

继电保护对电流互感器暂态特性的要求

广东省电力勘测设计院 张华贵

一 问题的提出

500千伏电压级在我国的出现,带来了许多技术问题要研究解决,如大容量,长距离送电的过电压及稳定等问题,本文着重讨论对500千伏继电保护用的电流互感器(C T)暂态特性的要求。

C T的暂态特性对保护的正确动作与否,息息相关,如C T的暂态特性与保护的动作原理不相适应时,会引起保护的误动作或拒绝动作,这对500千伏送电的可靠性危害很大。各国在500千伏C T的制造上,均对它的暂态特性加以研究,并提供具有暂态特

软件包括3个2阶节级〔2〕所组成的6阶切比雪夫数字滤波器作为中频滤波器,N点迭加平均幅值计算,3点平滑处理和门限判决。其中3点平滑处理用于克服信号频率误差所造成的高频抖动。

5·实验结果和结论

实验的方法是在保护用的收发讯机装置的输入端同时加入信号和白噪声,测试结果证实采用了以上所说的新技术后功率信噪比将提高4倍以上。有可能完全克服传统收发信机存在的问题。从另一角度说,传统收发信机以提高发信功率来获得较高的信噪比。例如,现场所做将发信功率从20W增加到40W只能提高信噪比2倍。所以可以说在保持原收发信机性能不变的情况下发信功率可减少一半,这是非常诱人的结果。另外采用微机后的收发信机还可以附带完成诸如装置循环检测控制逻辑等功能提高了收发信机的现场适应能力及自动化水平。

总之,应用本文所述的信号处理方法后,将能极大地提高收发信机的性能。

参考资料

- 〔1〕 S.Haykin·“Communication System”. John Wiley and Sons. 1978.
- 〔2〕 AiLourich and Ray Simar Jr.“Digital Signal Processing Applications with the TMS320—20 Family”. TEXAS Instruments. 1986.pp27—68.

性的CT，而继电保护工作者亦对CT的暂态特性提出要求，要CT与保护两者能很好地配合，使运行中的保护能正确动作，满足运行安全可靠。

二 CT的电磁暂态计算分析

1. CT的一次短路电流

CT的一次侧是串在电力系统的电流回路中，当电力系统发生短路时，系统的短路电流流入CT的一次侧，系统短路电流的暂态是与系统的结构有关，除工频电流外，可能包含有直流分量，低频分量及高次谐波电流分量。为了对CT电磁暂态现象便于了解，在分析PT的暂态特性时，需要用到一次短路电流的暂态计算，对此作了如下假设，1)采用线路集中参数，2)略去线路并联电容参数，3)略去高压并联电抗器参数，4)采用直流偏移100%。这使暂态电流的变化方式得以简化，能抓住主流，可满足工程对PT的实用计算。设电力线空载，当A相电压过0时发生三相短路，而短路电流中只考虑了工频分量及按指数衰减的直流分量。

即解微分方程式：

$$E_m \sin \omega t = L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

得A相短路电流：

$$i_1(t) = I_m \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos \omega t \right) \quad (1)$$

式中，直流分量 $I_{DC} = I_m e^{-\frac{t}{T_1}}$ ，

交流分量 $I_{AC} = -I_m \cos \omega t$ ，

一次时间常数 $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ 。

当 $t=0$ 时， $i_1 = 0$ ， $I_{DC} = -I_{AC}$ ， $\alpha = \frac{I_{DC}}{I_{AC}} \cdot 100\% = 100\%$ ，就是这100%的偏移度

CT的暂态带来很大的影响。

2. CT的暂态励磁电流及二次电流

为了对CT的电磁暂态现象便于了解，在计算上采用了一些简化，CT的等价回路中，励磁回路只考虑了电感，二次回路只考虑了电阻，也即CT的负载功率因素 $\cos \varphi = 1$ ，从CT的等价电路图可列出较简单的励磁电流微分方程式：

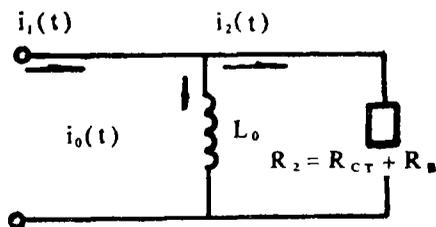


图1 CT等价电路图

$$\frac{di_0}{dt} + \frac{1}{T_2} i_0 = \frac{1}{T_2} I_m \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos \omega t \right)$$

可直接解微分方程式得:

$$i_0(t) = I_m \frac{T_1}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \frac{1}{\omega T_2} \sin \omega t \quad (2)$$

