

电流互感器的误差分析与工程计算

曹团结^{1,2}, 张 剑², 尹项根¹, 张 哲¹

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 南京中德保护控制系统有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 电流互感器的正确传变, 是继电保护装置正确工作的前提, 工程实际中经常需要对电流互感器误差作定量的评估或确切的计算。通过对电流互感器稳态误差特性做物理与数学上的分析, 可知电流互感器稳态误差主要来自其励磁阻抗的非线性。建立了以非线性方程组描述的电流互感器误差数学模型, 在此基础上对电流互感器误差计算、伏安特性曲线绘制、10% 误差特性曲线的绘制以及在给定的短路电流下允许最大负荷阻抗的计算等作了原理与方法上的研究与探讨。上述工作可以通过计算机完成, 文中结合工程应用介绍了使用 Matlab 软件的电流互感器误差特性计算机解法。

关键词: 电流互感器; 误差; 伏安特性曲线; 10% 误差曲线; Matlab

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)01-0053-04

0 引言

通常对电流互感器(TA)误差特性的分析分为 2 个方面, 稳态误差与暂态误差^[1-6]。稳态误差特性的分析相对而言较简单一些, 而对暂态特性的分析可能需要考虑到数值仿真的深度或层次才能得到较确切的结果。本文结合工程实际, 对 TA 稳态误差特性做物理与数学上的分析, 并介绍了使用 Matlab 计算软件的 TA 误差特性计算机解法。

运行中的继电保护装置, 出现误动、拒动现象在所难免, 特别是变压器差动保护, 长期以来误动率居高不下。各种差动保护, 如变压器差动保护、线路差动保护、母线差动保护等, 正确动作的前提是首先保证 TA 工作正常^[7-9]。当保护装置出现原因不明的误动作时, 人们总想知道在故障时 TA 二次侧输出的误差到底有多大; 若经简单分析后能判断出 TA 误差超过了 10% 允许范围, 则想知道将二次负荷阻抗减小到多少, 可以将问题消除, 或者, 差动保护门槛值要提高到多少才可避免误动作。

计算的思路一般是:

- a. 判断 TA 在故障电流下有没有超过 10% 误差, 作此判断的计算工作相对简单一点, 若某一 TA 误差没越限, 则可以不再详细计算其确切误差;
- b. 要是超过了 10% 误差, 则超过了多少, 确切值是多少;
- c. 若要将误差限制在 10% 以下, 二次负荷阻抗最多允许多大。

1 TA 稳态误差的物理特性与数学分析

计算 TA 误差, 有 2 种方式, 一是从 TA 结构与

材料参数出发求其稳态误差, 二是由 TA 的伏安特性曲线及等值电路参数求其误差。第 1 种方法需知道 TA 铁芯截面积、磁路长度、气隙长度等参数, 相对较繁琐和困难, 通常在分析暂态误差时使用; 第 2 种方法是日前普遍使用且简单易行的方法。以下由伏安特性曲线计算 TA 误差。

1.1 TA 的等值电路及参数

众所周知, TA 的物理模型可以用 T 型等值电路表示, 如图 1 所示, 图中, Z_1 、 Z_2 、 Z_L 、 Z_e 分别为 TA 一次侧等值阻抗、二次绕组阻抗、二次负载阻抗和等效励磁阻抗; I_1 、 I_2 、 I_e 分别为归算到二次的一次侧电流、二次电流、励磁电流; U_2 为二次负载阻抗上的压降, 箭尾端为高; E 为励磁阻抗上的感应电动势, 箭头端为高(所有参数都已归算到二次侧)。

