

互感器論文集

趙修民

山西省互感器研究所編印

一九八五年十二月

3014023/1

编 者 的 话

赵修民同志是中国仪器仪表学会理事、国际电工委员会第38技术委员会中国互感器专业委员会委员、山西省互感器研究所副所长、高级工程师。

他从一九五八年长期从事互感器补偿理论和测试方法的研究，先后与太原变压器厂、太原供电局修试所、山西互感器厂、天津市互感器厂、水电部电力科学研究院、西安热工研究所和北京互感器厂等单位合作，研制成功了一百多种型号规格的精密互感器和互感器测试仪器，获省级以上成果奖十七次。同时还对有关的原理、线路、设计、试验和使用等问题进行分析和总结，以个人、本单位或几个协作单位的名义，在《电测与仪表》、《变压器》、《中国科学》、《仪表技术》等期刊上发表了数十篇文章。现将其中的四十四篇汇编成《互感器论文集》，以飨读者。

本书按原文发表时间的先后顺序编排。这些文章均由赵修民同志执笔写成。这次选编时经作者重新校核，对原文中错误和不准确之处做了修改，并删去已无甚参考价值或重复的章节和段落。书中一律略去署名，凡原以本单位、几个协作单位，以及与其他同志联合名义发表的文章，皆借脚注加以说明。每篇结尾均注明原载期刊的刊名、年号和期数，以便读者查对。

由于我们编辑水平有限，错误和不妥之处在所难免，欢迎广大读者提出宝贵意见。

编 者

一九八五年十二月

目 录

1、单匝式高压电流互感器系列·····	(1)
2、关于新型电流互感器的饱和倍数和额定负荷问题·····	(4)
3、利用ATT电流互感器校验仪测量磁化曲线·····	(7)
4、电流互感器的额定容量与校验工作·····	(9)
5、利用热轧硅钢片设计制造0.2级电流互感器·····	(10)
6、圆环磁分路补偿电流互感器误差的原理及计算方法·····	(12)
7、圆环磁分路补偿的各类电流互感器·····	(20)
8、电流互感器的补偿原理和计算方法·····	(23)
9、0.05级~0.01级高准确度电流互感器的绝对法校验装置·····	(42)
10、利用互感器校验仪测量铁心磁性能·····	(46)
11、0.002级5~10000/5安高准确度零磁通电流互感器·····	(55)
12、电流互感器误差和补偿磁势分析法·····	(65)
13、小铁心补偿电流互感器的几个问题·····	(86)
14、小铁心补偿电流互感器·····	(89)
15、可逆式和自耦式电流互感器·····	(99)
16、便携式HEB型和HEBL型互感器校验仪·····	(105)
17、0.05级~0.01级低压高准确度电压互感器·····	(111)
18、关于HE5型互感器校验仪的几个问题·····	(120)
19、HE5型互感器校验仪的简易整体检定方法·····	(124)
20、新型高准确度互感器校验仪·····	(128)
21、关于升流器的设计问题·····	(136)
22、0.002级2~10kV/100V零磁通电压互感器·····	(139)
23、0.01级和0.02级2~10kV/100V高准确度电压互感器·····	(144)
24、LMZ-0.5型200/5和150/5互感器铁心磁性能的控制和误差试验问题·····	(149)
25、电流互感器误差补偿原理和零磁通电流互感器检定系统·····	(151)
26、赶超世界先进水平的仪用互感器 ——全国仪器仪表自动化装置展览会仪用互感器展品简介·····	(161)
27、一种新型电压互感器的检定设备 ——0.01级升压双级电压互感器·····	(165)
28、仪用电压电流互感器·····	(170)
29、升流双级电流互感器·····	(174)

30、电磁式高电压比率标准的误差及其检定方法	(179)
31、互感器式电流负荷箱	(186)
32、测单相三线制电压互感器零序电压线圈误差的仪器	(188)
33、互感器式电压负荷箱	(191)
34、电流互感器的退磁问题	(194)
35、HEG2、HEG3型互感器校验仪的扩展应用	(197)
36、电流比较仪检定电流互感器的各种线路	(203)
37、电位差式HE11型互感器校验仪的设计	(208)
38、0.5级和1级35千伏套管式电流互感器	(212)
39、环形铁心线圈漏抗的计算	(217)
40、检定精密互感器时的接地问题	(221)
41、电流互感器误差补偿原理和计算公式	(226)
42、关于电度表试验台用互感器的问题	(232)
43、利用低压电压互感器测定高压电压互感器误差的方法	(237)
44、工作电流和工作电压宽广的HEG4型互感器校验仪	(242)

简化结构, 缩小尺寸, 节省材料, 降低成本

单匝式高压电流互感器系列

本文报导一项敢想敢干的设计, 与TΠOΦ-10型电流互感器比较, 新设计平均能节省硅钢片(50~95)%, 铜线(85~90)%, 文中就误差的要求, 对缩小尺寸的各项因素作了详尽的分析。

在电流互感器方面, 目前我国正在生产的仿苏TΠOΦ-10及TΠΦ-10型10千伏电流互感器存在着严重的缺点。它们的价格贵, 体积庞大笨重, 浪费大量材料, 设计仍然不能满足生产发展的要求。

因此, 根据沈阳变压器厂提出的任务, 在沈阳变压器厂的同志指导和协助下, 重新设计了10千伏单匝式电流互感器。目的是想办法节约贵重材料——硅钢片和铜, 设计出价格低、尺寸小的电流互感器, 以满足我国电气化的要求。

一、在设计中进行的工作

1、我们进行了0.5级、1级、3级和D级的系列设计, 电流比有1500/5、1000/5、800/5、600/5、400/5、300/5、200/5、150/5等, 全部共计30种(其中D级没有设计200/5和150/5的)。

