

# 基于 PSCAD / EMTDC 的带气隙电流互感器建模及仿真

黄莉<sup>1</sup>, 杨卫星<sup>2,3</sup>, 张雪松<sup>4</sup>

(1. 浙江同济科技职业学院机电系, 浙江 杭州 311231; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310013;  
3. 浙江省电力设计院, 浙江 杭州 310014; 4. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 在分析 TPY 级电流互感器铁芯特点、电流基本方程和铁芯磁化特性的基础上, 借助 PSCAD 仿真程序自定义元件的方法建立了 TPY 级电流互感器仿真模型。详细说明了模型建立的过程及步骤, 并对模型的外观及参数设置进行了阐述。从仿真计算实例可以看出, 新建的 TPY 级电流互感器模型由于气隙的存在不易发生铁芯饱和现象, 由此证明了该模型的合理性, 为 PSCAD/EMTDC 中的超高压系统电磁暂态仿真计算提供具有良好暂态特性的电流互感器模型。

**关键词:** TPY 级电流互感器; PSCAD/EMTDC; 暂态特性; 建模; 仿真

## Modeling and simulation of current transformer with air-gap based on PSCAD/EMTDC

HUANG Li<sup>1</sup>, YANG Wei-xing<sup>2,3</sup>, ZHANG Xue-song<sup>4</sup>

(1. Department of Electromechanical Engineering, Zhejiang Tongji Vocational College of Science & Technology, Hangzhou 311231, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310013, China;  
3. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310014, China;  
4. Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the core's characteristic, current's basic equations and core's magnetizing property, a model of TPY current transformer is established with the help of simulation program custom components in PSCAD. The process of modeling, the model's interface and parameters' setting are introduced. Simulation example shows that the new model of TPY current transformer does not have the core saturation because of the air-gap and thus proves its validity. The model can provide a new current transformer model with good transient performance for electromagnetic transient simulation and computation of UHV power system in PSCAD / EMTDC.

**Key words:** TPY current transformer; PSCAD / EMTDC; transient performance; modeling; simulation

中图分类号: TM452 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0178-05

## 0 引言

电流互感器(CT)作为电流信号传变元件, 电力系统的继电保护装置都是通过它反映被保护元件中流过的电流。电流互感器的暂态特性对快速和高灵敏度的继电保护装置的动作为有着相当重要的影响, 是高压和超高压电力系统继电保护所必须考虑的问题。文献[1-5]论述了电流互感器暂态特性的仿真与分析, 对铁芯的磁化特性模型提出了不少的方法。

根据电流互感器类型选择原则, 330~500 kV 系统保护、高压侧为 330~500 kV 的变压器和 300 MW 及以上发电机变压器组差动保护用的电流互感器, 由于系统一次时间常数较大, 普通 P 类电流互感器

暂态饱和较为严重, 由此导致保护误动和拒动的后果严重。因此一般应选用暂态特性良好的 TPY 级电流互感器。目前世界上被广泛使用的电磁暂态仿真程序之一 PSCAD/EMTDC 没有给我们提供一个较为完善的保护类电流互感器模型, 其自带元件库中提供的模型采用的是目前工程中应用较为广泛的 Jiles-Atherton 铁磁磁滞模型<sup>[6-8]</sup>, 该模型的磁化曲线采用改进的 Langevin 函数进行模拟, 但是所需要的  $\alpha$ 、 $c$ 、 $k$  等参数在实际中很难获得, 因此给模型的使用带来极大不便。此外, 该模型的铁芯是没有气隙的, 暂态特性不能满足高压和超高压系统仿真要求。

