

继电保护中电流互感器的误差特性校验

西安交通大学 程立诚

一、概 述

电力系统继电保护运行的可靠性,相当程度地受电流互感器误差特性的影响,在运行中不止一次由于电流互感器的选用不当(如饱和电压不够)而导致线路内部故障拒动,外部故障母差保护误动等情况的发生。

为保证短路故障时电流互感器(CT)正确工作,必须了解CT在短路时的误差特性,继电保护对CT的要求和校验方法。过去保护装置基本上工作在短路的稳态情况,CT的准确度是通过10%误差特性来保证的,没有考虑非周期分量的影响。由于超高压电网的发展,系统的时间常数 T_1 增大(330KV线路 T_1 约为40ms,500—750KV线路下为75ms,大容量发电机出口短路 T_1 可达100~200ms以上),而系统稳定要求快速切除故障,对500KV线路要求保护的动作时间约在30ms左右,这样电流互感器正好工作在短路的暂态过程中,因而必须考虑暂态过程中周期分量和非周期分量同时存在时电流互感器的暂态特性,暂态误差对保护的影响,和误差校验方法。

二、稳态误差及校验

为了正确校验暂态误差,首先了解稳态误差及校验方法是很必要的。

CT接于系统的情况如图1所示, R_1 为系统等值电阻, ωL_1 为系统等值电抗,系统总阻抗为 $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$ 。CT的变比为 n_L ,CT的负载为 Z_{fn} ,CT的等效电路如图2(a),图中一次电流 I_1 及阻抗 Z_1 均归算到二次侧, Z_1 不影响电流的变换,因此可用等效图2(b)。图3为对应图2(b)的电压电流向量图,由此可求出CT的比差及角差分别为,

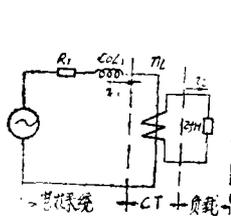
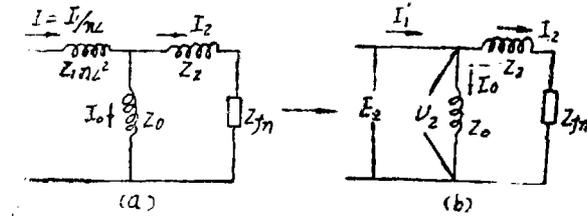


图1



(a)

图2

(b)

$$f\% = -\frac{I'_1 - I_2}{I'_1} \cdot 100\% \quad \left. \begin{array}{l} \\ \delta = \angle I'_1 I_2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

比差就是CT的励磁电流 I_0 相对一次电流的百分数，角差为二次电流的相位差。

保护对电流互感器的要求是：在最大稳态短路电流通过时CT不应饱和，或过电流倍数（ $n = \frac{I}{I_{1c}}$ ）即一次电流与额定电流的比值满足最大误差不超过10%，即认为合格。一般比差 $f\% < 10\%$ 时，角差 $\delta \leq 7^\circ$ 。为保证保护装置的准确性在整定计算中还考虑了可靠系数、同型系数将计及误差的影响。角差只在相位比较的保护中计及误差，不再作校验。

稳态误差校验方法有以下几种：

(一) 公式法：[1]

已知铁心材料的饱和磁感应强度 B_s 或饱和电压 E_s 。

由图2(b)求CT的二次感应电势值；

$$E_2 = I_2 (Z_2 + Z_{fh}) \dots (2)$$

式中 I_2 为CT二次电流，对电流距离保护应选择保护的動作电流；差动保护应选择出口最大的穿越短路电流。CT的负载阻抗 Z_{fh} ，为CT的二次电压 U_2 为二次电流 I_2 的比值；