2、在计算中分析了影响误差的各种因素, 分析了磁分路补偿原理并推导了计算方法。

3、对于误差、各种补偿方法对误差的影响、温升、绝缘强度、饱和倍数都按照标准进行了试验。

4、考虑了新产品的结构及工艺。

5、对新产品的成本进行了计算。

6、制造出来一台10千伏单匝式0.5级

电流互感器, 它的电流比是400/5。

此外还制造出两个0.5级的样品, 它们的电流比是300/5和200/5。下面只就主要方面作一简单介绍。

新产品400/5, 0.5级重量仅2.8公斤, 而现在生产的TΠOΦ-10型600/5电流互感器1级重33公斤, 0.5级重51公斤, 400/5制造不出来, 如果要制造出来, 至少要重70公斤。

二、0.5级电流互感器设计中的一些问题

0.5级电流互感器主要用来供给瓦时表等要求测量很准确的地方, 它的饱和倍数要求很低(按理说用于测量的电流互感器, 对饱和倍数没有任何要求, 从仪表的安全看来, 饱和倍数愈低愈好), 这样就提供了减小铁心尺寸的可能性。0.5级电流互感器只要能满足误差要求就可以了, 没有必要设计那种又可用于测量又可用于保护的电流互感器。

下面就根据误差的要求, 来分析如何缩小铁心尺寸, 节约材料。

1. 选择最好的铁心截面

设铁心的截面为 S , $S = a \times b$, a 是铁心的高度, b 为铁心的宽度。增加铁心宽度虽然可以使磁通密度减小, 单位长度的激磁磁动势减小, 但是平均磁路长度却因此而增加, 这样

对误差的改善作用很小,有时甚至反而使误差增大,白白浪费硅钢片和铜线。

例如TΠOΦ-10型0.5级1500/5电流互感器铁心截面 $S=30 \times 45$ (毫米),如果改为 30×30 ,误差不变,硅钢片就从5.1公斤降到3.1公斤,节省40%,铜线从1.39公斤降到1.11公斤,节省20%。

因此在设计时应该选择最好的铁心截面,使误差最小,材料最省。

2. 安全系数的选择

TΠOΦ-10型电流互感器在设计中采用了很大的安全系数,例如1500/5,0.5级设计出来的几乎等于0.2级,这样虽然保证了生产中不出废品,但是却浪费了不少材料。

根据我们对影响误差各种因素的分析结果,证明了卷制铁心、线圈的偏差对误差影响很小,可以不考虑。影响误差最严重的是铁心的磁性材料,也就是铁心B—H曲线的偏差。因此在设计时,必须根据给出的硅钢片材料B—H曲线范围进行计算,用最坏和最好的B—H曲线分别计算额定负荷和下限负荷的误差,计算结果能够满足误差要求就可以了,没有必要再留安全系数。

而TΠOΦ-10型电流互感器也用这方法计算后,却留有很大的安全系数,这显然是太浪费了。如果我们将TΠOΦ-10型0.5级1500/5电流互感器的安全系数取消,这样铁心的截面就可以减小到 20×25 ,硅钢片的重量就从3.1公斤降到1.9公斤,又可以节省40%,铜线从1.11公斤降到0.83公斤,又节省25%。

根据上述两项,也就是说不改变任何技术数据,经过这样分析计算结果,就能节省硅钢片63%,铜线40%。

3. 确定额定负荷

TΠOΦ-10型0.5级电流互感器额定负荷为0.8欧,根据我们对现在开关柜线路以

及工业企业供电二次线路标准方案分别进行的计算结果,负荷最大的只有0.325欧,考虑到仪表制造中电阻的误差,我们认为把额定负荷定为0.4欧是最合适的,能够满足所有开关柜二次线路的要求。这样不仅能减小铁心尺寸,而且使测量更准确。

再以TΠOΦ-10型0.5级1500/5电流互感器为例,如果将额定负荷改为0.4欧,那么硅钢片的重量就从1.9公斤降到0.74公斤,再节省60%,铜线重量从0.83公斤降到0.56公斤,再节省33%。

以上三项措施,一共可节省硅钢片87%,铜线60%。

4. 温升问题

为了减小电流互感器的误差,二次线圈导线的截面选得较大,现在用的是 $\phi 1.81$ 双纱包线,所以温升很低,大约只有 20°C 。

新设计的电流互感器由于铁心尺寸减小很多,使得二次线圈的电阻大大下降,这样二次线圈电阻对误差的影响就不是很大了。因此可以把导线改为 $\phi 1.56$ 的双纱包线,节省铜线33%,而对0.5级的铁心尺寸基本没有影响。

采用了上述四种办法,一共可以节省硅钢片87%,铜线73%。

5. 材料问题

材料的磁性能对电流互感器尺寸有很大的影响,可以认为材料愈好,尺寸愈小,价格也就愈便宜。TΠOΦ-10型电流互感器的铁心材料是热轧硅钢片,现在已经能够生产冷轧硅钢片,它的导磁率要比热轧硅钢片大一倍以上,因此电流互感器的发展方向应该是全部采用冷轧硅钢片。

以TΠOΦ-10型0.5级1500/5电流互感器为例,采用冷轧硅钢片后硅钢片重量从0.74公斤降到0.23公斤,节省70%,铜线从

0.37公斤降到0.21公斤, 节省43%。

新设计由于在上述五个方面进行改进的结果, 使得所用的材料大大减少。

新设计电流比从1500/5到600/5的电流互感器不采用特殊补偿, 它们的材料指标列于表1。

表 1

电流比	材料 (公斤)	T П О Ф-10 旧设计用量	T П О Ф-10新设计 用量	节约率 (%)
1500/5	硅钢片	5.1	0.23	95.5
	铜线	1.39	0.21	85
1000/5	硅钢片	10.2	0.48	95.3
	铜线	1.18	0.20	73
800/5	硅钢片	13.6	0.53	96
	铜线	1.2	0.18	85
600/5	硅钢片	20.4	1.05	95
	铜线	1.12	0.16	86

