

电磁式电流互感器暂态特性试验研究

陈德树, 尹项根, 张哲, 陈卫, 文明浩

(华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 电磁式电流互感器的暂态特性对继电保护, 特别是电流差动保护的動作特性有重要的影响。对此, 几十年前已开始进行研究。但运行情况表明, 存在一些保护误动作原因不很清楚的, 最后只好归结为 CT 暂态影响。而暂态影响的机理仍然不很明了。通过实验进一步观察电磁式电流互感器励磁的非线性参数对暂态特性的影响, 提出二次动态时间系数概念。此外, 还研究了剩磁对变化过程的影响。

关键词: 电磁式; 电流互感器; 暂态特性

Test study on the transient performance of the electro-magnetic type current transformer

CHEN De-shu, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, CHEN Wei, WEN Ming-hao

(Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The transient performance of the electro-magnetic type current transformer is very important to the behavior of the protective relaying, especially to the behavior of the current differential protection. Although the research in this area was going about several decades and the main properties were well known in operation, but the influence mechanism of the non-linear characteristic of the excitation of the current transformer was still out of focus in some incorrect operation of the differential protection. In this paper, some research basic on the test about the influence of the non-linear parameters of the current transformer on the transient process was given. The concept "secondary transient time coefficient" was given. The influence of the remanence of the current transformer to the transient process was researched too.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50507005).

Key words: electro-magnetic type; current transformer; transient performance

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)13-0001-04

0 引言

差动保护原理是区分区内、外短路的一种理想的保护原理, 是主保护的首选, 现在普遍地用以保护所有的重要电气设备。但是仍偶有原理性误动作的报导。此类误动作最后只能归结为 CT 饱和甚至“原因不明”。

2006年某地一个 220 kV 变电所的差动保护在区外短路切除后约一分钟再次短路, 如此重复至第三次外部短路时母差误动跳闸。

有多次报导, 一些 110/35 kV 变电站馈线出口短路, 经小延时跳闸, 其主变压器差动误动。这些误动多归于“原因不明”, 究其原因也有不同的研究。或归于“励磁涌流”, 或归于高低压侧 CT 不同型。

缺乏深入机理的探究。

凡此种种, 说明有必要对电磁式 CT 的暂态过程作更深入的研究。

半个多世纪以来, 对电磁式 CT 暂态特性的研究, 可谓是前赴后继, 由线性分析、物理模拟试验逐渐转向数字仿真。

早期(1949年)А т а б е к о в^[1]的物理试验, 为对其暂态过程的认识打下了很好的基础, 但限于测量及分析手段, 对一些深入的工况影响, 不易做出分析。

近期的数字仿真也取得了一些有益的结果, 但由于铁芯的强非线性和复杂的随机性, 很难作出比较严格的数学模型, 难于做出更切合实际的分析。

因此, 利用新的技术手段, 对 CT 的暂态特性

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507005)

做出新的物理模拟试验研究应该是有益的。

1 研究方法

由于电磁式电流互感器磁路的强非线性特性，最合适的研究方法是通过典型样品物理试验观测其在各种代表性工况下的动态行为。首先选择一个能得到其全部技术参数的试验样品，然后设计一个能实现各种运行工况的试验线路。

试验运行工况尽可能全面、周密、可单独改变一种参数或综合参数。

2 试验研究内容

被试品: T-24 (NO. 001-4-11)

1) 样品基本参数: $n_T = 5/1$; $S_n = 10 \text{ VA}$

铁芯尺寸:

$$\bar{l} = \pi(126 + 45) = 537.2 \text{ mm}$$

$$A = 4.5 \times 9.2 = 41.4 \text{ cm}^2$$

绕组参数:

$$(Iw)_n = 600$$

$$w_1 = 120 \text{ 匝}$$

$$w_2 = 600 \text{ 匝}$$

2) 基本参数测量

① $n_T = 5$

② 空载 U-I 特性

如图 1, 令 CT 付方开路, 原方加交流电压, 测不同电压下的 v-i 值, 得空载 U-I 特性 (图 1a) 及变换而得的 Z (图 1b)、L (图 1c)、B (图 1d)、 ΔZ (图 1e) 曲线如下。

③ 短路阻抗

在二次端口直接短路, 原方加入额定电流, 得短路阻抗

$$Z_{1,2} = \frac{U}{I} = 0.126 \Omega \text{ (一次侧)} / 3.15 \Omega \text{ (二次侧)}$$

$$Z_1 = Z_2 = \frac{Z_{1,2}}{2} = 0.063 \Omega \text{ (一次侧)} / 1.58 \Omega \text{ (二次侧)}$$

3) 暂态工况试验

(1) 试验接线

(2) 接线图设计考虑

试验接线如图 2, 设计考虑了下列几种需要:

① 能在试验前进行消磁。

② 能在试验前进行充磁, 以形成剩磁。

③ 可以形成正极性剩磁, 或形成反极性剩磁。

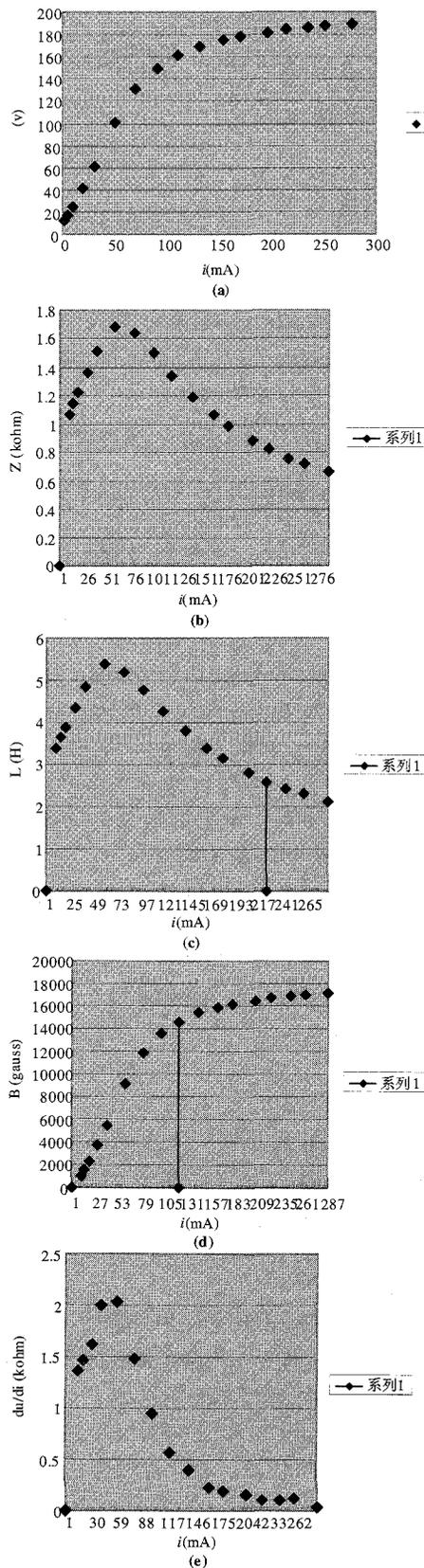


图 1 空载特性

Fig.1 No-load characteristics

- ④可以进行阶跃式非周期分量试验。
- ⑤可以进行指数上升式非周期分量试验。
- ⑥可以进行带衰减非周期分量的交流大电流冲击试验。

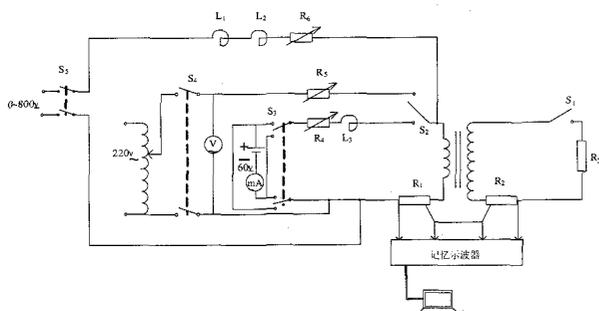


图 2 暂态工况试验接线

Fig.2 Experimental connection under transient condition

(3)具体操作

图 2 可进行下列操作:

- ①消磁。
- ②置正向剩磁。
- ③置反向剩磁。
- ④直流阶跃暂态响应试验。
- ⑤交流暂态响应试验。

S₂ 为供切换交、直流励磁 (S₁ 断开) 用;

S₃ 为供切换直流励磁极性及投、切直流励磁电源 (充磁) 用;

S₄ 为供投、切交流励磁电源 (消磁) 用;

S₅ 为作交流暂态冲击试验用。

4) 数据记录

暂态电流用记忆示波器记录。

分流器电阻

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{I_{n2}}{I_{n1}} = \frac{5}{1}$$

$$i_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_1}{1} \equiv U_1 \text{ A}, \quad i_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_2}{5} \equiv 0.2U_2 \text{ A}$$

3 试验结果分析

观察按上述操作所得的数十个试验结果, 初步得到几点有益的结果。

①二次非周期分量不是按指数函数衰减

从试验 1、3 等很明显看出, 在突加纯直流电流情况下, CT 二次自由衰减分量不是按指数函数衰减的, 即使从试验 2、4~10 也可以看出, 其过程的前面部分衰减较快, 而后部分明显变慢。

