

DOI: 10.7667/PSPC160131

## 基于分段拟合算法的电流互感器误差研究

周雪青<sup>1</sup>, 郝晓光<sup>1</sup>, 张岩坡<sup>2</sup>, 赵宇皓<sup>1</sup>

(1. 国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 国网河北省电力公司检修分公司, 河北 石家庄 050071)

**摘要:** 电流互感器的传变误差直接影响继电保护动作的可靠性。然而利用现场测试数据无法直接预估大倍数短路电流时的励磁电流, 很难对传变误差作定量评估和确切计算。提出利用三次样条插值和指数函数综合解析表达式, 对原始数据分段处理拟合伏安特性曲线, 可完整描述线性区和饱和区伏安特性, 准确求出饱和区内的励磁电压和励磁电流值, 从而计算出大倍数短路电流时电流互感器的传变误差和二次最大允许负载。通过与多组实测数据对比, 验证了该算法拟合精度高, 计算结果准确, 具有较好的工程应用价值。

**关键词:** 电流互感器; 10%误差曲线; 伏安特性曲线; 分段拟合

### Research on the error of current transformer based on subsection fitting algorithm

ZHOU Xueqing<sup>1</sup>, HAO Xiaoguang<sup>1</sup>, ZHANG Yanpo<sup>2</sup>, ZHAO Yuhao<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Maintenance Company, Shijiazhuang 050071, China)

**Abstract:** Proper transform of Current Transformer (CT) is the precondition for the proper operation of protective relays. However, the field test data can not be directly used to predict the excitation current when large short circuit current, it's hard to make a quantitative evaluation or exact calculation of CT error. A comprehensive analytic expression of three spline interpolation and exponential function is proposed. It uses a subsection processing to fit I-V character curve, which can completely describe the linear and saturation regions of I-V character and obtain the excitation voltage and current value of the saturated region, thus it can calculate the transmission error and the maximum allowable load of the current transformer when short circuit fault occurs. After verification with the measured data, the measured data can be well fitted and the calculated results are accurate. Results show it has a good engineering application value.

**Key words:** current transformer; 10% error curve; V-A character curve; subsection fitting

## 0 引言

电流互感器(Current Transformer, CT)用于保护、测量等回路, 其作用是将电力设备中强电流信号转换成二次使用的弱电流信号。CT 运行性能的好坏直接关系到继电保护的可靠性和测量计量的准确性<sup>[1-5]</sup>。而 10%误差曲线作为其重要特性参数, 能够直观反映出一次电流和二次负载的制约关系, 工程计算中常常需要此参数。

当电网发生短路故障, 穿过 CT 的短路电流超过其设计允许的准确限值后, 电流互感器可能发生饱和(与其所带二次负载有关), 饱和后电流互感器的一、二次电流已不是正常的线性关系, 传变误差

将超过相关规程规定的允许值, 误差过大将导致继电保护在原设定保护范围内误动或拒动<sup>[6-13]</sup>。因此通过电流互感器的伏安特性数据, 验算电流互感器的 10%误差是否满足要求, 具有重要意义。

目前, 电流互感器伏安特性的电压电流数据只能做到 CT 饱和点附近, 此饱和点对应的励磁电流较小, 通常小于二次额定电流<sup>[14-15]</sup>。因此, 对于流过 CT 的最大短路电流, 特别是越限短路电流, 没有相应伏安特性数据可以参考, 无法直接获取此种情况下的励磁电流和励磁电压, 这样就限制了 CT 短路电流传变误差的准确计算。

本文提出采用三次样条插值和指数函数综合解析表达式拟合伏安特性曲线<sup>[16]</sup>, 计算出 CT 一次侧

最大短路电流，特别是越限短路电流时的精确误差值、10%误差曲线和二次最大允许负载。根据现场实测数据，能非常好地拟合伏安特性曲线，计算结果准确，具有较广泛的工程应用价值。

## 1 CT 模型与 10%误差分析

### 1.1 CT 模型

CT 伏安特性曲线是  $U_2$  与  $I_2$  的关系曲线<sup>[17-19]</sup>。现场测试时，将互感器一次绕组开路，二次绕组与二次负载断开并通入交流电压  $U_2$ ，测试二次电流  $I_2$ ，可以得到一组伏安特性数据，如图 1 所示。

