

合成薄膜绝缘电流互感器 结构与运行维护

王如璋 黄维枢 刘朝辉 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

合成薄膜绝缘电流互感器 结构与运行维护

王如璋 黄维枢 刘朝辉 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书较全面地介绍了合成薄膜绝缘电流互感器的工作原理、绝缘结构、设计要点及运行维护经验等。全书共分为八章,分别是:概述、结构和特点、绝缘结构及材料、绝缘特性、技术参数及使用环境、设计要点、工艺制造及试验、运行维护。另还附有合成薄膜绝缘电流互感器的温升计算方法、国内外权威试验检测机构的试验报告,以方便读者查阅使用。

本书适用于电力工业用户中从事科研、设计、运行、维护、管理的技术人员,电工产品制造企业的产品研发人员,电力科研机构的科研开发人员,高等院校有关师生等。

图书在版编目(CIP)数据

合成薄膜绝缘电流互感器结构与运行维护/王如璋,黄维枢,刘朝辉著. —北京:中国电力出版社,2010

ISBN 978-7-5083-9901-0

I. ①合… II. ①王… ②黄… ③刘… III. ①电流互感器-结构设计②电流互感器-运行 IV. ①TM452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 237865 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 5 印张 125 千字

印数 0001—3000 册 定价 13.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

合成薄膜绝缘电流互感器结构与运行维护

合成薄膜绝缘电流互感器是一种区别于传统的油、纸、瓷、SF₆或环氧树脂绝缘电流互感器的新型电流互感器系列(曾用名有机复合绝缘电流互感器或干式电流互感器)。它利用涂硅油的合成绝缘薄膜做主绝缘材料,因此电流互感器的结构也随之发生很大变化,同时带来了很多优点。

这种新型的合成薄膜绝缘电流互感器诞生于20世纪90年代的中国,现在已经在国内各省、市大量运行,近年来还被推广到世界上几大洲的十几个国家,受到广大用户的欢迎。合成薄膜绝缘电流互感器是中国独有的,是中国对世界的贡献。

但是迄今为止,国内外还没有一本全面介绍这一系列新型电流互感器的书供广大用户和厂家的技术人员使用。鉴于很多技术人员迫切要求对此类电流互感器有更多的了解,我们遂动手写了这本书。

本书以简洁的文字和多幅图片系统地介绍了合成薄膜绝缘电流互感器系列产品的结构及特点、内绝缘及外绝缘、设计、工艺和试验、技术参数以及运行维护等方面的内容。为了使用方便,也摘抄了有关标准中的一些内容。