因 $i_2(t) = i_1(t) - i_0(t)$, 且 $\omega T_2 \gg 1$, 则考虑 $\frac{1}{\omega T_2} \approx 0$, 相对很小, 略去之, 可得:

$$i_2(t) = I_m \left[\frac{1}{T_2 - T_1} (T_2 e^{-\frac{t}{T_1}} - T_1 e^{-\frac{t}{T_2}}) - \cos \omega t \right] \quad (3)$$

式中, 一次时间常数 $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$,

二次时间常数 $T_2 = \frac{L_0}{R_2}$ 。

从(2)式及(3)式可见, $i_0(t)$ 及 $i_2(t)$, 除工频稳态电流外, 还含有按指数差衰减的直流分量。

3. CT的暂态磁感应密度

从电工原理可得, 闭合铁心的磁感应密度:

$$B(t) = \frac{L_0 i_0(t)}{W_2 S} = \frac{\mu W_2}{l_m} i_0(t) \quad (4)$$

式中, L_0 —励磁电感,

S —铁心截面,

μ —铁心导磁率,

l_m —铁心磁路平均长度,

W_2 —CT二次匝数。

以(2)式代入(4)式, 得一次励磁时:

$$B(t) = \frac{L_0 I_m}{W_2 S \omega T_2} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) - \sin \omega t \right] \quad (5)$$

当 $\sin \omega t = -1$ 时, 一次励磁的顶值:

$$B_{TR} = \frac{R_2 I_m}{W_2 S \omega} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) + 1 \right] \quad (6)$$

式中, $\frac{L_0}{T_2} = R_2$

当线路上装有重合闸, CT两次励磁时:

$$B_{RD} = \frac{R_2 I_m}{W_2 S \omega} \left\{ \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t'}{T_2}} - e^{-\frac{t'}{T_1}}) + 1 \right] e^{-\frac{t_{RR} + t''}{T_2}} + \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} (e^{-\frac{t''}{T_2}} - e^{-\frac{t''}{T_1}}) + 1 \right] \right\} \quad (7)$$

从(7)式可见, B_{TD} 为从一次励磁顶值按指数 $e^{-\frac{t_{FRT}+t}{T_2}}$ 衰减再加上第二次励磁的顶值。

CT两次励磁循环周期 $t'-t_{FRT}-t''$ 取 $(t_D+t_{CB})-t_{FRT}-t_D$ 或 $(t_D+t_{CB})-t_{FRT}-(t_D+t_{CB})$ 由厂家或用户决定,与继电保护的动原理有关。其中, t_D 为保护动作时间, t_{CB} 为断路器开断时间, t_{FRT} 为CT去励磁时间。从(7)式还可见,是假设CT的剩磁为0。

4. CT铁心的暂态倍数

从(6)式可见,一次励磁时铁心的暂态倍数

$$K_{TF} = \frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) + 1 \quad (8)$$

两次励磁时,铁心的暂态倍数:

$$K_{TD} = \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t'}{T_2}} - e^{-\frac{t'}{T_1}} \right) + 1 \right] e^{-\frac{t_{FRT}+t''}{T_2}} + \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t''}{T_2}} - e^{-\frac{t''}{T_1}} \right) + 1 \right] \quad (9)$$

5. 考虑暂态时,CT的铁心截面积

稳态情况下,当铁心不饱和,且铁心的磁感应密度为 B_m 时,

$$\begin{aligned} E_2 &= 4.44 f w_2 S_{\sim} B_m \times 10^{-8} \text{伏} \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 S_{\sim} B_m \times 10^{-8} \text{伏} \\ &= \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_2 S_{\sim} B_m \times 10^{-8} \text{伏} \end{aligned} \quad (10)$$

$$E_2 = I_2 R_2 = \frac{I_m}{\sqrt{2}} R_2 \text{伏} \quad (11)$$

式中的电流均已归算至二次侧。

(10)式=(11)式,则可解出:

$$S_{\sim} = \frac{I_m R_2}{\omega w_2 B_m} \times 10^8 \text{厘米}^2$$

式中, R_2 (欧), I_m (安), B_m (高斯)。

暂态情况下,考虑铁心不饱和,且磁感应密度仍为 B_m ,注入量纲后,从(6)式及(7)式,得一次励磁时(只一次励磁)。

$$B_m = B_{TF} = K_{TF} \frac{I_m R_2}{\omega w_2 S_{TF}} \times 10^8 \text{高斯/厘米}^2$$

$$\text{铁心面积 } S_{TF} = K_{TF} \frac{I_m R_2}{\omega w_2 B_m} \times 10^8 \text{厘米}^2 = K_{TF} S_{\sim} \text{厘米}^2 \quad (12)$$