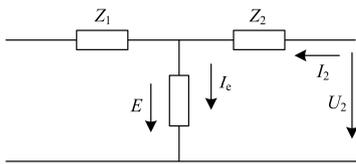


图 1 伏安特性测试等值电路图

Fig. 1 V-A character test equivalent circuit diagram

图 1 中， $E$  为励磁电压， $I_e$  为一次额定电流， $Z_2$  为二次绕组阻抗， $I_2$  为二次电流， $U_2$  为二次电压。测量伏安特性数据时，由于一次绕组开路，故  $I_2=I_e$ ，励磁特性关系式如式(1)。

$$E = U_2 - I_e Z_2 \quad (1)$$

由于励磁绕组的饱和特性，伏安特性曲线为非线性曲线，励磁方程改写为非线性方程，如式(2)。

$$E = f(I_e) \quad (2)$$

该方程解析表达式未知，只能求得此方程的离散点。

CT 二次侧接入二次负载后，其等值电路如图 2 所示。

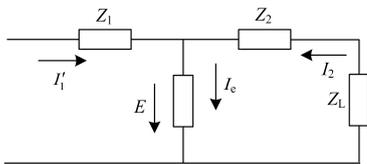


图 2 接入二次负载的等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram with load

图 2 中， $I'_1$  为 CT 归算到二次侧的一次电流， $Z_L$  为 CT 二次负载，励磁电压  $E$  的表示如式(3)。

$$E = (I'_1 - I_e) \times (Z_2 + Z_L) \quad (3)$$

在当前二次负载下，系统发生短路故障时， $I_{jd}$  表示当前的励磁电流， $E_{jd}$  表示当前的励磁电压，假设一次电流为  $I_1$ ，一次额定电流为  $I_{1N}$ ，二次额定电流为  $I_{2N}$ ，则短路电流倍数  $m_{10}$  和归算到二次侧的一

次电流  $I'_1$  表示如式(4)、式(5)。

$$m_{10} = \frac{I_1}{I_{1N}} \quad (4)$$

$$I'_1 = m_{10} \times I_{2N} \quad (5)$$

CT 误差值计算如式(6)。

$$e = \frac{I_{jd}}{I'_1} = \frac{I_{jd}}{m_{10} \times I_{2N}} \quad (6)$$

在短路故障情况下， $U_2$  和  $I_2$  很大，现场无法试验获取这些值，也就无法计算此时的励磁电流  $I_{jd}$ ，限制了短路情况下 CT 误差值的校核计算。

### 1.2 10%误差分析

当 CT 误差满足 10%误差曲线时，归算到二次侧的一次电流为励磁电流的 10 倍，则

$$I_e = \frac{I'_1}{10} = \frac{m_{10} \times I_{2N}}{10} \quad (7)$$

假设传变误差为 10%时二次侧最大允许负载为  $Z_{en}$ ，联立式(1)、式(3)、式(7)求解可得

$$Z_{en} = \frac{U_2 - m_{10} I_{2N} Z_2}{9 m_{10} I_{2N}} - Z_2 \quad (8)$$

式(8)中的  $U_2$  指 CT 传变误差为 10%时的二次电压值，此值在 CT 的饱和区。然而现场测试的伏安特性数据最多到 CT 饱和点附近，无法获取传变误差为 10%的  $U_2$  值。

因此，考虑根据现场试验数据来拟合求解短路发生时的  $I_{jd}$  值和传变误差为 10%的  $U_2$  值是十分必要的。本文提出一种基于三次样条插值和指数函数分段拟合算法来解决此问题。

## 2 三次样条插值和指数函数分段拟合算法

### 2.1 三次样条插值算法介绍

所谓插值法是利用函数在某区间中插入若干点的函数值，作出适当的特定函数，在这些点上取已知值，在区间的其他点上用这特定函数的值作为函数的近似值，这种方法称为插值法。

三次样条插值法是通过一系列值点拟合成一条光滑曲线。此法在实际计算时需要引入边界条件才能完成计算，只能保证各小段曲线在连接点的连续性，曲线在边界点外拟合趋势不准确，即在伏安特性饱和区的曲线趋势不能满足工程计算要求。

### 2.2 指数函数拟合算法介绍

曲线拟合是指选择适当的曲线类型来拟合观测数据，并用拟合的曲线方程分析两变量间的关系。本文中采用的指数函数如式(9)。

$$U_2 = \alpha e^{\beta/I_2} \quad (9)$$

两边取对数可转化为一次方程形式  $y=ax+b$ 。以  $y$  和  $x$  绘制的散点图呈直线趋势时, 可考虑采用指数函数来描述  $U_2$  和  $I_2$  间的非线性关系。指数函数能很好地拟合伏安特性饱和区的曲线趋势, 但是其函数本身的特点决定不能描述伏安特性的完整过程。

