

电流互感器10%誤差 曲綫試驗法

哈爾濱電業局 著
哈爾濱工業大學

電力工業出版社

前 言

电力系统繼电保护装置运行的可靠性，相当程度地受电流互感器誤差特性的影响。苏联在设计选择繼电保护用电流互感器时，都以10%誤差曲线为根据。我国电力系统中全部旧有的电流互感器，均缺乏該項資料，因而影响了繼电保护装置运行水平的进一步提高。运行經驗証明，由于电流互感器选用不当而造成的繼电保护装置的不正确动作，影响了电力系统的安全运行。

根据上述原因来看，进行对电流互感器10%誤差曲线各种实测方法的探討，显然是十分必要的。在本研究报告中，詳細的介绍了各种类型电流互感器的試驗方法，並针对我国电力系统試驗設備条件，提出了几种試驗方案，加以比較，供从事繼电保护工作的人員参考。

該項研究工作，是在苏联专家指导下，由哈尔滨电业局、哈尔滨工业大学与电力部改进局沈阳中心試驗所共同配合完成的。吳伯堅、河野武雄、王景屏、吳展允、范崇洵、魯宗霖、章华表等同志参加了該項研究工作。研究报告承苏沛浦同志校核。

本报告內容如有錯誤之處，希提出批評，寄交哈尔滨电业局。

目 录

前言

第一章 电流互感器的誤差及 10 %誤差曲綫	1
§1. 电流互感器的負担对誤差的影响	1
§2. 10%誤差曲綫	4
第二章 伏安特性法	6
§1. 概論	6
§2. 試驗結綫及試驗仪表	11
§3. 电流互感器二次阻抗的測定	15
§4. 試驗程序及注意事項	22
§5. 几种电流互感器的試驗結果	25
第三章 一次側通电流法	42
§1. 概論	42
§2. 电流发生装置和大电流測量方法	43
§3. 套管型电流互感器特殊試驗方法	46
§4. 套管型电流互感器試驗結果	48
§5. 二次模拟負担阻力的作用	51
第四章 二次側通电流法	53
§1. 概論	53
§2. 互感器标称比与匝数比不同时的补偿	55
§3. 試驗程序及注意事項	57
§4. 几种电流互感器的試驗結果	61
第五章 結論	65
附录 电流互感器(繼电保护用)根据容許誤差的計算*	67

第一章 电流互感器的误差

及 10% 误差曲线

§ 1. 电流互感器的负担对误差的影响

电流互感器的二次线圈联接于负担 Z_H 上, 如图1所示。此负担或为仪表或为继电器……, 其值对电流互感器的误差有极大的影响。

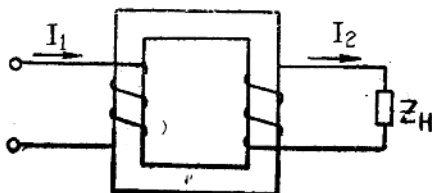


图 1

图2为互感器的等价图, Z_2 为其二次线圈阻抗, 此阻抗与负担 Z_H 相加, 即为互感器的二次侧阻抗 Z_s 即:

$$\dot{Z}_S = \dot{Z}_2 + \dot{Z}_H = z_s / \alpha \quad (1)$$

式中 z_s —— 绝对值;

