

电流互感器原理分析（准确级）及设计举例

蒋大维

江阴市星火电子科技有限公司

电流互感器和变压器工作原理很像，在英文中变压器和互感器都是同样的表述“Transformer”，而电流互感器叫做“Current transformer”，这也表述了电流互感器和变压器的区别是，变压器是改变线路上的电压的，而电流互感器是改变线路上的电流的。一个变压、一个变流，不同的是变压器变压的目的大多数是取得功率，而电流互感器的变流目的大多是为了测量或者保护，当然这个也没有绝对的。

电流互感器的工作原理是通过电磁感应将一次绕组的电流感应到二次绕组，电流互感器等值电路见图 1。

1 电流互感器的等值电路

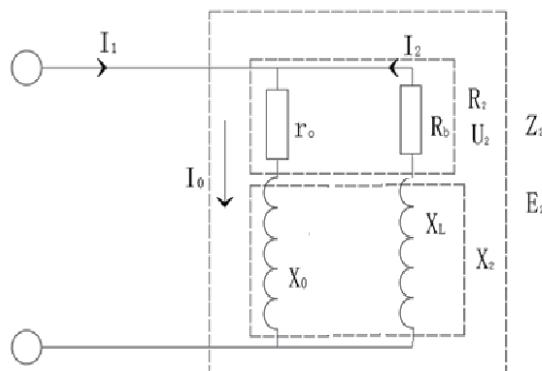


图 1 电流互感器的等值电路

I_1 ：一次电流； I_2 ：二次电流； I_0 ：励磁电流； r_0 ：二次线包内阻； R_b ：二次负荷电阻分量； R_2 ：二次总电阻； X_2 ：二次总感抗，包含漏抗 X_0 和二次负荷电抗分量 X_L 。

通常有以下的计算：

$$\text{二次总电阻} : R_2 = R_b + r_0 ;$$

$$\text{二次总感抗} : X_2 = X_L + X_0 ;$$

$$\text{二次总阻抗} : Z_2 = \sqrt{(X_2^2 + R_2^2)} ;$$

$$\text{二次电阻压降} : U_2 = (R_b + r_0) * I_2 ;$$

$$\text{二次电动势} : E_2 = Z_2 * I_2 .$$

为了直接能够看清楚各向量之间的关系，我们将电流互感器所有的向量画到一起。

2 电流互感器的向量图

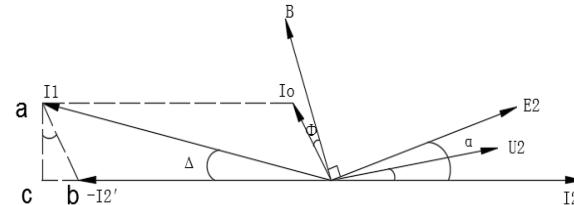


图 2 电流互感器的向量图

在水平轴上从左到右画上向量二次输出电流向量 I_2 ，长短表示数值大小，由于互感器内阻和互感器负荷的电阻分量产生了电压 U_2 ，同时 U_2 超前 I_2 一个角度，用向量 U_2 在图中表示，同时由于 Z_2 的存在产生二次感应电动势 E_2 ，所以 E_2 超前 I_2 一个角度 α ， α 就是 Z_2 的阻抗角。

要产生感应电动势，铁芯必须要有磁通，铁芯单位截面积的磁通密度叫做磁密 B ，也叫做磁感应强度，单位 T，同时 $1T=10000GS$ （高斯），其相位超前 E_2 90 度。