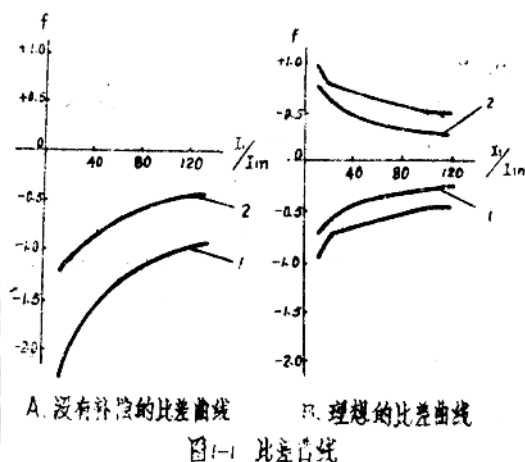
平均节省硅钢片95%, 节省铜线85%。

6. 采用更好的补偿方法

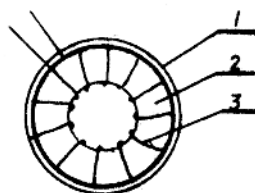
对于单匝式电流互感器, 一次电流愈小, 匝数愈小, 误差就愈大, 这样, 为了减小误差就要使铁心尺寸增大很多, 因此要设法采用特殊的补偿。现在 T П О Ф-10 型 750/5 和 600/5 电流互感器采用双铁心补偿, 效果不很好。最好的补偿办法是使比差曲线成为理想曲线 (如图 1-1), 这样就能充分地利用铁心, 最能节省材料。采取圆环磁分路补偿就能达到这样的要求。

设计中所采用的圆环磁分路的结构如图 1-2 所示。它的优点如下:

(1) 补偿作用好, 能够得到理想的比差曲线, 对角差也起补偿作用。当磁分路集中退火时, 对于 B-H 曲线偏差对误差的影响能起自动补偿的作用。由于铁心退火情况不



完全一致, 铁心磁性能是有偏差的, 铁心磁性能愈坏, 互感器的误差愈大, 而这时圆环磁分路对误差的补偿也就愈多, 这样就能够部分相互抵消, 起自动补偿的作用。



1—圆环磁分路; 2—主铁心; 3—二次线圈
图 1-2 圆环磁分路的结构

(2) 结构比较简单。

因此, 采用圆环磁分路能够得到很好的经济效益。例如新设计中的 400/5, 0.5 级:

不采用磁分路——铁心重 2.25 公斤, 铜线重 0.20 公斤;

采用磁分路——铁心重 0.83 公斤, 铜线重 0.12 公斤;

可以节省硅钢片 63%, 铜线 40%。

7. 采用更小的铁心内径

铁心内径愈小, 当然愈省材料。同时铁心内径小, 使平均磁路长度也减小, 误差减小, 又能反过来减小铁心截面尺寸, 特别是当安匝数小时影响更大。

因此在系列设计中我们根据母线的大小, 一共采用了四种铁心内径, 它们的直径是130、105、80和45毫米。这样在制造上只要增加卷铁心模就可以了, 虽然麻烦一些, 但是可以节省很多材料。

ТПОФ-10型电流互感器的一次线圈是铜杆, 按理应该采用更小的铁心内径, 但是现在它所用的铁心内径都是130毫米; 导杆和瓷瓶、瓷瓶和铁心之间都留有很大的间隙, 这显然是很大的浪费。

新设计采用上述各种措施, 使单匝式电流互感器系列增加了400/5、300/5、200/5、150/5四种电流比, 这有很大的经济意义。

它们的材料指标列于表2。

表2

电流比	硅钢片重 (公斤)	铜线重 (公斤)
400/5	0.83	0.12
300/5	1.66	0.14
200/5	1.40	0.11
150/5	2.80	0.15

和同样电流比、同样准确度的ТНОФ-10型电流互感器比较, 平均节省硅钢片50%, 节省铜线97%, 而且结构上要简单得多。

根据设计计算结果, 新产品能节省大量的材料又减小了体积, 而硅钢片和铜线又是电力工业迫切需要的重要材料, 因此希望有关单位, 特别是生产高压开关板的单位能够很快进行研究, 早日投入生产。

参 考 文 献

1. 电流互感器设计手册——沈阳变压器厂
2. 10千伏电流互感器系列设计问题——《电工译丛》, 1957, №8
3. 利用磁分路补偿电流互感器的误差(МЭИ方法)——《电器工业》, 1954, №3
4. Высоковольтные трансформаторы тока——Р.М.Барзилович, Госэнергоиздат, 1956

(原载《电工技术》, 1958, №11)

关于新型电流互感器的饱和倍数和额定负荷问题

作者根据好省原则提出一种测量用电流互感器, 饱和倍数可小到2~3倍, 额定负荷为0.4欧, 额定功率因数 $\cos\phi=1$, 以供有关方面商榷。

现在我国生产的仿苏ТПОФ和ТПФ电流互感器都存在有一定的缺点, 不仅制造工

艺复杂, 体积大, 而且大量耗费硅钢片和铜。去年十一月, 八局在上海召开的缩小开

开关柜讨论会上, 我们看到好几个电器厂都试制了新型电流互感器。虽然它们的结构都不一样, 但共同的特点是: 省材料, 体积小。因此就使得整个开关柜的体积也缩小了。

可是, 在这些新型互感器中, 存在一个最根本的问题, 就是各个互感器的主要参数——饱和倍数和额定负荷都不相同, 而这两个参数又是决定电流互感器尺寸、性能的最主要因素。因而制定统一标准是目前急待解决的问题。

电流互感器按用途可分为测量用和保护用两种, 这两种互感器的要求是完全不同的。测量用互感器要求有足够的准确度; 保护用互感器则要求有足够大的饱和倍数。过去生产的互感器带有通用的性质, 既要求误差小, 又要求饱和倍数大, 这样就使互感器的尺寸大大增加。最近各方面的意见都比较一致, 认为必须把这两种用途的互感器严格分开。因此在新的条件下, 必须重新修订互感器的要求参数, 特别是测量用互感器问题较多, 至今还未得到统一的意见。这里我想谈谈我们在这方面进行的工作和意见, 供讨论时参考。

