

开合式电流互感器的分析及改进

蒋大维

江阴市星火电子科技有限公司

1 开合式电流互感器的结构及作用

开合式电流互感器顾名思义就是在一次侧线路（被测电流线路的一侧，通常为电缆或者母牌）上开合的电流互感器，通过感应一次线路上的电流大小，从而为二次设备进行测量或为继电器进行保护。

近年来，我国的配电网发展虽取得明显改善，但城乡区域发展不平衡，用电质量有待改善，同时国家对能源管理不断提出要求，在这样的大环境下，我们急需对以前的电力线路进行二次改造，在改造项目上就需要用到电流互感器来对线路进行测量或者保护，但是普通的电流互感器是一个完整封闭的结构，（见图 1）由于这种电流互感器是闭环结构（见图 2），所以使用时必须要拆卸一次线路，再者拆卸一次线路，必须要先断电，如果为了改造而断上个几天甚至半个月的电，对一些商场、超市、企业的损失是非常大的。所以开合式电流互感器就应运而生了。（见图 3）



图 1 星火电子生产的环氧浇注式电流互感器，一次侧闭合铁心，无法打开，一次线路必须穿孔。

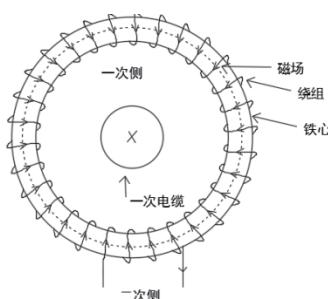


图 2 普通电流互感器的结构：是由漆包线的绕组和闭合的铁心组成，由于电流互感器的铁心是闭环结构，所以一次侧电缆只能穿心使用。



图 3 星火电子生产的 SCT 系列开合式电流互感器，一次侧开合式设计，即是铁心经过切割后安装在外壳内，左为一次侧闭合状态，右为一次侧打开状态。
使用时打开上盖，夹住一次电缆即可。

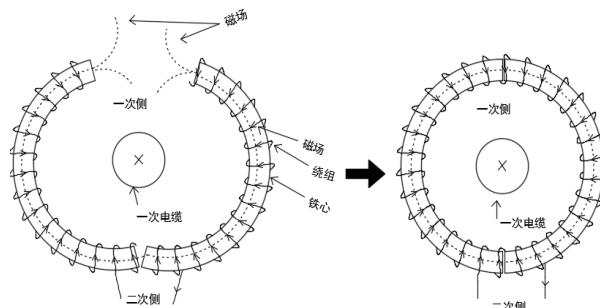


图 4 开合式电流互感器工作示意图，铁心采用开合式设计，从而开合式电流互感器可以夹住一次侧线路。

开合式电流互感器的特点是：电流互感器一次侧为开合式结构，（见图 4）无需拆卸一次线路，亦可带电操作，不影响客户使用，从而节省大量的人力、物力及财力，而且很大程度上提高了效率。

2 开合式电流互感器的技术参数

开合式电流互感器的主要技术参数如下：

2.1 设备最高电压

设备最高的工作电压决定互感器的绝缘要求，闭合式的电流互感器可以做很高的绝缘，但是开合式电流互感器由于结构的原因，正常只能使用于 1KV 以下的最高设备电压。当然如果一次侧是由有可靠绝缘的电缆结构，那开合式电流互感器就可以使用于中压，但一般最高设备电压不

表 1 : GB/T20840.1-2010 中规定测量用电流互感器的准确级的定义

准确级	下列额定电流百分数下的比值差 ±%				下列额定电流百分数下的相位差							
					±(°)				±crad			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15	0.15
0.2	0.75	0.35	0.2	0.2	30	15	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3
0.5	1.5	0.75	0.5	0.5	90	45	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9
1.0	3.0	1.5	1.0	1.0	180	90	60	60	5.4	2.7	1.8	1.8

表 2 : GB/T20840.1-2010 中规定特殊使用的测量用互感器的准确级

准确级	下列额定电流百分数下的比值差 ±%						下列额定电流百分数下的相位差								
							±(°)				±crad				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0.2 S	0.75	0.35	0.2	0.2	0.2	30	15	10	10	10	0.9	0.45	0.3	0.3	0.3
0.5 S	1.5	0.75	0.5	0.5	0.5	90	45	30	30	30	2.7	1.35	0.9	0.9	0.9

