

ENCYCLOPEDIA OF
TRANSFORMER
TECHNIQUE

变压器技术大全

— 1964 ~ 1993 变压器 精选

(下卷)

变压器杂志编辑委员会 编

辽宁科学技术出版社

ISBN 7-5381-2321-0
TM · 115 定 价: 180 元

变压器技术大全

— 1964 ~ 1993 变压器 精选

(下卷)

变压器杂志编辑委员会 编

主 编: 于海年

副主编: 朱英浩

郑时伊

辽宁科学技术出版社



互感器的结构与计

互感器的设计与结构	6.1
高压互感器的全密封及其防爆	6.6
电流互感器原理与误差补偿	6.8
倒置式电流互感器及其前景	6.31
互感器设计中的铁心磁化曲线	6.34
用带气隙铁心改善电流互感器的暂态特性	6.36
设计电流互感器时应考虑仪表保安系数	6.40
高压电流互感器击穿原因的分析	6.44
220kV 电流互感器计算实例	6.46
电流互感器电容端屏计算	6.56
全浇注型电流互感器在环氧浇注后误差增大的原因和解决办法	6.60
电压互感器概述	6.62
两台同型号电压互感器接成 V 形时要注意极性	6.81
电压互感器实用计算法	6.82
JCC1-110 型电压互感器计算实例	6.85
串级式电压互感器可靠性的提高及新产品发展	6.99
超高压电容式电压互感器	6.103
带有校正装置的电容式电压互感器	6.108
超高压气体绝缘电压互感器	6.112
JDZ-10 型塑料电压互感器的研究与试制	6.117
0.002 级 5~10000/5A 高精度零磁通电流互感器	6.121
0.002 级 2~10kV/100V 零磁通电压互感器	6.131
晶闸管电气传动装置用电流互感器	6.135
大机组继电保护用电流互感器	6.138
零序电流互感器原理与设计	6.142
直流互感器的系列及其发展	6.145

互感器的设计与结构

南京电瓷总厂 张永和 洪邦明

沈阳变压器研究所 景秀梅

介绍了国际大电网会议技术委员会 23(变电站)分委组织的 23.07 工作组 提出的 No124 工作报告一部分中的主要内容。叙述了运行中各种型式互感器的设计和结构。

由于互感器设计与结构的技术不同,其事故也明显地不同,而某些技术对某些偶然事件或老化有着特殊的敏感性。一种复杂产品的设计总是一些矛盾条件之间的折衷方案,稍一疏忽某一微小细节,都可能影响整个产品的运行性能。从运行经验看,难以评价某一种技术比另一种技术好,或者说某一型号不合适,可根据自己的情况选择一些技术,而改变认为不合适的技术。

这里涉及到各种形式的互感器,并注意到可能引起事故的那些特点。

以下分器身部分、绝缘系统和辅助部分进行讨论。

一、器身部分

1. 互感器结构和绝缘

在图 1~6 的结构图中,各种互感器共同的设计考虑之点是绝缘配合,以承受试验电压和

连续的最大系统电压。绝缘配合的另一个因素是一次线圈的设计。

一次线圈内绝缘、一次接线端 P_1 和储油柜(头部)的绝缘,必须承受储油柜对地或对底部油箱的直接闪络,而不损伤绝缘或击穿。

在闪络期间:

a. P_1 和 P_2 (分别为与储油柜绝缘、连接的一次端子)之间的电压降 $\Delta U(t)$ 施加在 P_1 与储油柜之间的内部绝缘和外部绝缘上。

b. 在不对称短时电流峰值中,机械力加在电流互感器的一次线圈和机械支撑件上。

对于 a 项可以在高压试验室使用额定系统电压的截波来检查,但是机械应力 b 项只能够在大电流或高电压实验室来检查。

2. 电流互感器铁心和线圈

铁心的电磁性能和线圈设计的基础是等值电路。通过分析等值电路,可得 9 到个主要的结论。

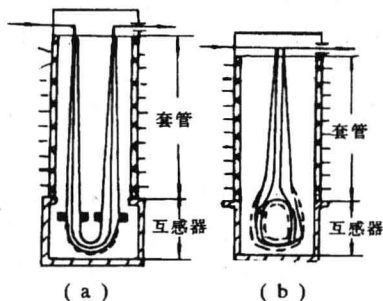


图 1 油箱式电流互感器
a—夹型;b—吊环螺栓型。

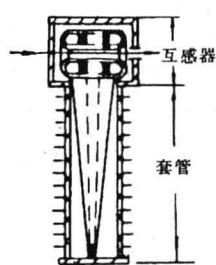


图 2 倒置式电流互感器

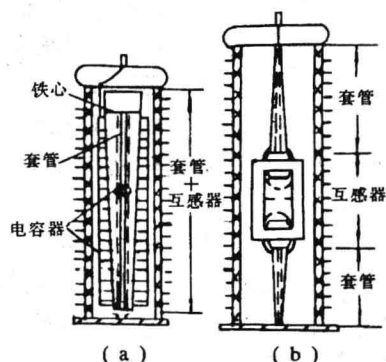


图 3 电磁式电压互感器
a—饼式线圈的开磁路铁心;
b—两个层式线圈串级。

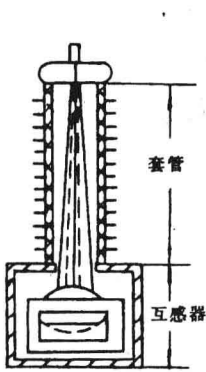


图4 电磁式电压互感器
(线圈在底部油箱)

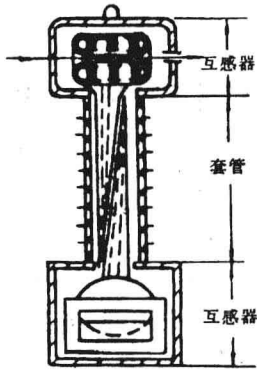


图5 组合式互感器
(CT+MCT)

