

一种电流互感器饱和误差补偿算法研究

陈丽¹, 李佳琦², 贾清泉², 王春²

(1. 邢台职业技术学院电气工程系, 河北 邢台 054035; 2. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 在故障情况下, 电流互感器(CT)的一次电流非常大, 且含有衰减的直流分量, 容易使CT饱和, 导致二次电流严重失真, 使继电保护装置或控制设备不能正常动作。本文提出了一种饱和二次电流的误差补偿算法。该算法根据测得的二次电流估计铁芯中的磁通量及激磁电流, 并将估计的激磁电流加入到实测二次电流中, 起到补偿作用, 矫正失真的二次电流。EMTP仿真及算例分析证明了本文算法的有效性。

关键词: 电流互感器; 误差补偿; 饱和; EMTP仿真

An error compensation algorithm for saturated current transformer

CHEN Li¹, LI Jia-qi², JIA Qing-quan², WANG Chun²

(1. Xingtai Vocational and Technical College, Xingtai 054035, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Under fault condition, primary current of a current transformer (CT) has high magnitude and may include decaying DC offset. This can result in saturation of magnetizing core of the CT and the secondary current thus is distorted. The distorted current could cause malfunction of protection relays or control devices. This paper proposes an error compensation algorithm for saturated secondary current. The algorithm estimates flux in the magnetizing core and current through the magnetizing branch from known secondary current. By adding the estimated magnetizing component, the distorted secondary current can be compensated. The proposed algorithm is evaluated by EMTP simulation data and case studies are included.

Key words: current transformer; error compensation; saturation; EMTP

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)04-0041-04

0 引言

随着电力系统容量的增大, 输电线路发生故障时, 有些情况下最大短路电流可达CT额定工作电流的100倍以上, 远远超出了保护用CT的正常运行范围。由于含铁芯CT的激磁电感非线性特性, 巨大的短路电流很容易导致CT饱和。在大容量超高压电网中, 短路电流中的直流分量衰减很慢, 直流分量的存在将严重恶化线圈绕组的磁通传变特性。励磁电流几十倍、百倍地增加, 且含有大量非周期分量和高次谐波分量, 将造成CT二次电流严重失真, 影响继电保护的正确动作。

国内外许多学者对CT饱和问题做过研究, 提出了一些CT饱和电流的补偿方法。文献[1]采用最小二乘(LS)算法补偿失真电流。文献[2]提出在电流信号中使用二阶差分函数检测起始饱和时间, 削弱由饱和及剩磁引起的二次电流失真。文献[3,4]提出了基于计量用CT的电流微分母线保护方法。该方法使用电流信号的三阶微分函数检测饱和期的开始和结

束, CT一旦进入饱和状态, 补偿信号模块就被激活, 一直作用到饱和期结束。文献[5]利用霍尔电流传感器的磁力平衡特性检测饱和电流, 用来消除CT的误差。文献[6,7]用三阶微分函数监测CT饱和度。文献[8]根据饱和状态下CT的变比估计二次电流的大小。文献[9]提出一种电流互感器模型的非迭代快速算法, 按模型算法可准确计算出二次电流。文献[10]给出一种柔性神经网络补偿方法, 通过基本磁化曲线, 应用柔性神经网络实现补偿。

本文根据电流互感器等值电路和磁化曲线关系, 提出一种简单易行的互感器二次电流补偿算法。该算法根据测得的二次电流估计铁芯中的磁通量及磁化电流, 并将估计的磁化电流加入到实测二次电流中, 起到补偿作用, 得到理想无铁芯饱和情况下的一次电流值。该算法具有运算量小、适应性强的优点, 可满足继电保护系统实时运行的要求。