能超过 35KV。

2.2 输入电流、输出电流

这个和普通的闭合式电流互感器一样，例如：600A/5A，就是把一次侧最大 600A 的电流转换为 5A 的二次电流。

2.3 准确级

通俗叫做误差，是互感器的重要性能参数，例如 0.1、0.2、0.5、0.2S、0.5S，数值越小，误差要求越高。（见表 1 和表 2）

当然开合式电流互感器由于铁心经过切割，准确级要比闭合式的电流互感器要低。

2.4 负荷

互感器二次侧的负载的视在功率，单位 VA，负荷要求越高，互感器的铁心越大。

2.5 海拔

一般海拔不超过 3KM，否则绝缘性能会遭到破坏，同时温升会升高，影响互感器使用。

2.6 防护等级

由于开合式互感器属于暴露装置，故一般 IP 防护等级为 IP20，如果要做到很高的防护等级，必须经过特殊的设计及处理。

3 开合式电流互感器的设计原理及影响因素分析

电流互感器是一个电流信号变换的装置，是基于电磁感应原理而工作的，在电力回路中，将一次侧大电流转换为便于仪表测量或者继电器保护的二次侧小电流信号，从而实现二次侧与高压电网的隔离，保证了二次侧回路及人员的安全。

电流互感器的电磁感应原理可以通过等效电路来建立其模型，将二次侧电流折算到一次侧，画出的等效模型。（见图 5）

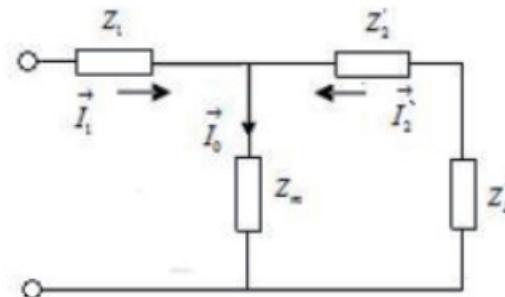


图 5 电流互感器的等效电路模型

$$\text{根据等效电流可知} : \bar{I}_o N_1 = \bar{I}_1 N_1 + \bar{I}_2 N_2 ; \quad \text{公式 1}$$

$$\bar{I}_o = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 . \quad \text{公式 2}$$

画出电流互感器的向量图。（见图 6）

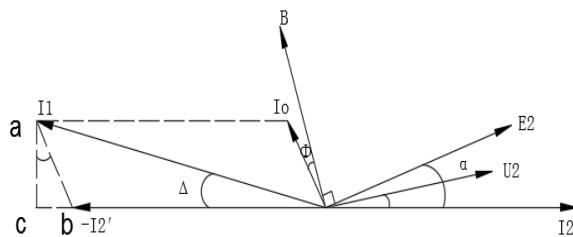


图 6 电流互感器的向量图

可知互感器一次电流与二次电流并非严格的等比例关系，关键在于励磁电流 I_0 ，励磁电流又是互感器工作的主要原因，所以互感器必然是有误差的。

依据电流互感器的定义，其比差公式为：

$$F = (I_2 - I_1) / I_1 \approx -cb/I_1 = -(I_0/I_1)\sin(\alpha + \phi) * 100\% ; \quad \text{——公式 3}$$

相位差公式为：

$$\Delta \approx \sin \Delta = ca/I_1 = I_0/I_1 \cos(\alpha + \phi) * 3438' ; \quad \text{——公式 4}$$

其复合误差公式为：

$$\varepsilon = F + j\Delta = 25.3 Z_2 L / N_2^2 \mu Sk . \quad \text{——公式 5}$$

式中 L 为铁心的平均磁路长度，单位 cm；

Z_2 为互感器总阻抗，包含负荷阻抗及绕组阻抗，单位 Ω ；

μ 为铁心磁导率，单位 T/Oe；

S 为铁心截面积，单位 cm^2 ；

K 为铁心的叠片系数，根据不同材质的铁心，其叠片系数从 0.8–0.95 之间。

所以影响互感器准确级的因素如下：

3.1 平均磁路长度 L 对互感器的误差的影响

公式 5 表明，误差与平均磁路长度成正比。铁心的磁路长度，主要取决于铁心窗口的面积，而铁心窗口的大小，必须保证能装下一次和二次绕组以及它们之间的绝缘。在满足这个要求以后，应该尽可能的缩小铁心的窗口面积，缩短铁心的磁路长度。很明显，铁心的磁路长度越小，越省铁心材料，误差也越小。