α —— 阻抗角。

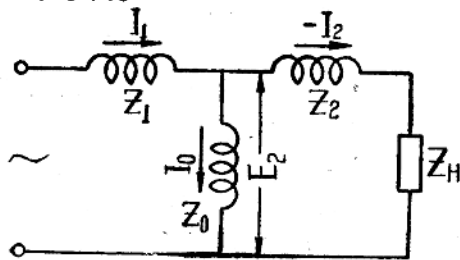


图 2

如互感器的圈数比为 K_T ，並將图2中各参数均归算至一次侧时，可繪出向量图如图3。图中：

$$I'_1 = -K_T I_2 \quad (2)$$

I'_1 为归算至一次侧的二次侧电流。

有时，为了計算方便，常将所有参数归算至二次侧，此时向量图将如图4。图中：

$$I'_2 = I_1 / K_T \quad (3)$$

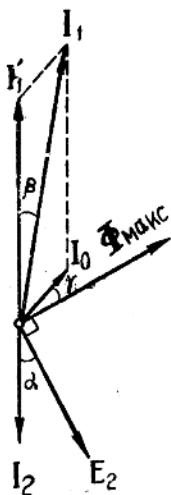


图 3

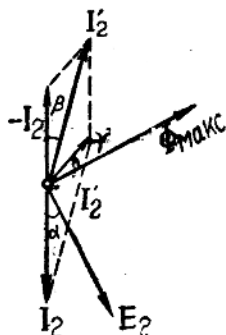


图 4

式中 I'_2 为归算至二次侧的一次侧电流，或简称“一次侧归算电流”。在一理想的互感器中，如励磁电流 I_0 为零时， I' 的绝对值应与二次侧电流相等，即 $I'_2 = -I_2$ 。但实际上由于 Z_s 与 Z_0 相較，不能略而不計，故 I_0 不可能为零。二次侧电流必小于一次侧归算电流，其間之差为 I_0 ，即：

$$i_0 = i'_2 - (-i_2) = i'_2 + i_2 \quad (4)$$

由(4)式及图4可知， I'_2 为 I_2 及 I_0 两向量顶点的連綫，另按电流互感器誤差之定义：

$$\text{电流误差百分数 } \epsilon = \frac{I_2' - I_2}{I_2'} \times 100 . \quad (5)$$

$$\text{相角误差弧度数 } \beta = (I_2')(-I_2) . \quad (6)$$

由(5)式可知, 如二次侧电流 I_2 保持一定时, I_2' 愈大, 误差也愈大, 故即可利用一简单的向量图, 说明互感器二次侧阻抗的阻抗角 α 对误差的影响。

一般继电保护用的电流互感器二次侧负担均为电感性。故当其二次侧阻抗绝对值 z , 保持不变, 但 α 自 0° 至 90° 变化时, 二次侧电流 I_2' 顶点的变化轨迹将如图 5 中弧形虚线所示。

由图中可见当 $\alpha = 90^\circ - \gamma$ 时, I_2' 最大, 且与 I_1 在同一直线上, 故互感器的电流误差最大, 而相角误差为零; 当 $\alpha = 0$ 时, 即二次侧阻抗为纯电阻性时, I_2' 为 AB 虚线, 其长度在 α 角变化范围(即 $0^\circ \sim 90^\circ$) 中为最短, 故知其误差最小。

通常为了减小电流互感器在额定电流范围内的误差, 恒使互感器的铭牌标称变流比(简称标称比) K_H 大于其实际

匝数比 K_T , 故在某种电流和负担下, 互感器的二次电流 I_2 可能较一次侧归算电流 I_2' (按标称比归算) 为大, 须加以注意。

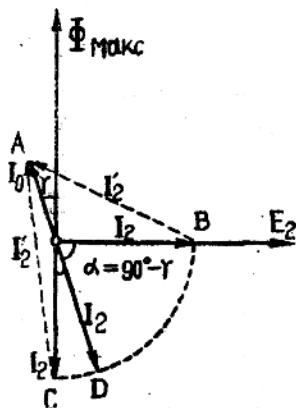


图 5

§ 2. 10% 誤差曲綫

一般电流互感器的準確度系指在一定二次負担和額定电流值下的容許誤差。此值仅能供選擇联接儀表的电流互感器时的参考，对繼电保护装置意义不大。因为当电力系统发生故障而使繼电保护装置动作时，电流互感器一次側电流常为其額定值之若干倍，而通过互感器的电流愈大，其二次側感应电动势 E_s 愈高。如已高于其伏安特性中的直綫运用部分时，励磁阻抗 Z_0 即急剧降低， I_0 必然增加，使互感器的誤差增大以致危及保护装置的灵敏度或選擇性，故选取繼电保护装置所用的电流互感器时，必須考虑当电力系统故障而通过甚大短路电流情况下的準確度。

