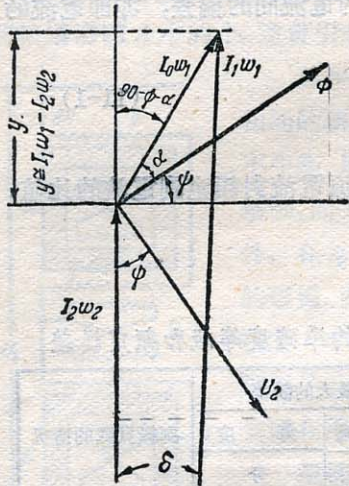


圖11-1 電流互感器的矢量圖

電流互感器的設計首先從選擇適合於指定條件的結構着手。

其次，由誤差的計算決定所選用的導磁體尺寸可否採納，選擇絕緣物和進而完成設計的草圖。如果必要時，製造出模型或試樣。試樣經過試驗並取得可以接受的試驗結果之後，製出最後的圖紙。

要計算準確度等級為 0.5、1、3 和 10 的電流互

感器的誤差，可以應用從圖 11-1 中所示的簡化矢量圖而得出的公式。

從圖上可以看到原級和副級磁壓（ $M. D. C$ ）的差，約等於綫段 y ，其值按矢量圖應等於：

$$y = I_0 w_1 \cos(90^\circ - \psi - \alpha) = I_0 w_1 \sin(\psi + \alpha).$$

按公式(11-1)，該差值對全部磁壓（磁動勢）的比值以百分率表示時，即為電流的誤差，所以

$$f_i = -\frac{I_0 w_1}{I_1 w_1} \times 100 \sin(\psi + \alpha). \quad (11-2)$$

誤差採用負值，這是因為副級磁動勢小於原級。

由該圖可求得原、副兩繞組磁動勢間的夾角。該角的正切可由下式確定：

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_0 w_1}{I_1 w_1} \cos(\psi + \alpha). \quad (11-3)$$

我們知道細小角度的正切值和該角度本身（用徑表示）是相等的，角度如改以分計算，便得：

$$\delta = 3440 \frac{I_0 w_1}{I_1 w_1} \cos(\psi + \alpha). \quad (11-4)$$

上式所包括的許多數量，都須由特別的計算求得。該計算所需的全部公式，列在表 11-3 中。

公式(11-2)和(11-3)表明除開其他的數值外，誤差決定於無載的磁動勢和原繞組的磁動勢。同時，無載磁動勢越小和原繞組磁動勢越大時，誤差便越小。由此可知原繞組若由不多的匝數組成，而具有不大的原電流時，則該電流互感器不論在多大的副級負載下常難獲得較高的準確度等級。