3.2 铁心截面对互感器误差的影响

从公式 5 看到，误差与铁心的截面 S 成反比。一般说来，增加铁心截面可以减小误差。但是，实际上伴随着铁心截面的增大，铁心的平均磁路会随着增长，二次绕组的内阻抗也会增大。所有这些都限制了互感器误差的减小，甚至在某些情况下，铁心截面 S 的增大，反而使误差增大。

3.3 绕组匝数对互感器误差的影响

根据公式 5，我们可以看到互感器的误差与互感器二次绕组匝数的平方成正比，即是增加互感器二次绕组的匝数能够大大的减小互感器的误差。但是随着二次绕组匝数的增多，二次绕组的内阻抗也随着增大，会限制互感器误差的减小，同时增加二次绕组的匝数，用铜量也会增加，增加了互感器的成本。

3.4 互感器一次电流对互感器误差的影响

公式并没有表明互感器一次电流对互感器误差的影响，但是随着互感器一次电流的增大，互感器铁心的磁密会升高，(见图 7) 在一定的范围内，铁心导磁率会上升，这样互感器的误差会随着一次电流的升高而减小。(见图 8)

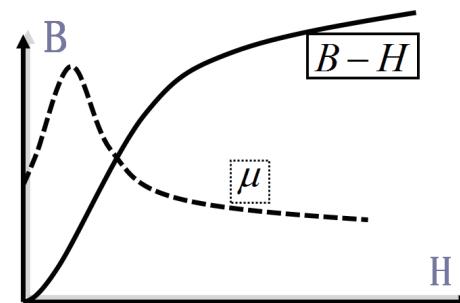


图 7 铁心初始 B-H 磁化曲线，随着一次电流上升，磁导率会逐渐增大，直至饱和。

[SCT0016 (3000T, Rb=10Ω) 性能曲线]

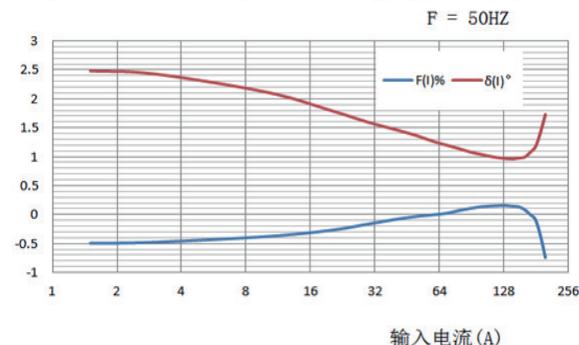


图 8 星火电子开合式电流互感器 SCT0016，随着一次电流增大，误差逐渐变小，直至饱和。

3.5 铁心材料对互感器误差的影响

从公式 5 看到，铁心的磁导率越高，互感器的误差越小，所以选取合适的互感器铁心是提高互感器误差的关键，互感器所用的铁心属于磁性材料，而磁性材料又有软磁和硬磁材料之分，软磁材料容易被磁化和被退磁，退磁所用