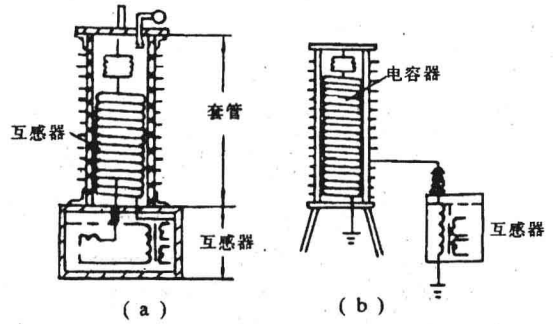


图6 电容式电压互感器
a—整体式;b—分体式。

① R_p 和 L_p 对电流互感器的测量功能没有影响(按图7的等值电路时)。

② 对于棒型一次线圈的电流互感器(图2倒置式), R_p 和 L_p 可忽略。

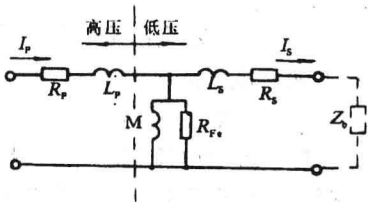


图7 等值电路

I_p —一次电流; I_s —二次电流; R_p —一次导体电阻;
 L_p —一次漏感; M —耦合电感; R_s —铁心磁滞和涡流损耗的等值电阻; L_s —二次漏感; R_s —二次线圈电阻; Z_L —负荷阻抗。

③ 一次线圈各位置上的短路力是 I_p 和 L_p 的函数。除了液体绝缘外,某些互感器也采用充砂结构,以改善机械稳定性和减少绝缘液体量。

④ 电流互感器的温升是 $I_p^2 R_p$ 的函数。特殊冷却和特殊一次导体的设计已成功地用于运行(使用分层的一次导体,可方便油循环和减少涡流损耗)。

⑤ $I_p - I_s$ 为铁心的励磁电流。为了测量精度,铁心的设计必须使 $I_p - I_s$ 值保持在一定范围内。通过避免铁心的气隙和使用特殊的磁性材料(晶粒取向钢片、导磁合金等)来实现这个目标)。

测量铁心应设计成环型结构(图8、9)。这种型式铁心用于图1a、2、5等电流互感器中。

对于吊环螺栓型(图1b)来说,使用环氧树脂加强环型铁心。在制造过程中,用磨削和抛光铁心表面来减少气隙。

⑥ 如果电流互感器对非对称故障电流响应方面有特殊要求时,其环型铁心可能存在气隙,以减少剩磁。

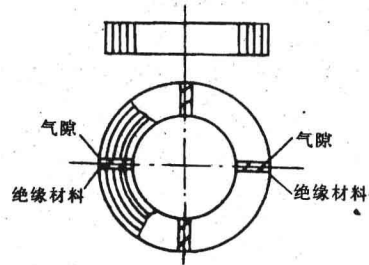


图8 带气隙的环型铁心

⑦ 必须特别注意内绝缘(U_i)和外绝缘(U_T)之间的配合。

⑧ 二次漏感 L_s 必须很低。某些结构的漏感为零,如棒型一次线圈的电流互感器。当互感器内有几个铁心或一次线圈不是棒型时,降低漏感值可能较为困难。这一点对于暂态性能特别重要。

⑨ 二次线圈的电阻值 R_s 与线圈的匝数(电流比)有关,也和规定的负荷有关,在该负荷下应保证电流比的精确度。二次电路的时间常数和最大热损耗是 R_s 的两个设计依据。

3. 电流、电磁式电压互感器接线

为了减少产品内部事故造成的瓷套损坏,产品与地(图10、11)或等电位的连接必须能承

受短路电流而连接导体不熔化,并在短路力下也不毁坏。

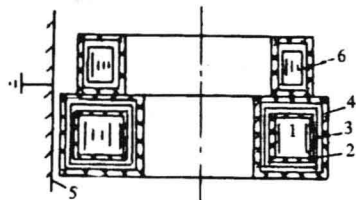


图9 带有线圈和绝缘的环型铁心

1—铁心;2—铁心和二次线圈的绝缘;3—两层二次线圈;4—二次线圈对地屏和第1个铁心的二次线圈对第2个铁心的绝缘;5—接地屏蔽;6—第2个铁心。

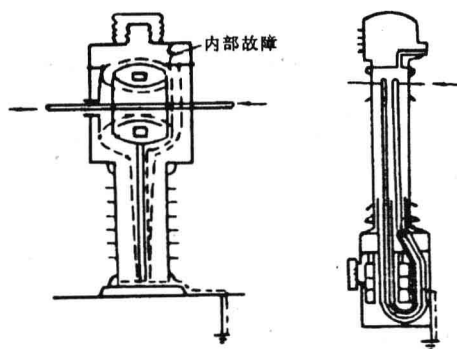


图10 电流互感器底部箱体的接地

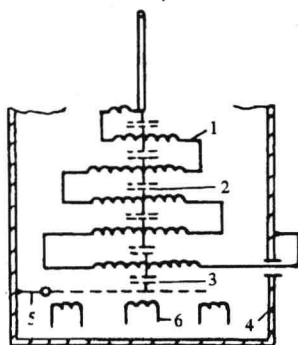


图11 带屏蔽的电磁式电压互感器等值电路

1—层式线圈;2—线圈两层间的电容;3—线圈最后一层和屏蔽间的电容;4—屏蔽;5—低感抗接地;6—二次线圈。

4. 电磁式电压互感器内的屏蔽

电磁式电压互感器结构中的关键,是在高压线圈的最后一层和二次线圈之间使用接地屏

蔽,以减少暂态过电压从一次线圈传递到二次线圈(图11)。

5. 电容式电压互感器设计

在电容式电压互感器中,因为有串联电容器组存在,当沿绝缘瓷套的电压分布不受外部情况影响时(如污染物),其内部故障引起的绝缘瓷套爆炸的危险相对较低。

一般来说,某一电容元件的击穿不会立即导致其他电容元件的相继损坏。

此外,电容分压器通常分成几个独立部分串联,所以使某一部分放电,不是以全短路电流起始值为先决条件的。

6. 器身部分要点

总的说来,在分析事故时要重点检查电网中高频冲击可能引起的事件,下列问题应加以考虑:

- 一次电流波形
- 瓷套构造与屏蔽
- 分级绝缘

二、内绝缘

1. 内绝缘结构

对于电流互感器(见图1、2、5、8),高压和地电位之间的常规绝缘是普通电缆纸(图12)或皱纹纸。



图12 纸绝缘的结构

这里强调指出,若油压小于90kPa,则气体饱和油浸全密封结构的起始局放电压较低。

在互感器某一点上,油压是油面上气压和油柱高度的函数。在一些设计中电场相同的绝缘点(特性相同),器身下部比上部有较高的局部起始放电电压。

对于层式线圈的电磁式电压互感器,采用三种绝缘设计。

①线圈为层式绝缘(图13)。此种设计必须特别注意层式线圈端部处的电场形状。

②电缆纸绝缘(图 12,套管部分)。

③油—隔板绝缘(图 14)。

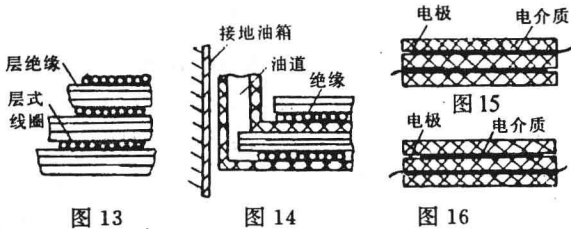


图 13

图 14

图 15

关于电容式电压互感器,电容器元件的结构可分为两种。

①单元件,两个电极(图 15)。

②双元件,三个电极(图 16)。

在以上两种情况下,电介质均由油浸电容器纸构成。但是,最近介绍的所谓的混合电介质则由电容器纸和塑料薄膜组合而成。其电容量取决于纸的压紧程度。

2. 分级绝缘

主绝缘的重点是如何避免沿瓷套部分的电场集中问题。已有设计可用于电流互感器和电磁式电压互感器。

对于倒置式、油箱式的电流互感器和电磁式电压互感器,主要有三种型式(图 17)。

主绝缘分级电屏之间没有中间端屏(图 18)。

套管设计中电屏端部配有调节电场的端屏时,可以采用少量分级主屏(图 19)。

当采用较多分级主屏时,主屏之间不加屏端。

三、辅助部分

1. 外绝缘

辅助部分的主要元件是膨胀装置和瓷套,瓷套对于产品的可靠性很重要。

瓷套长度大于 1.5~2m 的情况下,瓷套可分段粘接而成。瓷体粘接有两种可靠并广泛应用的技术:瓷接和环氧树脂粘接。

粘接部位的气泡能使局部放电测量造成困难。

对于电压 < 245kV 的瓷套,其外绝缘的长度由 1min 工频交流湿耐受电压来确定,而对

于电压 ≥ 245kV 的绝缘瓷套,则由正极性操作冲击湿试验来确定。按照 IEC 推荐,操作冲击试验耐受电压的闪络概率应小于 10%。

污秽地区,瓷套的伞裙形状很重要。

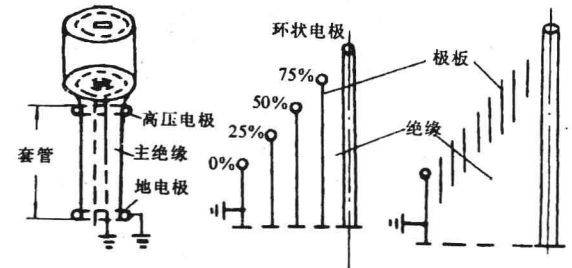


图 17

图 18

图 19

2. 油箱

互感器的油箱有两个主要元件:底部油箱和储油柜(头箱)。它们由瓷套来连接。油箱和储油柜所用材料一般为:①铸铁;②焊接钢;③热镀锌焊接钢;④焊接不锈钢;⑤铸铝;⑥焊接铝;⑦铸塑树脂。

利用特殊工艺使箱体内外表面耐受腐蚀。暴露于空气中外表面耐腐蚀保护,已有较大进展。但是,关于密封两个部件之间的间隙腐蚀和防止隙蚀的资料很少。内表面的腐蚀很重要,它将影响主绝缘的寿命。这就是要求内表面需要很好地防腐的原因,以避免绝缘故障。

3. 密封和膨胀装置

在辅助零件中,密封结构和膨胀装置是重要的零件,因为它们是绝缘系统的一部分。

某些密封结构对于水和空气的渗透非常敏感,这将影响油纸绝缘的可靠性和寿命。还应该注意,油或膨胀装置的特性可能受紫外线和温度的影响而改变。

必须规定油的使用温度范围(最低和最高温度)。温度太低会造成不允许出现的负压,而温度太高和太阳辐射又可能造成过正压,从而导致事故发生。

4. 安全与监测系统

金属或橡胶膨胀器密封允许通过观察膨胀器的收缩程度来检验互感器的工作状况。

膨胀器的膨胀和收缩取决于环境温度和产

品内部产生的热量,后者是一次电流和二次负荷的函数。

伸长式的膨胀装置,在 -40°C 的环境温度时收缩很大,其位置显示在刻度的下端;在 $+40^{\circ}\text{C}$ 的环境温度时膨胀很大,其位置显示在刻度的上端。重要的是三三相的三台电流互感器的膨胀器应在相同的位置。

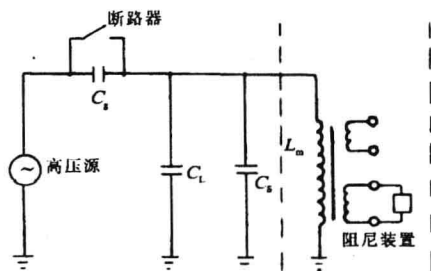


图 20 非线性谐振电路

5. 铁磁谐振抑制装置

如果计算由电磁式电压互感器非线性主电感 L_m 、断路器的辅助电容 C_s 、线路电容 C_L 、电站电容 C_s 以及高压源组成的电路系统(图 20)存在稳定振荡(铁磁谐振),那末电磁式电压互感器的二次线圈上必须接一个无源阻尼装置或一个有源电子阻尼装置。