若两次励磁时 $B_m = B_{TD}$, $B_m > B_{TF}$, 则:

$$\text{铁心面积 } S_{TD} = K_{TD} S_{\sim} \text{厘米}^2 \quad (13)$$

从(12)式及(13)式可以看出, CT在暂态情况下, 铁心不饱和时, 则其截面积为只考虑稳态时铁心截面积的 K_{TF} 倍或 K_{TD} 倍, 当线路装有重合闸, 存在两次励磁时, 则铁心截面积为稳态的 K_{TD} 倍, 这就是问题的关键所在。

现在我们进一步分析影响 K_{TF} 的因素, 从(8)式可见, 当 T_1 、 T_2 给定时, $K_{TF} = f(t)$, 取导数求 K_{TFmax} 可得:

$$\begin{aligned} t_{max} &= \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} \\ &= \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} \end{aligned} \quad (14)$$

以 t_{max} 代入(8)式, 得:

$$\begin{aligned} K_{TFmax} &= \omega T_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_1}{T_2 - T_1} + 1} \\ &= \omega T_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-\frac{T_2}{T_2 - T_1} + 1} \\ &\approx \omega T_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{-1} + 1 \\ &\approx \omega T_1 + 1 \end{aligned} \quad (15)$$

式中, 当 $T_2 \gg T_1$ 时, $\frac{T_2}{T_2 - T_1} \approx 1$

从(15)式可见, T_1 是影响 K_{TFmax} 的主要因素, 随着大容量机组的投产, 500千伏的 T_1 比220千伏的 T_1 大很多, 故500千伏CT的暂态截面积比220千伏的大很多。一般500千伏取 $T_1 = 100$ 毫秒。(9)式为两次励磁, 亦可看出, 影响 K_{TDmax} 的主要因素也是 T_1 , 其次是去励磁时间 t_{FRT} , t_{FRT} 愈小, 则 K_{TD} 愈大, 一般500千伏厂家CT取 $t_{FRT} = 500$ 毫秒。

三 CT暂态特性的检验方法

过去, 我国对220千伏及以下的保护用CT, 是按10%稳态误差曲线的检验方法, 当时, CT的暂态特性配合保护的研究还不多, 停留在稳态的误差要求上, 随着500千伏的出现, 保护对CT暂态特性的要求, 是不可忽视的了。为此, IEC185增刊文献⁽¹⁾, 已补充了这一章节, 并提出了T PS, T PY, T PX, T PZ的CT。

由于CT暂态误差

$$\text{err}(t) = \frac{i_0(t)}{i_1(t)} \times 100\% \quad (16)$$

随 t 而变的, 对保护专业不便使用, 为此, 要寻求其它更实用的方法。

方法一, 饱和时间法。给定 T_1 , T_2 , T_{FRT} , 在(8)式中, 若以CT的饱和倍数 K_{s1} 代 K_{TD} , 以CT开始饱和的时间 t_s 代替 t_D , 其中 $t = t_D + t_{CB}$ 得:

$$K_{s1} = \frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t_s + t_{CB}}{T_2}} - e^{-\frac{t_s + t_{CB}}{T_1}} \right) + 1 \quad (17)$$

同理在(9)式可得:

$$K_{s2} = \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t_s + t_{CB}}{T_2}} - e^{-\frac{t_s + t_{CB}}{T_1}} \right) + 1 \right] e^{-\frac{t_{FRT} + t_s}{T_2}} + \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t_s}{T_2}} - e^{-\frac{t_s}{T_1}} \right) + 1 \right] \quad (18)$$

可画出 $K_{s1} = f(t_s)$

及 $K_{s2} = f(t_s)$

变化曲线见文献⁽²⁾。实际工程中,也可根据厂家给定的 E_s 二次饱和电压,算出 K_s 。

$$E_s = K_s I_1 R_2 = K_s \frac{I_1}{n_{CT}} R_2$$

$$K_s = \frac{E_s n_{CT}}{I_1 R_2}$$

式中, I_1 为CT一次稳态短路电流值。

代入式(17)或(18),再算出饱和时间 t_s 。

然后加以比较,当 $t_D \leq t_s$ (19)