1 补偿算法

二次电流的补偿过程如图1所示。

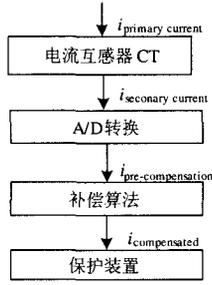


图 1 二次电流的补偿过程

Fig. 1 The process of secondary current compensation

1.1 等效电路

CT 的等效电路如图 2 所示。

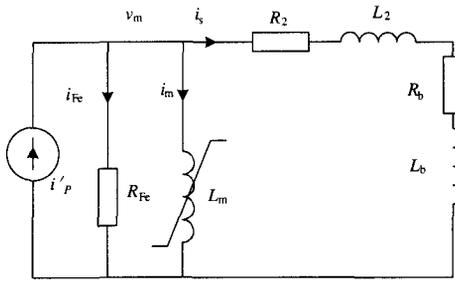


图 2 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit

其中： i_p' 表示一次电流， i_{Fe} 表示流过铁芯损耗等效电阻 R_{Fe} 的电流， R_{Fe} 与铁磁材料的电阻率及其材料性质有关，可通过试验测得。 i_m 表示通过电感 L_m 的电流， L_m 为铁芯等效电感， v_m 为励磁电压， i_s 为二次侧电流， $Z_2 = R_2 + jL_2$ 为二次侧泄漏阻抗， $Z_b = R_b + jL_b$ 为负载阻抗。 i_p' 由三部分电流组成：

$$i_p' = i_{Fe} + i_m + i_s \quad (1)$$

等式中每部分的电流都可以表示为与互感器铁芯磁链 λ 有关的函数。

1.2 铁芯损耗支路

铁芯损耗电阻的电压

$$v_m = R_{Fe} i_{Fe} \quad (2)$$

$$v_m = \frac{d}{dt} \lambda \quad (3)$$

联立(2)、(3)，有

$$\frac{1}{\Delta t} (\lambda_{new} - \lambda_{old}) = \frac{1}{2} R_{Fe} (i_{Fe,new} + i_{Fe,old}) \quad (4)$$

或

$$i_{Fe,new} = C_{Fe} \lambda_{new} + h_{Fe,old} \quad (5)$$

其中，

$$h_{Fe,old} = -C_{Fe} \lambda_{old} - i_{Fe,old} \quad (6)$$

$$C_{Fe} = \frac{2}{R_{Fe} \Delta t} \quad (7)$$

1.3 励磁支路

图 3 表示励磁支路的磁通量—励磁电流分段线性曲线。

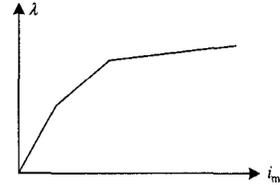


图 3 励磁支路的分段线性曲线

Fig. 3 Piecewise linear representation of magnetizing branch

励磁电流及磁通量的关系如下所示。

$$i_{m,new} - i_{m,old} = \frac{1}{L_m} (\lambda_{new} - \lambda_{old}) \quad (8)$$

或

$$i_{m,new} = \frac{1}{L_m} \lambda_{new} + k_m \quad (9)$$

其中，

$$k_m = i_{m,old} - \frac{1}{L_m} \lambda_{old} \quad (10)$$

1.4 二次侧支路

将二次侧漏阻抗与负载作为二次侧支路，有

$$R_s + j\omega L_s = (R_2 + R_b) + j(\omega L_2 + \omega L_b) \quad (11)$$

$$v_m = R_s i_s - L_s \frac{di_s}{dt} \quad (12)$$

与(3)联立，

$$\frac{\lambda_{new} - \lambda_{old}}{\Delta t} = R_s \frac{i_{s,new} + i_{s,old}}{2} + L_s \frac{i_{s,new} - i_{s,old}}{\Delta t} \quad (13)$$

整理得，

$$i_{s,new} = c_s \lambda_{new} + h_{s,old} \quad (14)$$

又有，

$$h_{s,old} = -c_s \lambda_{old} - d_s i_{s,old} \quad (15)$$

其中，

$$c_s = \frac{1}{L_s + \frac{R_s \Delta t}{2}} \quad (16)$$

$$d_s = c_s \left(\frac{R_s \Delta t}{2} - L_s \right) \quad (17)$$

1.5 计算二次补偿电流

通过方程式(1), (5), (9),(14)可得

$$i'_p = i_{Fe} + i_m + i_s = (c_{Fe} + \frac{1}{L_m} + c_s)\lambda + (h_{Fe} + k_m + h_s) \quad (18)$$