由于水平所限,错误在所难免,欢迎读者批评指正。

作者

2009年11月

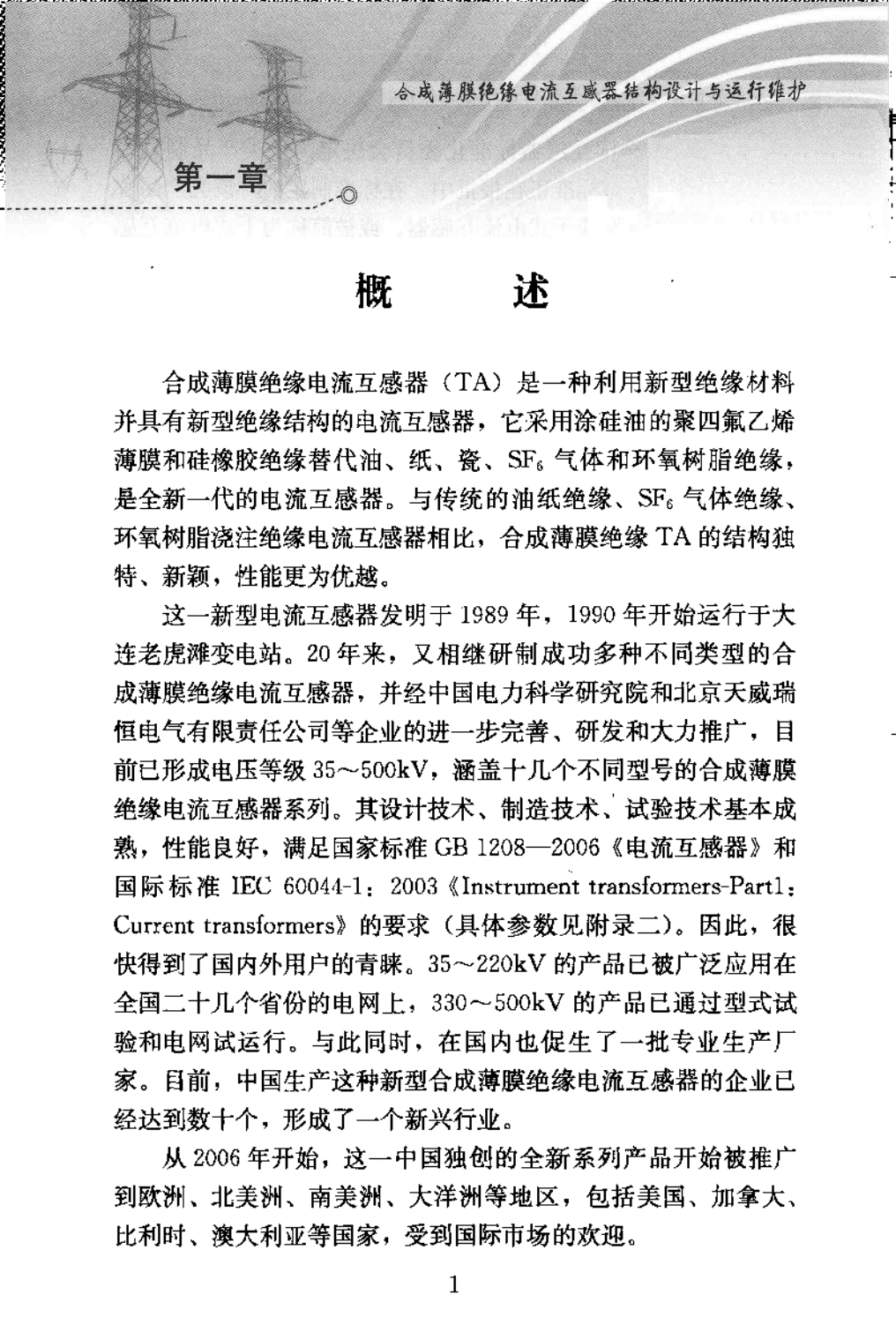
目 录

合成薄膜绝缘电流互感器结构与运行维护

前言

第一章 概述	1
第一节 定义	2
第二节 用途	2
第三节 分类	3
第四节 基本工作原理	6
第五节 与其他类型电流互感器的比较	15
第六节 技术标准	18
第二章 结构和特点	19
第一节 基本结构	19
第二节 基本结构特点	21
第三节 套管式合成薄膜绝缘电流互感器	22
第四节 串级式合成薄膜绝缘电流互感器	23
第五节 大电流合成薄膜绝缘电流互感器 (另一种串级式)	25
第六节 电子式合成薄膜绝缘电流互感器	26
第七节 合成薄膜绝缘电子/电磁双系统电流互感器	29
第八节 配件	31
第三章 绝缘结构及材料	33
第一节 内绝缘的结构及材料	33
第二节 外绝缘的结构及材料	35
第四章 绝缘特性	39
第一节 内绝缘特性	39
第二节 外绝缘特性	48
第三节 老化特性	55

第四节 温度特性	61
第五章 技术参数及使用环境	68
第一节 技术参数	68
第二节 使用环境	71
第六章 设计要点	73
第一节 概述	73
第二节 确定外绝缘弧闪距离及爬电距离	74
第三节 二次绕组设计及箱体基本尺寸确定	78
第四节 稳定温升计算和温升限值	80
第五节 确定一次导体长度、截面积及形状	88
第六节 一次绕组绝缘设计	89
第七章 工艺制造及试验	91
第一节 工艺及制造	91
第二节 试验及试验方法	93
第八章 运行维护	108
第一节 一般运行情况	108
第二节 运行后的跟踪检查	112
第三节 运行中可能出现的问题及处理措施	115
附录一 合成薄膜绝缘 TA 温升计算方法	118
附录二 荷兰 KEMA 试验室对 LRGBJ-220 型 TA 的试验报告(摘抄并翻译)	125
附录三 老虎滩变电站 3 号穿墙套管试验、解剖、 分析报告	134
附录四 110kV 干式电流互感器电气试验及解剖报告	136
附录五 电力工业电气设备质量检验检测中心(武汉 高压研究所)检测报告	147
参考文献	150
后记	152



第一章

概 述

合成薄膜绝缘电流互感器(TA)是一种利用新型绝缘材料并具有新型绝缘结构的电流互感器,它采用涂硅油的聚四氟乙烯薄膜和硅橡胶绝缘替代油、纸、瓷、SF₆气体和环氧树脂绝缘,是全新一代的电流互感器。与传统的油纸绝缘、SF₆气体绝缘、环氧树脂浇注绝缘电流互感器相比,合成薄膜绝缘TA的结构独特、新颖,性能更为优越。

