

TM450.5
W-219

互 感 器 制 造 技 术

互感器制造技术编审委员会 编



机械工业出版社

866745

《互感器制造技术》编审委员会名单

主 任	熊 观 银				
副 主 任	杨 师 和	邢 瑞 祥			
委 员	邢 瑞 祥	朱 哲 滨	钱 敬 明	魏 春 华	
	肖 耀 荣	杨 师 和	张 金 琢	王 勉	
	王 显 文	熊 观 银	王 承 志	李 宪 霞	
	杭 小 民				
主 编	魏 春 华	王 显 文	王 承 志		

本书编者	肖 耀 荣	参 编	伍 东 风	李 长 库	张 欣
------	-------	-----	-------	-------	-----

前 言

本书是为了适应互感器行业人员培训的迫切需要，受全国变压器行业职工教育研究会委托，由沈阳变压器有限责任公司组织有实践经验的工程技术人员编写的。

本书既可以作为互感器制造技术工人的理论培训教材和中等职业技术学校互感器专业的专业教材，也可以作为其他院校有关专业互感器制造方面的教学参考书，还可供各互感器制造厂、互感器维修及运行部门的有关人员学习参考。

考虑到产品结构和工艺条件不同，所用原材料性能有一定差异，在制造方法上也各有特点，本书在讲述工艺方法时所提供的数据和有关规定仅供参考，不能代替各厂现行的工艺文件。

由于水平有限，本书必然存在一定的局限性，缺点和错误也在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见，以便在适当时机修改完善。

本书第一、二章由伍东风（高级工程师）编写，第三章由肖耀荣（教授级高级工程师）编写，第四章由张欣（工程师）编写，第五章由李长库（工程师）编写。全书由肖耀荣统稿。

沈阳变压器有限责任公司培训中心董和鸣和关英杰老师为本书的整理付出了艰辛的劳动，在此表示谢意。

编 者

目 录

前言

第一章 电流互感器的原理、性能和

结构简介 1

第一节 电流互感器的工作原理和 用途 1

第二节 电流互感器的分类及 型号 4

第三节 电流互感器的 电气性能 9

第四节 电流互感器结构简介 19

复习思考题 24

第二章 电压互感器的原理、性能和

结构简介 25

第一节 电压互感器的工作原理 和用途 25

第二节 电压互感器的分类及 型号 32

第三节 电压互感器的 电气性能 34

第四节 电压互感器结构简介 40

复习思考题 44

第三章 铁心、绕组制造工艺及

设备 45

第一节 概述 45

第二节 铁心加工设备及工艺 45

第三节 电压互感器绕组绕制工艺

和设备 49

第四节 电流互感器二次绕组绕制

及设备 52

第五节 电流互感器一次绕组

制造 54

第六节 环形绕线机和包纸机 57

复习思考题 60

第四章 绝缘包扎、绝缘浇注工艺

及设备 61

第一节 油浸式互感器

绝缘包扎 61

第二节 绝缘包扎机 67

第三节 绝缘浇注工艺和装备 69

复习思考题 74

第五章 互感器装配工艺 75

第一节 对装配场所的

一般要求 75

第二节 电流互感器装配 76

第三节 电压互感器装配 85

第四节 互感器绝缘干燥处理 87

第五节 真空设备, 真空表与

真空检漏 94

第六节 变压器油处理 100

复习思考题 105

第一章 电流互感器的原理、性能和结构简介

第一节 电流互感器的工作原理和用途

电流互感器是一种专门用于变换电流的特种变压器，工作原理如图 1-1 所示。

互感器的一次绕组串联在电力线路中，线路电流就是互感器的一次电流 I_1 ，二次绕组外部接有负荷，如果是测量用电流互感器，二次就接测量仪表；如果是保护用电流互感器，二次就接保护控制装置。在图中以 Z_b 表示其阻抗（包括联接导线的阻抗）。

电流互感器的一、二次绕组之间有足够的绝缘，从而保证所有低电压设备与电力线路的高电压相隔离。电力线路中的电流各不相同，通过电流互感器一、二次绕组匝数比的配置，可以将不同的一次电流变换成较小的标准电流值，一般是 5A 或 1A。这样可以减小仪表和继电器的尺寸，也可简化其规格，有利于仪表和继电器小型化、标准化。因此电流互感器的主要作用是：

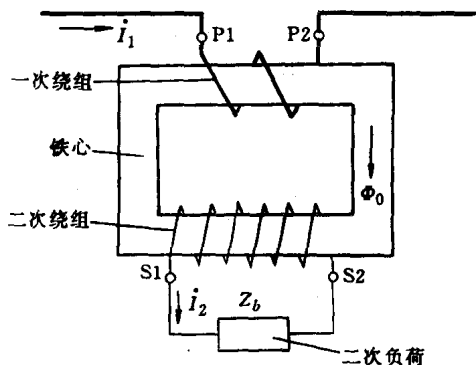


图 1-1 电流互感器工作原理

- 1) 传递信息给测量仪表或保护控制装置。
- 2) 使测量和保护设备与高压电力线路相隔离。
- 3) 有利于仪表和保护继电器的小型化、标准化。

1. 电流互感器的工作原理

在图 1-1 中，当电流 I_1 流过互感器的一次绕组时，建立一次磁动势， I_1 与一次绕组匝数 N_1 的乘积就是一次磁动势，也称一次安匝。一次磁动势分为两部分，其中一小部分用来励磁，使铁心中产生磁通；另外一大部分用来平衡二次磁动势。二次磁动势也称二次安匝，是二次电流 I_2 与二次绕组匝数 N_2 的乘积。用以励磁的叫做励磁磁动势也叫励磁安匝，是励磁电流 I_0 与一次绕组匝数 N_1 的乘积。用以平衡二次磁动势的这一部分一次磁动势，其大小与二次磁动势相等，但方向相反。所以可写出电流互感器的磁动势平衡方程式如下