一、饱和倍数问题

测量用电流互感器的负荷就是测量仪表。根据仪表制造的要求, 只允许短时通过9倍的额定电流。但是现在我国生产的TΠOΦ互感器饱和倍数很大, 在短路时最大可使仪表受到100倍额定电流的冲击, 非常容易损坏仪表。我们从仪表的安全看来, 应该要求互感器的饱和倍数愈小愈好。对于测量用电流互感器, 如果规定饱和倍数不小于5~7倍, 那末除了危害仪表外, 就是白白浪费硅钢片和铜, 完全应该取消; 所以测量用互感器应按照准确度的要求尽可能缩小

尺寸。根据我们对10千伏以下电流互感器的计算结果, 对于安匝数600以上的1级互感器, 饱和倍数可以小到2~3倍, 这样就可以节省硅钢片和铜线50%左右。

二、额定负荷问题

电流互感器的误差主要是由负荷引起的, 因此互感器额定负荷的确定, 对互感器的尺寸有极大的影响。现在生产的TΠOΦ额定负荷为0.8欧, TΠΦ为0.6欧, TKM为0.4欧; 华通开关厂还试制一种新型互感器为0.2欧, 都不一致。我们知道, 如果额定负荷规定得比实际负荷大很多, 不仅浪费硅钢片和铜, 甚至测量准确度也不能保证; 如果额定负荷比实际负荷小, 虽然省材料, 但是不能满足准确度的要求。因此我们必须从实际出发, 计算一下实际负荷究竟是多少, 才能定出最合理的额定负荷。

1. 电流互感器的接线及负荷计算公式

测量用电流互感器的接线一般有下列两种:

(1) 两个电流互感器线路如图2—1所示, 其中CTA、CTC分别为接在A相及C相上的电流互感器,

R_A 、 R_b 、 R_c 分别为二次回路a、b、c线上的负荷。这样折算到电流互感器CTA上的负荷应该是

$$Z_a = \frac{U_A}{I_A} \quad (1)$$

式中 U_A ——互感器CTA两端的压降。

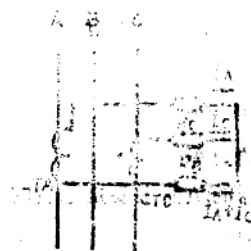


图2-1

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A R_A + (\dot{I}_A + \dot{I}_C) R_B \quad (2)$$

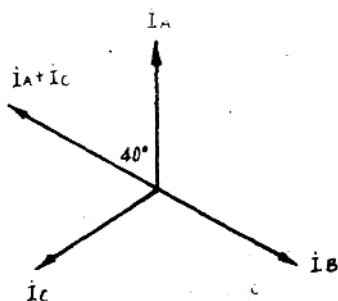


图 2-2

由电流向量图(图 2-2)得到

$$\dot{I}_A + \dot{I}_C = \dot{I}_A \cos 60^\circ + j \dot{I}_A \sin 60^\circ \quad (3)$$

(1)、(2)、(3) 三式联合解得

$$Z_A = R_A + 0.5R_B + j0.866R_B \quad (4)$$

同样的办法求得 CTC 的负荷

$$Z_C = R_C + 0.5R_B - j0.866R_B \quad (5)$$

(2) 单个及三个电流互感器线路
线路如图 2-3 所示, 没有折算关系。

其中:

$$Z_A = R_A, \quad Z_B = R_B, \quad Z_C = R_C$$

2. 电流互感器的负荷

测量用电流互感器的负荷主要是电表的电阻和联接导线的电阻。

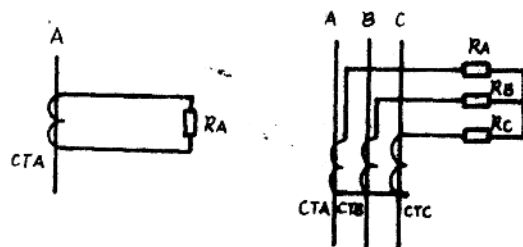


图 2-3

用于各种开关柜上的电表电阻值如下:

电流表, $R = 0.07 \Omega$; 功率表、电度表都有两个电流线圈, 每个线圈 $R = 0.021 \Omega$; 无功电度表, 三个线圈的电阻分别为 0.11Ω 和 0.22Ω ;

联接导线截面 $S = 1.5 \text{ 厘米}^2$; 开关柜上联接导线长度 $l = 3 \sim 5 \text{ 米}$, 联接导线接触电阻 $R_K = 0.05 \Omega$ 。

这样, 我们根据工业企业供电二次回路标准方案及现有开关柜的各种接线, 按上述负荷计算公式分别进行计算, 结果列于表 1。

表 1

线	互感 器 路数	电表种数及数目			负荷 (Ω)
		安培表	电度表	无功电度表	
1	1	1	-	-	0.25
2	2	1	1	1	$0.288 \angle 34.5^\circ$
3	2	2	1	1	$0.28 \angle 29^\circ$
4	2	3	-	1	$0.325 \angle 37^\circ$
5	2	2	1	-	$0.25 \angle 28^\circ$
6	2	1	1	-	$0.235 \angle 36^\circ$
7	3	3	1	-	0.181 或 0.16
8	3	1	1	-	0.16 或 0.11

根据计算结果, 并考虑到仪表制造中电阻的误差为 $\pm 20\%$, 我们认为, 开关柜上的测量用电流互感器的额定负荷应为 0.4Ω , 按标准下限负荷为 0.15Ω , 能够满足上述所有线路的要求, 因此是最合理的。

对于用在其他地方如发电厂等的互感器, 接线长度达 $20 \sim 30 \text{ 米}$, 可以根据计算另行设计大负荷的电流互感器。

3. 额定功率因数

按照现行标准, 额定功率因数 $\cos \phi = 0.8$ (感性)。如果电流互感器是通用的 (既可用于测量, 又可用于保护), 由于继电

器等线圈电感较大,是符合实际情况的。但是,当电流互感器只用于测量时,由上述负荷计算公式可以看出,对于单个或三个电流互感器线路,互感器负荷的功率因数 $\cos \phi = 1$ 。对于两个互感器线路,则一个为感性 $\cos \phi \approx 0.8$,另一个为容性 $\cos \phi \approx 0.8$ 。