用式(14)表示 $i'_p = f(i_s)$, 补偿后的二次电流 $i_{s,compensated}$ 即为理想二次电流 i'_p 。

$$i_{s,compensated} = i'_p = k_1 i_s + [h_{Fe} + k_m + (1 - k_1)h_s] \quad (19)$$

其中:

$$k_1 = \frac{(h_{Fe} + \frac{1}{L_m} + c_s)}{c_s} \quad (20)$$

如果能够从先前的时间段里知道所需的数据, 补偿后的二次电流 $i_{s,compensated}$ 就可由二次电流 i_s 及式(19)得到。在实际应用中, 可按文献[2]等方法先检测互感器是否进入饱和, 当互感器铁芯进入饱和状态时开始估算激磁电流, 磁链的变化由式(13)计算求得, 因此该算法不需考虑剩磁的影响。

2 结果验证

EMPT 仿真得出的 CT 二次电流作为该算法的输入数据, 输出补偿后的二次电流, 并与理想非饱和和情况下一次电流的值进行比较。补偿过程如图 4 所示。

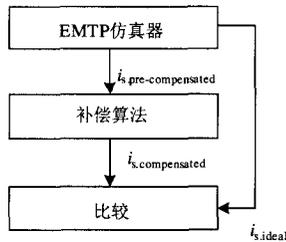


图 4 仿真过程

Fig. 4 Evaluation process

在 EMPT 仿真中, 以电感(type-96)作为 CT 模型的励磁支路。CT 的 B-H 曲线如表 1 所示。CT 二次侧的总阻抗分别取 1、5、10 Ω (cos φ = 1)。结果如图 5、6、7 所示。其中 $i_{s,ideal}$ 为理想非饱和情况下一次侧电流, 由 EMPT 生成, 用于比较。 $i_{s,pre-compensated}$ 为饱和状态下的二次电流, 作为补偿算法的输入数据。 $i_{s,compensated}$ 为补偿后的电流, 作为补偿算法的输出数据。