根據所列的公式來計算誤差的方法在例題 11-1 中敘明。

11-3 電流互感器誤差計算的例題

例題 11-1 試計算 10 仟伏、600 安培的套管式單匝電流互感器；在額定負載 0.8 歐姆下，副電流為 5 安培，準確度為 1 級。

解 互感器結構的形狀可採用圖 11-2 所示的形狀。本例中的導磁體可由 ^{熱軋矽鋼片} 厚度 0.5 公厘的變壓器鋼片製成。

在第一次的近似計算中，可以採用如圖 11-2 所示的導磁體的大略尺寸。

充填係數 0.9 的導磁體所具有的有效截面積為：

$$Q = 9 \times 5 \times 0.9 = 40.5 \text{ 公分}^2$$

導磁體的平均長度

$$l_c = 3.14 \times 17 = 53.4 \text{ 公分。}$$

原繞組的匝數按照任務書等於 1。

副繞組的匝數按公式(11-5a)： $n_2 = \frac{600}{5} \times 1 = 120$ 。

副繞組中的電流密度常常採用近於 1.5~1.8 安培/公厘²的數值。在電流 5 安培下，適用於本互感器的導線為 ^{紗包線} 的導線，其直徑為

1.95 公厘 ($q_2 = 2.98 \text{ 公厘}^2$)。這時，電流密度為：

$$\delta = 1.68 \text{ 安培/公厘}^2。$$

副繞組線匝的平均長度按圖 11-2 應為

$$l_n = (2 \times 56 + 2 \times 96) \times 10^{-3} = 0.304 \text{ 公尺。}$$

按公式(11-6)，副繞組的有效電阻為：

$$r_{2c\theta} = \frac{0.02 \times 0.304 \times 120}{2.98} = 0.245 \text{ 歐姆。}$$

這種結構的副繞組的感抗最好按實驗的數據選取。適當的數值為 $x_{2c\theta} = 0.5 \text{ 歐姆}$ (為了計算可靠，稍有增加)。

誤差應按表 11-2 所列的全部電流的限值和副級負載計算。

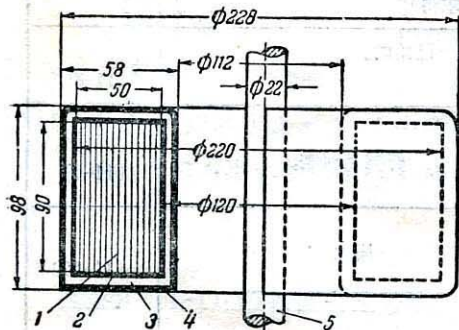


圖 11-2 單匝電流互感器的草圖：

- 1—用變壓器鋼片製成的鐵芯；
- 2—數層斜紋布帶繞成的絕緣；
- 3—直徑 1.95 公厘導線所繞成的繞組；
- 4—數層細麻布繞成的絕緣；
- 5—導電鋼桿。

其中一組的條件是這樣的：

$$1) I_2 = 120\% I_n = 1.2 \times 5 = 6 \text{ A}; \quad 3) 100\% \text{ 的副級負載，即 } 0.8 \text{ 歐姆。}$$

$$2) \cos \varphi_2 = 0.8;$$

這樣，按照規定的負載 ($x_2 = 0.8 \text{ 歐姆}$ 和 $\cos \varphi_2 = 0.8$) 求得：

$$\text{按公式(11-7), } x_2 = 0.8 \times 0.6 = 0.48 \text{ 歐姆;}$$

$$\text{按公式(11-8), } r_2 = 0.8 \times 0.8 = 0.64 \text{ 歐姆;}$$

$$\text{按公式(11-10), } z_0 = \sqrt{(0.48 + 0.5)^2 + (0.64 + 0.245)^2} = 1.32 \text{ 歐姆;}$$

$$\text{按公式(11-9), } \psi = \arctg \frac{0.48 + 0.5}{0.64 + 0.245} = 48^\circ;$$

$$\text{按公式(11-11), } E_2 = 6 \times 1.32 = 7.92 \text{ 伏特; } B = \frac{450000 \times 7.92}{120 \times 40.5} = 740 \text{ 高斯。}$$

按表 3-3 磁感應 740 高斯時可得： $H_n = 0.152$; $H_n = 0.075$ 。

於是 $H_0 = \sqrt{H_u^2 + H_n^2} = \sqrt{0.152^2 + 0.075^2} = 0.17$; $H_0 l_c = 0.17 \times 53.4 = 9.1$;

$$\alpha = \arctg \frac{H_n}{H_u} = \arctg \frac{0.075}{0.152} = 26^\circ 20'; \quad \psi + \alpha = 48^\circ + 26^\circ 20' = 74^\circ 20'.$$

電流 6 安培時的額定磁壓(安匝)為:

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 = 6 \times 120 = 720 \text{ 安匝}.$$

這樣,求得計算誤差所需的全部數據。

按公式(11-15)電流的誤差

$$f_i = -\frac{9.1}{720} \times 100 \times \sin 74^\circ 20' = -1.26 \times 0.963 = -1.21\%.$$

由表 11-1 可見,這樣的電流誤差不符合於其準確度等級。

按公式(11-16)求得:

$$\delta = 3440 \times 0.0126 \times \cos 74^\circ 20' = 43.3 \times 0.27 = 11.7'.$$

角度的誤差符合於準確度 1 級和 0.5 級。

對其他的條件也進行同樣的計算。這時,應重新決定下列各值:

$$E_2; B; I_0 w_1; I_1; w_1.$$

例如,對 $I_2 = 10\% I_H = 0.5$ 安培,可得:

$$E_2 = 0.5 \times 1.32 = 0.66 \text{ 伏特}; \quad B = 62 \text{ 高斯}; \quad I_0 w_1 = 1.98; \quad \alpha = 11^\circ 11'; \quad \psi + \alpha = 59^\circ 11'.$$

於是得: $f_i = -2.83\%$ (對第 1 級的準確度,應不高於 2%);

$\delta = 58.5'$ (符合於 1 級和 0.5 級準確度的要求)。

對所有的額定情況進行計算後,把所得的結果和表 11-1 的要求互相比較。

在所討論的本例中,角度的誤差符合於標準,可是變流係數(電流值的誤差)超出所容許的範圍。

要減小變流係數的誤差,可在副繞組中移去數匝。這樣,假定副繞組取用 118 匝,而不取用 120 匝。那末副磁動勢便會相應地降低。

由於這樣,去磁磁動勢降低,合成磁通增大一些。同時副繞組的電動勢增加,因而提高了副電流。這種電流的增加使誤差減小。移去兩匝後,修正值為

$$\frac{120 - 118}{120} \times 100 = 1.67\%.$$

經過這些修正後,實在的誤差為:

a) 在 6 安培時,

$$\cos \varphi_2 = 0.8 \text{ 和 } z_2 = 0.8 \text{ 歐姆}; \quad f_i = -1.21 + 1.67 = 0.46\%,$$