由图2可得下式

$$E_s = I_s Z_s = I_s (Z_0 + Z_H). \quad (7)$$

故知除 I_s 外，尚有 Z_s 影响 E_s 值。如 I_s 之值甚大，但欲使誤差在容許范围內时，可减小 Z_s 之值。

为了繼电保护装置設計和运行的方便，苏联新制的电流互感器均給出所謂“10% 誤差曲綫”，此曲綫即为互感器的誤差为10%时，其一次側額定电流倍数 m 对二次側阻抗 Z_s 的关系，其形状如图6。有时为了利用上的方便，預先减去互感器二次綫圈阻抗 Z_0 ，曲綫的橫座标即用二次負担值 Z_H 表示出来。

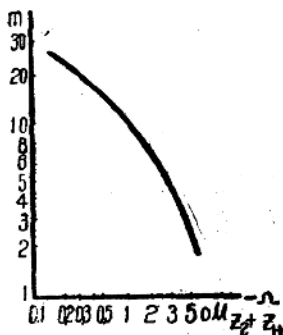


图 6

根据10%误差曲线，即可在繼电保护装置設計时，决定在某种保护方式中的互感器的容許二次負担值。詳細应用方法可参考繼电保护导則計算篇第九章和“交流电操作的繼电保护”一書（見附录）①。

在測制10%误差曲线时，可在互感器的二次側联接一可變的模拟負担 Z_H ，而逕从一次側通入电流如图7，或从二次側通入电流如图8，以求得10%误差时的一二次側电流数值，最簡單者是由互感器的伏安特性中。計算其詳細試驗計算方法，将于以下各章分別詳細論述。

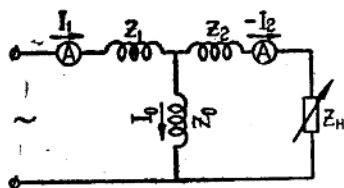


图 7

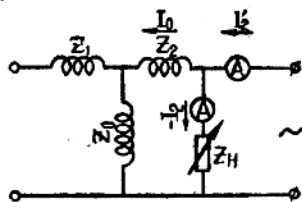


图 8

由§ 1，可知当二次側阻抗 Z_S 的阻抗角 $\alpha=90^\circ-\gamma$ 时，互感器的电流误差最大。故为了考虑最不利时的情况，試驗时 Z_S 的阻抗角应保持为 $90^\circ-\gamma$ ，但 γ 值随电流之增加而變更，且其值一般难以测定，故实际上不能保証上述条件。依照苏联专家建議，試驗时 Z_H 的阻抗角可定为 37° （即其力率为0.8），由此而得的10%误差曲线一般較接近于最不利的情况。

採用伏安特性計算而得的10%误差曲线，因在計算时假定 $\alpha=90^\circ-\gamma$ ，故为最不利的情況，按該曲线作繼电保护設計最为安全。

①电力工业部沈阳技术改进局（即前电力部东北电 業管理局中心試驗所）1953年印發的繼电保護导則及苏联П.М.米里尼科著“交流电操作的繼电保護”第二章，均有詳細介紹。本書已把繼电保護导則計算篇第九章必需部分列为附錄。

第二章 伏安特性法

§ 1. 概 論

电流互感器伏安特性試驗，原为用以求出励磁电流与感应电动势的关系。但在一般試驗时，为方便計，常按图 9 的結綫法，即變更二次側电流以讀取电流表和电压表的指示值，由图 10 中可知試驗时加于二次側的电流全部为励磁电流，电压表的讀数不是感应电动势 E ，而为二次綫圈两端的电压 U ，

$$U = I_0(Z_0 + Z_2). \quad (8)$$

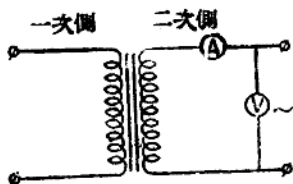


图 9

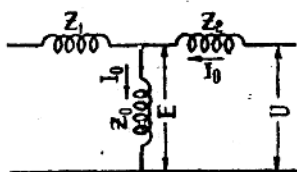


图 10

根据試驗結果，可以繪出电流互感器的 $U = f(I_0)$ 伏安特性曲綫 (I_0 的值应自 0.5 安培起至 30 安培以上)，然后利用下列任一方法以計算 10% 誤差曲綫。