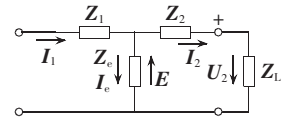


图 1 电流互感器的 T 型等值电路

Fig.1 T-type equivalent circuit of CT

由于励磁阻抗中要流过励磁电流, 所以 $I_1 \neq I_2$, 于是产生了 TA 传变误差 e , $e = (I_1 - I_2) / I_1$ 。图 1 是一个很简单的一阶电路, 若电路全部参数已知, 对任意输入电流 I_1 , 可以通过对此电路列出 2 个独立方程(1)(2)求解 I_2 和 I_e , 从而求出传变误差 e 。

$$E = U_2 + I_2 Z_2 = I_2 Z_L + I_2 Z_2 \quad (1)$$

$$I_1 = I_2 + I_e \quad (2)$$

实际中, 电路图中的 Z_1 串联于电流源中, 对计算无影响, 参数也不必知道, Z_2 、 Z_L 可以直接测量到。困难在于 Z_e 无法直接测量, 也不是一个固定的值, 不能用 $Z_e = E / I_e$ 表示, 因为 Z_e 可能因铁芯饱和而变化。由于 Z_e 未知, 仅由(1)(2)两式不可能求出 I_2 与 I_e , 还需要一个 E 与 I_e 之间的关系式。

1.2 TA 的伏安特性曲线

为得到 E 与 I_e 之间的关系式 $E = f(I_e)$, 一般在

TA 二次侧施加一个电压源,一次侧开路。每给定一个电压值,测量二次回路线上流过的电流 I_e ($I_e=I_2$)。试验方法如图 2 所示,试验中各量满足式(3)的关系。

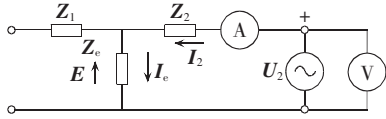


图 2 伏安特性试验接线图

Fig.2 Connection diagram of volt-ampere characteristic test

$$U_2 = E + I_e Z_2 \quad (3)$$

对各个不同的外施电压 U_2 , 可得到不同的 I_e 值, 由此得到一组数据, 将其绘成图 3 所示曲线, 即为电流互感器伏安特性曲线。

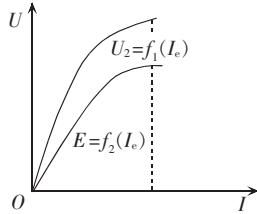


图 3 电流互感器伏安特性曲线

Fig.3 Volt-ampere characteristic curve of CT

1.3 TA 的数学模型

由式(3)变形得:

$$E = U_2 - I_e Z_2 \quad (4)$$

此即为所求 E 与 I_e 之间的关系式 $E = f_2(I_e)$ 。式

(4)在图上表示为 $U_2 = f_1(I_e)$ 曲线减去 $I_e Z_2$, 即 $E = U_2 - I_e Z_2 = f_1(I_e) - Z_2 I_e = f_2(I_e)$, 如图 3 中下面的一条曲线。

应该说明式(4)是由二次侧测得的 E 与 I_e 之间的关系曲线, 实际上, 它与 TA 实际工作时由一次侧提供励磁电流时是相同的。于是可以联立式(1)(2)(4)即方程组(I)求解 I_2 与 I_e 。

$$\begin{aligned} E &= U_2 + I_2 Z_2 = I_2 Z_1 + I_2 Z_2 \\ I_1 &= I_2 + I_e \\ E &= f_2(I_e) \end{aligned} \quad (I)$$

由式(2)推得 $I_2 = I_1 - I_e$, 代入式(1)消去 I_2 , 得方程组(II)。

$$\begin{aligned} E &= I_1 (Z_2 + Z_L) - I_e (Z_2 + Z_L) \\ E &= f(I_e) \end{aligned} \quad (II)$$

方程组(II)就是 TA 稳态误差计算的数学模型。从 3 个方面讨论方程组(II)。

a. 首先, 要明确式(4) $E = f_2(I_e)$ 是一个非线性方程, 因此方程组(II)是一个非线性方程。

b. 非线性方程(4)的解析表达式未知, 只知道此曲线上的一些离散点的值。

c. 解此方程组需知道以下参数与状态量: 一次短路电流与 TA 变比, 由此求得归算到二次侧的 I_1 ; Z_2 ($Z_2 = R_2 + jX_2$); Z_L ($Z_L = R_L + jX_L$)。参数 Z_1 及 Z_e 无需知道。