即CT暂态满足保护的要求。

方法二,饱和倍数法。实际工作中,可根据厂家给定的 E_s 二次饱和电压,算出 K_s 。

$$K_s = \frac{E_s n_{CT}}{I_1 R_2}$$

按(9)式,算出 K_{TD} ,当加以比较

$$\text{因 } E_s = K_s I_1 R_2 / n_{CT}$$

$$E_s = K_{TD} I_1 R_2 / n_{CT}$$

$$\text{当 } K_{TD} \leq K_s \quad (20)$$

即CT的暂态满足保护的要求。

方法三,拐点电压法

根据厂家给出的拐点电压 U_K 、或 E_{AL} 准确度限定电压,按(9)式,

算出 K_{TD} ,当:

$$E_{AL} \geq K_{TD} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}} \quad (21)$$

则CT的暂态满足保护的要求。

本文作者推荐用方法三。因为它最为直观,只要针对CT最重要的参数 E_{AL} (或 U_K 拐点电压),再按(9)式算出工程上的 K_{TD} ,代入(21)式,便可得知暂态CT是否满足保护的要求了。

四 拐点电压法的应用举例

$$\text{从(21)式, } E_{AL} \geq K_{TD} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}}$$

$$\text{左方, } E_{AL} = K_{TDH} \frac{K_{SSC} I_{IH}}{n_{CT}} (R_{CT} + R_{BH})$$

与厂家选择的参数有关,如广东500kV增城变电所进口的TPY,厂家给定其 $T_1 = 0.1$ 秒, $T_2 = 1.3$ 秒, $T_{FRT} = 500$ 毫秒, $K_{TDH} = 24.39$, $K_{SSC} = 20$, $R_{CT75^\circ} = 7.15$ 欧, $R_{BH} = 15$ 欧, $n_{CT} = 3000/1$, $E_{AL} = 10800$ 伏。

右方,工程的参数,

$T_1 = 0.1$ 秒, $T_2 = 2.38$ 秒, $R_{CT} + R_B = 7.1 + 5 = 12.1$ 欧,代入(9)式得:

$$K_{ID} = \left[\frac{0.1 \times 2.38 \times 314}{2.38 - 0.1} \left(e^{-\frac{0.08}{2.38}} - e^{-\frac{0.08}{0.1}} \right) + 1 \right] \\ + \frac{0.1 \times 2.38 \times 314}{2.38 - 0.1} \left(e^{-\frac{0.04}{2.38}} - e^{-\frac{0.04}{0.1}} \right) + 1 \right] = 22.9$$

$$K_{ID} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}} = 22.9 \frac{50000 (12.1)}{3000} = 4620 \text{伏}$$

可见,CT准确度限定电压 $E_{AL} > K_{TD} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}}$ 能满足保护的要求。

从上可见,裕度产生在厂家选择的 $R_{BH} = 15$ 欧,而工程上实际的 $R_B = 5$ 欧,其次是厂家的 K_{SSC} 大于工程上实际的短路电流倍数。

方法三剩磁的考虑,可用公式:

$$E_s (1 - K_R) \geq K_{TD} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}} \quad (22)$$

$$\text{式中 } K_R = \frac{\phi_R}{\phi_s} = \frac{B_R}{B_s}$$

即剩磁通与饱和磁通之比,TPY剩磁 $K_R = 0.1$ 这是TPY的主要优点,取 $E_{AL} \approx E_s$ 则:

$$E_{AL} (1 - K_R) \geq K_{TD} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}}$$

$$10800 (1 - 0.1) > 4620 \text{伏}$$

$$9720 \text{伏} > 4620 \text{伏}$$

考虑剩磁后,增城变500kV的TPY是满足保护的要求的。

实际工程中,短路电流的偏移度 $\alpha < 1$,可用式:

$$E_s (1 - K_R) \geq \alpha K_{TD} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}} \quad (23)$$

$$\text{或近似 } E_{AL} (1 - K_R) \geq \alpha K_{TD} \frac{I_1 R_2}{n_{CT}}$$

式中, α 可取0.5, 0.8或1,最严重时是取 $\alpha = 1$ 。

五 500kV用CT的比较

项	H	TPX	TPY	TPZ
铁	心	闭路铁心	小气隙铁心	大气隙铁心
二次时间常数		$\frac{\mu SW_2^2}{I_m R_2}$	$\frac{\mu_0 SW_2^2}{R_2 \sum \delta}$	$\frac{\mu_0 SW_2^2}{R_2 \sum \delta}$
$T_L = \frac{L_0}{L_2}$		>5秒	一般1~3秒	60毫秒
K 剩磁系数		0.8	0.1	0
交流分量误差		5%	7.5%	10%
直流分量误差		误差小	误差大	误差很大
保护用铁心, 不允许饱和时		截面大	一般截面	截面较小
失励后 i_2		衰减快	衰减慢	衰减很慢
500kV保护所用CT		少用	多用	限制用