如果按额定负荷为 $\cos \phi_n = 0.8$ (感性)来校互感器,那么对于感性负荷的互感器CTA来说, I_A 是准确的,而对于容性负荷的互感器CTC来说,互感器的比差几乎从最大值减至最小值(因为比差 $f \propto \sin(\psi + \alpha)$,其中 ψ 为损耗角, α 为二次电势与电流的夹角。当 $\cos \phi_n = 0.8$ 为感性时, $\sin(\psi + \alpha) \approx 1$;当 $\cos \phi_n = 0.8$ 为容性时, $\sin(\psi + \alpha) \approx 0$),而角差却大大增加(角差 $\delta \propto \cos(\psi + \alpha)$)。这样所测量的功率 $P = U_{AB} I_A \cos \phi_1 + U_{CB} I_C \cos \phi_2$ (其中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为 U_{AB} 与 I_A 、 U_{CB} 与 I_C 的夹角),由于第二项误差较大,也就不准确了。

如果将额定功率因数定为 $\cos \phi_n = 1$,那么对单个或三个电流互感器线路完全符合

实际情况,对于两个电流互感器线路,感性负荷互感器CTA的比差增加,角差减小,而容性负荷互感器CTC刚好相反,比差减小,角差增大,同时两互感器误差的增减都不剧烈,而从测量功率来看,两者相加又大部分抵消了,因此测量也就比较准确。

功率因数额定值改为 $\cos \phi_n = 1$ 后,比差曲线较之 $\cos \phi_n = 0.8$ 时要平得多。过去为了使比差曲线变平,曾经采用了多种补偿方法,以后可以取消一部分,这样互感器的结构也就更简单,更能够提高劳动生产率。

参 考 文 献

1. 电流互感器设计手册——沈阳变压器厂
2. 10千伏电流互感器系列设计问题——《电工译丛》, 1957, № 8
3. 单匝式高压电流互感器系列设计——清华大学

(原载《电机工业》, 1959, № 4)

利用 ATT 电流互感器校验仪测量磁化曲线

完整的磁化曲线的测量是一件烦杂而费时的的工作,并且还需要采用比较特殊的仪器设备。本文介绍利用苏联 ATT 型电流互感器校验仪测量磁化曲线的方法,全部磁化曲线只须一个人在 1~2 小时内就可测量完毕。

一般磁化曲线的测量(从磁密 $B > 1000 \sim 2000$ 高斯开始)并不是很困难的,只要利用电流表、电压表和功率表就可以了。但是,如果要较为准确完整地测量磁化曲线,也就是说要从低磁密 $B < 100$ 高斯(现在生产的电流互感器中硅钢片的最小磁密甚至小至十几高斯)开始进行测量,这时由于感应电势小至 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 伏,就产生了极大的困

难。我们曾经采用极坐标和直角坐标电桥进行了多次测量,不仅实验工作烦杂,而且也无法得到准确的结果。

利用 ATT 电流互感器校验仪测量磁化曲线,与其他方法比较起来,就显得既简单,又准确了。测量线路见图 3-1。图中 T 代表被测铁心,可以是圆环形的,也可以是方形的。T₁ 为调压器, T₂ 为升流器, W₁

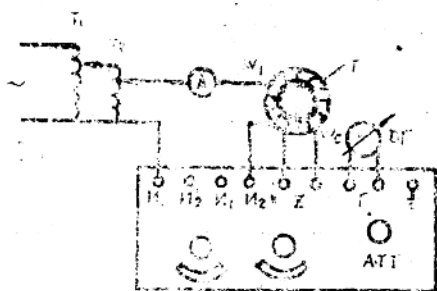


图 3-1 利用 A.T.T. 测量阻抗线路图

为激磁线圈，一般测低磁密时可取 1 匝，然后改为 2~10 匝， W_c 为测量线圈，取 5 或 10 匝就可以了。

测量时，根据预先估计好的电流值，加上激磁电流 I ，利用 A.T.T. 测阻抗的办法，改变 A.T.T. 上 R 和 X 的刻度，使检流计 BF 达到平衡，记下电流值 I 和 A.T.T. 上 R 、 X 的读数，经过简单的计算，就能得到所求的 B 、 H 和 X 值。

测量的原理很简单。我们知道，利用 A.T.T. 测阻抗的线路如图 3-2 所示。图中 Z 为被测阻抗。

由线路图中可见，测量时就是把负荷的端电压 $\dot{U} = IZ$ 与 A.T.T. 中的另一电压 $\dot{U}_A = IZ_A$ 相比较，当调节到平衡时，即 $\dot{U} = \dot{U}_A$ ，

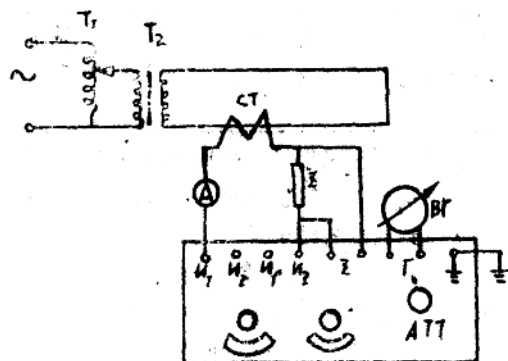


图 3-2 A.T.T. 测阻抗线路

因此 $Z = Z_A$ ，从 A.T.T. 上直接读出 R 、 X 的数值， $Z = R + jX$ 。

现在我们利用同样的原理，把测量线圈的两端接到 A.T.T. 测阻抗“ Z ”的位置上，也就是说把感应电势看作是某个阻抗与电流的乘积 $E = IZ$ (这里 Z 完全是假想的，实际并不存在)，然后与 A.T.T. 中的电压