1.4 TA 参数的简化

方程组(II)是相量方程组, 图 1 中各参数也都是复数。二次绕组电阻 R_2 由 TA 厂家提供, 也可在现场测量, 但二次绕组电抗 X_2 不易测得, 但可以根据经验估计一个二次绕组阻抗角, 然后推算出; 二次

负载电阻 R_L 可以根据二次回路导线数据计算也可在现场直接测量, 但是 X_L 不易得到。为解决上述问题并简化计算, 可将相量方程组(II)化为标量方程组(III), 而其中的参数简单地全部以标量表示。

$$\begin{aligned} E &= I_1 (Z_2 + Z_L) - I_e (Z_2 + Z_L) \\ E &= f(I_e) \end{aligned} \quad (III)$$

这样简化的实质是将二次回路的总阻抗 $Z_2 + Z_L$ 的阻抗角 α 与励磁阻抗 Z_e 的阻抗角 β 看作同一角度。而事实上阻抗角 α 由负荷性质决定, 一般呈阻性, $\alpha \rightarrow 0^\circ$, 而阻抗角 β 由于励磁电抗 X_e 远大于励磁电阻 R_e , 一般呈感性, $\beta \rightarrow 90^\circ$ 。由相量图 4 可见, 这种简化是将误差考虑大了, 结果是偏向于保守(可靠)的。

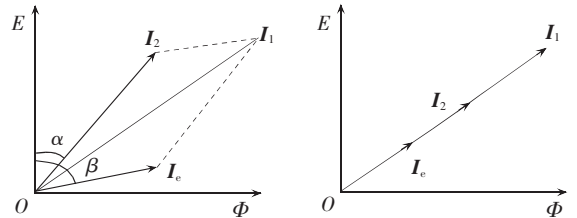


图 4 电流互感器相量图

Fig.4 Phasor diagram of CT

当然, 若想得到确切的解, 最好还是解相量方程组(II)。这种情况下, 在测试电流互感器伏安特性曲线时, 需要以 I_e 为参考相量, 记录 U_2 幅值与相角。但这样做在实际操作时很困难并且收效甚微, 也没有必要, 故本文的误差计算仍以简化方程组(III)为数学模型。

2 TA 数学模型方程组的解法

非线性方程组(III)的解法多种多样, 此处介绍适于工程使用的 2 种解法。

2.1 图解法

一般的图解法由人工进行, 在已绘制的伏安特性曲线图 3(重画于图 5)上, 在 U 轴上找到 $E = I_1 (Z_2 + Z_L)$ 点, 图中表示为 A 点; 在 I 轴上找到 $I = I_1$ 点, 图中表示为 B 点; 连接 A、B 两点得直线 AB, 即方程组(III)中第 1 式的图形。直线 AB 与伏安特性曲线的交点 C 即是方程组(III)的解, 其横坐标即为待求励磁电流 I_e 。

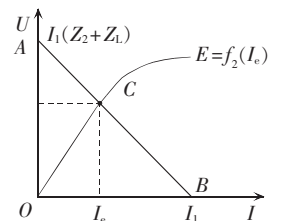


图 5 图解法求电流互感器误差

Fig.5 Calculation of CT error using volt-ampere characteristic curve

图解法也可以借助常用的计算机软件实现。例如, 可以利用常见的 AutoCAD 绘图软件或 Excel 表格处理软件, 按比例画出图形, 然后利用软件本身提供的坐标标识功能提取图 5 中 C 点的横坐标值 I_e 。求得 I_e 以后, 可方便求得 I_2 及传变误差 $e = (I_1 - I_2) / I_1$ 。