### 2.3 分段拟合算法的提出

为了克服三次样条插值法在伏安特性饱和区的曲线趋势和指数函数不能描述伏安特性的完整过程两类局限性, 考虑到 CT 最大短路电流时励磁绕组的饱和特性, 并且工程实际中又想得到完整的伏安特性曲线, 采用基于三次样条插值和指数函数分段拟合的算法, 综合解析表达式拟合伏安特性曲线, 可最终计算出当流过电流互感器一次侧短路电流时的误差值和 10% 误差曲线。

## 3 算例分析

本文使用该算法对某 220 kV 变电站 CT 误差进行校核, 该 CT 型号为 LB9-220W2, 其中铭牌参数为 10P15, 1200/5, 30 VA; 越限短路电流为 18 kA; 三相短路  $k^{(3)}$  和单相接地短路  $k^{(1)}$  电流分别为 27.12 kA, 22.21 kA。

### 3.1 CT 计算数据选取

根据现场测试数据获取 CT 伏安特性试验数据, 如表 1 所示。

表 1 CT 伏安特性试验数据

Table 1 V-A characteristic data of tested CT

$I_2/A$	$U_2/V$	$I_2/A$	$U_2/V$
0.1	282	3.0	295
0.3	283	5.0	300
0.5	284	10	305
1.0	286	15	307

二次绕组负载  $Z_L$  取现场实测值, 现场 CT 二次侧多为星形接线, 二次负载为单相测试结果, 其计算如式(10)。

$$Z_{L,1} = 2Z_a + Z_b + Z_c \quad (10)$$

式中:  $Z_a$  为导线电阻;  $Z_b$  为保护装置电流线圈电阻;  $Z_c$  为接触电阻。计算三相短路阻抗时, 如式(11)。

$$Z_{L,3} = \frac{Z_{L,1} + Z_b + Z_c}{2} \quad (11)$$

二次绕组阻抗定义为二次绕组直流电阻, 算例中二次绕组电阻值为校正至 75°C 时的电阻值。

暂态系数  $K$  的选取, 应考虑短路电流非周期分量和互感器剩磁等的暂态影响、系统暂态问题的严重程度、保护装置的特性、暂态饱和可能引起的后果和运行经验等因素, 本算例中暂态系数取 2.0。

为更全面评估该 CT 特性, 以三相短路  $k^{(3)}$  和单相接地短路  $k^{(1)}$  时的短路电流分别计算。获取 CT 计算参数, 如表 2 所示。

表 2 CT 短路参数

Table 2 Short circuit parameters of CT

故障类型	$Z_2/\Omega$	$Z_1/\Omega$	$Km_{10}$
$k^{(3)}$	0.389	1.06	45.02
$k^{(1)}$	0.389	1.98	37.02

### 3.2 伏安特性曲线的分段拟合

伏安特性曲线采用分段拟合算法进行拟合, 线性区域采用三次样条插值法, 饱和区域采用指数函数算法。所拟合的伏安特性曲线如图 3 所示。

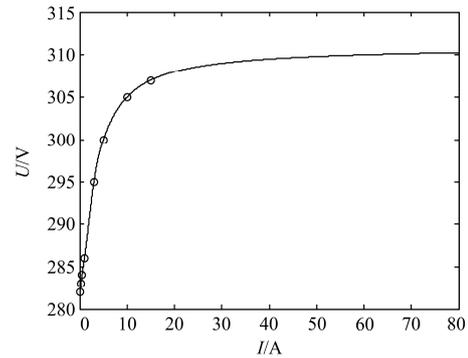


图 3 基于分段拟合的伏安特性曲线

Fig. 3 V-A character curve based on subsection fitting

图 3 中, 圆圈代表伏安特性现场测试数据点, 其均方误差  $\delta=0.0013$ 。

为对拟合效果进行分析, 采用四次多项式函数进行拟合, 所拟合伏安特性曲线如图 4 所示。

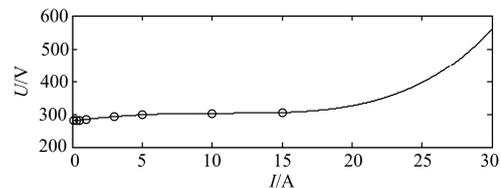


图 4 基于多项式拟合的伏安特性曲线

Fig. 4 V-A character curve based on polynomial fitting

图 4 中的伏安特性曲线走向已明显错误, 均方误差  $\delta=0.6777$ 。对比图 3 和图 4 可以发现, 分段拟合法不仅误差小、拟合程度高, 而且能够准确拟合伏安特性走向, 反映 CT 饱和趋势和程度, 该拟合法伏安特性数据测到饱和点附近, 现场测试一般都可以满足该要求。