$$I_1 N_1 = I_0 N_1 + (-I_2 N_2) \quad (1-1a)$$

或者写成

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1 \quad (1-1b)$$

式中 I_1 、 I_2 、 I_0 ——一、二次电流和励磁电流的相量 (A) (用复数表示既可表示大小还可表示相位)；

N_1 、 N_2 ——一、二次绕组匝数。

如果忽略很小的励磁安匝，并且只考虑一、二次电流大小之间的关系，则可得出

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 \quad (1-2a)$$

若以额定值表示，则可写成

$$I_{1N} N_1 = I_{2N} N_2 \quad (1-2b)$$

式中 I_{1N} 、 I_{2N} ——一、二次绕组额定电流 (A)；

N_1 、 N_2 ——额定一、二次绕组匝数。

额定一次电流与额定二次电流之比称为电流互感器的额定电流比，用 K_N 表示

$$K_N = \frac{I_{1N}}{I_{2N}} \quad (1-3)$$

从以上几个式子看出，只要适当配置互感器的额定匝数比就可以将不同的一次额定电流变换成标准的二次电流。例如已知额定一次电流分别为 1250A 和 2000A 的电流互感器各一台，额定一次绕组匝数均为 1 匝，要求二次额定电流为 5A，其二次绕组匝数各是多少？根据公式 (1-2b) 可得，第一台互感器为

$$N_2 = \frac{I_{1N} N_1}{I_{2N}} = \frac{1250 \times 1}{5} \text{ 匝} = 250 \text{ 匝}$$

第二台互感器为

$$N_2 = \frac{2000 \times 1}{5} \text{ 匝} = 400 \text{ 匝}$$

即第一台互感器的额定二次绕组匝数为 250 匝，第二台互感器为 400 匝，它们的额定二次电流都是 5A。

又如已知电流互感器的额定电流比为 500/1A，额定二次绕组匝数 1000 匝，问其额定一次绕组匝数是多少？根据公式 (1-2b) 可得

$$N_1 = \frac{I_{2N} N_2}{I_{1N}} = \frac{1 \times 1000}{500} \text{ 匝} = 2 \text{ 匝}$$

即第一次绕组有 2 匝。

根据公式 (1-2b) 可以从三个已知参数计算出第四个参数，这里就不再一一举例。

现在讨论电流互感器的相量图。从电工基础知道，励磁电流 I_0 在铁心中建立主磁通，这个磁通同时穿过一次和二次绕组的全部线匝，故称为主磁通 Φ_0 。铁心材料有磁滞和涡流损耗，励磁电流中有一部分是供给这些损耗所必需的，称之为有功部分，另一部分是用来励磁的，称之为无功部分，这两个分量的相量和才是 I_0 ，所以励磁电流与主磁通相差一个 ϕ 角（见图 1-2），这个角称为铁损角。主磁通在二次绕组中感应出电动势 E_2 。在相位上， E_2 滞后于主磁通 90° 角。二次感应电动势 E_2 等于二次绕组内部阻抗压降 $I_2 Z_2$ 及二次负荷阻抗压降 $I_2 Z_b$ 之和，即

$$E_2 = I_2 (Z_2 + Z_b) \quad (1-4)$$

或者用有效值表示为

$$E_2 = I_2 \sqrt{(R_2 + R_b)^2 + (X_2 + X_b)^2} \quad (1-5)$$

式中 E_2 、 I_2 ——二次感应电动势 (V) 和电流的相量 (A)；

E_2 、 I_2 ——二次感应电动势 (V) 和电流 (A) 的有效值；

Z_2 ——二次绕组内阻抗，也是一个复数量 (Ω)；

Z_b ——二次负荷阻抗，复数量 (Ω)；

R_2 、 R_b ——二次绕组电阻和二次负荷电阻 (Ω)；

X_2 、 X_b ——二次绕组电抗和二次负荷电抗 (Ω)。

因为在大多数情况下，电抗 X_2 和 X_b 都是电感性的，国家标准也规定用电感性负荷（功率因数为 0.8，滞后）来测量互感器的误差，所以在图 1-2 中二次电流相量滞后二次感应电动势 α 角。 $\alpha = \arctan \frac{X_2 + X_b}{R_2 + R_b}$ 。

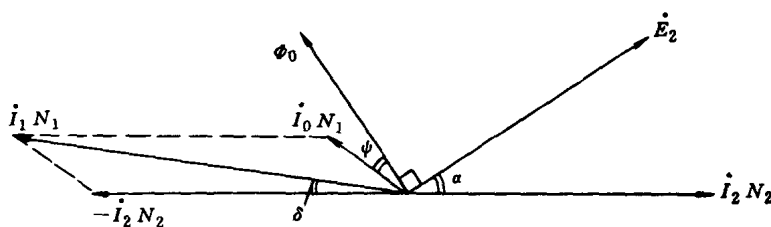


图 1-2 电流互感器简化相量图

一次电流 I_1 应是 I_0 与 $(-I_2)$ 之和，所以一次电流 I_1 与 $(-I_2)$ 相差 δ 角。由图 1-2 可见，由于励磁电流 I_0 的存在，一、二次电流在大小和相位上都出现了差别。电流大小的差别就是电流变换出现了误差，相位差别就是相位差，以后分析电流互感器的误差特性时，再详细讨论。