$\dot{U}_A = IZ_A$ 进行比较。在平衡时同样得到 $E = \dot{U}_A = IZ_A$ 。这样，我们不仅得到了感应电势的数值，而且也得到了它与电流 I 的向量关系 (见图 3-3)。从理论上我们知道，磁场强度 H 是和电流 I 同相的，感应电势 E 与电流 I 的夹角大于 90° ，所以 A.T.T. 上测量结果 Z_A 的阻抗角 ϕ_A 实际上是 $-E$ 与 I 的夹角。磁通 B 超前于 E 90° ，这样从向量图上可以看出 B 与 H 间的夹角，即损耗角 $\psi = 90^\circ - \phi_A$ 。再通过简单的计算，也可以求得

$$H = \frac{IW_c}{l_{cp}}$$

式中 l_{cp} ——被试铁心的平均磁路长度。

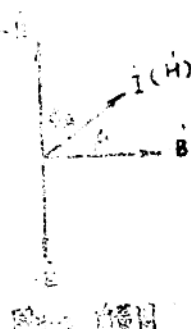
$$B = \frac{E \times 10^8}{4.44 W_c f S_F} = \frac{IZ_A}{4.44 W_c f S_F} \times 10^8$$

式中 f ——频率，50 赫；

S_F ——铁心净截面。

根据求得的 B 、 H 和 ψ 值，就能画出 $B-H$ 和 $\psi-H$ 曲线。

我们知道 A.T.T. 是比较准确的，并且没有因为计算而引入较大的误差，这样就保证了测量结果的准确度。特别是在低磁密时，如果激磁线圈通过电流 $I = 0.1$ 安，A.T.T. 测量阻



抗值可以准确到 10^{-2} 欧,可读出 10^{-5} 欧,这也就是说,能够测量感应电势 E 的值可达到 10^{-3} 伏,可读出 10^{-4} 伏。而利用其他办法很难较准确地测量这样小的交流电压。像这样小的电压加在功率表上是毫无作用的,这时根本没有可能通过功率表读数来计算损耗角 ψ 。

利用ATT来调节平衡也很方便,每测一点大概只要2~3分钟,全部B-H、 ψ -H曲线只用一个人做实验,1~2小时就能测好,而用其他方法测量至少要两个人,1~2天时间才能完成。

(原载《电机工业》,1959, № 6)

电流互感器的额定容量与校验工作

电流互感器是冶炼、电站等配套设备中常用的电器,由于它的需要量很大,同时一般说来制造又比较简单,因此很多地方都自行设计制造电流互感器,满足各地配套的迫切需要,这是非常好的事。

但是,根据山西省制造、校验电流互感器以及从刊物上报导的各地制造新型电流互感器的情况看来,有不少产品是存在着一些问题的,其中最根本的问题是对电流互感器的容量缺乏正确的了解,所以在制造上、校验上都不完全准确,这样对电流互感器的性能影响很大。

电流互感器的铭牌上一般都标有额定容量或额定负荷,它们之间的关系可用下面的公式表示:

$$S_n = I_{2n}^2 Z_n$$

式中 S_n ——额定容量;

I_{2n} ——额定二次电流;

Z_n ——额定负荷。

对于一般电力用的电流互感器 $I_{2n} = 5$ 安,因此 $S_n = 25Z_n$ 。这就是说额定容量与额定负荷之间只差一个常数,它们实际上都是表示电流互感器在所规定的容量或负荷范围内满足准确级的要求。

至于电流互感器的额定电压,是指电流

互感器一次所接的线路上的线电压,它只是和电流互感器的绝缘有关,而和电流互感器的容量是没有任何直接关系的。常常发现有人按变压器的容量概念来理解电流互感器的容量,这显然是不正确的。

按照标准的规定, $I_{2n} = 5$ 安的电流互感器的额定负荷,有0.1、0.15、0.2、0.4、0.6、0.8、1、1.2、1.6、2、2.4、3和4欧共13种。各准确级电流互感器必须保证在(25~100)%额定负荷(功率因数 $\cos \phi = 0.8$)范围内误差不超过规定的极限值。

对于额定负荷小于0.4欧的电流互感器,下限负荷不按25%计算,而另外规定如下:

额定负荷(欧)	0.1	0.15	0.2	0.4
下限负荷(欧)	0.05	0.10	0.15	0.15

以TKM-0.5型0.5级电流互感器为例,它的容量为10伏安,因此校验的时候,第一次必须带上额定负荷0.4欧 $\cos \phi = 0.8$,第二次带上下限负荷0.15欧 $\cos \phi = 0.8$ 。试验时测量一次电流与额定一次电流之比 $I_1/I_{1n} = 10\%、20\%、120\%$ 三点,电流比差 ϵ 和角差 δ 不超过标准所规定的极限值才

算合格。如果将所测的误差绘出曲线，应落在极限值的折线内。

这样，如果电流互感器实际所接的负荷是在0.15~0.4欧之间，那么选用容量为10伏安的电流互感器，基本上就能保证它的误差不超过极限值。

电流互感器的实际负荷，就是除了二次线圈本身的阻抗外，二次线圈所接的全部负荷，包括所接仪表的电流线圈、继电器、联接导线等的阻抗以及接线头的接触电阻。所以在校验电流互感器时，所带的额定负荷或下限负荷应该把联接导线和接入电流表的电阻计算进去，否则就使试验的误差很大，这一点往往在试验时被忽略了。

现在有些地方生产的电流互感器不完全是按上述标准设计和校验的。有的厂自己规定三次负荷范围为0.4~0.5欧，与标准规定的(25~100)%额定负荷比较，这范围显然是太小了，因此在很多情况下这种电流互感器的准确度都不能达到它的铭牌上所规定的等级。有的厂生产的电流互感器的铭牌上标有30伏安，而在校验时只接一个电流表，根本没按规定接上额定负荷与下限负荷。有的厂只在额定负荷下满足要求，根本没有考虑