表 1 CT 的 B-H 特性

Tab.1 CT B-H characteristic

B	0.5	1.0	1.2	1.4	1.6	1.65	1.7	1.75	1.76	1.77
H	10	25	30	45	100	150	250	400	500	600

CT 相关参数为: 截面积=6.5e-3 m²; 长度=0.5 m; 变比=1250:1。

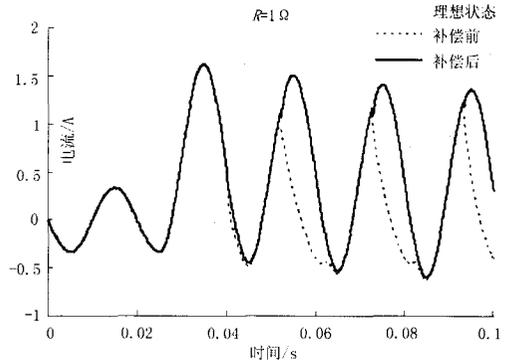


图 5 负载 1 Ω 时的二次电流

Fig. 5 Secondary currents with burden 1Ω

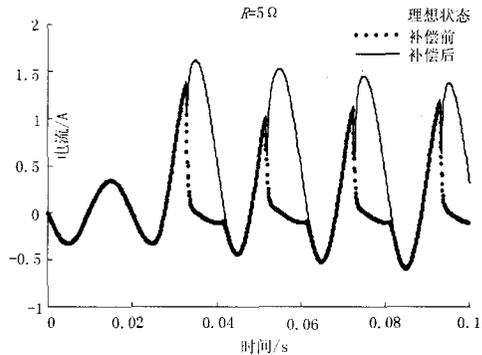


图 6 负载 5Ω 时的二次电流

Fig. 6 Secondary currents with burden 5Ω

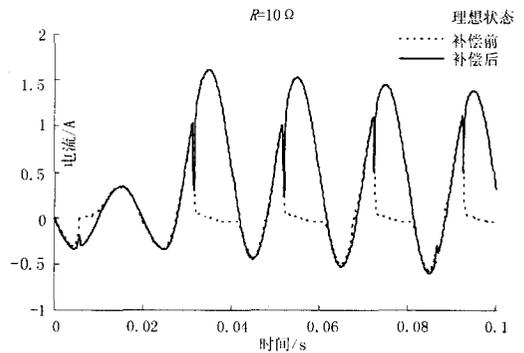


图 7 负载 10Ω 时的二次电流

Fig. 7 Secondary currents with burden 10Ω

结果表明, 补偿后的二次电流和理想二次电流

在不同饱和度下都非常接近,但在 CT 的负载较重、饱和刚开始时差别较大。

4 结论

本文提出了在电流互感器饱和情况下的一种误差补偿算法。故障时,通过铁芯 B-H 曲线、CT 的相关参数及二次阻抗值,能够有效补偿饱和情况下的二次失真电流。仿真结果表明补偿后的二次电流与理想无饱和二次电流很接近。使用补偿后的二次电流,可极大地提高电力系统继电保护的应用效果。

参考文献

- [1] Pan J, Vu K, Hu Y. An Efficient Compensation Algorithm for Current Transformer Saturation Effects[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 19(4): 1623-1628.
- [2] Kang Y C, Lim U J, Kang H J, et al. Compensation of the Distortion in the Secondary Current Caused by Saturation and Remanence in a CT[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 19(4): 1642-1649.
- [3] Kang Y C, Lim H J, Kang S H, et al. A Bus Bar Differential Protection Relay Suitable for Use with Measurement Type Current Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1291-1298.
- [4] Kang Y C, Ok S H, Kang S H, et al. Crossley. Design, Evaluation and Implementation of a Busbar Differential Protection Relay Immune to the Effects of Current Transformer Saturation[J]. IEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 2004, 151(3): 305-312.
- [5] Ai X, Bao H, Song S H. Novel Method of Error Current Compensation for Hall-effect-based High-accuracy Current Transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 11-14.
- [6] Kang Y C, Kang S H, Crossley P A. Design and Evaluation of an Algorithm for Detecting Current Transformer Saturation[J]. IEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 2004, 151(1): 27-35.
- [7] Kang Y C, Lim U J, Kang S H. A CT Saturation Detection Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 78-85.
- [8] Kang Y C, Park J K, Kang S H, et al. An Algorithm for Compensating Secondary Currents of Current Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 116-124.
- [9] Marti J, Linares L, Dommel L. Current Transformers and Coupling-capacitor Voltage Transformers in Real-time Simulations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 164-168.
- [10] 葛宝明, de Almeida A T, Ferreira F J T E. 电力系统电流互感器饱和特性柔性神经网络补偿法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 150-156
- GE Bao-ming, de Almeida A T, Ferreira F J T E. Flexible Neural Network-based Compensation Method for Saturation Characteristic of Current Transformer in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 150-156.
- [11] 梁仕斌, 文华, 曹敏, 等. 铁心剩磁对电流互感器性能的影响[J]. 继电器, 2007, 35(22): 28-32.
- LIANG Shi-bin, WEN Hua, CAO Min, et al. The Effects of Remanent in CT Core[J]. Relay, 2007, 35(22): 28-32.
- [12] 胡晓光, 于文斌. 电流互感器的暂态仿真及其铁心饱和的小波分析[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 58-61.
- HU Xiao-guang, YU Wen-bin. Transient Simulation of Current Transformer and Wavelet Analysis of Its Core Saturation[J]. Power System Technolog, 2001, 25(11): 58-61.
- [13] 束洪春, 林敏. 电流互感器暂态数学建模及其仿真的比较研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 11-14, 26.
- SHU Hong-chun, LIN Min. Comparative Study on Modeling and Transient Simulation of Current Transformer[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 11-14, 26.
- [14] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和识别判据[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 44-48.
- LIN Xiang-ning, 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.

收稿日期: 2008-04-04; 修回日期: 2008-08-12

作者简介:

陈丽(1977-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为检测技术、人工智能技术在电力系统中的应用;

李佳琦(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为消弧线圈控制技术等; E-mail: jiaqiymeng2003@126.com

贾清泉(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统故障检测与信号处理、电能质量等。