2. 电流互感器的用途

图 1-3 为一台有两个二次绕组的电流互感器的应用接线示意图。二次绕组是测量用绕组，接至保护继电器。当电力线路正常工作时，二次电流不大，继电器不会动作，其常开触点是打开的，断路器的跳闸线圈没有电流，断路器处于接通状态，如图 1-3 所示。如果在互感器以下的线路发生短路或严重过载，就有很大的电流流经电流互感器的一次绕组，二次电流也将增加很多，当二次电流增长到等于或大于继电器的动作电流时，继电器动作将常开触点接通，断路器跳闸线圈流过电流，跳闸机构动作，断路器跳闸，将故障线路从电力系统中脱开。电力系统继电保护方式很多，实际接线也很复杂，这里只是以简单实例说明一下保护用电流互感器的用法。

在一台电流互感器中可以有多多个二次绕组，分别起不同的作用，但是，每个二次绕组都要单独绕在一个铁心上，不能两个或几个二次绕组共用一个铁心。

从图 1-1~图 1-3 中看出，当一次电流从互感器的 P1 端流入一次绕组时，二次电流从 S1 端流出。这样的互感器的端子标志才是正确的，或者说这种接法是减极性接法。如果互感器的端子标志搞错了，不是减极性，则将使许多测量仪表和继电器的电流方向搞错，造成混乱。这一点无论在绕制绕组或装配和使用时都要注意。还要注意，电流互感器在运行中如果二次不接负荷，则必须可靠地短接，绝不许开路，因为二次开路时，二次没有电流，一次安匝全

部用来励磁，铁心高度饱和，磁通变为平顶波，二次感应电动势变成峰值很高的尖顶波，见图 1-4。高峰值的电动势对人身和设备都将造成危害。

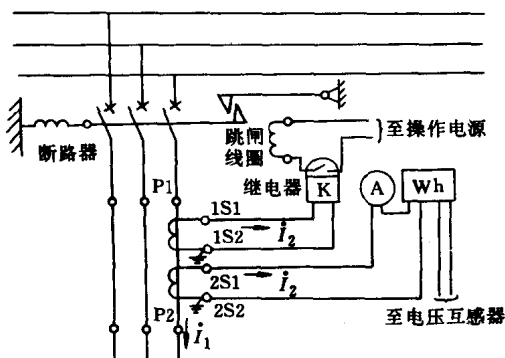


图 1-3 电流互感器应用 (示意图)

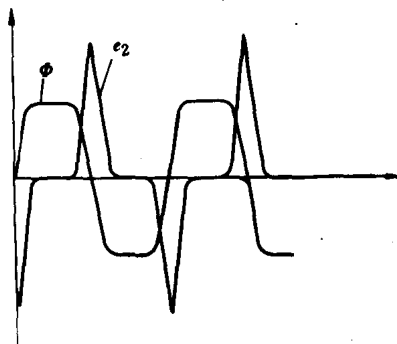


图 1-4 二次开路时的磁通和电动势波形

第二节 电流互感器的分类及型号

一、电流互感器的分类

通常有以下几种分类法：

1. 按用途分

(1) 测量用 指专门用于测量电流和电能的电流互感器。

(2) 保护用 指专门用于继电器保护和自动控制装置的电流互感器。保护用电流互感器中包括零序电流互感器，其结构较简单，作用原理与一般的电流互感器有所不同，因篇幅有限，本书不另作介绍。