本文在吸收上述电流互感器暂态特性分析及建模方法的基础上, 利用 PSCAD 自定义模块的方法,

建立了 TPY 级电流互感器的元件模型, 为高压和超高压系统电磁暂态的仿真分析提供了一个具有良好暂态特性的互感器模型。

## 1 TPY 级电流互感器的数学模型

### 1.1 基本特点

TP 类电流互感器是考虑暂态条件的保护用电流互感器, 要求在规定的暂态条件下保证规定的准确性。作为其类型之一的 TPY 级电流互感器的铁芯存在小气隙, 气隙长度为铁芯平均磁路长度的 0.01%~0.1%, 静态剩磁系数  $K_r \leq 0.1$ 。由于为小气隙环形铁芯, 励磁阻抗减小, 二次闭合回路时间常数相应减小, 动态剩磁的衰减加快, 有利于改善暂态误差, 以适应继电保护装置的要求。同时励磁阻抗的减小使励磁电流增大, 对一次短路电流中非周期分量的传变能力变差。但稳态误差略有增加, 可采取相应措施既满足继电保护对稳态误差和额定二次容量的要求, 又满足对暂态误差的要求。

### 1.2 基本方程

CT 的简化等值电路如图 1 所示。图中忽略了铁心损耗电阻  $R_0$ , 并把二次绕组电阻和电抗分别与二次负荷电阻和电抗合并成  $R_2$  和  $X_2$ , 且一次侧电流  $i_1$  和励磁电流  $i_0$  已折算到二次侧。

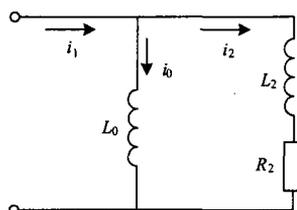


图 1 CT 的简化等值电路  
Fig.1 Equivalent circuit of CT

由图 1 可知, 电流互感器的基本关系式为:

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$i_2 = i_1 - i_0 \quad (2)$$

励磁电流  $i_0$  为未知量, 而一次电流变换的准确度就取决于这个电流。从方程式中消去  $i_2$  即可得出线性微分方程式

$$\frac{di_0}{dt} + \frac{R_2 i_0}{L_0 + L_2} = \frac{L_2}{L_0 + L_2} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{R_2 i_1}{L_0 + L_2} \quad (3)$$

设  $T_0 = L_0 / R_2$ ,  $T_2 = L_2 / R_2$ , 在实际条件下,  $T_2$  大体上处在  $0 \leq T_2 \leq 0.0018$  s 的范围内, 故可认为  $T_2 \approx 0$ 。于是式 (3) 可简化为

$$\frac{di_0}{dt} + \frac{i_0}{T_0} \approx \frac{i_1}{T_0} \quad (4)$$

$$\text{即} \quad T_0 \frac{di_0}{dt} + i_0 = i_1 \quad (5)$$

假如采样时间间隔取得很小, 则  $\frac{di_0}{dt} \approx \frac{\Delta i_0}{\Delta t}$ ,

于是式 (5) 可改写为

$$T_0 \frac{\Delta i_0}{\Delta t} + i_0 = i_1 \quad (6)$$

在  $t_{n+1}$  时刻, 对应式 (6) 有

$$T_0(n) \frac{\Delta i_0(n)}{\Delta t} + i_0(n+1) = i_1(n+1) \quad (7)$$

设时间间隔内的励磁电流变化量为  $\Delta i_0(n)$ , 则在时刻  $t_{n+1} = t_n + \Delta t$  的励磁电流可近似记作:

$$i_0(n+1) = i_0(n) + \Delta i_0(n) \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (7), 可得

$$T_0(n) \frac{\Delta i_0(n)}{\Delta t} + \Delta i_0(n) = i_1(n+1) - i_0(n) \quad (9)$$

$$\text{即} \quad \Delta i_0(n) = \frac{i_1(n+1) - i_0(n)}{1 + T_0(n) / \Delta t} \quad (10)$$