2.2 数值解法

图解法简单易掌握,但绘图过程繁琐,精确度也不高,在计算机日益成为普及工具的今天,利用使用方便且功能强大的软件程序解决问题成为可能也很有必要。Matlab 语言是目前工程界流行最广的科学计算语言,它集数值计算、符号运算与图形处理等强大功能于一体,具有非常友好的工作平台、编程环境及接近 Windows 的标准界面,基于 Matlab 语言开发计算软件简单易行,且软件容易为使用者掌握。作者在 TA 稳态误差的物理与数学模型的基础上开发了基于 Matlab 语言的 TA 稳态误差计算软件^[10-11]。程序处理过程如下:

- a. 输入原始数据,包括故障时的短路电流、TA 参数及伏安特性试验测量到的电压、电流数据组;
- b. 由伏安特性试验测量结果,用最小二乘法拟合出 $E=f_2(I_e)$ 曲线的解析表达式;
- c. 将 $E=f_2(I_e)$ 的解析表达式代入非线性方程组(III),用 Newton 迭代法求出 I_e ;
- d. 计算误差 e ,并绘制出伏安特性曲线。

下面给出该计算软件在实际工程应用中的一个例子^[12]。某变电站 35/10 kV 主变压器 10 kV 侧出线附近发生短路故障,引起主变差动保护误动跳闸。经现场调查与检验,是因 35 kV 侧 TA 误差超过 10% 造成的。用误差计算软件分析该 TA 误差,已知条件:

- a. TA 变流比 $n=200/5$;
- b. TA 的伏安特性已经由试验测得,列于表 1 中;

表 1 电流互感器伏安特性试验数据
Tab.1 Volt-ampere characteristic data of tested CT

U/V	I_2/A	U/V	I_2/A
61.16	1	73.06	10
64.11	2	74.87	12
68.58	5	77.14	15
70.89	7	81.24	20

注: U 为外施电压, I_2 为二次电流。

c. 电流互感器的二次绕组电阻 R_2 ,用电桥测得为 0.128Ω ,阻抗角按 35° 计算,二次绕组阻抗计算为 0.156Ω ;

d. 二次负载阻抗 $Z_L=2.25 \Omega$;

e. 通过电流互感器一次绕组的短路电流为 1 508 A。

依照软件提示将上述各已知条件按要求的格式输入,运行后得出 TA 稳态误差为 22.15%。同时绘出的 TA 伏安特性曲线如图 6 所示。

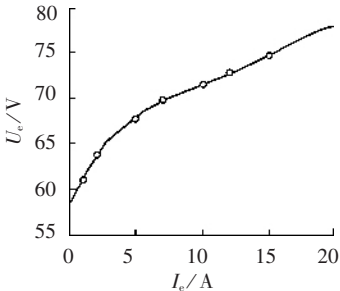


图 6 示例电流互感器伏安特性曲线

Fig.6 Volt-ampere characteristic curve of tested CT

3 电流互感器 10% 误差特性曲线^[13-14]

以上 4 步给出了确切计算 TA 误差的方法。在

实践处理分析保护动作情况时,一般需要先做出某个 TA 是否已经超过了 10% 误差的判断,然后才对越限的 TA 作确切计算。下面是判断 TA 误差是否越 10% 误差的简便方法。

3.1 与铭牌数据对照法

如 10P 20 的 TA,容量 $15 V \cdot A$,若实际二次总负荷阻抗 (Z_2+Z_L) 消耗的容量未超过 $15 V \cdot A$ 并且一次短路电流未超过额定电流的 20 倍,则此 TA 不会超过 10% 的误差;若 TA 二次负载容量大于 $15 V \cdot A$ 且一次短路电流倍数大于 20,则 TA 误差肯定超过 10%。若二次负荷容量与一次短路电流倍数两者中一个越限而另一个还有一定裕度,则 TA 误差未必超标,此时可由下面方法判断。