2. 按装置种类分

(1) 户内式 即只能安装于户内的电流互感器，其额定电压多不高于 35kV。

(2) 户外式 即可以在户外安装使用的电流互感器，电压多在 35kV 以上。

3. 按绝缘介质分

(1) 油绝缘 即油浸式互感器，实际上产品内部是油和纸的复合绝缘，多用于户外产品，电压可达 500~1100kV；

(2) 浇注绝缘 用环氧树脂或其他树脂为主的混合胶浇注成型的电流互感器，多在 <35kV 采用。国外有用特殊橡胶浇注的电流互感器。

(3) 一般干式绝缘 包括有塑料外壳的和无塑料外壳的由普通绝缘材料包扎，经浸渍漆处理的电流互感器。

(4) 瓷绝缘 即主绝缘由瓷件构成，这种绝缘结构已被浇注绝缘所取代。

(5) 气体绝缘 即产品内部充有特殊气体，如六氟化硫 (SF_6) 气体作为绝缘的互感器，多用于高压产品。

4. 按结构形式分

电流互感器的结构形式多种多样，这里只能大致加以分类。

(1) 贯穿式 又可分为单匝贯穿式 (图 1-5) 和多匝贯穿式 (图 1-6)。

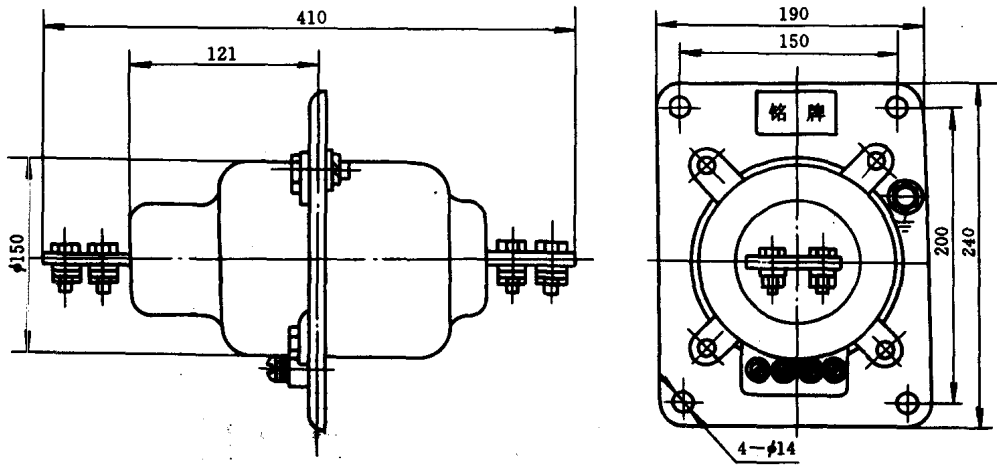


图 1-5 单匝贯穿式互感器外形 LDZ-10

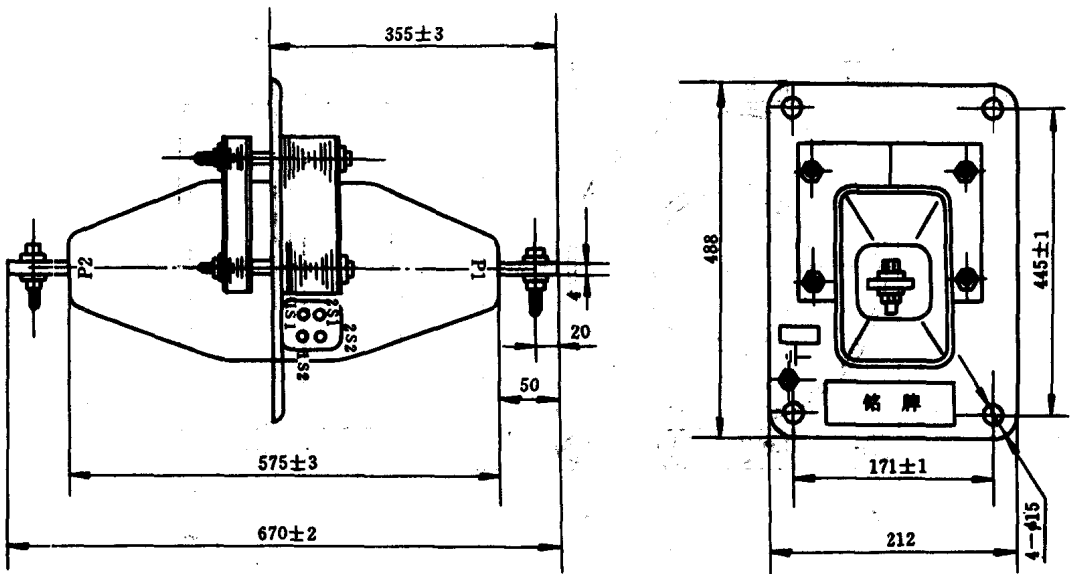


图 1-6 多匝贯穿式互感器外形 LFZ-10

(2) 支柱式 见图 1-7。

(3) 母线式 图 1-8 为母线式互感器的外观图。这种互感器适用于大电流场合, 例如安装在发电机母线上, 发电机母线就是互感器的一次绕组。显然, 这种互感器的一次绕组只有一匝。