(a) 励磁阻抗曲綫法——即 $Z_0 + Z_2 = f(I_0)$ 曲綫法

根据 (8) 式及由伏安特性曲綫可求出 $(Z_0 + Z_2) = f(I_0)$ 曲綫如图 11，然后将 $(Z_0 + Z_2) = f(I_0)$ 曲綫的横座标 (I_0) 乘以 2，作为 10% 誤差曲綫的纵座标，而将其纵座标乘以 0.1，作为 10% 誤差曲綫的横座标，則此时得出的 $Z_0 + Z_2 = f(I_0)$ 曲綫即近似地成为 10% 誤差曲綫。現証明如后：假設互感器

的标称比 K_H 与 圈数比 K_T 相同, 此时由电流互感器等价图

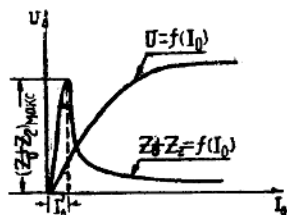


图 11

可得出励磁电流,

$$I_0 = \frac{Z_1 + Z_H}{Z_0 + Z_1 + Z_H} \cdot I_2' \quad (9)$$

$$\therefore \frac{I_0}{I_2'} = \frac{Z_1 + Z_H}{Z_0 + Z_1 + Z_H} \quad (10)$$

因在10%误差曲线中

$$\frac{I_0}{I_2'} = 0.1. \quad (11)$$

所以
$$\frac{Z_1 + Z_H}{Z_0 + Z_1 + Z_H} = 0.1. \quad (12)$$

也就是
$$Z_1 + Z_H = 0.1(Z_0 + Z_1 + Z_H). \quad (13)$$

如将(13)式右方的 Z_H 略而不计, 则:

$$Z_1 + Z_H \approx 0.1(Z_0 + Z_1). \quad (14)$$

又因电流互感器二次侧的额定电流为5安培, 故(11)式可写成

$$\frac{I_0}{5m} = 0.1. \quad (15)$$

式中 m ——一次侧额定电流的倍数,

所以
$$m = 2I_0. \quad (16)$$

故由(14)式及(16)式即可证明上述计算方法。

本法的缺点是将二次负担 Z_H 略而不计。 Z_H 值约为 Z_1 的十分之一, 故计算结果不够准确, 仅能近似地检查电流互感器的误差。另外图11励磁阻抗曲线除可用以绘制10%误差曲线外, 还可根据下述两点进行电流互感器特性的初步检查。

(1) 电流互感器的最大励磁阻抗 $(Z_0 + Z_2)_{\text{Мак}}$ 愈高, 则准确度愈高。

(2) 对应于最大励磁阻抗的励磁电流 I'_0 值愈小, 则愈准确。

一般0.5级电流互感器的 I'_0 值仅数十千分安培, 而套管型电流互感器则最大可达数安培。

(b) 感应电动势曲线法——即 $E = f(I_0)$ 曲线法

由(8)式得出:

$$U = I_0 Z_0 + I_0 Z_2,$$

但

$$E = I_0 Z_0,$$

故可得

$$E = U - I_0 Z_2. \quad (17)$$

由(17)式可知, 如将伏安特性 $U = f(I_0)$ 曲线上的纵座标每点均减去对应的 $I_0 Z_2$ 时, 即可求得 $E = f(I_0)$ 曲线。E 为当互感器励磁电流为 I_0 时, 其二次绕组的感应电动势。如此时二次侧连接负载为 Z_H , 则通过 Z_H 的电流将为:

$$I_2 = \frac{E}{Z_2 + Z_H}, \text{ 故即可计算出 } 10\% \text{ 误差曲线, 其原理}$$

及计算方法, 按下列两种不同情况详述如下:

(i) 当 $K_H \approx K_T$ 时,

一般绕线式互感器的标称比 K_H 与圈数比 K_T 甚为近似, 故可按本情况进行计算。

设通过互感器的一次侧额定电流倍数为 m , 则一次侧电流 I_1 为:

$$I_1 = 5m \cdot K_H. \quad (18)$$

如将一次侧电流归算至二次侧, 可得出等价图如图12所示(假设互感器二次侧电流 I_2 的方向与图1所示者相反)。当误差为10%时, 则:

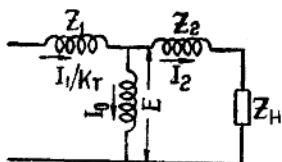


图 12

$$\frac{I_2}{I_1/K_H} = 0.9. \quad (19)$$

$$\text{即 } I_2 = 0.9 \frac{I_1}{K_H}. \quad (20)$$

今 $K_H \simeq K_T$, 则 (20) 式可写成为:

$$I_2 = 0.9 \frac{I_1}{K_T}. \quad (21)$$

$$I_0 = \frac{I_1}{K_T} - 0.9 \frac{I_1}{K_T} = 0.1 \frac{I_1}{K_T}. \quad (22)$$

在 $E = f(I_0)$ 曲线上, 查得对应于 (22) 式中 I_0 值的 E 值, 则:

$$Z_H + Z_s = \frac{E}{I_2} = \frac{E}{0.9 \frac{I_1}{K_T}}.$$

由 (22) 式可知 $I_1 = 10 K_T I_0$,

$$\text{故 } Z_H + Z_s = \frac{E}{0.9 \frac{10 K_T I_0}{K_T}} = \frac{E}{9 I_0}. \quad (23)$$

由 (18) 式得出:

$$m = \frac{I_1}{5 K_H} = \frac{10 K_T I_0}{5 K_H} = 2 I_0. \quad (24)$$

故根据 (23) (24) 式即可按下列顺序计算 10% 误差曲线。

- (1) 作出 $E = f(I_0)$ 特性曲线;
- (2) 按 (23) 式计算对应于 $E = f(I_0)$ 曲线上每一 I_0 值的 $Z_H + Z_s$ 值;
- (3) 按 (24) 式计算对应于 $E = f(I_0)$ 曲线上每一 I_0 值的 m 值;
- (4) 将以上 (2) (3) 两条所得的结果, 绘出 10% 误差

差時 $m = f(Z_H + Z_2)$ 曲綫或 $m = f(Z_H)$ 曲綫。

(ii) 當 $K_H \neq K_T$ 時，

套管型互感器的標稱比與圈數比有時差別很大，故計算時須考慮此兩者的差別：

設通過互感器的二次側額定電流倍數為 m ，

則一次電流 $I_1 = 5m \cdot K_H$ 。 (25)

如將一次側電流歸算至二次側，可得出等價圖如圖 13 所示，當誤差為 10% 時，則：

$$\frac{I_1}{I_1/K_H} = 0.9. \quad (26)$$

$$\text{即 } I_1 = 0.9 \frac{I_1}{K_H}. \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{故 } I_0 &= \frac{I_1}{K_T} - 0.9 \frac{I_1}{K_H} = I_1 \left(\frac{1}{K_T} - \frac{0.9}{K_H} \right) \\ &= I_1 \frac{K_H - 0.9 K_T}{K_T K_H}. \end{aligned} \quad (28)$$

$$\text{設 } K = \frac{K_T K_H}{K_H - 0.9 K_T}, \quad \text{則 } I_0 = \frac{I_1}{K}, \quad (29)$$

$$\text{或 } I_1 = K I_0. \quad (30)$$

故即可從 $E = f(I_0)$ 曲綫上查得對應於 I_0 的 E 值。

$$\therefore Z_H + Z_2 = \frac{E}{I_1} = \frac{E}{0.9 \frac{I_1}{K_H}}.$$

由 (30) 式，將 I_1 值代入

$$\text{則 } Z_H + Z_2 = \frac{E}{0.9 \frac{K I_0}{K_H}} = \frac{E}{0.9 \frac{K_T}{K_H - 0.9 K_T} I_0}. \quad (31)$$