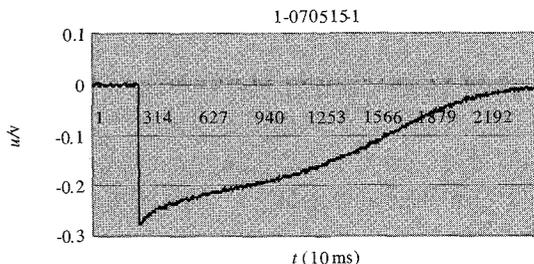


图 3 试验 1: 消磁, I_{m1}=55.5*2.5mA, Z₁=10.15ohm
Fig.3 Test1: No residue magnetism, I_{m1}=55.5*2.5mA, Z₁=10.15ohm

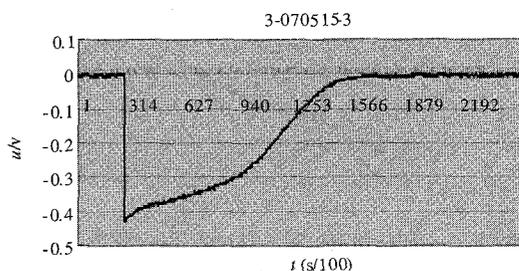


图 4 试验 3: 消磁, I_{m1}=95.5*2.5mA, Z₁=10.15ohm
Fig.4 Test3: No residue magnetism, I_{m1}=95.5*2.5mA, Z₁=10.15ohm

② 当电流按指数函数衰减时, 即

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

存在下面关系:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{i(t)}{T} \quad T = \frac{L}{R}, \quad L、R \text{ 为恒定值,}$$

即 T 为常数, 称为时间常数。现 i(t) 不按指数函数衰减, 意味着 T、L (励磁电感) 不是恒定值。此时, 电感是一个很复杂的, 非线性的因变量, 为

$$\tilde{L} = F \left[B(t), i(t), \frac{\Delta B(t)}{\Delta i(t)} \right]$$

③由此, 可以定义一个可称之为“动态时间系数”的量

$$\tilde{T} = \frac{\tilde{L}}{R}$$

④在时刻 k,

$$\tilde{L}(k) = F \left[B(k), i(k), \frac{dB(k)}{di(k)} \right]$$

$\frac{dB(k)}{di(k)}$ 的值决定于导磁介质, 对硅钢片来说不

是唯一的, 为增值时和为减值时因走不同的磁滞回线, 此值就不一样。

⑤ \tilde{L} 受剩磁影响很大, 包括剩磁的大小和方向。

图 5 是无剩磁和强剩磁两种工况下的试验对比。图 6 和图 7 是不同极性剩磁对交流短路时的影响的对比。图 5 中上面曲线是在试验 1 基础上不消磁即高剩磁时进行的结果。下面曲线是消磁后的试验结果。

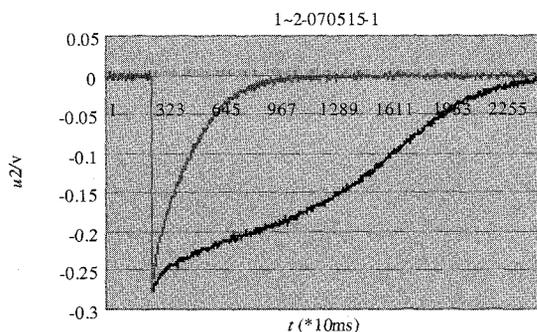


图 5 试验 2: 上曲线是在试验 1 基础上不消磁即高剩磁时进行

Fig.5 Test2: The same as test1 but high residue magnetism

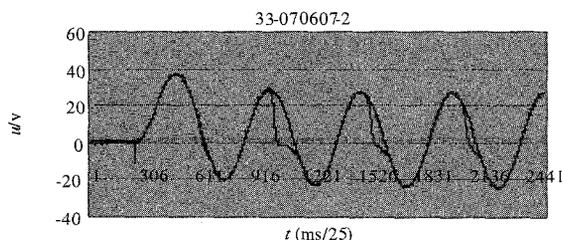


图 6 试验 33: 负冲磁 200mA 后作交流试验

Fig.6 Test33: AC current test going after 200mA negative magnetizing

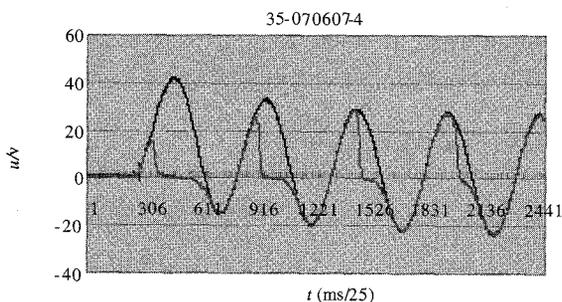


图 7 试验 35: 同上, 正冲磁 200 mA 后作交流试验

Fig.7 Test35: The same as before, but the test going after 200 mA positive magnetism