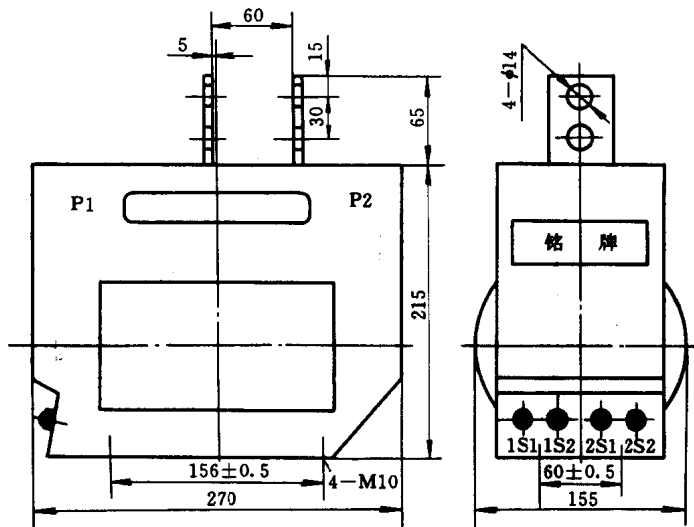


图 1-7 支柱式电流互感器外形 LZZ-10

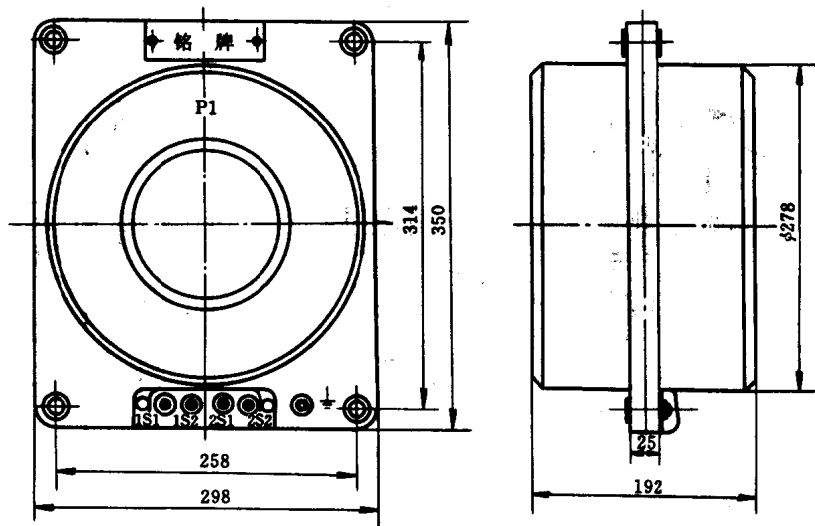


图 1-8 母线式电流互感器外形 LMZ-10

(4) 套管式 安装在变压器或断路器套管的中间法兰处，主绝缘是套管，一次绕组就是套管内的导电杆。这种互感器的一次绕组也只有一个匝。

(5) 正立式 二次绕组装在产品下部，产品重心较低，是国内高压油浸式互感器的常用结构，图 1-9 为一台 220kV 正立式互感器外观。

(6) 倒立式 二次绕组装在产品上部，重心较高，头部较大，但一次绕组导体较短，瓷套较细，是近年来比较新的结构。图 1-10 为倒立式互感器的外观图。

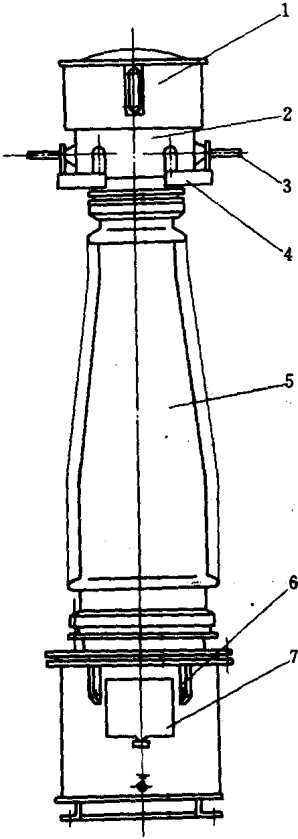


图 1-9 220kV 正立式电流互感器外形 LB-220W₁
1—膨胀器 2—贮油柜 3—一次端子 4—串、并联板
5—瓷套 6—油箱 7—二次端子盒

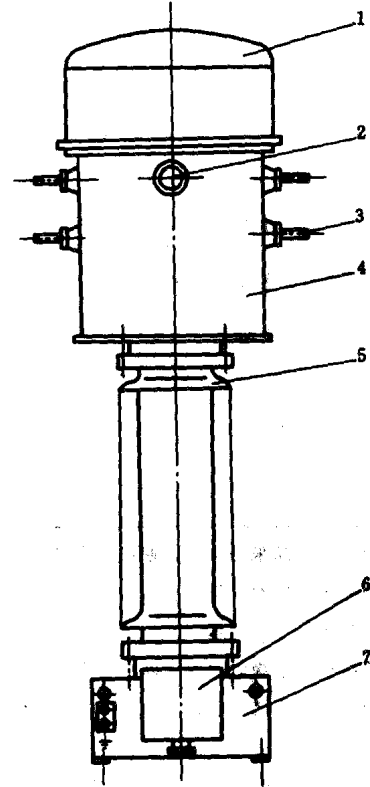
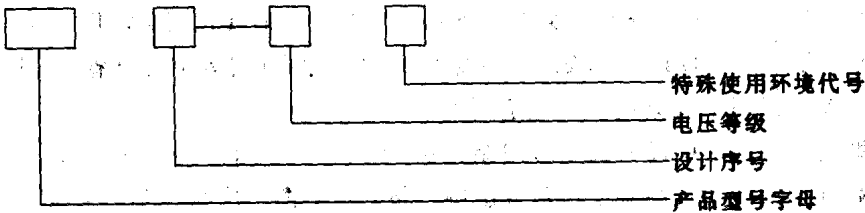


图 1-10 倒立式电流互感器外形
1—膨胀器 2—油视察窗 3—一次端子 4—贮油柜
5—瓷套 6—二次端子盒 7—底座

二、电流互感器型号简介

电流互感器的型号组成方法如下（按 JB3837—92）。

产品型号均以汉语拼音字母表示，字母的代表意义及排列顺序如表 1-1 所示。



设计序号表示同类产品的改型设计，虽然技术性能和结构尺寸变化，但不涉及到型号的

改变, 为了便于与原设计相区别, 所以在型号的第一部分汉语拼音字母之后加注阿拉伯数字 1、2、3……, 以表示第一次、第二次……改型设计。

电压等级以产品额定电压的 kV 数表示。国外常用最高电压的 kV 数表示。

表 1-1 电流互感器型号代表字母及涵义

序号	分 类	涵 义	代表字母	序号	分 类	涵 义	代表字母
1	用途	电流互感器	L			变压器油	—
2	结构形式	套管式 (装“人”式)	R	3	绕组外 绝缘介质	空气 (干式)	G
		支柱式	Z ^①			气式	Q
		线“圈”式	Q			瓷式	C ^③
		贯穿式 (复匝)	F			浇注成型固体	Z
		贯穿式 (单匝)	D			绝缘“壳”	K
		母线型	M	4	结 构 特 征及用途	带有保护级	B
		开合式	K			带有保护级 (暂“态”误差)	BT ^④
		倒立式	V	5	油 保 护 方式	带金属膨胀器	—
		链型	A ^②			不带金属膨胀器	N