這便符合於 1 級的準確度;

6) 在 0.5 安培時,

$$\cos \varphi_2 = 0.8 \text{ 和 } z_2 = 0.8 \text{ 歐姆}; \quad f_i = -2.83 + 1.67 = -1.16\%,$$

這也符合於 1 級的準確度。

按基本條件計算的最後結果列在表 11-4 中。表中的最後三欄係按表 11-1 的要求,對 $1/4$ 額定負載 $r_2 = 0.2$ 歐姆的誤差進行計算後所得的結果。

這裏不需要減小角度的誤差,因為它已完全符合於 1 級的要求。

減少匝數並不會減小角度的誤差。要減小包括有角度誤差的誤差,可採用其他的方法,例如應用磁分路器或附加的副繞組;為此,導磁體必須具有特別的形狀。補償形式之一的作用原理如下:導磁體上鑿一孔口(圖 11-3),而導磁體截面積的一部分圍繞有附加繞組和短路綫匝。所採用綫匝

的有效電阻應較其感抗為高，以使綫匝的電感可以不計。這時綫匝中的電流和它的電動勢同相。該電流的磁動勢可和基本副繞組的磁動勢幾何相加，以減小原電流和副電流間的相應差，亦即使角度的誤差減小一些。

表11-4 電流互感器誤差計算的結果

P_2	%	120	20	10	120	20	10
I_2	安培	6	1	0.5	6	1	0.5
$\cos\varphi_2$		0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
z_2	歐姆	0.8	0.8	0.8	0.2	0.2	0.2
$I_0 w_1$		9.1	3.6	1.98	7.25	2.18	1.18
ρ	%	0.46	-0.94	-1.16	0.69	-0.04	-0.12
δ	分	11.7'	51'	58.5'	7.1'	22.2'	26.6'

11-4 電流互感器的熱計算

按照標準的要求，在周圍溫度為 $+35^\circ\text{C}$ 和

110%的額定電流下，電流互感器的溫度不應超過額定標準。

例題11-2 根據例題11-1的數據，求電流互感器的溫度和熱穩定度。

互感器的原繞組採用長0.58公尺和直徑22公厘的銅桿(截面積 $q=380$ 公厘 2)。

附加損耗係數 $k_\rho=1.05$ ；受熱繞組的電阻係數 $\rho=0.02$ 歐姆·公厘 2 /公尺。

a) 原繞組中110%的額定電流等於660安培，副電流5.5安培。原繞組(銅桿)中的功率損耗為：

$$P_1 = k_\rho I^2 r = 1.05 \times 660^2 \times 0.02 \times \frac{0.58}{380} = 14 \text{ 瓦特。}$$

副繞組中的功率損耗為：

$$P_2 = I_2^2 \times r_{20\sigma} = 5.5^2 \times 0.245 = 7.4 \text{ 瓦特。}$$

(r_2 值係從例題11-1中取得)。

這時周圍介質(空氣)從互感器的外表面携散損耗的熱量。表面各部分上的熱負荷不同，而受氣流冷卻的方式也不一樣，所以只能大略確定互感器高於空氣溫度的某一平均溫昇。

按圖11-2計算出互感器的全部冷卻面積等於0.44公尺 2 。

假定熱導係數採用 $\alpha=7$ 瓦特/ $^\circ\text{C}$ 公尺 2 ，則其溫昇為：

$$\tau_{\text{平均}} = \frac{P_1 + P_2}{\alpha S} = \frac{14 + 7.4}{7 \times 0.44} = \frac{21.4}{3.1} \approx 7^\circ\text{C}$$

熱度 $\Theta=35+7=42^\circ\text{C}$ 。

在互感器表面上個別的點將受熱高過該平均值。互感器內部靠近繞組表面的溫度將較之高若干度。

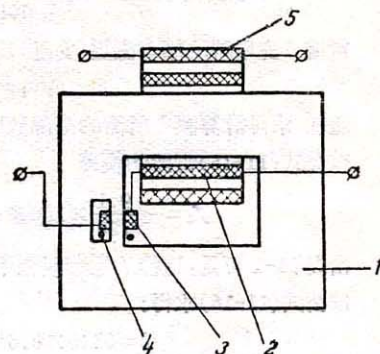


圖11-3 電流互感器誤差補償方法之一的簡圖：

1—導磁體；2—基本副繞組；3—附加副繞組；4—短路綫匝；5—原繞組。