电磁式电压互感器本身是一个稳定的非线性元件,其电源频率为 50 或 60Hz 时,该元件不能产生一个非线性稳定振荡。这点与电容式电压互感器相反,后者可产生一个稳定的非线性振荡。

四、安全性的改进

尽管对互感器进行了许多检查和试验,但事故仍可能发生。为了提高互感器运行的安全性,本节叙述油纸绝缘的互感器,主要应采取的一些改进设计的措施。

——无论结构或绝缘是何型式,均须有短路电流有效传递的内外接地电路及低压屏蔽。

——在油纸绝缘的产品中,必须避免瓷套内表面产生电弧,因瓷体的耐温剧变性能差。

根据互感器事故的统计,瓷套内的事故非常低。大多数事故发生在互感器的上部或下部的器身周围。根据实验室试验,有必要做到:

——当互感器事故时,防止产生压力波或压力波传递到绝缘瓷套上;

——迅速地释放事故所产生的压力。

——限制爆炸片散落在几米远的距离内;

——减少流出的油量,以防止火灾发生。

在某些设计中,电弧可能发生在绝缘瓷套内部,为了减少瓷套炸裂,可在绝缘瓷套内安装环氧树脂玻璃纤维管(或其他保护)。

五、结论

这里描述了各种技术类型,但还没包括所有投入运行的互感器技术。显然,内绝缘的质量是事故的基本点,还有老化问题。

不同介电强度设计中的电压分布非常重要,这是绝缘的质量保证和评价的最关键问题之一。在制造期间,重视产品工艺可靠性和质量控制是必须的。

其次是油纸组合绝缘重要性也较大。为此,应充分注意油的质量,注意油与材料的相容性,对环境温度的敏感性,因为环境温度将造成内压力的差别。

对各种结构的分析表明,可有不同的方法用于检查或监测运行中的互感器。

参考文献(略)

(原载《变压器》1991No6,有删节)

高压互感器的全密封及其防爆

沈阳变压器厂 戴霞初

概要说明了高压互感器实现全密封的必要性;简要介绍了作为全密封结构所采用的膨胀器的结构及其特点;为确保产品的可靠运行所采用的防爆措施。最后,对全密封结构的高压互感器在投入运行前后的注意事项作了具体说明。

一、全密封问题的提出

近年来,互感器制造厂家从多方面努力提高产品的技术特性。在结构方面广泛采用金属膨胀器,使产品实现全密封;在制造工艺方面,从绝缘包扎到产品总装配,特别是其中的真空干燥处理和变压器油处理工艺,部分厂家已经达到当代世界先进水平。这些产品的特点是产品内部的固体绝缘和变压器油含水量低,介损低,耐电强度高。绝缘纸的含水率一般低于 $0.5\% \sim 1.0\%$,变压器油的含水量一般为 $10 \sim 15\text{ppm}$,介损值一般低于 0.3% 。产品的总体介损和局部放电量一般都达到了国际电工标准 IEC 的要求,且有相当一部分产品超越了这一标准。

产品的内在性能越来越好,但随之而来的则是对外界的影响越来越敏感。如采用过去的开启式结构,则外部大气对变压器油及其内部绝缘必定产生严重的影响。比如变压器油,由于和大气接触,其含水量可能达到 $30 \sim 50\text{ppm}$ 。在湿热季节或在湿热地带,由于产品的呼吸作用,还将分离出游离水。其耐电强度将由 $50 \sim 70\text{kV}$ 下降到 $20 \sim 40\text{kV}$,且浸于油中的绝缘件亦相继受潮,绝缘强度急剧降低,直至绝缘被损坏。因而,对于开启式结构的产品,用户必须对运行中的产品进行经常性的监测。且往往由于产品严重受潮给电力系统运行的可靠性和稳定

性带来很大威胁,不得不退出运行进行干燥处理。同时,由于空气中的氧气长期地与变压器油接触,将加速油的老化。为此,近年来发展了带有金属膨胀器的全密封结构的高压互感器,普遍受到用户的欢迎。

二、全密封结构的特点

全密封结构的互感器,一般都是在产品的顶部安装金属膨胀器,以适应由于温度的升降而导致的变压器油体积的变化,使产品内部完全与外界隔离,从而避免了大气对产品内部的影响,把整个产品真正地、全部地封闭起来。

根据其所采用的材质不同,膨胀器分为胶囊和金属两种。由于橡胶对变压器油的不稳定性,当其长期浸泡在变压器油中时,必将导致橡胶的老化(变硬、变脆、开裂等),以致密封被破坏。为此,世界上一些先进的厂家先后采用了由不锈钢板制成的膨胀器,逐步取代了胶囊结构。

金属膨胀器根据其结构形式不同分为波纹式和盒式两种。这两种膨胀器又根据其在产品上的充油方式分为内油式和外油式两种。

波纹式膨胀器及安装方式见图 1。每个膨胀节由两片内外交错焊接而成。产品内部发生故障时,所产生的气体使膨胀节迅速膨胀,顶开上顶盖,直至爆破,释放内部压力,起到防爆效果。

盒式膨胀器及安装方式如图 2。每个膨胀

盒(膨胀单元),由上下两个模片组成。每个膨胀盒的容积较大,盒与盒之间为刚性固定。根据产品的用油量,选择不同尺寸的膨胀盒,并由多个盒并联组成。根据产品的需要安装成内油式或外油式均可。