B 值可以计算：

$$B = E_2 * 10000 / (4.44 * S_c * f * K * N_2)$$

S_c : 铁芯截面积，单位 cm^2 ；

f ：互感器工作频率，通常为 50；

K : 铁芯的叠片（卷绕）系数，硅钢通常取到 0.9–0.95，纳米晶 0.8–0.9；

N_2 : 互感器的二次绕组匝数。

要产生磁通密度，铁芯必须有磁场强度 H ，单位 A/m

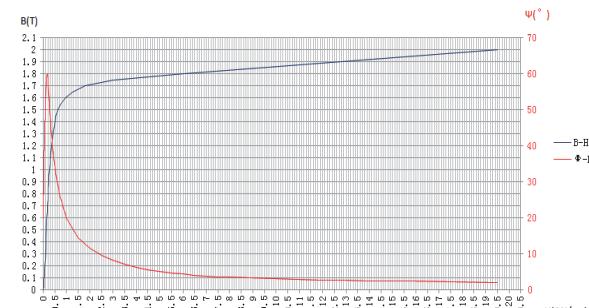


图 3 硅钢卷绕牌号 Z11 的磁化曲线

CM。H 超前 B 一个角度 ϕ , ϕ 就是铁芯的损耗角, 损耗角不是一个常数, 他随着磁密或者磁场强度的变化而变化, 一般可以从厂家提供的铁芯磁化曲线中可以查到(见图 3)。

要给铁芯磁场强度, 必须要对铁芯励磁, 励磁电流的角度和磁场强度 H 是一样的, 所以通常向量图不标 H, 只标个 I_0 即可, 励磁电动势按照下式计算。

$$I_0 * N_1 = H * L$$

N_1 : 一次绕组的匝数, 穿心电流互感器就是 1 匝。

$I_0 * N_1$ 就是励磁电动势, 单位是安匝 AT, 也叫做励磁安匝, L 是铁芯的磁路长度, 单位是厘米 cm, 即是这个单位磁路长度的铁芯需要的励磁电流。励磁电流就是互感器误差的主要原因。即是向量 $I_0=I_1+I_2'$ 。

I_2' 二次电流这算成一次的值。

那么向量 $I_1=-I_2'+I_0$ 。

两个向量相加, 这两个向量组成平行四边形, 中间的对角线就是向量 I_1 , I_1 和 $-I_2'$ 的夹角就是互感器的相位差: Δ 。其中 $-I_0$ 与 I_1 的比值就是互感器的比差: F。

$-I_2'$ 向左延长, 并与 a 点直线相交形成一个直角三角形, Δacb , 经过几何计算, 可以得出, $\angle cab=\alpha+\phi$, 即是阻抗角与损耗角之和。由此可以计算出互感器比差公式 F:

$$F=(I_2-I_1)/I_1 \approx -cb/I_1=-(I_0/I_1)\sin(\alpha+\phi)*100\%$$

由于 Δ 通常很小, 一般按分来计算, 所以 $\Delta \approx \sin \Delta$, 即相位差 Δ :

$$\Delta \approx \sin \Delta=ca/I_1=I_0/I_1\cos(\alpha+\phi)*3438'$$

因为 cos 计算出来的是弧度, 相位差是分, 所以弧度要化成分, 1 弧度=3438 分。

以上就是根据向量图计算电流互感器的基本过程。

3 环形低压电流互感器准确级设计举例

环形电流互感器硅钢卷绕铁芯 50*80*30, 牌号 Z11, 设计电流互感器 300/5A, 负荷 S 5VA, 功率因素 0.8, 要求按国标计算互感器能够达到的测量用电流互感器的准确度等级。

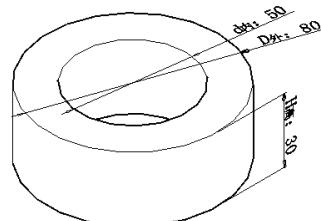


图 4 Z11 硅钢卷绕铁芯尺寸图

按照 GB208420.2-2012 电流互感器的补充技术要求的准确级要求:

表 1 测量用电流互感器的准确级 0.1-1.0 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			5 20 100 120		
	0.1	0.4	0.2	0.1	0.1	15	8	5	5	0.45	0.24	0.15
0.2	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