### 3.3 励磁曲线的拟合和误差计算

根据式(1)和分段拟合得到的伏安特性曲线可拟合出式(2)表示的励磁曲线, 如图 5 所示。

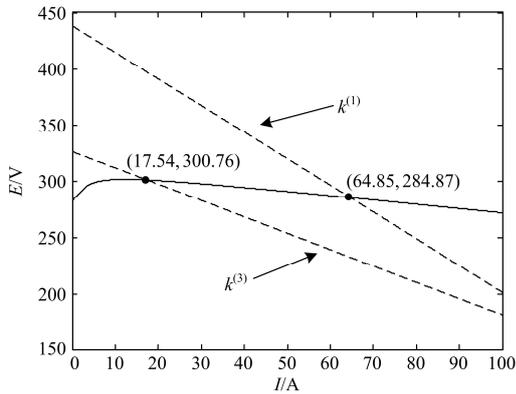


图 5 励磁曲线  
Fig. 5 Excitation curve

图 5 中，实线表示所拟合的励磁曲线，虚线表示  $k^{(3)}$  和  $k^{(1)}$  短路发生时，在当前二次负载情况下励磁电流和励磁电压的线性关系，实线和虚线的交点即为当前的励磁电流  $I_{jd}$  和励磁电压  $E_{jd}$ 。根据  $I_{jd}$ ，由式(6)求得该 CT 的精确误差值， $k^{(3)}$  和  $k^{(1)}$  短路情况下的精确误差值分别为 7.79% 和 35.05%。

### 3.4 10%误差特性曲线

根据式(8)可计算出  $k^{(3)}$  和  $k^{(1)}$  短路时的二次最大允许负载  $Z_{en}$ ，分别为  $1.09 \Omega$  和  $1.42 \Omega$ 。并拟合得到当前  $Z_2$  下的 10% 误差曲线，即变比误差为 10% 时  $m_{10}$  和  $Z_{en}$  的关系特性曲线，如图 6 所示。

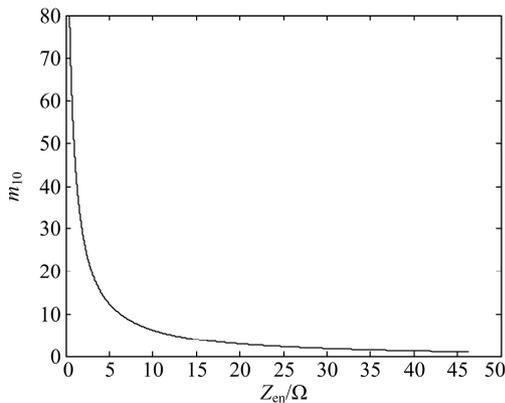


图 6 10%误差特性曲线  
Fig. 6 10% error curve

通过对精确误差值  $e$  和二次最大允许负载  $Z_{en}$  计算结果分析，发生  $k^{(3)}$  短路时 CT 误差小于 10%，同时  $Z_{en} > Z_L$ ；发生  $k^{(1)}$  短路时 CT 误差大于 10%， $Z_{en} < Z_L$ 。由此可知，误差计算结果与二次最大允许负载比较结果相互吻合，基于分段拟合算法的 CT 误差计算非常准确。

## 4 结论

本文中 CT 误差计算利用三次样条插值和指数

函数分段拟合的方法，能完整拟合伏安特性曲线，获得饱和区内电流电压值，计算出不同短路故障情况下的精确误差值、二次最大允许负载和 10% 误差曲线。该算法已在多个变电站开展 CT 误差分析和二次负载校核工作，经过与多组实测数据验证，能够很好地拟合实测数据，误差值与二次最大允许负载比较结果互相吻合。通过对 CT 短路情况下的误差计算，可对 CT 进行是否超差评估，加强对 CT 的管控能力，提高该运行设备状态水平，增加保护的可靠性。当评估出 CT 超差时，应予以措施解决，包括限值一次系统短路水平、增大保护 CT 变比、减小 CT 二次负载、更换抗饱和和特性较好的 CT 等措施。