由 (25) 式得出：

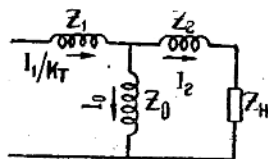


圖 13

$$m = \frac{I_1}{5K_H} = \frac{KI_0}{5K_H} = \frac{K_T I_0}{5(K_H - 0.9K_T)} \quad (32)$$

故根据 (31) (32) 两式, 即可按 (1) 节相似的程序, 作出 10% 误差时

$$m = f(Z_H + Z_s) \text{ 曲线或 } m = f(Z_H) \text{ 曲线。}$$

本法免除了励磁阻抗曲线法的缺点, 但因 $U - I_0 Z_s$ 运算时, 不是采用向量减法, 因此稍有误差, 然 $I_0 Z_s$ 与 U 相较不大, 故误差较小。

(c) $B-H$ 磁化曲线法

如被测的电流互感器的铁心磁化曲线已由制造厂供给时, 即可根据继电保护导则计算篇第九章(见附录)方法, 逐由磁化曲线计算 10% 误差曲线。此法可免去 (a) 法及 (b) 法的缺点, 但因制造厂供给的磁化曲线仅为平均曲线, 与实际铁心特性尚有出入, 有时误差颇大, 且如无磁化曲线时, 现场难以测制, 故无从计算。

比较上述各法之利弊, 可知如利用伏安特性计算 10% 误差曲线时, 以 (b) 法 [即 $E = f(I_0)$ 法] 较为合宜, 但事先必须较准确地测定互感器二次线圈阻抗 Z_s 值。

§ 2. 試驗結果及試驗仪表

在作伏安特性試驗时, 試驗电源可从电流互感器一次侧或二次侧接入, 如图 14 中的 a 及 b 图所示。

从一次侧接入电源时, 如果二次侧所接的电压表为内阻极大的真空管型电压表, 二次电流可以略而不计, 而电压表的读数即为二次线圈的感应电动势 E 。缺点是一次侧的额定电流可能至一极大的数值, 所需电源电流很大, 故一般均采用图 14b 的联接方法。

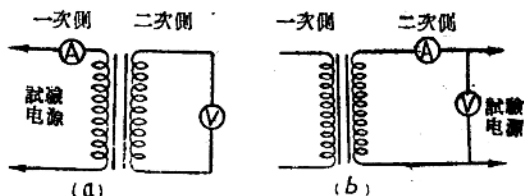


图 14

从二次侧接入电源时，因任何电流互感器的二次侧额定电流必不超过 5 安培，如计算的 10% 误差曲线的电流倍数 m 最大至 40 倍时，则所需电源电流约为 20 安培。但其缺点是电压表所量得的电压为互感器二次线圈两端的电压 U ，故用互感应电动势法求 10% 误差曲线时，须减去二次线圈的电压降 $I_0 Z_2$ 。

电源电流的调整可利用容量足够的负荷变阻器，自耦变压器或电压调整器。使用时各有优缺点，兹分别讨论如下：

(i) 负荷变阻器

将足够容量的负荷变阻器 R 串联于互感器一次回路中。调节电流时如电源电压为正弦波 E_c ，则 $E_c = E + I_0 R$ ，令 $I_0 R \gg E$ ，则 $I_0 = \frac{E_c}{R}$ ，即 E 虽为非正弦波，但 I_0 可保持为正弦波。如果按图 14a 接线试验，电压表用整流式仪表时，测量结果最为准确。但大容量的负荷变阻器目前尚难找到，且又须从一次侧接入电源，故一般均不采用。