注: 当对正常产品采用加大容量或加强绝缘时, 应在产品型号字母后加 J 表示。

① 以瓷箱做支柱时, 不表示。

② 电容型绝缘, 不表示。

③ 主绝缘以瓷绝缘时表示, 外绝缘为瓷箱式时不表示。

④ 只使用于套管式互感器。

特殊使用环境代号主要有以下几种:

GY——高原地区用;

W——污秽地区用 (W_1 、 W_2 、 W_3 对应污秽等级为 I、II、III);

TA——干热带地区用;

TH——湿热带地区用;

下面用几个例子来加以说明:

例 1 产品型号为 LFZB6-10 表示第 6 次改型设计的复匝贯穿式、浇注绝缘电流互感器, 额定电压 10kV。

例 2 产品型号为 LMZ-20 表示母线式、浇注绝缘电流互感器, 额定电压 20kV。

例 3 产品型号为 LB-110GYW₂ 表示带有保护级的油浸式 (代表字母已省略) 电流互感器, 额定电压 110kV, 适用于高原地区, 也适用于 III 级污秽地区。

现在还有一些老型产品采用过去的型号编制方法, 如 LC WD 表示瓷箱式 (C)、户外装置 (W), 带有保护级 (D) 的电流互感器。在新方法中已将 C、W 两个字母取消, 字母 D 用 B 代替。随着产品的发展, 老型号将逐渐淘汰。

特种电流互感器产品型号字母排列顺序及涵义按 JB 3837—92 的规定。

第三节 电流互感器的电气性能

电流互感器的性能可从三个方面来讨论：误差特性、绝缘特性、热特性和力学特性。除电气性能外，结构上的要求，如结构的合理性，便于维修性，油或气体绝缘的密封可靠性等都是重要的。这里主要讲电气性能。

一、几个基本名词术语

在讨论电气性能之前，先简单介绍几个有关名词术语，这是了解互感器性能常用的几个基本名词，有些在第一节中已经用过，这里再给出明确的定义。还有一些名词及其定义则放在讨论有关电气性能时再详细说明。其他常见的名词术语，这里不再解释。

• **额定电流** 电流互感器的误差性能、发热性能和过电流性能等都是以额定电流为基数做出相应规定的。因此说，额定电流是作为电流互感器性能基准的电流值。对一次绕组而言，就是指额定一次电流；对二次绕组而言，就是指额定二次电流。

国家标准 GB 1208—87《电流互感器》规定电流互感器的额定一次电流从 10A 到 75A 以及它们的十进位数或小数，额定二次电流标准规定值为 1A、2A 和 5A，5A 为优先值。

• **额定电流比** 额定一次电流与额定二次电流的比。

• **二次负荷** 电流互感器二次绕组外部回路所接仪表、仪器或继电器等的阻抗和二次联接线路阻抗之和即为电流互感器的二次负荷。

• **额定二次负荷** 确定互感器准确级所依据的二次负荷。

二次负荷通常以视在功率的伏安值表示。GB1208—87 规定的额定二次负荷值最小为 2.5VA，最大为 100VA，共有 12 个额定值。以往也有用 Ω 来表示二次负荷大小的，若要把 VA 值表示的负荷值换算成以 Ω 值表示时，可按下式进行。

$$Z_2 = \frac{S_2}{I_{2N}^2} \quad (1-6)$$

式中 I_{2N} ——额定二次电流 (A)；

S_2 ——以 VA 值表示的二次负荷 (VA)；

Z_2 ——以 Ω 值表示的二次负荷 (Ω)；

例如 已知电流互感器的额定二次电流为 5A，二次负荷为 50VA，若以 Ω 值表示时，则为

$$Z_2 = \frac{50}{5^2} \Omega = 2\Omega$$

二、电流互感器的误差特性

1. 稳定状态下的电流互感器的误差

电流互感器应能准确地将一次电流变换为二次电流，才能保证测量精确，或保护装置正确地动作，因此电流互感器必须保证一定的准确度。电流互感器的准确度是以其准确级来表征的，不同的准确级有不同的误差要求，在规定的使用条件下，误差均应在规定的限值以内。GB1208—87 规定测量用电流互感器的准确级有：0.1、0.2、0.5、1、3 和 5 级，0.1 级~5 级互感器的误差限值规定如表 1-2 所示。

表 1-2 测量用电流互感器的误差限值

准确级	一次电流为额定 一次电流的百分数 (%)	误差限值		保证误差的二 次负荷范围
		电流误差 ($\pm\%$)	相位差 $\pm$ ($'$)	
0.1	5	0.4	15	$(0.25 \sim 1.0) S_{2N}$
	20	0.2	8	
	100~120	0.1	5	
0.2	5	0.75	30	
	20	0.35	15	
	100~120	0.2	10	
0.5	5	1.5	90	
	20	0.75	45	
	100~120	0.5	30	
1	5	3.0	180	
	20	1.5	90	
	100~120	1.0	60	
3	50	3	—	$(0.5 \sim 1.0) S_{2N}$
	120	3	—	
5	50	5	—	
	120	5	—	

标准还规定，负荷的功率因数为 0.8（滞后）。

从表 1-2 看出，电流互感器的准确级是以额定电流下的最大允许电流误差的百分数标称的。

GB1208—87 对保护用电流互感器规定有 5P 和 10P 两种标准准确级，其误差限值见表 1-3。

表 1-3 保护用电流互感器的误差限值

准确级	额定一次电流下的误差		额定准确限值一次电 流下的复合误差 (%)	保证误差的二次负荷范围 $\cos\varphi=0.8$ (滞后)
	电流误差 $\pm$ (%)	相位差 $\pm$ ($'$)		
5P	1	60	5	S_{2N}
10P	3	—	10	S_{2N}