即 $Z_{fh} = \frac{U_2}{I_2}$ ，不仅为继电器阻抗 Z'_r ，导线阻抗 Z_w 有关，还与继电器的接线方式

及短路种类有关。[2]、如表1。

另外，根据感应电势有效值：

$$E_2 = 4.44fAW_2B_{max}10^{-8} \text{ (伏)} \dots (3)$$

式中 f ： 电源频率HZ

A ： 铁心截面 cm^2

W_2 ： 二次线圈匝数

B_{max} ： 最大磁感应强度Gauss

解(2)、(3)式得 $B_{max} = \frac{I_2(Z_2 + Z_{fh}) \times 10^{-8}}{4.44fAW_2} \dots (4)$

要求 $B_{max} < B_s$ ；或由(2)式求得的 $E_2 < E_s$ （ E_s 为对应 B_s 的饱和电压可由磁化曲线两切线的交点确定如图4(C)）

例1、CT变比 $n_T = 2000/5$ ，铁心为高导磁硅钢片（ $B_s = 19000Gauss$ ）截面为 $20cm^2$ ，二次线圈电阻 0.31Ω ，保护装置的動作电流为 $40KA$ ，二次负载包括继电器及二次电缆为 2Ω ，校验CT是否饱和？

假定CT不饱和则 $E_2 = I_2 (Z_2 + Z_{fh}) = \frac{40000}{2000/5} (0.31 + 2) = 231V$

$$B_{max} = \frac{E_2 \times 10^8}{4.44fAW_2} = \frac{231 \times 10^8}{4.44 \times 50 \times 20 \times 400} = 13006 < 19000 Gauss$$

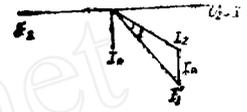


图3

表 1

接线图	故障种类	二次负载 Z_{fh}
	$d^{(3)}$ $d^{(2)}$	$\dot{Z}_e + \dot{Z}_J$
	$d^{(1)}$	$2\dot{Z}_e + \dot{Z}_J + \dot{Z}_{2\phi}$
	$d^{(3)}$ $d^{(2)}$	$3\dot{Z}_e + 3\dot{Z}_J$
	$d^{(1)}$	$2\dot{Z}_e + 2\dot{Z}_J$
	$d^{(3)}$	$\sqrt{3}\dot{Z}_e + \dot{Z}_J$
	$dAc^{(2)}$	$\dot{Z}_e + \dot{Z}_J$
	$dAB^{(2)BC}$	$2\dot{Z}_e + \dot{Z}_J$

Z_J : 继电器阻抗
 Z_e : 二次导线电阻

CT不会饱和。

在保护安装处附近短路虽然通过CT的一次电流较大、误差增大，但即使饱和二次侧稳态短路电流也不可能小于继电器的动作值，关于具体保护校验可选用的二次电流计算值可参考[2]。

(二) 磁化曲线法:

当CT的磁化曲线已知时，可根据已知的一次电流和二次负载阻抗值求励磁电流确定误差。

磁化曲线可采用图4(a)的接线由试验求出，试验时CT一次侧开路，由二次侧通电流，此时的电流全部为励磁电流。电压 $U_2 = I_0(Z_0 + Z_2)$ ， Z_2 相对 Z_0 可忽略不计，近似用此法做出的伏安特性代表二次感应电势 $E_2 = f(I_0)$ 的关系曲线如图4(c)。

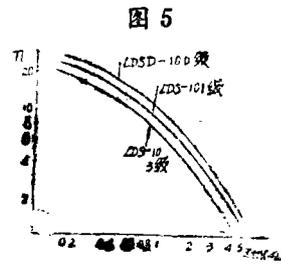
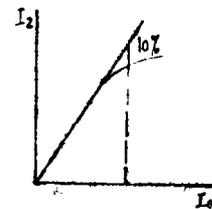
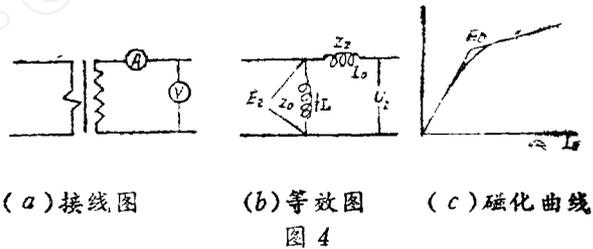
然后利用磁化曲线求 $I_2 = f(I_1)$ 的关系曲线步骤如下:

1. 假定一个二次电流 I_2 ，计算 $U_2 = I_2(Z_2 + Z_{fh})$
2. 从磁化曲线上找对应 U_2 的励磁电流 I_0 。
3. 求一次电流 $I_1 = (I_2 + I_0)n_L$
4. 反复求数点绘出 $I_2 = f(I_1)$ 的曲线如图5。
5. 如果稳态短路的计算电流 I_1 小于 I_{max} 则误差在允许范围之内。

如误差不能满足要求时，可增大变比，或两个互感器串联使用。

(三) 误差曲线法:

根据制造厂提供的10%误差曲线(6图)，此曲线表明CT的误差为10%时，其一次侧额定电流倍数 ($n = \frac{I_1}{I}$) 与最大允许二次负载 Z_{fh} 的关系[3]，可以根据负载情况求一次电流允许倍数，或已知过电流倍数求允许负载，以保证CT误差在允许范围之内。



三、暂态误差及校验

大容量发电机、变压器及超高压输电线分裂导线的采用,使系统时间常数($T_1 = \frac{L_1}{R_1}$)增大,图7为500KV系统一例[4]

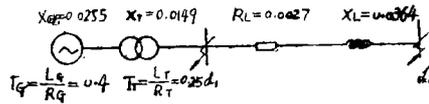


图 7

系统参数均按基准容量 $S_b = 1000MV A$ 归算, d_1, d_2 点短路电流不计系统各元件电阻值,分别为:

$$I_{d1} = \frac{1}{X_G + X_T} I_b = \frac{1}{0.0404} \times \frac{1000}{\sqrt{3} \times 550} = 25.99 K A$$

$$I_{d2} = \frac{1}{X_G + X_T + X_L} I_b = \frac{1}{0.0768} \times \frac{1000}{\sqrt{3} \times 550} = 13.7 K A$$

系统的时间常数:

$$T_{d1} = \frac{L_G + L_T}{R_G + R_T} = 0.327''$$

$$T_{d2} = \frac{L_G + L_T + L_L}{R_G + R_T + R_L} = 0.079'' \approx 0.08''$$

在发电厂出口母线 d_1 点短路 T_{d1} 达300ms以上,在线路末端 d_2 点短路 T_{d2} 为80ms,整个暂态过程持续时间为系统时间常数的4~5倍,可延续到几十周波,而超高压系统稳定要求快速切除故障,保护的動作时间被限制到30ms左右,加之保护装置本身又是高灵敏度,为保证保护装置准确可靠动作,故要求CT在保护动作时间内有良好的暂态特性。

(一) 暂态过程中CT电流和磁通变化规律

短路暂态过程的全电流一般式为:

$$i_1' = I_m' \sin(\omega t + \theta - \varphi) - I_m' \sin(\theta - \varphi) e^{-\frac{t}{T_1}} \dots (5)$$

式中 θ : 等效电压的初相角。

$$\varphi: \text{短路电压电流间的相角, } \varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L_1}{R_1} \approx 90^\circ$$

I_m' : 一次短路电流周期分量幅值。

ω : 电源角频率。

假定短路前为空载,最严重的情况是电压接近于零时的短路($\theta \approx 0$),稳态电流为最大值,一次电流中的非周期分量最大:

$$i_1' = I_m' e^{-\frac{t}{T_1}} - I_m' \cos \omega t \dots (6)$$

根据图8所示CT简化等效图,不考虑铁心饱和引起的非线性,则有:

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = R_2 i_2 \dots (7)$$

$$i_1' = i_0 + i_2 \dots (8)$$

将(6)式关系代入(7)、(8)式求解 i_0 、 i_2 得:

$$i_0 = -I_m' \cos \delta \cos(\omega t - \delta) - \frac{T_1}{T_2 - T_1} I_m' e^{-\frac{t}{T_1}} + I_m' \cos^2 \delta e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{T_1 I_m' \cos^2 \delta}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} \dots (9)$$

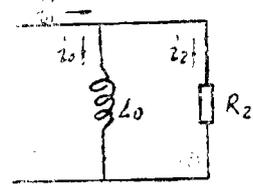


图8

$$i_2 = I_m' \sin \delta \sin(\omega t - \delta) + \frac{T_2}{T_2 - T_1} I_m' e^{-\frac{t}{T_1}} - I_m' \cos^2 \delta e^{-\frac{t}{T_2}} - \frac{T_1 I_m' \cos^2 \delta}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} \dots (10)$$

式中 T_2 : 二次回路时间常数 $T_2 = \frac{L_0}{R_2}$

δ : 二次回路阻抗角 $\delta = \text{tg}^{-1} \frac{\omega L_0}{R_2} = \text{tg}^{-1} \omega T_2$

分析(9)、(10)式可得:

1. 第一项称为稳态强制周期分量, 按励磁回路和二次回路阻抗成反比分配, 相位相差 90° 。不随时间衰减。

2. 第二项称为强制非周期分量, 是一次电流非周期分量传变到二次的电流, 按时间常数 T_1 、 T_2 的比例在励磁回路和二次回路中分配。 T_1 越大一次非周期分量变为励磁电流的比例越大; T_2 越大则变换到二次电流中非周期分量的比例越大。

3. 第三项为补偿第一项周期分量的自由非周期分量。由于短路时CT磁路中的磁通不能突变, 因此在 L_0 、 R_2 组成的闭合二次回路中出现这一项自由非周期分量以补偿在短路开始时($t=0$)上述第一项强制周期分量。由于 $\omega L_0 \gg R_2$ 接近 90° , $\cos \delta \approx 0$, 因此在近似计算中可以不考虑这一分量。

4. 第四项为补偿 $t=0$ 时的强制非周期分量的自由非周期分量, 在励磁回路和二次回路环流。

一次电流和励磁电流的波形如图9所示, CT对非周期分量的变换情况如图10。

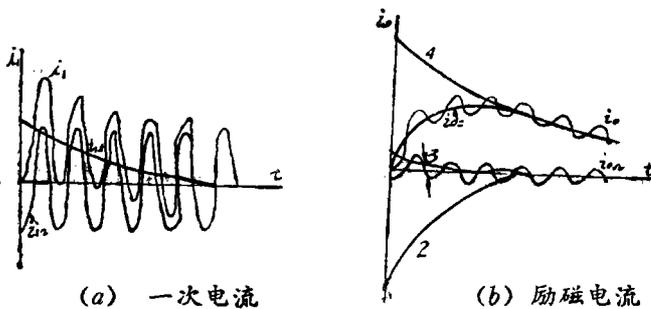


图9 CT电流波形图

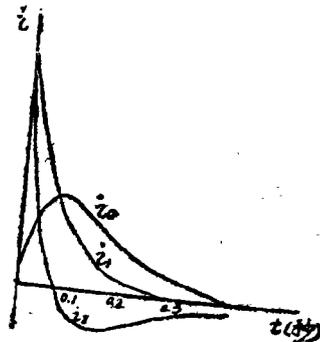


图10 CT对非周期分量的传变

下面着重讨论一下CT对非周期分量的传变特性,不论电流互感器是否饱和,在 $t=0$ 时,励磁电流中的非周期分量为零,全部非周期分量均传变到二次回路,然后再逐渐进入励磁回路。由于 $T_2>T_1$,二次回路中强制性非周期分量比自由非周期分量大,但衰减较快。又由于两个分量的极性相反,致使后来二次回路的非周期分量变换了极性[5]。