这一新型电流互感器发明于1989年,1990年开始运行于大连老虎滩变电站。20年来,又相继研制成功多种不同类型的合成薄膜绝缘电流互感器,并经中国电力科学研究院和北京天威瑞恒电气有限公司等企业的进一步完善、研发和大力推广,目前已形成电压等级35~500kV,涵盖十几个不同型号的合成薄膜绝缘电流互感器系列。其设计技术、制造技术、试验技术基本成熟,性能良好,满足国家标准GB 1208—2006《电流互感器》和国际标准IEC 60044-1:2003《Instrument transformers-Part1: Current transformers》的要求(具体参数见附录二)。因此,很快得到了国内外用户的青睐。35~220kV的产品已被广泛应用在全国二十几个省份的电网上,330~500kV的产品已通过型式试验和电网试运行。与此同时,在国内也催生了一批专业生产厂家。目前,中国生产这种新型合成薄膜绝缘电流互感器的企业已经达到数十个,形成了一个新兴行业。

从2006年开始,这一中国独创的全新系列产品开始被推广到欧洲、北美洲、南美洲、大洋洲等地区,包括美国、加拿大、比利时、澳大利亚等国家,受到国际市场的欢迎。

2006年,全国互感器标准化委员会决定为该类产品制订专门的标准,目前该标准正在报批中。在标准制定前,该类产品曾被称作有机复合绝缘干式电流互感器,或被简称为干式电流互感器。在这个标准中,该类电流互感器被正式命名为合成薄膜绝缘电流互感器。

第一节 定 义

合成薄膜绝缘电流互感器是主绝缘采用合成薄膜绝缘的电容型电流互感器。其内绝缘主要是用涂硅油的聚四氟乙烯薄膜卷制成的电容芯子,外绝缘主要是硅橡胶伞裙[见JB/T×××××(报批稿)《合成薄膜绝缘电流互感器》(简称《报批稿》)]。

第二节 用 途

合成薄膜绝缘电流互感器的用途和传统的电流互感器一样,是用来将一次侧交流电流按照额定电流比转换成可供测量、保护或控制等仪器、仪表或继电保护装置使用的二次侧电流,同时用来隔离一次、二次电路。即是将高电压、大电流(或很小电流)的信号按额定电流比转换成可以用仪器、仪表测量的信号。

合成薄膜绝缘TA由于其独有的性能还具有以下特殊的适用性:

- (1) 因基本不需要维护,适用于无人值守电站;
- (2) 因防污能力强,适用于重污秽地区;
- (3) 因抗震能力强,适用于地震多发地区;
- (4) 因不爆、不燃、无渗漏问题,适用于对安全性要求高的场所;
- (5) 因耐超低温,适用于高寒地区。

第三节 分 类

一、按安装部位分

按安装部位可分为套管式 TA 和独立式安装的 TA 2 种。

(1) 套管式 TA。它通常用于穿墙套管或断路器、变压器等高压电器的引出套管，安装在墙上或高压电器的外壳上，即在作为套管使用的同时兼做 TA 使用。按照二次绕组安装的方式，套管式 TA 可以分为与套管连体式或与套管分体式 TA。连体式 TA 的二次绕组连同二次绕组圆筒状箱体与套管法兰固定安装在一起；分体式 TA 的二次绕组连同二次绕组圆筒状箱体单独装在墙上或变压器、断路器的升高座上，不与套管法兰固定安装在一起。套管连体式（简称套管式）TA 的外形图见图 1-1。

(2) 独立式安装的 TA。与套管式 TA 不同，它可以单独安装在变电站的户内或户外，与高压导线串联连接，它包括单级式 TA、串级式 TA、大电流 TA、电子式 TA、电子/电磁双系统 TA 等。其外形图分别见图 1-2~图 1-6。