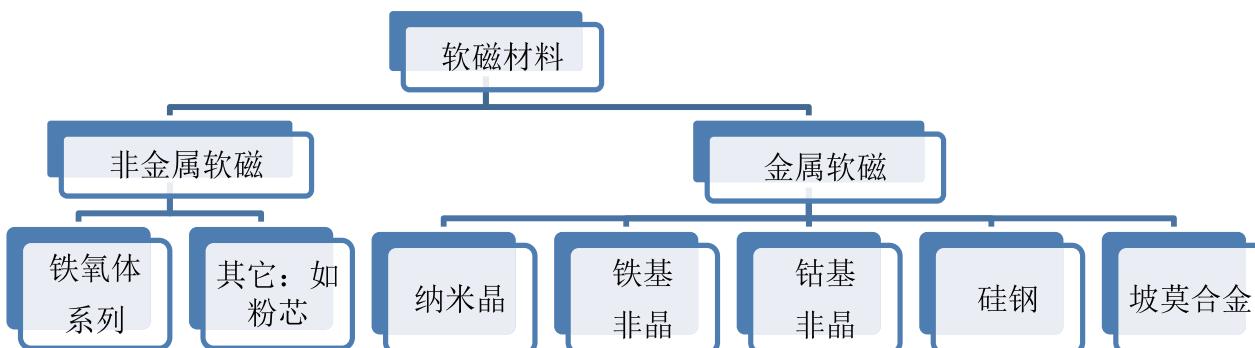


图 9 软磁材料大致分类

的矫顽力又很小，而硬磁材料退磁所用的矫顽力很高，这就是两者最明显的差别，软磁材料拥有较高的磁导率和很小的矫顽力，所以互感器铁心使用软磁材料。

软磁材料的种类又有很多，有金属软磁和非金属软磁，晶态软磁和非晶态软磁，性能也各不相同，有的磁密高，有的磁导率高，有的频率特性好，所以软磁材料不同，性能也有所不同，我们给软磁大致分类如下。（见图 9）

4 铁心材料对开合式互感器的影响分析

常用的铁心材料做个介绍：

4.1 铁氧体系列

主要分为镍锌和锰锌。镍锌磁导率低，但频率特性好；锰锌磁导率相对较好，但频率特性相对较差。镍锌通常使用于高频电感，锰锌用作于低频滤波电感。开关电源用变压器通常使用铁氧体作为磁芯，只是根据频率高低而采用不同材质的铁氧体。当然铁氧体由于价格便宜，容易成型也可以适用于开合式电流互感器，但是由于其磁导率和磁密都不是很高，所以互感器的过载、负荷及其误差都不是最佳的状态。

4.2 硅钢片铁心

硅钢片是一种合金，在纯铁中加入少量的硅（一般在 4.5% 以下）形成的铁硅系合金称为硅钢。该类铁心具有最高的饱和磁感应强度值为 2T；由于它们具有较好的磁电性能，又易于大批生产，价格便宜，机械应力影响小等优点，在电力电子行业中获得极为广泛的应用，特别是在低频、大功率下最为适用。所以硅钢铁心是现在开合式互感器的主流使用材料。

4.3 坡莫合金

坡莫合金常指铁镍系合金，镍含量在 30~90% 范围内。是应用非常广泛的软磁合金。通过适当的工艺，可以有效地控制磁性能，饱和磁感应强度比硅钢稍低一些，但磁导率比硅钢高几十倍，铁损也比硅钢低 2~3 倍。由于其较高的初始磁导率，所以通常适用于零序电流互感。

4.4 纳米晶

纳米晶（1K107）是在非晶（1K101）的基础上开发出来的，拥有很高的磁导率、较高的磁感应强度（1.2T），可以说纳米晶是磁性能综合能力最好的磁性材料，也可以说适用于各项电磁转换的产品，对互感器、变压器、电感、电抗来说都是不错的选择。它的缺点是物理特性较差，由于铁心要切割，纳米晶的机械应力影响较大，所以目前为止，纳米晶的开合式互感器并非主流。

下面我先列出互感器使用常见的磁性材料（见下表 3）。

表 3：互感器常见磁性材料对比

参数	纳米晶	铁氧体	坡莫合金	冷轧硅钢
磁感应强度	1.2T	0.5T	0.9T	2.0T
初始磁导率	4~810 ⁴	1~410 ⁴	5~810 ⁴	1000
使用频率	50HZ~100KHZ	50HZ~5MHZ	50HZ~8KHZ	50HZ~400HZ
损耗	较低	一般	很低	高
价格	较高	很低	很贵	一般
机械应力	差	一般	一般	较好

所以根据上表，纳米晶是制作普通电流互感器最好的材料，它可以制作准确级最高同时有一定负荷的互感器。

但考虑到价格，纳米晶的价格远高于硅钢，同时在互感器的工艺处理上要难于硅钢，所以现在常规的一次互感器（输出 5A/1A）使用硅钢铁心。准确级要求很高，则采用纳米晶。对于二次互感器（输出 mA 级电流），由于其准确级要求较高，一般采用纳米晶制作。对于准确级要求及负荷要求不高的互感器，考虑到成本，也可以采用锰锌铁氧体的磁芯。