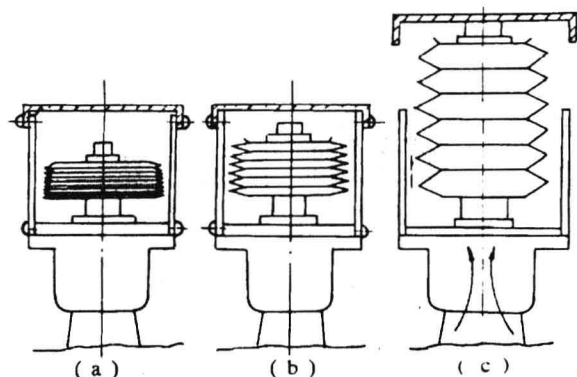


图1 波纹式膨胀器及安装方式
a—超始状态;b—运行状态;c—事故状态。

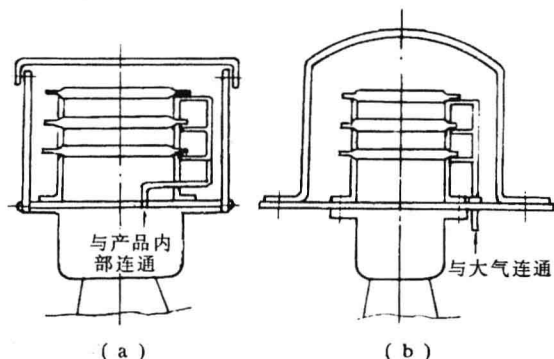


图2 盒式膨胀器及安装方式
a—用于内油式;b—用于外油式。

内油式即膨胀器的内部充油,并与产品的内部相通,外部与大气接触。采用内油式结构的特点是:产品用油量小,且一般处于微正压状态下工作。

外油式即膨胀器的外部充满变压器油,并与产品内部相通。变压器油直接与上储油柜接触,散热良好,特别适用于采用热虹吸冷却的大

电流产品,其用油量较大,一般处于微负压状态下工作。

盒式膨胀器的每个膨胀盒的刚性都较好,且盒与盒之间采用刚性固定,故可适用于产品的放倒运输。但它不具备波纹式膨胀器的压力释放能力,如不采取防爆措施,当产品内部发生故障时,将导致爆炸事故的发生。

三、互感器产品的防爆

互感器在运行中发生各种事故是不可避免的,但由于高压互感器一般为瓷箱式结构,其上部的储油柜多为铸铝结构,下部的箱底或油箱分为钢铁焊接结构,都具有很强的刚性,因此如果没有很强的防爆措施,一旦发生故障,必将导致严重的爆炸事故。

产品的防爆措施是多种多样的,有压力释放阀、炭素防爆膜、金属防爆膜等等。对上述防爆元件的选择要考虑到产品的结构和用户的要求。对此,沈阳变压器厂出厂的产品中除带波纹式膨胀器的产品不安装防爆膜外,其它所有采用盒式膨胀器的全密封的产品中均安装了由石墨制成的压力释放装置。此外,防爆装置的安装部位是一个值得探讨的问题。与此同时,要求防爆装置必须具有足够的压力释放能力。一旦产品内部压力达到预定值,必须可靠地动作,并具有足够的释放断面。否则当产品内部故障严重,产气量大时仍难以避免爆炸事故的发生。

总之,产品的防爆措施和产品的结构、电压等级、安装方式以及用户的特定要求有关。从防爆观点出发,需要提出的是,安装波纹式膨胀器产品的上盖,目前普遍采用钢板制成,一旦产品内部发生故障,膨胀器高度急剧上升,顶掉上部的上盖,直至爆破,达到防爆的目的。由于上盖是铁的,从顶部掉下来很可能砸坏瓷套。为此,建议改成塑料压制件为佳。

(原载《变压器》1987No9,有删节)

电流互感器原理与误差补偿

上海互感器厂 刘在勤

第一章 互感器的用途

互感器按其用途分,可以分成电流互感器和电压互感器两种,其作用如下:

(1) 电流互感器将电力回路的大电流按一定比例缩小到便于测量仪表和继电器动作的数值,一般为 5A,也有 1A 或更小的,以满足特殊需要。测量仪表及继电器的电流线圈与电流互感器的二次线圈串联使用。适用于小电流的测量仪表及继电器可以制造得小巧精密。各电器元件彼此间的连接导线也可用较细的,有利于配电盘的安装。

(2) 电压互感器将电力系统的高电压按一定比例缩小到便于测量仪表和继电器动作的数值。一般为 100V,也有 50V 的。测量仪表及继电器的电压线圈与电压互感器的二次线圈并联使用。因此,对测量仪表及继电器的绝缘强度要求不高。可按电压互感器二次绝缘水平考核。

采用电流互感器和电压互感器以后,二次测量仪表及继电器的规格就简单得多了。电流表一般制成 5A 的,电压表制成 100V 的。继电器的电流线圈按 5A 考虑,电压线圈按 100V 考虑。特殊规格数量极少,可按新产品生产。

图 1 表示电流互感器、电压互感器与测量仪表及继电器的接线示意图。

第二章 电流互感器的基本原理

第一节 电流互感器的基本知识

电流互感器的一次线圈是直接和电力回路串联的,必须具有电力回路同一电压等级的绝缘水平。此外,一次线圈的容量应该使其在长期通过电力回路的最大电流时,一次线圈的温升

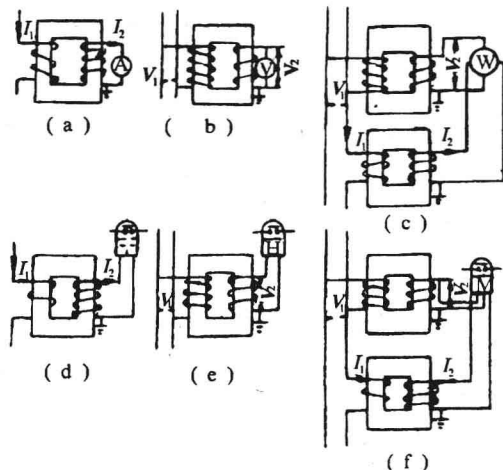


图 1 测量仪表及继电器与电流、电压互感器的接线示意图

a—接有电流表的电流互感器;b—接有电压表的电压互感器;;c—接有功率表的电流、电压互感器;d—接有电流继电器的电流互感器;e—接有电压继电器的电压互感器;f—接有方向继电器的电流、电压互感器。