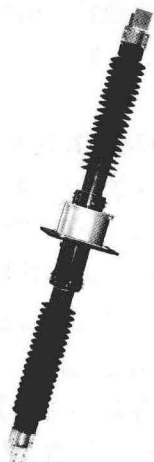


图 1-1 套管式 TA

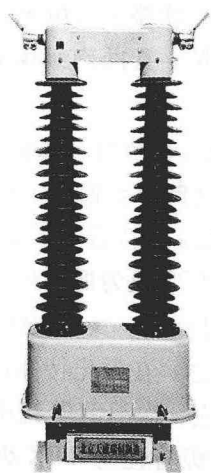


图 1-2 单级式 TA

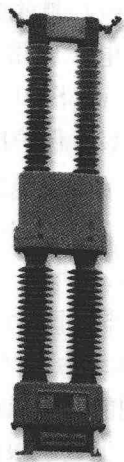


图 1-3 串级式 TA

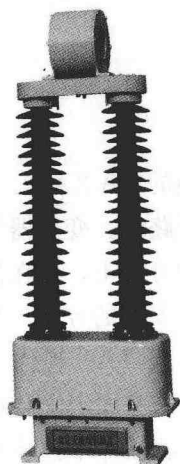


图 1-4 大电流 TA

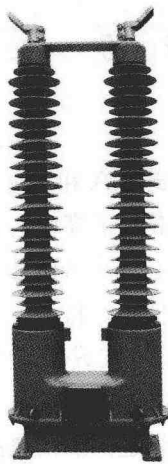


图 1-5 电子式 TA

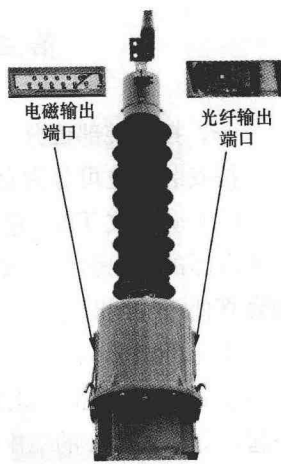


图 1-6 电子/电磁
双系统 TA

二、按功能分

按功能可分为测量用 TA、保护用 TA（P 级或 TPY 等）等。

(1) 测量用 TA。其二次绕组与电流表或电能表连接，用于测量电流或用于计量电量，其准确级误差为 0.1、0.2、0.2S、0.5、0.5S、1 级等。

(2) 保护用 TA。其二次绕组与保护装置或自动装置连接，用于启动继电保护装置或自动装置。供稳态特性保护的准确级误差有 5P、10P 级。供瞬态特性保护的准确级误差有 TPS、TPX、TPY、TPZ 级。TPS 级为低漏磁 TA，其性能由二次励磁特性和匝比误差限制规定，无剩磁限制，铁芯不设气隙。TPX 级为无气隙环形铁芯，在磁化特性规定的限值范围内，二次侧能准确成比例地反应一次故障电流中的交流分量和直流分量，无剩磁限值。TPY 级特性与 TPX 级相似，铁芯带有小气隙，静态剩磁不超过饱和值的 10%，适用于超高压电力系统的

继电保护。TPZ 级的二次侧只限制交流分量的误差，无直流分量误差限值。要求铁芯磁化特性好，磁芯要有防止气隙和剩磁

第四节 基本工作原理

一、工作原理和等值电路

电流互感器是一种特殊的变压器。它与电力变压器的区别是在正常工作条件下二次回路阻抗很小，近乎短路状态。其一次电流取决于被测线路负荷，与互感器二次负荷无关。由于励磁电流的影响，互感器产生电流误差和相位差。

合成薄膜绝缘 TA 与一般电磁式 TA 的工作原理相同，只是绝缘材料和绝缘结构发生了变化，很多书（如参考文献[1]）中对 TA 的工作原理作了详尽的说明，这里只简单介绍，不再赘述。

TA 的工作原理见图 1-7，等值电路见图 1-8。

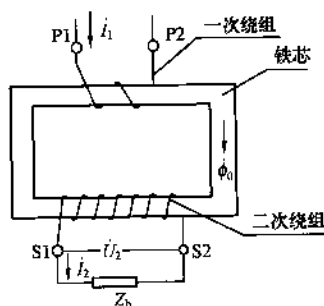


图 1-7 TA 的工作原理

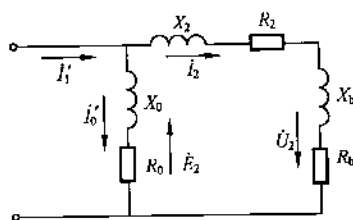


图 1-8 等值电路

由图 1-7 可知，当一次绕组中流过电流 $\dot{I}_1$ 时，由于电磁感应，在二次绕组中感应出电势，当二次绕组外回路接通时，就有二次电流 $\dot{I}_2$ 流过。