除表中所列外, 500千伏CT尚有TPS和5P20型闭路铁心的, 可配合一定的保护用。

六 各种保护对CT暂态特性的要求

不同的保护及设备, 对CT的暂态要求是不同的。

1. 线路距离保护, 方向保护, 用带小气隙的TPY。主要利用其优点, 剩磁系数小, $K_R = 0.1$, 当线路装有重合闸, 产生对CT两次励磁时, CT的 E_{AL} 可要求比TPX闭合铁心的CT的 E_{AL} 低。

2. 线路电流差动保护, 可用带小气隙的TPY。但(9)式中, 两次励磁 K_{L0} 的均取 $t = t_D + t_{CB}$, 以保证外部短路时, 非故障线路电流差动保护两侧的TPY在故障线切除前不应饱和, 以免因CT饱和而误动。

3. 相差保护, 500千伏线路上, 我国无使用相差保护的经验和, 用闭合铁心的TPX抑或带小气隙的TPY, 值得进一步探讨。

4. 开关失灵保护, 应用闭合铁心的CT, 如5P20。当一次侧开关断开后, 二次电流很快衰减, 使开关失灵保护的电流继电器很快返回。但不应用TPY, 因气隙使CT的励磁电流较大, 当一次侧开关断开后, 二次电流慢衰减, 对电流继电器的快速返回不利。

5. 高阻差动保护, 其原理要求用TPS的CT, 拐点电压 $U_K \geq (500 \sim 800)$ 伏便可足够高阻保护的应用。但不应用TPY或5P20, 这2种CT, 误差电流大, 高阻差动保护的整定电流大, 灵敏度下降。

6. 故障录波器, 其原理要求二次电流、二次电压能真实模拟一次侧的值, 难有合适的CT。一般选用TPY, 则直流分量传变误差大, 若用5P20, 则在暂态中CT会饱

和。若用 TPX, 则比较好, 但 TPX 体积大, 价钱高。

7. 故障探测器, 可用 TPY, 利用交流的电、电压分量测距。

8. 电流差动母线保护, 用 5P20, 电流差动保护原理中应包含有 CT 饱和的闭锁功能, 才不会在外部短路 CT 饱和时误动作。

结 束 语

CT 的暂态特性, 近年来已引起各国的重视, 见 IEC185 增刊。无论如何, CT 的暂态特性不能忽视, 尤其是 500 千伏及以上电力系统, CT 的暂态特性对继电保护的 动作影响很大。

本文推荐用拐点电压法来对 CT 的暂态特性进行校核, 并提出了各种不同的保护应用何种 CT 为宜。随着 500 千伏的运行, 必然使人们对 CT 的暂态特性有更全面的认识, 确保电力系统安全可靠运行。

参 考 文 献

[1] IEC185 增刊。

[2] Transient response of current Transformers IEEE Vol. PAS-96, NO. 6, NOV. /Dec. 1977

[3] Nongapped Cores, Antiremanence Cores or Linear Cores for CT.

IEEE Vol. PAS-97, No. 2 Mar/Apr. 1978

(上接第 44 页)

式计数器, 脉冲式计数器为机械式可预置数的, 当计数器达到预置数时, 有输出信号指令发出停机。同时延时计数器计数至减负荷延时整定数时, 有一高电平输出, 同时停止延时计数, 高电平经三极管放大推动小型继电器, 继电器发出减负荷指令和声光信号。这是就一路频率而言的。但同时考虑到保护的可靠性, 增设了低电平闭锁功能, 这样防止了停机停电时误动。同时还增设了双重回路, 即频率下降到整定频率 f_2 时, 必须要在较高频率 f_1 的启动下, f_2 才能有输出, 同时 f_2 反馈给 f_1 进行闭锁, 以防止 f_2 动作的同时 f_1 也动作, 这样可有效的防止了保护的误动。为了防止拒动, 设置了手动试验和自动巡检电路。手动试验能定性地检测电子元件工作好坏; 自动巡检电路可有效地借助微机巡检装置, 对各个频率及时间定值进行定量检测。在进行手动或自动检测时, 累加计数器计数值不改变。此方案不受寿命停电的限制, 它的寿命是永久的 (除电子器件外), 数据也是永久的不会丢失。如时间累加不用机械计数器, 也可用集成电路和液晶显示来构成, 但电子式又存在寿命和停电数据消失的缺点, 尽管可采取措施解决, 但构成保护势必过于繁杂了, 相对可靠性也降低了。

以上在研制低频累加保护时, 所想到的一些问题, 在此向大家交换看法, 以求得新保护更加完善合理, 满足电力系统的要求。