再观察一下电流互感器铁心中磁通的变化情况,由于 $\phi(t)=\int R_2 i_2 dt$ 将(10)式代入且近似认为 $\delta=90^\circ$ 可求出暂态磁通 $\phi(t)$ 的一般式:[6][7]

$$\phi(t) = \frac{I_M' R_2}{\omega} \left[\frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \sin\omega t \right] \dots (11)$$

当忽略(9)式中第三项自由非周期分量时(11)式与(9)式具有变化规律相同的周期分量 $(\phi_1 = -\frac{I_M' R_2}{\omega} \sin\omega t)$ 和非周期分量 $\left[\phi_2 = \frac{I_M' R_2 T_2 T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) \right]$,因此说明了铁心未饱和时磁通变化的波形(图11)与励磁电流有相同的特性[6][8]。

分析图9及图10可得知暂态过程CT励磁电流和磁通具有以下特点:

(1) 励磁电流和磁通将大大超过稳态值。且其中非周期分量远大于周期分量。

(2) $t=0$ 时励磁电流中的非周期分量为零,全部非周期分量传变到二次,然后逐渐进入励磁回路,所以励磁电流要经历一段时间达到最大值。

(3) 由于 $T_2>T_1$,所以励磁电流中第四次自由非周期分量(图9曲线4)对励磁电流起决定作用,CT的暂态过程较一次回路暂态过程长。

(二) CT饱和时的暂态特性:

暂态过程中CT误差增大的主要原因是非周期分量引起铁心饱和所致。由于短路电流含有非周期分量,这时铁心将同时受到交流和直流的交替磁化,铁心的磁感应强度按局部磁滞回线变化(图12)[9],非周期分量电流使铁心的磁感应强度增加,特别在剩磁与非周期分量电流产生的磁通符号相同时,铁心磁感应强度很快到达饱和值,励磁电流数值大大增加,误差增大。由于饱和后励磁阻抗 ωL_m 减小,非周期分量电流的变换比周期分量电流要坏得多。这时磁通和励磁电流的关系不能用线性方程求解,用磁化曲线分段计算也比较复杂,工作量大。求解的关键在于了解其变化特性和规律。用龙格-库塔法计算二次电流和励磁电流的结果为如图13所示,[10]计算程序是以高次多项式为基础表明励磁电流非线性的数字模型,包含磁滞和剩磁的影响,计算结果与实验室对CT进行的试验完全一致。

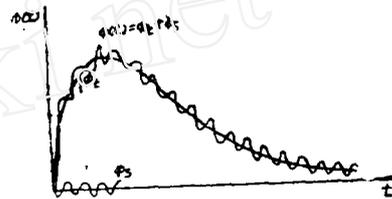


图 11

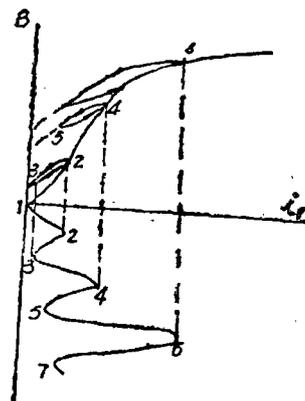
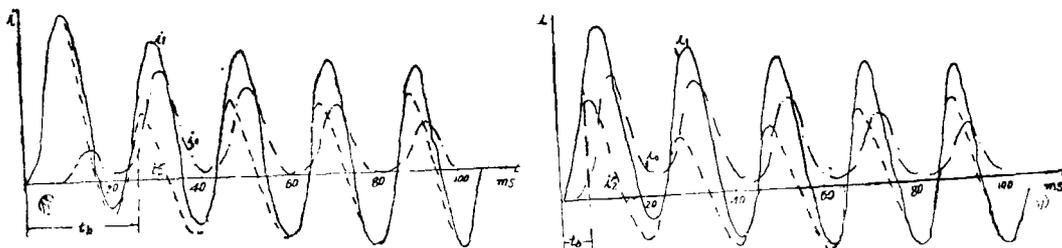