不超过容许值。

在电力回路发生短路时,便出现较正常负荷电流大很多倍的短路电流。这样大的电流会产生很大的机械应力和热效应,对电流互感器产生破坏作用。因此,在选择电流互感器时,除一次线圈容量和绝缘水平必须满足要求外,还必须注意短路时的机械应力和热效应不能超过电流互感器的容许值。

电流互感器的二次线圈可以视需要制成单线圈或双线圈。二次线圈的额定电流一般为 5A,但目前,在超高压系统和大电流电力回路中,为了增加二次负荷、减小二次回路连接导线的截面及损耗,二次线圈的额定电流也有 1A 或 0.5A 的。

二次线圈的额定容量

$$P = I_{2H}^2 Z_H$$

式中 P —二次线圈额定容量(VA);

I_{2H} —二次线圈额定电流(A);

Z_H —二次线圈额定负荷(Ω)。

由此公式可见,当 P 不变时, I_{2H}^2 与 Z_H 成反比。当二次额定电流从 5A 降至 1A 时,电流互感器允许的二次负荷将增大到 25 倍,如二次额定电流降至 0.5A,则允许的二次负荷将增大到 100 倍。

在超高压系统和大电流回路中,如果原来需要配备二台或三台电流互感器,现在只要一台就够了,可以节约大量国家资金。在选择测量方案中,也需要 1A 或 0.5A 的。

在运行中,当一次与二次线圈间的绝缘被击穿后,二次线圈回路内会出现高电压,使测量仪表及继电器的绝缘遭受破坏,更严重的问题是危及操作人员的人身安全。因此,为了保证安全,电流互感器的二次线圈的一端经常是直接接地的,见图 1。

电流互感器在实际运行中,二次线圈是不容许开路的,因为电流互感器的工作情况相当于短路状态。电流互感器的一次线圈有很大的安匝数(一般在 600 安匝及以上),正常运行时,此安匝有很大一部分是由二次线圈相当于短路状态时的安匝抵消之,仅剩下一小部份作为铁心的励磁安匝。所以,正常运行中的电流互感器铁心的磁密较低,只有几千 Gs。当二次线圈开路成空载状态时,则一次线圈的所有安匝都作为励磁安匝,铁心的磁密比正常时增加好多倍,使铁心处于高度饱和状态,以致使铁心损耗聚增,发热厉害,严重的会使二次线圈烧坏。更值得注意的是,铁心的高度饱和会在二次线圈中感应出相当高的电压,达数百 V。在电流比大的电流互感器(如套管式)中,有时竟达数千 V。这样高的电压会危及操作人员的安全。铁心中的剩磁也影响电流互感器的准确度。

第二节 电流互感器的相量图

图 2 是电流互感器的原理图。电流互感器

的工作原理大致与变压器相同,所不同的是变压器铁心内的交变主磁通是由一次线圈二端所加的交流电压产生的,而电流互感器铁心内的交变主磁通则是由一次线圈内通过的电流产生的。这个主磁通在电流互感器的二次线圈内感应出一个二次电势 E_2 。

如果通过一次线圈的电流 I_1 (一次电流)与二次线圈回路中由感应而产生的电流 I_2 (二次电流)有一定的比例关系,则只要测量出 I_2 值, I_1 值就可以算出。理想的电流互感器, I_1 与 I_2 的比值是一个常数,称为电流互感器的额定电

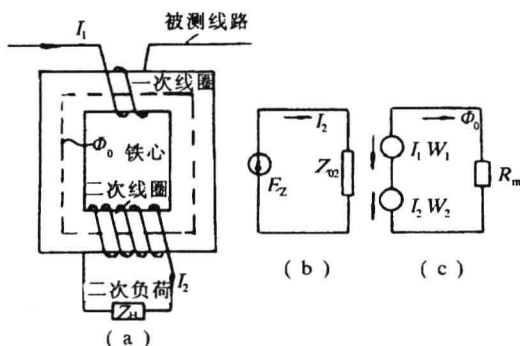


图 2 电流互感器的原理图

a—原理图;b—等值电路图;c—等值磁路图。

流比(或称额定变比),通常以符号 K_H 表示:

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

式中 I_{1H} —额定一次电流(A);

I_{2H} —额定二次电流(A)。

如从二次测量仪表上读得 I_2 值,则线路上的真实电流就可由 $I_1 = K_H I_2$ 算出。

实际上,电流互感器的一次电流 I_1 与感应的二次电流 I_2 的比不可能象上面所说的那样,在任何情况下都等于 K_H ,而是随不同条件而变。因此,有必要研究 I_1 与 I_2 间的真实关系。不管电流互感器采用什么补偿方法,其基本原理是一致的。

没有补偿的电流互感器的基本原理与一般单相变压器一样。从图 2 可见,这样的电流互感器主要包括三部分:铁心、一次线圈和二次线圈。此外,有一负荷连接在二次线圈两端。

根据原理图、等值电路图及等值磁路图,可

以推导出 I_1 和 I_2 间的关系公式。

对二次回路,可以根据电路定律直接写出用复量表示的关系式:

$$\begin{aligned}\dot{E}_2 &= I_2[(R_H + R_2) + j(X_H + X_2)] \\ &= I_2(Z_H + Z_2) \\ &= I_2 Z_{02}\end{aligned}\quad (1)$$

公式(1)表明,当铁心未饱和时, E_2 是与 I_2 和 Z_{02} 成正比的。

I_2 滞后 E_2 的角度

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{X_H + X_2}{R_H + R_2} \quad (2)$$

式中 E_2 —二次线圈的感应电势(V);

I_2 —通过二次负荷的电流(A);

Z_{02} —二次回路总阻抗(Ω);

Z_H —负荷阻抗(Ω);

Z_2 —二次线圈内阻抗(Ω);

R_H, R_2 —二次负荷电阻和二次线圈内电阻(Ω);

X_H, X_2 —二次负荷电抗和二次线圈漏抗(Ω);