其中,  $T_0(n) = L_0(n) / R_2$

对于带小气隙的 TP 类电流互感器, 总的励磁支路电感  $L_0(n)$  可用气隙支路电感  $L_3(n)$  和铁芯钢片支路电感  $L_{CT}(n)$  并联得到的等效电感表示<sup>[9]</sup>, 即

$$L_0(n) = \frac{L_3(n) \cdot L_{CT}(n)}{L_3(n) + L_{CT}(n)}$$

若是不带气隙的 P 类电流互感器,  $L_0(n) = L_{CT}(n)$ ,  $L_{CT}(n)$  由电流互感器磁化曲线的仿真模型动态求得。

### 1.3 磁化过程的描述

电流互感器的铁芯具有非线性的磁化特性, 对电流互感器磁化过程的合理描述是系统建模的关键。稳态和暂态情况下, 电流互感器铁芯的磁化过程是不相同的。稳态情况下, 铁心的磁化过程是沿某确定的磁滞回线循环。暂态情况下, 由于暂态磁通既包含周期性正弦分量又包含非周期性分量, 导致铁心的磁化过程是沿着一系列不规则的局部磁滞回环变化。根据铁芯的磁化过程特征, 对不同励磁电流段内的磁化曲线分区间进行描述。TPY 级电流互感器铁芯的多值磁滞特性可近似表示为一个基本磁化曲线和包含在其内部的局部磁滞回环族。关于基本磁化曲线的模拟, 目前常见的方法是应用某种曲线拟合, 如反正切函数拟合、高次多项式拟合、



### 2.3 模型外观及界面

TPY 级电流互感器模型的外观如图 3 所示, 其中 CT\_TPY.f 是实现元件功能的 Fortran 函数子程序。通过双击互感器模型, 可以进入元件参数设置对话框。描述 TPY 级 CT 的相关参数被分为三类, 设置了对应的三个参数输入对话框, 分别为 main 参数、material 参数和 load 参数对话框, 通过下拉式菜单可以选择相应的对话框。

如图 4 所示, main 参数对话框中包含的参数主要有线圈匝数、铁芯截面积、铁芯平均磁路长度、气隙长度、剩磁和铁芯类型等。Material 参数对话框主要是磁化曲线的辅助参数。Load 参数对话框中包含的参数主要是二次负荷参数, 界面如图 5 所示。用户通过参数设置可得到所需的 TPY 级 CT 模型。