要计算准确度等级即是要计算此电流互感器的几个工作点 (5%、20%、100%、120%) 是否能够达到此互感器的比差及相位差要求。

1、计算互感器二次匝数: $N_2=I_1/I_2=300A/5A=60T$;

2、计算漆包线使用规格: $d_{漆}=1.13 \sqrt{(I_2/J)}=1.13 \sqrt{(5/3)} \approx 1.45mm$;

$d_{漆}$: 漆包线直径;

J 值: 电流密度, 单位 A/mm², 通常取 2~4 之间。

3、计算排绕: 第一层排绕匝数 = $d_{内} * 3.14 / d_{漆} / d_{排} = 50 * 3.14 / 1.45 / 1.2 = 90T$,

$d_{内}$: 硅钢铁芯的内径, 单位 mm;

$d_{排}$: 漆包线排绕系数, 通常根据绕线工艺取值, 正常在 1.05~1.3 之间;

经计算, 50 内径的铁芯可以让 1.45mm 直径的漆包线绕 90T, 所以 300/5A 的互感器只需要绕制一层就行。

4、计算所需漆包线长度: $L=I * N=((D_{外}-d_{内})+2*H_{高}+\pi * d_{漆}) * N=((80-55)+2*30+3.14*1.45)*60T=5673mm=5.673M$ 。

$H_{高}$: 硅钢铁芯高度;

5、计算漆包线的内阻 $r_0: r_0=L*0.0175/S=5.673*0.0175/3.14/(1.45/2)^2 \approx 0.06\Omega$ 。

S: 漆包线的截面积, 单位 mm²。

6、计算负载、总阻抗角: 见图 5:

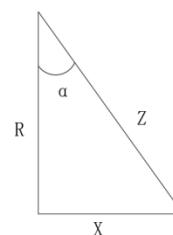


图 5 阻抗三角

由于功率因素 0.8，即是电阻分量占总阻抗的 80%，即 $R/Z=0.8$ ，可以计算 $\cos \alpha_1=0.8$ ，可以计算出 $\alpha_1=36.87^\circ$ 。那么电抗分量 $X_L=X/Z=\sin 36.87^\circ$ ，可以计算出电抗分量占总阻抗的 60%，由于负荷 $S_2=5\text{VA}$ ，所以二次总阻抗 $Z_2=0.2\Omega$ ，可以计算电阻分量 $R_b=S/I_2^2*0.8$ ；电抗分量 $X_L=S/I_2^2*0.6$ 。

所以 $R_b=0.8Z=0.8*(5/25)=0.16\Omega$ ， $X_2=0.6Z+0.1$ （互感器的漏抗 X_0 ） $=0.22\Omega$ ，

$$\text{即 } Z_2 = \sqrt{(X_2^2 + R_b^2)} = \sqrt{(0.22^2 + (0.16+0.06)^2)} = 0.311\Omega$$

计算总阻抗角 α ：

$$\cos \alpha = R_b / Z_2 = 0.22 / 0.311 = 0.707$$

故总阻抗角 $\alpha = 45^\circ$

7、计算铁芯截面积 S_c ：

$$S_c = (D_{外} - d_{内}) * H_{高} / 2 / 100 = 4.5\text{cm}^2$$

8、计算铁芯磁路长度 $L_{磁}$ ：

$$L_{磁} = 3.14 * (D_{外} + d_{内}) / 2 / 10 = 20.41\text{cm}$$

9、先计算 5% 电流 B 值

$$5\% \text{ B 值} = 5\% * E_2 * 10000 / (4.44 * S_c * f * K * N_2) = 0.05 * 0.311 * 10000 / (4.44 * 4.5 * 50 * 0.95 * 60) = 0.137T$$

10、查询 Z11B-H、 ϕ -H 曲线，此时 H 值 $\approx 0.013\text{A}/\text{CM}$ ，损耗角 $\phi \approx 26.7^\circ$