α —二次回路阻抗角(度)。

再根据磁路定律,在铁心回路中可以写出关系式:

$$\sqrt{2}(I_1 W_1 + I_2 W_2) = \Phi_0 R_m \quad (3)$$

式中 I_1, I_2 —一次电流和二次电流(A);

W_1, W_2 —一次线圈匝数和二次线圈匝数(匝);

Φ —铁心中的主磁通(Mx, 1Mx = 10^{-8} Wb);

R_m —铁心的磁阻。

又根据电磁感应原理,得关系式:

$$\dot{E}_2 = -j4.44fW_2\Phi_0 \times 10^{-8} \quad (4)$$

式中 f —电源频率。

如公式(3)的右边等于零,即铁心中的磁阻 R_m 或磁通 Φ_0 为零,则 I_1 和 I_2 之间的关系式就非常简单:

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 = 0$$

$$I_1 W_1 = -I_2 W_2$$

$$\frac{I_1}{-I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

通常二次线圈匝数与一次线圈匝数的比值称为匝数比,简称匝比,用 K_w 表示,所以:

$$\frac{I_1}{-I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_1}{I_2} = K_w \quad (5)$$

K_w 为一常数。因此,从上式可知, I_1 和 I_2 在此值上等于 K_w ,在相位上相差 180° 。

以上所述情况就是所谓理想情况。但由于铁心的磁阻 R_m 永远不可能为零,而 Φ_0 的存在又是电流互感器工作的必要条件,故 I_1 和 I_2 的关系就随 Φ_0 和 R_m 的大小而变,其比值实际上不为常数,相位差别也会改变。

我们用铁心励磁安匝来代替 $\Phi_0 R_m$ 。令 I_0 表示铁心空载电流,则得:

$$\sqrt{2} I_0 W_1 = \Phi_0 R_m$$

代入公式(3)即得:

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = \Phi_0 W_1 \quad (6)$$

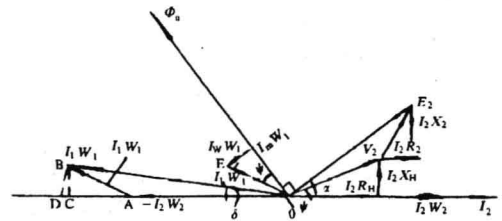


图3 电流互感器的相量图

I_0 由二部分组成:产生 Φ_0 的磁化电流 I_m , 与 Φ_0 同相;供给电流互感器铁心中涡流损耗和磁滞损耗的铁损电流 I_w , 与 E 反向(与 Φ_0 应成 90°)。所以,空载电流

$$I_0 = I_m + I_w$$

I_0 超前 Φ_0 的角度

$$\Psi = \tan^{-1} \frac{I_w}{I_m} \quad (7)$$

式中 Ψ —铁心损耗角(度)。

从而得一次电流

$$\begin{aligned}I_1 &= I_0 - I_2 \frac{W_2}{W_1} \\ &= I_0 - I_2 K_w\end{aligned}$$

公式(1)、(4)、(6)是表示 I_1 和 I_2 间关系的公式,根据这三个公式,用复量法算出 I_1 和 I_2 的比差和角差。根据三个公式给出的相量图如图3所示。

第三节 电流互感器的误差

从上节的叙述中已知,电流互感器因其铁心有空载电流存在, I_1 与 I_2 的比值不可能为一常数。实际上,它们之间的关系比较复杂,这从相量图中可以看出。因此,用直接测得的 I_2 值乘以 K_H 来代表 I_1 显然是不准确的,也就是说有一定的误差存在。

误差有二种,即比误差和角误差。 I_1 和 $K_H I_2$ 在数值上的差别称为比误差,简称比差。比差用相对值(百分数)表示:

$$f_i = \frac{K_H I_2 - I_1}{I_1} \times 100\% = \frac{K_H - \frac{I_1}{I_2}}{\frac{I_1}{I_2}} \times 100\% \quad (8)$$

式中 f_i —比差;

I_1 —被测线路上的真实电流(A);

I_2 —实际测得的电流互感器二次电流(A)。

从比差公式中可知,比差有正负值。当 $K_H I_2 > I_1$ 时,比差为正值,反之为负值。

比差为正值,表示从电流互感器二次测得的电流 I_2 乘以 K_H 后比线路实际电流 I_1 要大;比差为负时相反。

在无补偿的电流互感器中(也没有匝数补偿),比差永远为负值;当加了补偿之后,随着电流和负荷的变化,比差可能为正,也可能为负。

从使用角度来说,电流互感器的比差越小越好。要使比差减小,就必须尽量减小引起误差的空载电流 I_0 , I_0 的大小又主要决定于铁心磁通密度的大小和材料的优劣。因此,除使用优质铁心材料外,设计电流互感器时,磁通密度应取得低些。

从图3中可见, I_0 比 I_1 小得多, $\overline{OB}$ 与 $\overline{OC}$ 的差值更是微小。所以用 $\overline{OC}$ 代替 $\overline{OB}$ 也能较精确地计算比差。这样的假设,使 I_1 和 I_2 间数值关系以算术表示时大为简化。利用这一假设,从相量图中可以得出:

$$I_1 W_1 = I_2 W_2 + I_0 W_1 \sin(\alpha + \Psi)$$

$$\begin{aligned} \text{于是 } I_1 &= \frac{I_2 W_2 + I_0 W_1 \sin(\alpha + \Psi)}{W_1} \\ &= \frac{W_2}{W_1} I_2 + I_0 \sin(\alpha + \Psi) \\ &= K_w I_2 + I_0 \sin(\alpha + \Psi) \end{aligned} \quad (9)$$

在 $\triangle ABC$ 中

$$\begin{aligned} &\because BC \perp AC \\ &\therefore \angle BAC + \angle ABC = 90^\circ \end{aligned} \quad (10)$$