下限负荷。有的厂1级电流互感器只考虑电流比差而没有考虑角差。有的厂在校验时，互感器所带负荷的阻抗值虽然对了，但是功率因数 $\cos\phi \approx 0.8$ 。有的试验室有很好的误差校验仪器，并且有标准的负荷，但是做试验时却用了又长又细的联接导线，在额定负荷很小时，带来了很大的测量误差。有的厂更是随使用不退火的热轧硅钢片代替TKM中原来用的退火冷轧硅钢片，且制造好后又不经过校验。所有这些都大大影响了电流互感器的性能。我们认为大量生产的电流互感器都应该按照规定的标准进行生产。至于各地根据具体条件制造的电流互感器以及其他专用的电流互感器，只要满足实际工作的要求，也可以不受标准的限制。

参考文献

1. Трансформаторы тока.
Общие технические условия
—ГОСТ7746—55

2. Высоковольтные трансформаторы тока—В.М.Барзилович,
Госэнергоиздат, 1956

《原载《电机工业》1959.12》

利用热轧硅钢片 设计制造0.2级电流互感器

为了满足山西省电器工业发展的需要，我所和太原变压器厂合作，利用普通热轧硅钢片，制成了0.2级标准电流互感器。

0.2级电流互感器属于精密电流互感器，用来精密测量、校验仪表和校验其他低等级的电流互感器。国外大都利用坡莫合金

或冷轧硅钢片等高级导磁材料来制造，而这些高级导磁材料目前我国都非常缺乏，特别是地方工业部门更难得到。因此，利用普通热轧硅钢片制成0.2级标准电流互感器，对地方电流互感器的生产，将起一定的推动作用。

这次我们制成的两台0.2级标准电流互感器的基本参数是一样的。它们的额定电压为3千伏，可以直接在高压线路上进行测量。额定负荷为0.2欧。铁心重4.4公斤，只有现在生产的TΠOΦ-10型0.5级电流互感器最小铁心的86%。

第一台的安匝数为1600，额定电流比计有：800/5，400/5，200/5，100/5，50/5，40/5，20/5，10/5，5/5等9种。

第二台的安匝数为1800，额定电流比计有：600/5，300/5，200/5，150/5，100/5，75/5，50/5，40/5，20/5，10/5，5/5等11种。

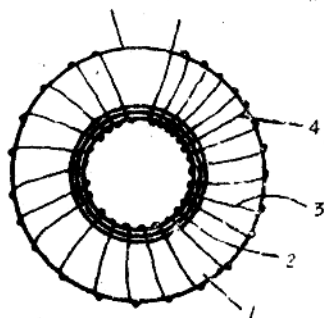
现在我们以1600安匝这一台为例，说明0.2级标准电流互感器的设计和制造。

一、0.2级标准电流互感器的设计

利用热轧硅钢片来制造0.2级标准电流互感器是有很困难的。由于热轧硅钢片的损耗角很小，角差很难满足要求。现在用来补偿角差的办法，只有短路匝一种。当电流互感器在额定负荷功率因数 $\cos \phi_0 = 0.8$ 下（即被校验时），短路匝对角差起了一些补偿作用，但是0.2级标准电流互感器实际负荷功率因数经常是 $\cos \phi = 1$ ，这时短路匝不仅对角差不起补偿作用，反而使角差增大，因此一般利用短路匝补偿的电流互感器的性能是不好的。

为了使0.2级标准电流互感器具有良好的性能，我们采用了新的补偿方法——圆环磁分路，来补偿角差和比差。

圆环磁分路的结构如图5-1。图中磁分路2安在铁心1的内侧（也可以安在外侧），紧贴着铁心。二次线圈3的总匝数为 W_2 ，其中一部分从铁心与磁分路中间穿



1. 铁心；2. 磁分路；3. 二次线圈 W_2
4. 磁分路补偿线圈 W_f

图5-1 圆环磁分路的结构

过，这部分线圈匝数4叫做磁分路补偿匝数 W_f 。对于冷轧硅钢片 $W_f = 10 \sim 20$ 匝，对于热轧硅钢片 $W_f = 20 \sim 35$ 匝。磁分路的片数一般为1~3片，用带状硅钢片卷成，头尾搭接40~60毫米，成圆环形状。

圆环磁分路对电流互感器比差和角差的补偿按下列公式计算。有关圆环磁分路补偿原理和计算方法的详细分析，我们将专文讨论。

补偿比差

$$f_t = k_t \frac{I_1 W_1}{I_2 W_2} \cos(-\psi_t + \psi) \times 100(\%)$$

补偿角差

$$\delta_t = k_\delta \frac{I_1 W_1}{I_2 W_2} \sin(-\psi_t + \psi) \times 3440(\text{分})$$

$$\frac{I_1 W_1}{I_2 W_2} = \frac{W_2 (W_2 - W_f)}{W_2^2}$$

$$\frac{\mu_t}{\mu} \frac{S_t}{S} \frac{l}{l_t}$$

式中 μ —— 铁心的导磁率，
 S —— 铁心的截面，

l ——铁心的平均磁路长度；

α ——铁心的损耗角。

标有下角“f”的，分别表示磁分路的导磁率、截面、平均磁路长度和损耗角。

校正系数 $k_1 = 0.6 \sim 0.8$, $k_2 = 0.4 \sim 0.6$ 。

由计算公式可以看出，磁分路对角度、比差的补偿与互感器负荷的功率因数无关，因此它没有短路匝补偿的缺点。

根据一般电流互感器误差计算公式和磁分路对误差补偿的计算公式，我们计算在额定负荷 $Z_n = 0.2$ 欧，下限负荷 $Z_x = 0.15$ 欧， $\cos \phi_n = 0.8$ 下，一次电流与额定一次电流之比 $I_1/I_n = 10\%$ 、 20% 、 120% 共六个最危险点的误差。