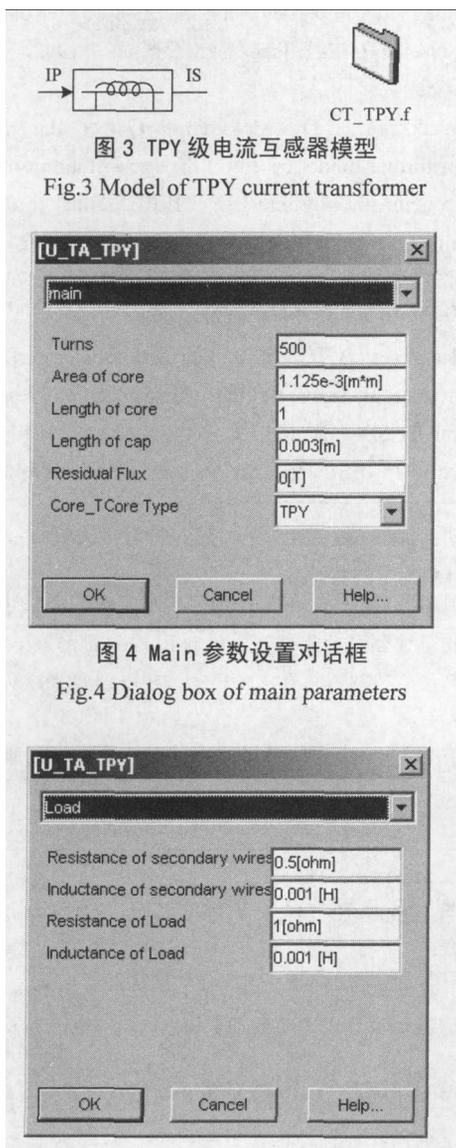


图 3 TPY 级电流互感器模型

Fig.3 Model of TPY current transformer

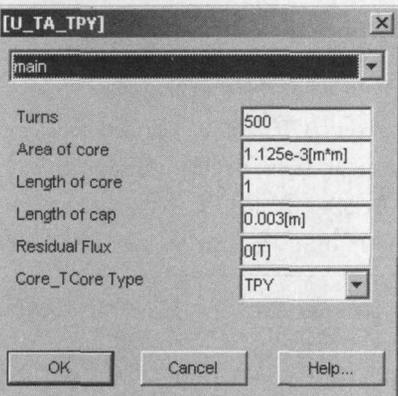


图 4 Main 参数设置对话框

Fig.4 Dialog box of main parameters

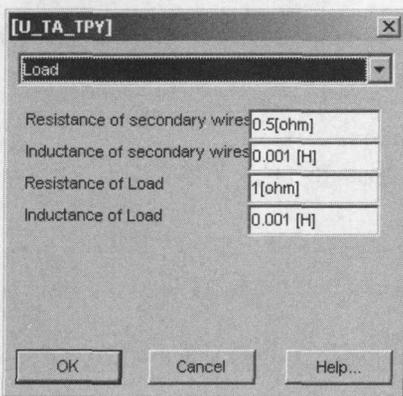


图 5 Load 参数设置对话框

Fig.5 Dialog box of load parameters

### 3 仿真计算实例

假定一次侧故障电流为  $i_1 = 5e^{-t/0.1} - 5\cos 314t$  (kA), 故障时刻为 1.02 s, 根据变比  $n = 500/1$ , 准确等级为 10P20 电流互感器选用原则, 仿真电流互感器参数选取如下: 铁芯平均磁路长度  $l = 100$  cm, 铁芯截面积  $S = 11.25$  cm<sup>2</sup>, 铁芯气隙长度  $l_0 = 0.3$  cm, 二次侧负载为  $r_2 = 1$  Ω,  $x_2 = 0.314$  Ω。用 TPY 级 CT 仿真出来的一次侧和二次侧电流波形如图 6 所示。为了便于对比, 用相同准确度等级的 P 类电流互感器进行仿真, 得到如图 7 所示的仿真结果。

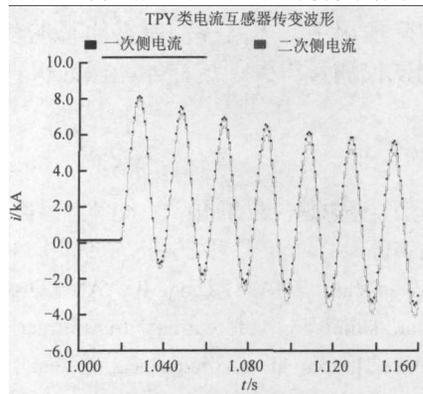


图 6 TPY 级电流互感器的仿真结果

Fig.6 Simulation result of TPY current transformer

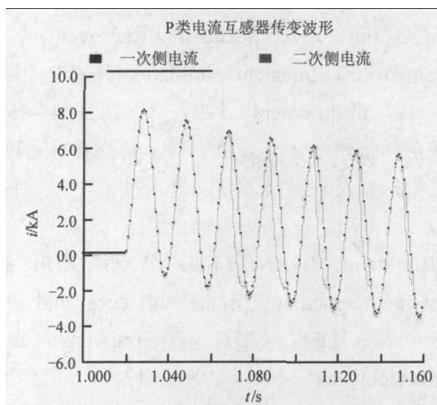


图 7 P 类电流互感器的仿真结果

Fig.7 Simulation result of P current transformer

根据图 6 和图 7 的仿真结果可以看到, 在相同准确等级条件下, 当传输较大故障电流时, P 类电流容易发生饱和现象, 而自定义的 TPY 级互感器由于铁芯小气隙的存在未发生饱和现象, 与现场相符, 符合 TP 类电流互感器在最严重的暂态条件下不饱和的要求。由仿真计算得到的最大峰值瞬时误差为 8%。以上可见, 采用 PSCAD 自定义元件方法建立的 TPY 级电流互感器模型是合理的, 为高压和超高压系统电磁暂态的仿真计算提供了暂态特性良好的