图 1-7 中一次绕组的 P1 端和二次绕组的 S1 端为同极性端子，也就是当一次电流 $\dot{I}_1$ 从 P1 端流入一次绕组时，二次电流

$\dot{I}_2$ 将从 S1 端流出二次绕组。

图 1-8 的等值电路图中, $\dot{I}'_0$ 和 $\dot{I}'_1$ 表示已折合到二次侧的励磁电流和一次电流。

一次电流 $\dot{I}_1$ 与一次绕组的匝数 N_1 的乘积称为一次磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ (也称一次安匝数), 二次电流 $\dot{I}_2$ 与二次绕组的匝数 N_2 的乘积称为二次磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ (也称二次安匝数), 由铁芯引起的励磁电流 $\dot{I}_0$ 与一次绕组的匝数 N_1 的乘积为励磁磁动势 $\dot{I}_0 N_1$ (也称励磁安匝数)。

二、磁动势平衡式和电动势平衡式

根据变压器原理, 理想 TA 的一次、二次绕组的磁动势 (安匝数) 相等, 但由于励磁电流影响 (铁芯损耗), TA 磁动势平衡方程式如下

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-1)$$

式中 $\dot{I}_1$ ——一次电流, A;

$\dot{I}_2$ ——二次电流, A;

$\dot{I}_0$ ——励磁电流, A;

N_1 ——一次绕组匝数;

N_2 ——二次绕组匝数。

或者写成 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \times \frac{N_2}{N_1} = \dot{I}_0$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \times K = \dot{I}_0 \quad (1-2)$$

式中, $K = \frac{N_2}{N_1}$, 称为 TA 的额定电流比。

根据变压器原理, TA 的电动势平衡方程式可以二次侧的形式写出, 即

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) \quad (1-3)$$

式中 $\dot{E}_2$ ——二次感应电势, V;

$\dot{U}_2$ ——二次绕组端电压, V;

R_2 ——二次绕组电阻, Ω ;

X_2 ——二次绕组漏抗, Ω 。

二次绕组端电压为

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 (R_b + jX_b)$$

式中 R_b ——二次负荷电阻, Ω ;

X_b ——二次负荷电抗, Ω 。

同样,也可以列出一侧的电动势平衡方程式,此处不再赘述。

三、电流互感器的误差

1. 误差

TA 的二次电流应能准确地反映其一次电流的幅值和相角,才能保证测量准确,亦即 TA 必须保证具有一定的准确度,而准确度是以准确级表示的。GB 1208—2006 规定了 TA 各准确级允许的误差限值。

TA 的测量误差包括幅值误差和相位误差,以比差和相位差(习惯上也称作角差)表示。

比差和相位差的概念是建立在向量图的基础上的,因此必须建立在正常工作的稳态正弦波条件下,这两个参数是衡量 TA 在正常工作状态下准确度的重要性能参数。

由图 1-8 和式 (1-3) 可得 TA 的向量图 1-9。图 1-9 中, $\dot{I}'_0$ 和 $\dot{I}'_1$ 表示已折合到二次侧的励磁电流和一次电流。

TA 的比差,指 TA 在测量时所出现的电流幅值误差,是由于实际电流比不等于额定电流比造成的,以电流幅值误差的百分数表示

$$\epsilon_i(\%) = \frac{K_N \times I_2 - I_1}{I_1} \times 100 \quad (1-4)$$

比差也可以用下式来表示(推导过程从略)

$$\epsilon_i(\%) = \frac{(IN)_0}{(IN)_1} \times \sin(\alpha + \theta_0) \times 100 \quad (1-5)$$

式中 K_N ——额定电流比；

I_1 ——实际一次电流；

I_2 ——实际二次电流；

$(IN)_0$ ——励磁安匝数 ($= I_0 \times N_1$, I_0 是励磁电流, N_1 是一次绕组匝数)；

$(IN)_1$ ——一次安匝数 ($= I_1 \times N_1$)；

α ——二次阻抗角 (包括二次绕组和外部回路阻抗)；

θ_0 ——铁芯损耗角。

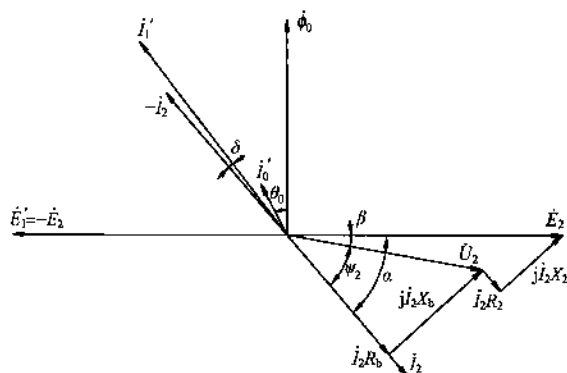


图 1-9 TA 向量图

由互感器原理及式 (1-2) 可知, 只有励磁电流为 0 时, 二次电流乘以额定电流比才等于实际一次电流, 而励磁电流总是存在的, 所以 TA 测得的电流总是存在幅值误差的, 而且一般是负值。