11、计算 $I_0 = HL = 0.013 * 20.41 = 0.2653\text{A}$

12、计算 5% 比值差 F 和相位差 Δ

$$F = (I_2 - I_1) / I_1 \approx -cb / I_1 = -(I_0 / I_1) \sin(\alpha + \phi) * 100 = -1.67\%$$

$$\Delta \approx \sin \Delta = ca / I_1 = I_0 / I_1 \cos(\alpha + \phi) * 3438' = 19.63'$$

13、分别计算 20%、100%、120% 的参数如下：

In(%)	B 值 (T)	H 值 (A/cm)	ϕ ($^\circ$)	F(%)	Δ ($'$)
5%	0.137	0.013	26.7	-1.67	19.63'
20%	0.054	0.031	34.76	-1.03	6.6'
100%	0.274	0.095	52	-0.64	-2.6'
120%	0.329	0.1	54.1	-0.44	-2.36'

对比国家标准的准确级，此互感器可以达到 1.0 的准确级。

我们看下他的数据，相位差能够达到 0.2 级的要求，只是比差拖了后腿，那么是不是可以进行简单的补偿让互感器拥有更高的准确级呢？答案是可以的。

4 单匝数补偿

原理：电流互感器的输出电流和匝数成反比，如果将互感器二次匝数 N_2 少绕 N_x 匝，即是二次绕组实际绕了

$N_2 - N_x$ 匝， N_x 就是互感器的补偿匝数，那么电流互感器的二次输出电流从 I_2 变成了 I_2' 。

电流互感器产生的误差主要由于互感器需要励磁电流，那么通过少绕 N_x 匝，使二次电流增大以补偿原来减少的那部分电流，从而补偿互感器的误差。可以得出下面公式：

$$I_2 * N_2 = I_2' * (N_2 - N_x)$$

$$\text{即 } I_2' = I_2 * N_2 / (N_2 - N_x)$$

$$\text{那么补偿的比差 } F_{补} = (I_2' - I_2) / I_2 * 100 = N_x / (N - N_x) * 100$$

由于 N_x 所占比例很小，在分母位置可以忽略，所以补偿的比差 $F_{补} = N_x / N * 100$ (%)；

由此可见补偿匝数越多，补偿的比差值越大，与二次的负荷及电流大小没有关系，同时对角差补偿没有明显影响。

$$\text{补偿后的比差为 : } F' = F + F_{补}$$

5 单匝数补偿举例

要求补偿上面例子的电流互感器，60T 减少 1T，那么补偿的效果是 $F_{补} = 1 / 60 * 100 \approx 1.67$ 。

$$5\% \text{ 这点的 } F = -1.67 + 1.67 = -0$$

$$20\% \text{ 这点的 } F = -1.03 + 1.67 = 0.64$$

$$100\% \text{ 这点的 } F = -0.64 + 1.67 = 1.03$$

$$120\% \text{ 这点的 } F = -0.44 + 1.67 = 1.23$$

我们发现 1T 的补偿对于这个互感器已经补偿的数值太大了，是负的比差全部变正，补偿后依然只符合 1.0 级的准确级，所以对于匝数太少的互感器不怎么适用于此类补偿方式。