从表 1-3 看出，保护用电流互感器是以复合误差限值来标称的。字母 P 表示保护用。

保护用电流互感器的基本要求之一就是当超过额定电流许多倍的短路电流流过一次绕组时，互感器应有一定的准确度，即复合误差不超过限值，以保证继电器正确动作，这个保证复合误差不超过限值的最大一次电流就叫做额定准确限值一次电流。对于保护用电流互感器，还经常遇到准确限值系数这一名词，所谓准确限值系数，就是额定准确限值一次电流与额定一次电流之比值。习惯上往往把保护用电流互感器的准确级与准确限值系数连在一起标注。例如：10P₂₀，这表示互感器为 10P 级，准确限值系数为 20。只要电流不超过 $20I_{1N}$ ，互感器的

复合误差不会超过 10%。

下面进一步说明误差的定义。

• **电流误差** GB1208—87 对电流误差的定义是

$$\text{电流误差} = \frac{K_N I_2 - I_1}{I_1} \times 100, \quad (1-7)$$

式中 K_N ——额定电流比；

I_1 ——实际一次电流 (A)；

I_2 ——在测量条件下，流过 I_1 时的实际二次电流 (A)。

从电流互感器工作原理知道，只有当励磁电流等于零时，二次电流乘以额定电流比才等于实际一次电流，由于励磁电流或多或少总是存在，所以二次电流乘以额定电流比总是小于实际一次电流，也就是说，电流误差总是负值，只有在采取了特殊的误差补偿措施以后，才有可能出现正值电流误差。

• **相位差** GB1208—87 对相位差的定义是：互感器一次电流与二次电流相量的相位之差。相量方向以理想互感器的相位差为零来确定。当二次电流相量超前一次电流相量时，相位差为正值，它通常以分或厘弧度 (crad) 表示。

参看图 1-2 有助于理解上述定义。在图 1-2 中， $I_1 N_1$ 与 $(-I_2 N_2)$ 之间的相位角 δ 就是电流互感器的相位差。图中所表示的情况为相位差是正值。

另外，在国内很少采用厘弧度 (crad) 表示相位差值，故在表 1-2 及表 1-3 中都没有写出。实际上通过简单的换算即可由角度变为弧度。换算公式为

$$1' = 0.029 \text{ crad}$$

还必须着重说明一点，相位差的定义只在电流为正弦波形时正确。因为当电流不是正弦波形时，就不能用相量图表示它们之间的关系。

• **复合误差** 当很大的电流流过互感器时，铁心的磁通密度很高，由于铁磁材料的非线性特性、励磁电流的波形畸变，二次电流也就不是正弦波，如图 1-11 所示。这样就不能用前述误差定义，而要采用复合误差的概念下定义。GB1208—87 对复合误差的定义是：在稳态时下列两个值之差的有效值称为复合误差为

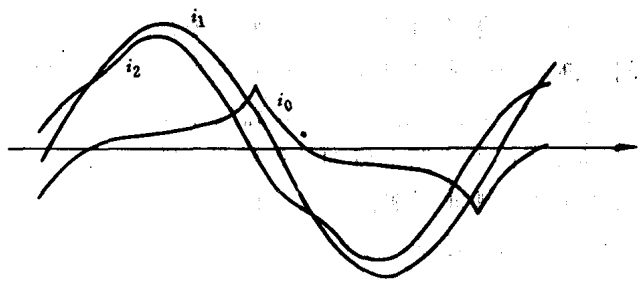


图 1-11 过电流时的电流波形

1) 一次电流瞬时值

2) 二次电流瞬时值与额定电流比的乘积。

复合误差 ϵ 通常以一次电流有效值的百分数表示，按下式计算

$$\epsilon \% = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_N i_2 - i_1)^2 dt} \quad (1-8)$$

式中 I_1 ——一次电流有效值 (A)；

i_1 ——一次电流瞬时值 (A)；

i_2 ——二次电流瞬时值 (A);

K_N ——额定电流比;

T ——一个周波的时间 (s)。

复合误差除了用来衡量保护用电流互感器的特性外, 也用来衡量测量用电感器的特性。GB1208—87 对测量用电感器提出了仪表保安系数的要求。仪表保安系数 (FS) 是额定仪表保安电流与额定一次电流之比值。而所谓的额定仪表保安电流是二次负荷为额定值时, 复合误差不小于 10% 的最小一次电流值。这个一次电流值越小, FS 值也越小。也就是说在一次电流倍数不太大时, 复合误差就等于或超过 10%, 一次电流再增加, 误差将更大, 二次电流的增长不多, 对测量仪表来说就比较安全。

值得注意的是, 保护用电流互感器要求在一定的过电流倍数 (准确限值系数) 下, 其复合误差要小, 不得超过限值, 而测量用电感器则要求在一定的过电流倍数 (FS) 因数下复合误差要大, 要超过 10%。复合误差应用于两种互感器, 要求却不相同。