TA 的相位差, 指互感器在测量时所出现的一次、二次电流的相位误差, 也称角差。以理想互感器的相位差为 0, 当二次电流超前一次电流时, 相位差为正值; 当二次电流落后一次电流时, 相位差为负值。其单位通常以分 (') 或弧度 (crad) 来表示。

TA 的相位差表示 (推导过程从略)

$$\delta_i = \frac{(IN)_0}{(IN)_1} \times \cos(\alpha + \theta_0) \times 100 \quad (\text{crad}) \quad (1-6)$$

或
$$\delta_i = \frac{(IN)_0}{(IN)_1} \times \cos(\alpha + \theta_0) \times 3440 \quad (')$$
 (1-7)

式 (1-5) 和式 (1-7) 是设计中常用的电流比差和相位差的公式。

2. 影响误差的因素^[1-2]

为了能比较直观地看出各种参数对 TA 误差的影响, 先假定铁芯的导磁率 μ 为常数, 并根据下列基本公式将上述误差计算式作适当变换。

当铁芯中的主磁通 Φ_0 取幅值, 二次感应电势 E_2 取有效值时

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{2}E_2}{2\pi f N_{2N}}$$

式中 Φ_0 ——铁芯中的主磁通 (幅值), Wb;

E_2 ——二次感应电势 (有效值), V;

N_{2N} ——额定二次匝数;

f ——电源频率, Hz。

又因为

$$E_2 = I_2 Z_2 = I_2 \sqrt{(R_2 + R_b)^2 + (X_2 + X_b)^2}$$

式中 I_2 ——二次电流 (有效值), A;

R_2, R_b ——二次绕组和二次负荷电阻, Ω ;

X_2, X_b ——二次绕组和二次负荷电抗, Ω ;

Z_2 ——二次回路总阻抗, Ω 。

于是得出

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{2}I_2 Z_2}{2\pi f N_{2N}} \quad (\text{Wb}) \quad (1-8)$$

再根据磁路定律可得

$$\Phi_0 = BA_c = \sqrt{2}\mu H A_c$$

$$HL_c = (IN)_0$$

从而得出

$$\Phi_0 = \frac{\sqrt{2}\mu A_c (IN)_0}{L_c} \quad (1-9)$$

式中 μ ——铁芯导磁系数, H/m;

B ——磁感应强度 (幅值), T;

A_c ——铁芯有效截面积, m^2 ;

H ——磁场强度 (有效值), A;

$(IN)_0$ ——磁势, 即励磁安匝 (有效值), A;

L_c ——铁芯的平均磁路长度, m。

求解式 (1-8) 和式 (1-9) 得出

$$(IN)_0 = \frac{I_2 Z_2 L_c}{2\pi f \mu A_c N_{2N}}$$

将此式代入式 (1-5) 和式 (1-7) 中得出

$$\epsilon_i (\%) = \frac{I_2 Z_2 L_c}{2\pi f \mu A_c N_{2N} (IN)_1} \times \sin (\alpha + \theta_0) \times 100 \quad (1-10)$$

$$\delta_i (') = \frac{I_2 Z_2 L_c}{2\pi f \mu A_c N_{2N} (IN)_1} \times \cos (\alpha + \theta_0) \times 3440 \quad (1-11)$$

分析式 (1-10) 和式 (1-11) 可知, 影响误差的因素主要有以下几点:

(1) TA 的误差与二次回路总阻抗 Z_2 成正比, 要减小误差就必须减小 Z_2 。二次回路总阻抗中包括绕组本身的阻抗和二次负荷阻抗。二次负荷阻抗取决于使用条件, 由用户提出要求。设计人员应尽量减小二次绕组阻抗。

(2) 增加一次安匝数、铁芯截面积或减小铁芯平均磁路长都可以减小误差, 但改变这些参数会受到结构的限制。如一次绕组尺寸和最小绝缘距离决定了铁芯内径的最小尺寸, 也就限定了可能的最小平均磁路长, 而产品结构或外形尺寸将使铁芯截面积的