我们用的铁心截面 $S = 40 \times 30$ 毫米²，内径 $D = 120$ 毫米，平均直径 $D_{cp} = 150$ 毫米，铁心材料是较好的普通热轧硅钢片，厚度 0.35 毫米。二次线圈匝数 $W_2 = 320$ 匝。磁分路为1片冷轧硅钢片，截面 $S_f = 30 \times 0.35$ 毫米²，直径 $D_f = 110$ 毫米，匝数 $W_f = 12$ 匝。二次线圈导线为 $\phi 1.81$ 的双纱包线。线圈内阻

$R_2 = 0.45$ 欧，内抗 $X_2 \approx 0$ 。

考虑到个别地方一片冷轧硅钢片材料也很难找到，因此我们又计算了热轧硅钢片磁分路补偿的铁心，计算结果也能满足0.2级要求，这时铁心、磁分路、线圈匝数应有些改变。

铁心截面 $S = 40 \times 30$ 毫米²，内径 $D = 120$ 毫米， $W_2 = 320$ 匝。

二次线圈导线应改为 $\phi 2.1$ 双纱包线。磁分路补偿匝数 $W_f = 35$ 匝，磁分路安在铁心外侧，磁分路直径 $D_f = 190$ 毫米。

山西省电力厅研究所，根据上述新数据，试制成功了一台0.2级标准电流互感器。

二、结构和制造工艺（略）

三、0.2级标准电流互感器的试验（略）

（原载《技术研究》，1959，№10）

圆环磁分路补偿电流 互感器误差的原理及计算方法

没有特殊补偿的电流互感器的比差曲线是很陡的（图6—1）。为了使得在额定负荷下，一次电流与额定一次电流之比 $I_1/I_n = 10\%$ 时，比差不超过允许值，往往不得不增大铁心截面，这样就要多耗费硅钢片和铜线等贵重材料。如果我们能想办法把比差曲线改成图6—2的理想形状，让它刚好落在允许值的范围内，就能最充分利用铁心，最节省材料。利用圆环磁分路来补偿电流互感器

的误差，完全可以达到这样的效果。

我们利用圆环磁分路补偿设计试制成功了0.2级标准电流互感器、0.5级和1级单匝式10千伏电流互感器系列，以及其他各种类型的电流互感器。这些新设计都具有较好的经济指标。例如，我们用普通热轧硅钢片制成的0.2级电流互感器，铁心仅重3.9公斤，为现在生产的ТПОФ-10型0.5级电流互感器最小铁心5.1公斤的77%〔1〕。用冷轧硅钢片

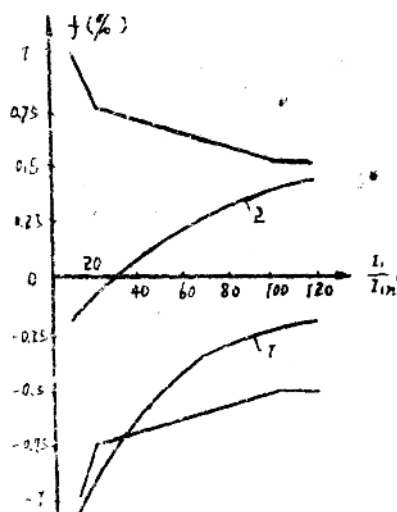


图6-1 没有特殊补偿时的比差曲线
1. 额定负荷时 2. 下限负荷时

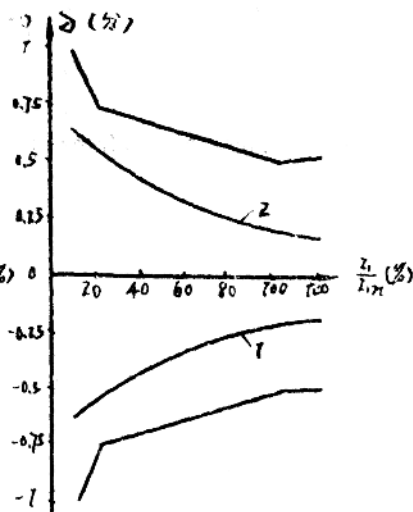


图6-2 理想的比差曲线
1. 额定负荷时 2. 下限负荷时

设计的单匝式10千伏0.5级电流互感器系列, 与现在生产的TΠΦ-10比较, 平均节省硅钢片95%, 二次线圈铜线85%〔2〕。用热轧硅钢片设计试制成功的单匝式10千伏0.5级、1级电流互感器系列, 与现在生产的TΠΦ-10比较, 平均节省硅钢片83%, 二次线圈铜线66%。利用圆环磁分路补偿的铁心代替TΠΦ-10、TKM-0.5的叠片铁心, 平均节省硅钢片40%, 二次线圈铜线60%〔3〕。

因此, 在圆环铁心电流互感器中广泛采用圆环磁分路补偿, 将会进一步缩小电流互感器尺寸(缩小尺寸的主要关键, 除了圆环磁分路补偿外, 还有其他因素, 详见文〔2〕)。

下面我们专门分析讨论圆环磁分路补偿原理和误差的计算方法。

一、圆环磁分路的结构及磁通分布情况

圆环磁分路的结构如图6-3所示。它

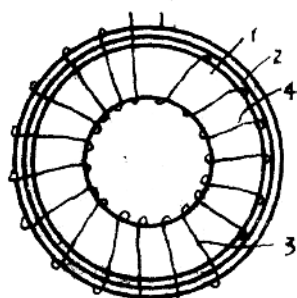


图6-3 圆环磁分路结构
1. 圆环铁心 2. 圆环磁分路
3. 二次线圈 4. 磁分路补偿线圈

是用来补偿圆环铁心电流互感器的误差。圆环磁分路和铁心一样, 也是用带状硅钢片卷成圆环, 紧紧地贴在铁心内侧或外侧。它的厚度一般为1~3片, 在二次线圈 W_2 中, 有一部分匝数从铁心与磁分路之间穿过, 这部分线圈的匝数 $W_4 = 10 \sim 35$ 匝左右, 称为