3.2 计算最大允许二次负载阻抗法

给定某一短路电流值,假设此时 TA 误差恰为 10%,根据伏安特性曲线 $E=f_2(I_e)$,可以计算出此时的最大允许负载阻抗 $Z_{L,max}$ (不含 Z_2)。若实际负载阻抗 $Z_L > Z_{L,max}$,则可推断 TA 误差超过 10%。

设归算到二次侧的一次电流为 I_1 ,则有

$$I_e = 0.1 I_1 \tag{5}$$

$$I_2 = 9 I_e \tag{6}$$

$$E = I_2(Z_2 + Z_{L,max}) = 9 I_e(Z_2 + Z_{L,max}) \tag{7}$$

给定一个 I_e 值,根据伏安特性曲线可以得出一个 E ,将 I_e 与 E 代入式(7)可得:

$$Z_{L,max} = E / (9 I_e) - Z_2 \tag{8}$$

结合式(5)(8)及伏安特性曲线得方程组(IV):

$$\begin{cases} I_e = 0.1 I_1 \\ E = f_2(I_e) \end{cases} \tag{IV}$$

$$Z_{L,max} = E / (9 I_e) - Z_2$$

由方程组(IV)可求出给定 I_1 所对应的最大允许二次负载 $Z_{L,max}$ 。

计及短路电流倍数 m_{10} ,

$$m_{10} = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I'_1}{I_{2N}} = \frac{10 I_e}{5} = 2 I_e \quad (I_{2N} = 5 A) \tag{9}$$

或

$$m_{10} = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I'_1}{I_{2N}} = \frac{10 I_e}{1} = 10 I_e \quad (I_{2N} = 1 A) \tag{10}$$

式中 I_1, I'_1 分别为一次侧电流及其折算到二次侧的值; I_{1N}, I_{2N} 分别为一次侧和二次侧额定电流。

则可由方程组(IV)求出电流互感器的 10% 误差曲线 ($m_{10} - Z_{L,max}$ 曲线)。

计算最大允许二次负载阻抗法也可称为 10% 误差曲线法。事实上,制造厂在 TA 出厂时给出的参数也仅是伏安特性试验数据而非 10% 误差曲线。TA 的 10% 的误差曲线就是利用伏安特性曲线按上述方法求得的。TA 稳态误差计算软件中包含了上述计算功能,并可以自动以图形方式输出电流互感器 10% 误差曲线。图 7 给出了利用该软件绘出的第 2 节例子中电流互感器的 10% 误差曲线(图中 n

① Matlab user's guide. The Mathworks Inc.,1998.

为短路电流倍数, Z_2 为二次负载阻抗), 软件同时也给出了在给定短路电流下的最大允许负荷阻抗(为 1.45Ω)。

顺便指出, 若计算出的 Z_L 大于 $Z_{L,max}$ 则可尝试通过加大 TA 二次导线截面积或并联导线根数减小 Z_L ; 或者若计算出的 TA 误差值超过 10% 不多, 在应急情况下可将差动保护启动门槛整定值适当提高以躲过误动。

4 结论

电流互感器稳态误差主要来源于其励磁阻抗的非线性。非线性的励磁阻抗工程上用一组伏安特性试验数据描述, 而电流互感器的数学模型可以用非线性方程组(II)或(III)表示。利用 Matlab 编写的电流互感器稳态误差计算软件首先用非线性多项式拟合电流互感器的伏安特性曲线, 然后解此非线性方程组。方程组求解以后, 引言中提出的误差与最大允许二次负载阻抗计算问题即迎刃而解。

参考文献:

- [1] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 全国变压器标准化技术委员会. GB 1208-1997(eqv IEC 185-1987) 电流互感器[S]. 北京: 国家技术监督局, 1997.
- [3] 全国变压器标准化技术委员会. GB 16847-1997(idt IEC 44-6 1992) 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S]. 北京: 国家技术监督局, 1997.
- [4] IEEE. IEEE std C37.110-1996 IEEE guide for the application of current transformer used for protective relaying purpose[S]. [S.l.]: IEEE, 1996.
- [5] IEC. IEC 60044-1:2000 Instrument transformers, part 1, the current transformer, accessory 1[S]. Geneva: IEC, 2000.
- [6] 袁季修, 卓乐友, 盛和乐, 等. 保护用电流互感器应用的若干问题——《电流互感器和电压互感器选择和计算导则》简介[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(8): 69-72.

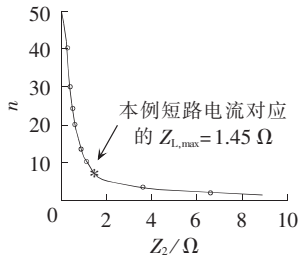


图7 示例电流互感器 10% 误差曲线

Fig.7 10% error curve of tested CT

YUAN Ji-xiu, ZHUO Le-you, SHENG He-le, et al. Some problems on application of current transformers in protection—introduction of “Guide to the selection and calculation of current transformer and voltage transformer” [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(8): 69-72.

- [7] 陈建玉, 孟宪民, 张振旗, 等. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 54-56. CHEN Jian-yu, MENG Xian-min, ZHANG Zhen-qi, et al. Influence of the current transformer saturation on relay unit and its countermeasures in medium voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 54-56.
- [8] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [9] 施雄杰. 变压器差动保护中的两个问题[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(10): 99-101. SHI Xiong-jie. On two factors of transformer differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(10): 99-101.
- [10] 陈怀琛, 吴大正, 高西全. Matlab 及在电子信息课程中的应用[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [11] 刘兴杰, 田建设, 丁波, 等. 应用 Matlab 进行电力系统分析和动态仿真[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 43-45, 49. LIU Xing-jie, TIAN Jian-she, DING Bo, et al. Power system analysis and simulation with Matlab[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 43-45, 49.
- [12] 邹森元. 《电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点》条例分析[M]. 沈阳: 白山出版社, 2000.
- [13] 李维波, 毛承雄, 陆继明, 等. 电流互感器 10% 误差特性曲线测绘技术研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 23-26. LI Wei-bo, MAO Cheng-xiong, LU Ji-ming, et al. Study on test and fitting of 10% error curve for current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 23-26.
- [14] 潘文诚, 唐根宝. 保护用电流互感器全自动伏安特性测试仪研制[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 50-53. PAN Wen-cheng, TANG Gen-bao. Development of automatic volt-ampere characteristic tester for current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 50-53.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

曹团结(1975-), 男, 安徽淮北人, 工程师, 硕士研究生, 从事电力系统微机继电保护与安全自动装置的设计与开发工作(E-mail: tuanjiecao@126.com);

尹项根(1954-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统微机继电保护及自动控制的研究;

张哲(1962-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统微机继电保护及自动控制的研究。

Error analysis and engineering calculation of current transformer

CAO Tuan-jie^{1,2}, ZHANG Jian², YIN Xiang-gen¹, ZHANG Zhe¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Nanjing Sino-German Protection & Substation Control Systems Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: Proper transform of CT(Current Transformer) is the precondition for the proper operation of protective relays. Quantitative evaluation or exact calculation of CT error is always necessary. Based on the physical and mathematical analysis, the static error of CT is found mainly from the nonlinearity of its exciting impedance. Mathematical model of CT error is represented by nonlinear equations, based on which, the CT error calculation, volt-ampere characteristic curve drawing and 10% error characteristic curve drawing, permitted maximal load impedance calculation with given short-circuit current are discussed in principle and methodology. All these can be done with computer. Combined with an engineering application, the computer solution using Matlab is introduced.

Key words: current transformer; error; volt-ampere characteristic curve; 10% error curve; Matlab