(ii) 自耦变压器

利用自耦变压器的优点是调整方便，且当输入电压为正弦波时，其输出电压于伏安特性试验过程中能保持为正弦波。目前 10A 以上的自耦变压器现场尚少，实行较困难。

(iii) 电压調整器

电压調整器，也有調整方便的优点，所需容量不大于10千伏安，一般現場和試驗室均能找到。但由于其一二次線捲阻抗較大，輸入电压虽为正弦波，其输出电压在伏安特性試驗过程中不能保持为正弦波，故对測量儀表类型的選擇更应注意。

一般最常用的交流电气儀表可分为整流型、电磁型及电动型三种。其中整流型儀表反应于波形的平均值，电磁型和电动型均反应于波形的有效值，但所有各型儀表的刻度均按正弦波的有效值划分。

当所测电气数值为正弦波时，用任何型式儀表测得的结果均相同。但如为非正弦波时，則虽同一波形而用不同型式的儀表所得的结果将不同。故在試驗前須根据具体情况選擇儀表类型，使試驗結果能符合实际需要。茲分別討論如下：

(i) 如用負荷變阻器按图 14a 結綫調整电流时，所测电流为正弦波，故可用任何型式的电流表，而电压則除基本波外，尚有迟后 180° 的三次諧波，故其波形如图 15 所示。

由图中可知波形的平均值远較同一基本波及三次諧波之和的有效值为小，故使用电磁型电压表測量的結果將較用整流型者为大。互感器的饱和程度愈高时，两者讀数相差愈大，其

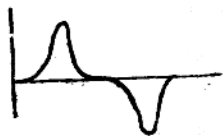


图 15

值可至二、三十伏以上，但因鉄心內的磁通密度与二次感应电动势 E_2 的平均值成比例，故採用整流型电压表所量得的伏特数換算至磁通密度后，其值将与实际的磁通密度相同，故应採用整流型电压表。

(ii) 用自耦變压器調整电流时，所测电压必为正弦波，故可用任何型式的电压表。但所测电流为具有三次諧波的非

正弦波形(图15),其平均值較有效值小,故採用整流型电流表測量电流时,測量的結果必較用电磁型电流表时为低。由于計算10%誤差曲綫,应考虑最不利的情况,故建議採用电磁型电流表(或电动型),使10%誤差曲綫的使用更为安全。

(iii) 用电压調整器調整电流时,电流及电压均为如图15的非正弦波形,故对电流表及电压表均須妥慎選擇。此时考虑最不利的情况,建議採用整流型电压表及电磁型电流表。

經实际用自耦變压器、电压調整器及各种不同的儀表組合作出試驗(見§5),可知如採取以上所建議的儀表組合时,利用自耦變压器或电压調整器調整电流所得的伏安特性曲綫均大致相同。

如所採用之电压表及电流表均为电磁型时,应採用图14b的連接法,将电压表接于电源側。原因是电磁型电压表的內阻較小(苏联150伏电磁型电压表的內阻約3300歐,75伏刻度約为1700歐),而一般电流互感器的励磁阻抗于上述电压范围时,可能在100歐以上,故如将电压表接于负荷側时,則如图16,电流表所量得的电流除励磁电流外,尚有通过电压表的电流,殊不準確。如按图14b結綫,一般苏联0.5級电磁型电流表的損耗約1.2瓦,即用2.5安培的刻度时,其內阻約为0.2歐,故电流互感器的阻抗較电流表的內阻已大至100倍以上,由于电流表內阻所造成的电压降可略而不計。

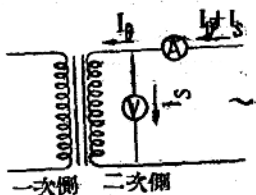


图 16

如用整流型电压表时,因其內阻較大(一般均在330Ω/伏以上),有时如所測的电流互感器的励磁阻抗較小,其值不及