图12 交替磁化



(a) 低剩磁 (b) 高剩磁

图13 暂态过程CT波形图。(龙格-库塔法计算与试验结果一致)

试验参数: $T_1 = 50ms$ $T_2' = \frac{L_2}{R_2} = 1.5ms$

系统故障时一次电流: —; 二次电流: - - -; 励磁电流: ·····。

图13(a)为低剩磁情况,约在一个半周波内CT的误差均很低,图13(b)为高剩磁情况,CT不到半周波就饱和了。

短路情况下的开断,管型避雷器的放电以及变压器空载合闸的励磁涌流都会在CT铁心中产生剩磁,无气隙闭心式铁心剩磁 ϕ_r 可达饱和磁通 ϕ_s 的80%,所以铁心很容易饱和。改善CT暂态特性的关键在于消除励磁阻抗的非线性,近年来国内外超高压电网已使用开小气隙的所谓线性电流互感器,既可降低铁心磁感应强度,又可以减小剩磁(图14)暂态饱和条件大为减轻。缺点是开气隙后CT的励磁阻抗减小,稳态误差较大。

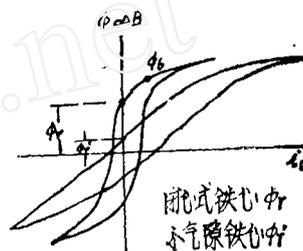


图14 气隙对CT特性影响

图15为500KV电流互感器二次电流录波图,采用了上述两种不同特性的铁心。第5铁心用于500KV系统,暂态特性很好。第三铁心用于275KV及其以下系统,暂态过程中CT饱和,二次电流波形畸变。

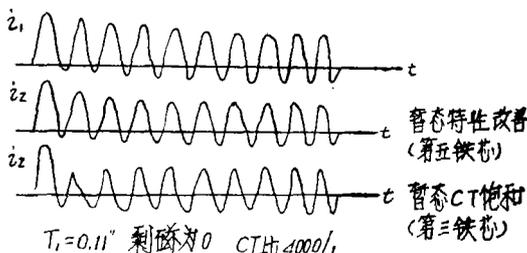


图15 500KV CT电流示波图

根据图13、15所示波形分析,CT饱和的暂态特性主要有以下特点;

(1)励磁电流从零逐渐上升,到达CT和时饱和要经历一段时间,这段时间叫饱间,以 t_b 表示,在 t_b 以前CT误差 $f\% < 10\%$ 。饱和时间与系统时间常数,短路电流水平及CT型式有关。

(2)饱和后的二次电流波形出现缺损,幅值降低,过零点提前,使得正负半波的差别更为显著。这个特点可以将二次电流 i_2 16(b)相应磁化曲线16(a)划分为三段来解释在a、b段,

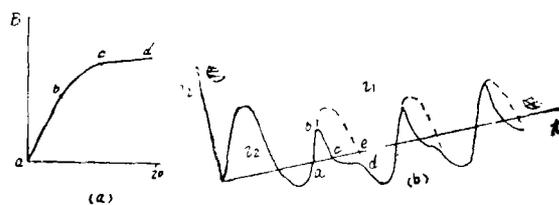


图16 二次电流波形失真分析

励磁电流较小，工作在磁化曲线的线性段，二次电流的误差较小，一次电流基本变换为二次电流。*b*、*c*段由于铁心的非线性，励磁电流逐渐增大，铁心逐渐进入饱和区，导磁率下降，二次感应电势下降，所以二次电流幅值降低。*C*、*d*段铁心完全饱和，二次电流理论上为零，一次电流全部流入励磁回路，由于电感电流不能突变，所以在励磁回路和二次回路中出现了环流，即*C*、*d*段的反向电流，致使二次电流波形严重失真。直到励磁电流中的非周期分量衰减后，CT误差才逐渐变小，二次电流逐渐增大，二次电流波形恢复正常。