2. 暂态过程中电流互感器的误差

上面介绍的是有关稳定状态下的误差概念和定义, 下面简单介绍一下当电流还未进入稳态而处于暂态过程中电流互感器的误差特性。

随着电力系统容量的增加和电压的增高, 要求继电保护动作时间越来越短, 在尽可能短的时间内切断故障电流。快速继电保护装置的動作时间可在 0.04s 以下, 对 50Hz 的交流电来说, 只是两个周期的时间, 而在这样短的时间里, 短路电流还处在过渡状态 (暂态) 中, 系统容量越大, 暂态过程的时间越长。暂态过程中, 短路电流包含两个分量: 一个是按工频变化的周期性分量, 另一个是随时间逐渐衰减的非周期分量 (有时也称为直流分量)。短路暂态过程中的电流波形见图 1-12 所示。由于短路电流的这种特性, 铁心中的磁通也出现非周期性分量, 它与周期性分量磁通相加才是铁心中的总磁通, 见图 1-12 所示。

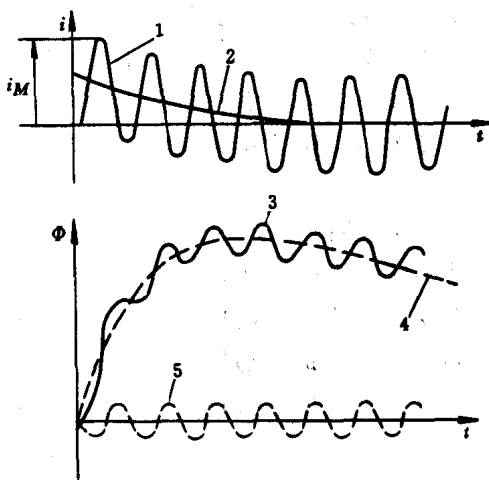


图 1-12 一次电流时互感器铁心中磁通的变化规律

1——一次短路电流 2——非周期性分量 3——总磁通 Φ 。

4——非周期性磁通 $\Phi_{\sim}$ 5——周期性磁通 $\Phi_{\sim}$ 。

理论分析和实验都证明, 非周期性磁通

要比周期性磁通大很多, 如果铁心截面积不够大, 铁心会迅速饱和, 励磁电流很快增长, 误差急剧加大, 待非周期性电流和磁通都衰减以后, 电流互感器才进入稳态工作, 显然这样的互感器是满足不了快速继电保护的要求的。为了保证暂态误差不超过一定的限值, 互感器的铁心截面积必须比普通的保护用电感器的铁心截面积加大许多。

电力系统的短路故障有一部分是暂时性的, 只要切断电路, 故障可能自动消除, 若很快接通电路, 就能恢复正常送电, 因此在电力系统中装有自动重合闸装置。快速继电保护装置配合高速断路器, 总的动作时间约 0.1s, 隔 0.3s~0.5s 后就重合闸。因此普通铁心的磁通不会立即降到零, 而是逐渐衰减到零的。在第一次切断电路到重合闸这样短的时间里, 铁心中

还保留有一定的剩磁,如果重合闸后新建立的磁通与剩磁的极性相同,铁心会更快重新饱和,误差猛然增加,引起保护装置误动作。因此对重合闸后仍要保证一定准确度的互感器,必须使其铁心中的剩磁很快地降下去,即使降不到零,也应保证重合闸后铁心不会饱和。能使剩磁很快衰减的有效方法是制成开口铁心,让铁心有一定的气隙。理论分析和实验还证明,有气隙铁心的截面放大倍数可以比无气隙铁心小一些,从而达到节约材料的目的。

保证暂态误差的电流互感器有四种类型:TPX、TPY、TPZ和TPS。它们的适用场合和性能要求各不相同。TPX级是不限制剩磁大小的互感器,铁心没有气隙,误差限值较小;TPY级是剩磁不超过饱和磁通10%的互感器,铁心有一定的气隙,误差限值稍大一些,TPZ级是实际上没有剩磁的互感器,误差限值比TPY级大一些;气隙也相对地大一些。以上三种类型互感器的误差定义各不相同,限值条件也不一样,这里不作详细介绍。

TPS级是一种低漏磁型电流互感器,其特性由二次励磁特性和匝数比误差确定,而且对剩磁无限制。我国已能生产110~500kV级的保证暂态误差的互感器,也生产出了用于发电机保护的大电流母线型保证暂态误差的互感器。

3. 误差计算及其补偿

根据误差定义和互感器相量图,可推导出误差计算公式如下

$$\text{比值差: } f = -\frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \sin(\alpha + \phi) \times 100, \quad (1-9a)$$

$$\text{相位差: } \delta = \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \cos(\alpha + \phi) \times 3440 \quad (1-9b)$$

式中 $I_0 N_1$ ——励磁安匝(A);

$I_1 N_1$ ——一次安匝(A);

α ——二次绕组阻抗与负荷阻抗串联时的阻抗角(°);

ϕ ——铁损角(°)。

式(1-9)是设计计算用的,不能直接看出误差与互感器的参数和负荷大小的关系。将上述式子做一些适当的变换即可得到下面的式子

$$f = -\frac{I_2 (Z_2 + Z_b) L \times 10^4}{4.44 f N_2 S \mu (I_1 N_1)} \sin(\alpha + \phi) \times 100 \quad (1-10)$$

$$\delta = \frac{I_2 (Z_2 + Z_b) L \times 10^4}{4.44 f N_2 S \mu (I_1 N_1)} \cos(\alpha + \phi) \times 3440 \quad (1-11)$$

式中 I_2 ——二次电流(A);

Z_2 ——二次绕组阻抗(Ω);

Z_b ——二次负荷阻抗(Ω);

N_2 ——二次绕组匝数;

f ——电源频率(Hz);

L ——平均磁路长(cm);

S ——铁心截面积(cm^2);

μ ——铁心材料的磁导率(H/cm);

$I_1 N_1$ ——一次绕组安匝(A)。