又 $\because BA \parallel EO$

$$\therefore \angle BAC = \angle EOC \quad (11)$$

由 $-I_2 W_2$ 与 $I_2 W_2$ 构成的 180° 角中, Φ_0 与 E_2 的夹角已占 90° ,

故 $\alpha + \Psi + \angle EOC = 90^\circ$

由公式(10)和(11)得出

$$\angle BAC + \angle ABC = \alpha + \Psi + \angle EOC$$

又 $\because \angle BAC = \angle EOC$

$$\therefore \angle ABC = \alpha + \Psi \quad (12)$$

将公式(9)代入公式(8),即得电流互感器比差的计算公式:

$$\begin{aligned} f_i &= \frac{K_H I_2 - [K_w I_2 - I_0 \sin(\alpha + \Psi)]}{I_1} \times 100\% \\ &= \frac{(K_H - K_w) I_2 - I_0 \sin(\alpha + \Psi)}{I_1} \times 100\% \end{aligned} \quad (13)$$

这样的公式仍太复杂。如果再作一些简化,就可以大大地简化比差的计算,同时还能保证有足够的准确度。

设计时 K_H 与 K_w 之间保留一定的差异是为了调整比差,这就使二次匝数 W_2 稍减小些。

W_2 减少后, K_w 值就稍小于 K_H ,但两者一般仍近于相等。所以,可令 $K_w = K_H$,代入公式(13)后得:

$$f_i = - \frac{I_0}{I_1} \sin(\alpha + \Psi) \times 100\% \quad (14)$$

因为 $I_1 = K_H I_2$,所以比差公式(14)也可写成:

$$f_i = - \frac{I_0}{K_H I_2} \sin(\alpha + \Psi) \times 100\% \quad (15)$$

如分子分母均乘以 W_1 ,则公式(15)可化为用安匝表示的公式:

$$f_i = - \frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} \sin(\alpha + \Psi) \times 100\% \quad (15a)$$

公式(14)、(15)及(15a)即为常用的比差计算公式。

I_1 与 $-I_2$ 在相角上的差别,称为相角误差,简称角差。角差用绝对值表示,单位为分。

角差的确切定义是:二次电流相量 I_2 旋转 180° 后,与一次电流相量 I_1 之间的夹角。

角差有正负之分。当旋转 180° 后的二次电流相量 $-I_2$ 超前于一次电流相量 I_1 时,角差为正,反之为负。

从图 3 中可得:

$$\begin{aligned}\sin\delta &= \frac{BC}{OB} = \frac{I_0 W_1 \cos(\alpha + \Psi)}{I_1 W_1} \\ &= \frac{I_0}{I_1} \cos(\alpha + \Psi)\end{aligned}\quad (16)$$

由于 δ 值很小,如果 δ 以弧度为单位可令 $\delta = \sin\delta$ 。

将 $I_1 = K_H I_2$ 代入公式(16)后,得角差的另一种表示形式:

$$\begin{aligned}\delta = \sin\delta &= \frac{I_0}{I_1} \cos(\alpha + \Psi) \\ &= \frac{I_0}{K_H I_2} \cos(\alpha + \Psi)\end{aligned}\quad (17)$$

如分子分母均乘以 W_1 ,即公式(17)可化为用安匝表示的公式:

$$\delta = \frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} \cos(\alpha + \Psi)\quad (17a)$$

因 δ 很小,实际上多以分为单位。弧度与分的关系如下:

$$\pi = 180^\circ$$

$$1^\circ = 60'$$

$$\pi = 180 \times 60' = 10800'$$

$$\pi \approx 3.14 \text{ 弧度}$$

$$\text{则每 1 弧度} = \frac{10800'}{3.14} = 3439.5 \approx 3440'$$

如果 δ 以分为单位,则公式(17)和(17a)可分别写成:

$$\begin{aligned}\delta &= 3440 \frac{I_0}{I_1} \cos(\alpha + \Psi) \\ &= 3440 \frac{I_0}{K_H I_2} \cos(\alpha + \Psi)\end{aligned}\quad (18)$$

$$\delta = 3440 \frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} \cos(\alpha + \Psi)\quad (18a)$$

作为测量用的电流互感器,其比差和角差的大小直接影响到测量数值的准确程度。因此,

比差和角差是测量用电流互感器最主要和最重要的技术参数之一。和测量仪表一样,把测量用电流互感器按比差和角差的大小分成几级,称为准确等级。

按我国目前的生产和使用情况,各准确等级的比差和角差的极限值如表 1 所示。

当二次额定负荷小于 0.4Ω 时,二次负荷的下限值不再按照表 1 规定,而按照表 2 规定。

表 1 电流互感器的准确等级及误差范围

准确等级	一次电流 (%)	误差及限值		二次负荷极限 ($\cos\varphi=0.8$) (%)	一般用途
		比差 (%)	角差 (')		
0.2	10	± 0.3	± 20	25~100	1. 测量 0.5 级及以下的电流互感器的误差 2. 在实验室接线系统中作标准电流互感器用
	20	± 0.25	± 15		
	100~120	± 0.2	± 10		
0.5	10	± 1.0	± 60	25~100	1. 用于准确测量电力及电量,特别是用于与电力积算表相连接的回路上 2. 在实验室及控制装置中使用
	20	± 0.75	± 50		
	100~120	± 0.5	± 40		
1	10	± 2.0	± 120	25~100	1. 测量电力及电量 2. 在实验室及控制装置中使用
	20	± 1.5	± 100		
	100~120	± 1.0	± 80		
3	50~120	± 3.0	不规定	50~100	用于电流表及继电器
10	50~120	± 10	不规定	50~100	用于电流表及继电器

表 2

额定二次负荷 (Ω)	0.1	0.15	0.2	0.4
二次负荷下限 (Ω)	0.05	0.10	0.15	0.15

二次额定电流为 5A 的电流互感器,其二次额定负荷一般为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.2, 1.6 及 2 Ω 。

二次额定电流为 1A 的电流互感器,其二次额定负荷一般为 5, 10, 15, 20 及 30 Ω 。如二次额定负荷小于 5 Ω ,则其负荷下限值不得小于 1.5 Ω 。