6 分匝数补偿

对于这样 1 匝补偿过多的情况，我们可以采用双匝，

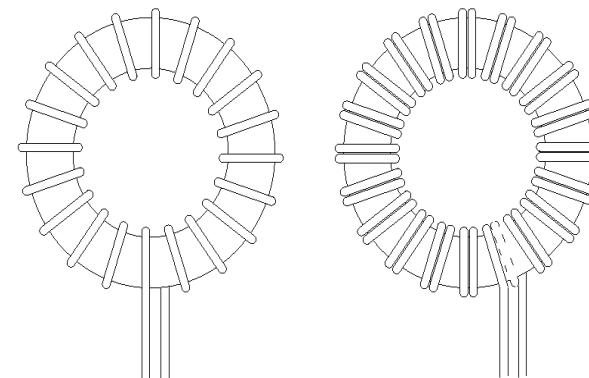


图 6 左边是单匝数绕线，右边是分匝数，2 根并绕，并少绕 1 匝作为补偿（见虚线）

甚至多匝的补偿，也叫做分匝数补偿，就是我们绕线工艺中经常提到的多线并绕。把一根 1.45mm 的漆包线分成两根或者多根漆包线来并绕 60T，见图 6。

那么它的补偿公式如下：

$$F_{\text{补}} = N_x / N * K * 100 (\%) ;$$

K：并绕根数。

7 分匝数补偿举例

现在对互感器进行 2 根线并绕 60T，那么漆包线总匝数为 120T，由于匝数并绕，不会影响互感器正常的输出，那么减少 1 匝， $F_{\text{补}} = 1/120 * 100 \approx 0.835$ ；

5% 这点的 $F = -1.67 + 0.835 = -0.835$ ；

20% 这点的 $F = -1.03 + 0.835 = -0.195$ ；

100% 这点的 $F = -0.64 + 0.835 = 0.195$ ；

120% 这点的 $F = -0.44 + 0.835 = 0.395$ 。

经过 2 根线并绕，补偿 1 匝后，准确级已经能够达到 0.5 级的要求了。我们再计算下 3 根并绕后的结果， $F_{\text{补}} = 1/180 * 100 \approx 0.557$ ；

5% 这点的 $F = -1.67 + 0.557 = -1.113$ ；

20% 这点的 $F = -1.03 + 0.557 = -0.473$ ；

100% 这点的 $F = -0.64 + 0.557 = -0.087$ ；

120% 这点的 $F = -0.44 + 0.557 = 0.117$ 。

虽然在 20%–120% 达到了 0.2 级的标准，但是 5% 反倒差了，同时不满足 0.2 级的标准，所以说，分匝数补偿也要以适宜为主。

当然补偿的方法还有很多，如半匝数补偿、短路匝补偿、磁分路补偿、电容补偿等等，不过随着铁芯性能的不断优化、改良、出新，已经不需要这么很多略显复杂的补偿方法，在生产中主要还是依靠简单的匝数的补偿而已。

上接 132 页

关的不运转判定。为了提高判定的准确度，必须利用多方向的振动加速度和对检测阈值的重新评价。

3.3 长时期运用实验的结果

本事业中，从最终的 2014 年 11 月开始的 2 个月时间内，实施了长期的运用试验。通过长期运用试验构建的控制系统，已确认可以稳定的运用。而且，长期运用试验中，进行了对风力发电机反映其运转工况的运用，与未考虑运转工况的场合进行了性能比较。通过如图 8 所示反应运转

工况的对比评价的结果，确认了蓄电池必要的容量可大幅度减小。

4 结束语

本事业中，达到了当初设定的广域运用系统的目标性能，有效 RE 电源可以稳定的计划运用已经确认。而且，进行了通讯网的性能评价和运转工况监视基础数据的收集。由此，能抽出针对未来实用化的课题，今后，可望 RE 电源进一步的普及。本技术，作为扩大 RE 电源与电力系统联网数量的技术，期待得到充分有效的利用。

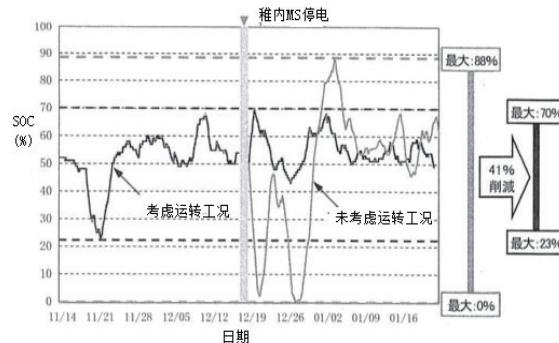


图 8 借风轮机组运转判定削减蓄电池必要的容量

原文出处：

1. 田边隆之
再生可能エネルギー電源の
広域運用システムの構築と評価
《电气评论》2016.3 P53—P57