## 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] Q/GDW 690-2011 电子式互感器现场校验规范[S]. 2010.
- [3] 陈丽艳, 何奔腾, 钱国明, 等. 基于二次电流下降的电流互感器饱和判别方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 59-63.  
CHEN Liyan, HE Benteng, QIAN Guoming, et al. Detection method for current transformer saturation based on the dropping of the secondary current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 59-63.
- [4] 李振华, 李红斌, 张秋雁, 等. 一种高压电子式电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 229-236.  
LI Zhenhua, LI Hongbin, ZHANG Qiuyan, et al. An online calibration system for high voltage electronic current transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 229-236.
- [5] 闫艳霞, 崔建华. 基于双向直流法的电磁式电流互感器剩磁测量仪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 137-142.  
YAN Yanxia, CUI Jianhua. Residual flux measuring instrument for electromagnetic current transformer based on bidirectional DC method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 137-142.
- [6] 李谦, 张波, 蒋榆宽, 等. 变电站内短路电流暂态过程及其影响因素[J]. 高电压技术, 2014, 40(7): 1986-1993.  
LI Qian, ZHANG Bo, JIANG Yukuan, et al. Transient process of short-circuit current in substations and its influential factors[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7): 1986-1993.
- [7] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.

- LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transformer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [8] 金明亮, 尹项根, 游大海. 复杂和应涌流导致差动保护误动的原因与对策[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 86-93.  
JIN Mingliang, YIN Xianggen, YOU Dahai. Reason of differential protection mal-operation caused by complex sympathetic inrush and its countermeasure[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 86-93.
- [9] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-76.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-76.
- [10] 王振浩, 王学斌, 李国庆, 等. 计及直流偏磁的保护用电流互感器仿真与实验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 15-22.  
WANG Zhenhao, WANG Xuebin, LI Guoqing, et al. Analysis of simulation and experiment on the characteristic of the current transformer used for protection affected by DC magnetic bias[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 15-22.
- [11] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.  
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.
- [12] 闫丽梅, 祝玉松, 徐建军, 等. 基于分数阶微积分理论的线路模型建模方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 260-268.  
YAN Limei, ZHU Yusong, XU Jianjun, et al. Transmission lines modeling method based on fractional order calculus theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 260-268.
- [13] 罗慧, 周卿松, 苗洪雷. 基于 LMD 母线差动保护 CT 饱和和检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 49-54.  
LUO Hui, ZHOU Qingsong, MIAO Honglei. A method for CT saturation detection based on LMD in busbar differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 49-54.
- [14] 陈丽, 李佳琦, 贾清泉, 等. 一种电流互感器饱和误差补偿算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 41-44.  
CHEN Li, LI Jiaqi, JIA Qingquan, et al. An error compensation algorithm for saturated current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 41-44.
- [15] 郭耀珠, 石光, 刘华, 等. 保护用电流互感器 10% 误差曲线现场测试及其二次负载校核[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 101-104.  
GUO Yaozhu, SHI Guang, LIU Hua, et al. The field test on secondary load of current transformer and the calculation of its 10% error[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 101-104.
- [16] 王一清, 阮江军, 杨志强. 一种基于广义逆的电流互感器励磁特性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 90-94.  
WANG Yiqing, RUAN Jiangjun, YANG Zhiqiang. A method to analyze the excitation characteristics of current transformer based on Moore-Penrose inverse algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 90-94.
- [17] 张健康, 粟小华, 胡勇, 等. 智能变电站保护用电流互感器配置问题及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 140-145.  
ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, HU Yong, et al. Problems and solutions of configuration scheme of current transformer used by protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 140-145.
- [18] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于数学形态的电流互感器饱和和识别判据[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 44-48.  
LIN Xiangning, LIU Pei, GAO Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 44-48.
- [19] 童悦, 李红斌, 张明明, 等. 一种全数字化高压电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2010, 24(8): 59-64.  
TONG Yue, LI Hongbin, ZHANG Mingming, et al. A full digital high voltage current transformer online calibration system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 24(8): 59-64.

收稿日期: 2016-01-23; 修回日期: 2016-03-07

作者简介:

周雪青(1987-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置。E-mail: 18031169498@163.com

(编辑 魏小丽)