但如果是开合式电流互感器，这就要考虑到铁心切割时的应力，由于纳米晶机械应力较差，所以正常切割完，其性能会明显下降，磁导率甚至降到比硅钢铁心还要低，本来纳米晶的特点就是高磁导率，比硅钢还要低了，那么就不再适用于开合式电流互感器。所以现在多数开合式电流互感器（输出 5A/1A）使用硅钢的切割铁心。对于准确级要求及负荷要求不高的互感器，考虑到成本，也可以采用锰锌铁氧体的磁芯。

综上所述，开合式电流互感器的铁心主流还是使用硅钢的切割铁心，当然，目前很多厂家都在研究纳米晶的切割工艺，相信不久就会有所突破。

5 气隙对开合式互感器的影响

那么硅钢切割的铁心与常规未切割的电流互感器相比有哪些变化呢？见图 10。

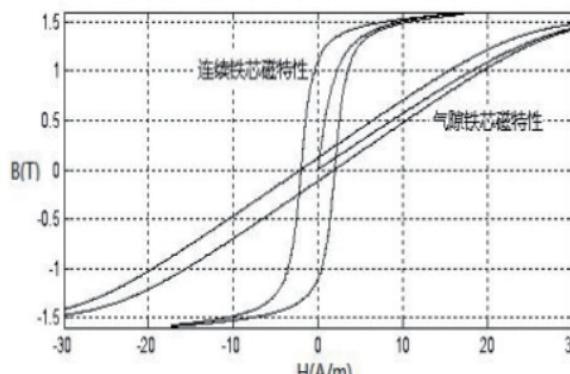


图 10 气隙铁心仿真的磁滞回线

从图 10 中可以看出，铁心在开了气隙后，磁性能发生了明显的变化，变化点如下：

5.1 气隙是铁心磁导率变小

从仿真磁滞回线可以看出，铁心切割后会产生明显的气隙，从而导致磁导率明显的下降，可以推断出，气隙越大，磁导率越低，所以气隙会影响开合式的误差，这也是开合式电流互感器的准确级达不到普通电流互感器准确级的原因。

5.2 气隙使互感器的线性度变好

从仿真磁滞回线可以看出，增加气隙后，互感器的 B-H 曲线斜率变好，从而磁导率不再是随着电流的增大而增大，变的较为线性，这样互感器的励磁电流会相对恒定，从而互感器的误差不再随着一次电流的增大而变化，这样互感器的线性也就会变好。

5.3 气隙增强了互感器的负载能力，增加了互感器的过载能力

增强了互感器的负载能力，增加了互感器的过载能力，这两点都关乎于互感器的磁密 B 有关，从仿真磁滞回线可以看出，铁心加入气隙后，饱和磁感应强度增大，剩磁减小，这样互感器的负载能力及过载能力都会有明显的改善。

综上所述，我们可以分析出开合式电流互感器相较于普通的电流互感器的优点是：1、量程宽：由于磁密增加，剩磁减小，所以开合式电流互感器的量程更宽；2、负载能力强：同样由于磁密增加，剩磁减小，开合式电流互感器相较于普通电流互感器负载能力更强；3、无侵入：当然考虑到开合式结构，它能够直接夹在被测电缆上，进行非侵入式测量。

6 如何进一步补偿开合式互感器的精度

开合式电流互感器与普通电流互感器的性能差别就是准确级不够好，除了在磁导率、阻抗、平均磁路长度、铁心截面积等硬件方面来改善互感器的准确级，还有没有其他的方法来提高开合式电流互感器的准确级呢？

我们知道互感器的误差主要是由于励磁电流的存在，所以互感器的补偿方法核心思想就是有效的处理互感器的励磁电流。所以可以进行开合式电流互感器有源补偿法，处理的方法有两种思路：

6.1 自身提取励磁电流法

通过对开合式铁心的气隙控制以及使用磁导率线性度

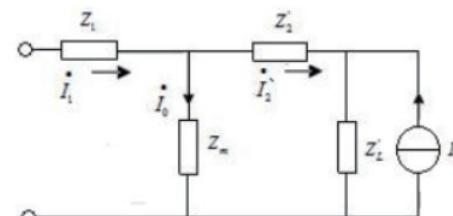


图 11 自身提取励磁电流法

下转 151 页