互感器模型。

### 4 结论

(1) 借助PSCAD自定义元件方法建立的具有小气隙环形铁芯的TPY级电流互感器模型调用简单, 可通过灵活设置线圈匝数、铁芯截面积、气隙长度及二次负荷等各种相关参数调节互感器的性能, 满足用户需要。

(2) 仿真计算实例表明该模型的合理性, 该模型的建立丰富了PSCAD/EMTDC仿真程序的互感器元件模型, 为基于PSCAD的继电保护仿真提供了前提。

在实际应用中, 本文模型所需的基本参数要通过CT测试仪测量得到, 这样才能保证仿真结果与实际相符。

### 参考文献

[1] 刘万顺, 张忠理, 杨奇逊, 等. 电流互感器暂态过程的数字仿真[J]. 电路与系统学报, 1996, 1(1): 70-74. LIU Wan-shun, ZHANG Zhong-li, YANG Qi-xun, et al. Digital simulation of current transformer transient response[J]. Journal of Circuits and Systems, 1996, 1(1): 70-74.

[2] 张军, 朱声石. 电流互感器暂态仿真数学模型的改进[J]. 电力自动化设备, 1997, 17(3): 44-46. ZHANG Jun, ZHU Sheng-shi. Improvement in math model for CT transient simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 1997, 17(3): 44-46.

[3] 余保东, 张粒子, 杨以涵, 等. 电流互感器铁芯的暂态磁化模型及误差计算[J]. 电工技术学报, 1998, 13(6): 25-30. YU Bao-dong, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han, et al. The transient magnetizing model of core and the error computation for CT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(6): 25-30.

[4] 胡晓光, 王哲, 于文斌. 电流互感器暂态过程的仿真

与分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(4): 12-15. HU Xiao-guang, WANG Zhe, YU Wen-bin. The transient simulation and analysis of current transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPASA, 2001, 13(4): 12-15.

[5] James G Frame, Narendra Mohan, Liu Tshuei. Hysteresis modeling in an electromagnetic transients program[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(4): 3403-3411.

[6] Jiles D C, Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986, 61: 48-60.

[7] Thoeke J B, Jiles D C, Devine M K. Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Trans on Magnetics, 1992, 28(1): 27-35.

[8] Annakkage U D, McLaren P G, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.

[9] 阿法纳西耶夫 B B, 等. 电流互感器[M]. 陆安业, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1989. Афанасьев В В, et al. Current transformer[M]. LU An-ye, et al, Trans. Beijing: China Machine Press, 1989.

[10] Talukdar S N, Bailey J R. Hysteresis models for system studies[J]. IEEE Trans on PAS, 1976, 95(4): 1429-1434.

收稿日期: 2009-09-23; 修回日期: 2009-11-24

#### 作者简介:

黄莉(1978-), 女, 讲师, 硕士, 从事水电站计算机监控系统与综合自动化研究; E-mail: ee\_hl@126.com

杨卫星(1979-), 男, 工程师, 硕士研究生, 从事继电保护研究;

张雪松(1979-), 男, 高级工程师, 博士, 从事继电保护研究。

(上接第 177 页 continued from page 177)

LIU Hai-ying, FENG Wen-xiu, DU Xiao-tong. Study and implementation of data transfer in management information system upgrade[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(5): 37-39.

[6] Prabhu Ram, Lyman Do. Extracting delta for incremental data warehouse maintenance[C]. //IEEE TCDE. Proc. of ICDE'00, San Diego, IEEE Computer Society. CA(USA), Washington D C(USA): 2000: 220-229.

收稿日期: 2009-10-14; 修回日期: 2010-04-22

#### 作者简介:

段成(1985-), 男, 博士生, 主要从事电力信息技术、分布式智能软件技术方面的研究; E-mail: duancheng1985@126.com

王增平(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护、自动化方面的研究;

吴克河(1962-), 男, 教授, 主要从事电力智能软件技术、计算机网络安全方面的研究。