(3) 用暂态倍数 K_b 来说明铁心的饱和裕度：暂态倍数是指瞬时磁通 $\phi(t)$ 增长到稳态磁通幅值的 K_b 倍时，CT铁心开始饱和 $\phi(t) = \phi_b$ ，在达到暂态倍数 K_b 之前，铁心磁路并未饱和而仍为线性，所以这个数值越大，饱和的裕度越大，暂态特性越好。

$$K_b = \frac{\phi_b}{\phi_{i.m}} = \frac{\phi_i + \phi_{i.m} \dots}{\phi_{i.m}} \dots (12)$$

式中 $\phi_{i.m}$ ：磁通 $\phi(t)$ 周期分量的幅值可由(11)式得 $\phi_{i.m} = \frac{I'_m R_2}{\omega}$

ϕ_i ：对应饱和和时间 t_b 时的非周期分量磁通。

$$\phi_i = I'_m R_2 \frac{T_2 T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t_b}{T_2}} - e^{-\frac{t_b}{T_1}})$$

不同型式铁心CT的暂态倍数可按下列式求出：

A、对小气隙铁心 $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ (约为0.2~1秒)

$$K_b = \frac{\omega T_2 T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t_b}{T_2}} - e^{-\frac{t_b}{T_1}}) + 1 \dots (13)$$

B、对无气隙闭心式铁心 $T_2 \gg T_1$

$$K_b = \omega T_1 (1 - e^{-\frac{t_b}{T_1}}) + 1 \dots (14)$$

根据(13)、(14)式图16绘出了不同饱和时间 t_b 、暂态倍数 K_b 与系统时间常数的关系曲线，这里饱和时间 t_b 相当于继电保护装置动作时间。从图16可得出以下结论。

(a) $t_b < 5 \text{ ms}$ ，即继电器的动作时间低于5ms，暂态倍数 $K_b < 1$ ，说明暂态磁通比稳态分量幅值还低，所以不需考虑暂态饱和的影响。因此保护对所采用CT型式没有要求。

(b) 当系统的时间常数大约为保护动作时间的5倍时($T_1 = 5 t_b$)暂态倍数 K_b 约为最终值的0.9倍， T_1 再增大对 K_b 的影响甚微，所以时间常数对暂态倍数的影响并不是很严重的，有人曾经用 $K_b = 1 + \omega T_1$ 来计算暂态倍数，显然是不合适的[11]。

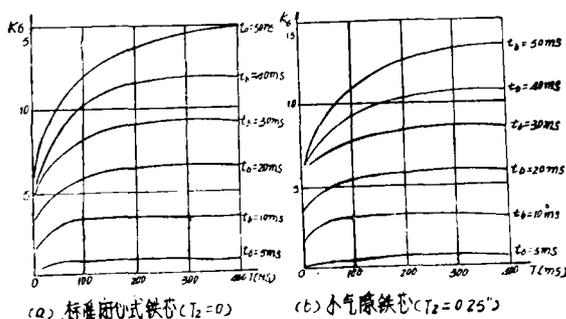


图16 CT的暂态倍数

(c) t_b 不超过 20ms 时闭心式和小气隙 CT 的暂态倍数很相近, 可以简化均按 (14) 式计算。

(三) 暂态误差校验:

暂态过程对不同原理继电器的影响, 华东电力试验研究所等有关单位已经做了试验 [12], 如反应突变量的继电器在短路后 1~2ms 启动, 原理上不受 CT 饱和的影响。电流继电器及阻抗继电器可能受饱和和影响拒动或返回, 比相元件则因二次电流过零点提前, 也可能引起误动和拒动。试验指出当 $T_1 < 200ms$, $K_b > 10$ 时各种保护均能正确动作。根据 500KV 系统有关单位提供资料, 国内 500KV 系统采用小气隙线性 CT, $K_b > 10$, 基本能满足要求。

再讨论一下有关暂态倍数计算的几个问题:

(1) 系统时间常数 T_1 : 如果确知系统参数, 可由实际网路求出。如果没有具体参数可采取 $T_1 = 5t_b$, 即相当于 5 倍保护动作时间, 这是偏于保守的计算。

(2) 短路电流偏移度 α : 以上讨论的情况是在电压过零时的短路, 非周期分量最大。根据国外收集的资料对于电压高于 100KV 的输电线, 短路故障均是在离电压峰值 450 之内发生的。因为绝缘击穿需要一定的强度, 非周期分量达最大值的情况是很少见的。

[13] 短路电流偏移度 α 可由 (5) 式求得:

$$\alpha = \left| \frac{I'_m \sin(\theta - \varphi)}{I'_m} \right| \% = \sin 450 \% = 70 \% \dots (15)$$

考虑短路电流偏移度后 (13)、(14) 式变为:

A、小气隙铁心:

$$K_b = \frac{\omega T_2 T_1 \alpha}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t_b}{T_2}} - e^{-\frac{t_b}{T_1}} \right) + 1 \dots (16)$$

B、闭心式铁心:

$$K_b = \omega T_1 \alpha \left(1 - e^{-\frac{t_b}{T_1}} \right) + 1 \dots (17)$$

综上所述, 建议当 T_1 选取 100ms 时, 短路电流偏移度不计, 当 T_1 取 150ms 时, 偏移度 α 取 80%, 保证一定的裕度以弥补 T_1 的不足。

(3) 剩磁的影响: 特别在使用快速重合闸时暂态误差要能满足连续两次短路的要求, 且当第二次短路的暂态磁通与剩磁极性相同时铁心将更快饱和, 这时要求 CT 在全过程中满足误差的规定, 则校验时需使 CT 的饱和电压满足条件:

$$U_b > K_r K_b I_2 (Z_2 + Z_{jh}) \dots (18)$$

式中 K_r 为剩磁系数, 由图 14 可求得剩磁系数的值是 $K_r = \frac{\phi_b}{\phi_b - \phi_r}$, 由于剩磁难以控制对闭心式 CT, K_r 取 2~3, 小气隙 CT 可不考虑剩磁影响 K_r 取为 1。

K_b 按 (16) (17) 式计算。

例 2: IMZE—TPY 为小气隙电流互感器, 变比 2000/1, 暂态过电流倍数 $N = 190$, 饱和电压 $U_b = 3100V$, 二次阻抗 5.6Ω, 负荷阻抗 $Z_{jh} = 8.4\Omega$ (包括距离继电器, 故障探测器及二次电缆等, 系统短路电流 $I_d = 50KA$, $T_1 = 0.1$ 秒, 保护动作时间 $t_{DZ} = 0.02$ 秒

校验CT是否满足误差要求。

解:TPY为线性CT, T_2 约为0.2秒, ∴可按式(17)计算 K_b , 取 $T_1 = 5 t_0 = 100ms$, $\alpha = 100\%$

$$K_b = 1 + \omega T_1 (1 - e^{-\frac{t_{Dk}}{T_1}}) = 1 + 314 \times 0.1 (1 - e^{-\frac{20}{100}}) = 6.69 \text{倍}$$

$$U_2 = K_b K_b I_2 [Z_2 + Z_{fk}] = 1 \times 6.69 \times \frac{50 \times 10^3}{2000} [5.6 + 8.4] = 2341.5 < 3100V$$

暂态二次电压小于饱和电压, 所以满足CT误差要求。

另外从过电流倍数来看, 暂态过电流倍数是暂态电流相对额定电流的比值,

$$N = K_{bn} = K_b \frac{I_d}{I_n}, \text{为稳态过电流倍数的 } K_b \text{ 倍。}$$

这里CT实际过电流倍数为

$$N = 6.69 \times \frac{50 \times 10^3}{2000} = 167.25 < 190 \text{ 同样满足要求。}$$

www.cnki.net