⑥ 有剩磁的铁芯, 当不施加交变磁化力时, 其剩磁接近不变, 即长期保持, 不易衰减。

⑦ 当施加交变磁化力时, 剩磁 (表现为偏磁) 会逐渐趋于“零”, 其衰减速度与施加的交变磁化力

的强度有关, 强度愈大, 衰减愈快。

⑧ 当切断交变磁化力时, 仍会产生相应的剩磁, 只有磁化力逐渐减小至趋零时切除, 此时的剩磁才变为零。CT 二次负载不同或流过电流不同, 使磁化力不一致, 导致剩磁不一致。

4 对差动保护的影响

1) 两个 CT 即使一次侧电流相同, 如其“动态时间系数” \tilde{T} 的动态特性不一致, 即可使二者的二次电流在暂态过程中不一致, 构成差动保护时会出现时变特性的差流。

2) 有些运行工况会造成差动两侧 CT 剩磁不一致。严重时可能造成差动误动:

① 内部短路切除后重合成功, 短时间后的 (例如 1 分钟左右) 发生外部短路, 因内部短路切除时各 CT 的磁通状态可能不一致, 导致两侧剩磁大小/方向不一致, 加上消磁时间不长, 致使“动态时间系数” \tilde{T} 差别较大。此时, 如发生外部短路, 差动保护可能因二次回路暂态过程差别过大而误动。

② 外部连续性故障, 即使 CT 型号相同, 在第一个短路切除时, 尽管两侧 CT 剩磁极性和大小一致, 但消磁速度可能因 CT 二次负载不一致, 使后来流过负荷电流时产生的消磁磁化力不一样, 导致剩 (偏) 磁不一样, “动态时间系数” \tilde{T} 特性不一致, 使在后一个短路发生时二次暂态过程不同, 从而产生暂态不平衡电流, 严重时可能引起差动保护误动。

③ 两侧 CT 不同型, 即使穿越短路电流不是非常大, 未使 CT 严重饱和, 在外部短路发生前也没有剩 (偏) 磁, 但由于 CT 型号不一致, 严重时, 两侧的 \tilde{L} 差别较大。此时发生上述故障, 也会由于两侧的 \tilde{L} 差别较大, 导致 \tilde{T} 的不一致, 引起暂态不平衡电流过大而使保护误动。

3) 为克服非周期分量的影响, 继电保护常用“消去”非周期分量的算法。在很多情况下, 这是有较好的效果的。但很多算法是基于电流是由按指数衰减的直流分量和正弦交流分量两大部分叠加而成这一前提的。这在 CT 没有饱和的情况下是合适的, 如果出现 CT 饱和, 即 CT 励磁电流较大, 二次电流失真较严重, 此时的计算结果的误差就会增大。滤直效果变差。

5 待进一步研究的问题

此次试验研究未测量样品的磁滞回线及剩磁的数值。有待进一步完善。

(下转第 32 页 continued on page 32)

- [16] Miller J T, LI Ching-chung. Adaptive Multiwavelet Initialization[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998,46(12).
- [17] Attakimongcol K, Hardin D P. Multiwavelet Prefilters. II. Optimal Orthogonal Prefilters[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2001,10(10).
- [18] LIAN Jian-ao, Chui C K. Balanced Multiwavelets with Short Filters[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004,11(2).
- [19] Controinei M, Montefusco L B, Puccio B U. Multiwavelet Analysis and Signal Processing[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1998,45(8).
- [20] 谢荣生,李汉杰,孙枫,等. 基于多小波噪声方差阈值的信号滤波方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002,23(2): 54-57.
XIE Rong-sheng, LI Han-jie, SUN Feng, et al. Filtering Algorithm Based on Multiwavelet Noise Variance Threshold[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2002,23(2):54-57.
- [21] Tham Jo Yew, SHEN Li-xin, Lee Seng Luan, et al. A General Approach for Analysis and Application of Discrete Multiwavelet Transforms[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000,48(2).
- [22] Geronimo J, Hardin D P, et al. Functions and Wavelet Expansion Based on Several Scaling Functions[J]. Ppox Theory, 1994,78:373-401.
- [23] 王玲. 多小波二阶平衡的预滤波处理[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2002,(6):107-111.
WANG Ling. Prefiltering of Multiwavelet with 2-order Banlancing[J]. Journal of Sichuan Normal University (Natural Science), 2002,(6):107-111.
- [24] 刘志刚, 何正友, 钱清泉. 多小波的研究进展及其在电力系统中应用的展望[J]. 电力系统自动化, 2004,28(11): 94-100.
LIU Zhi-gang, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. Review of the Multiwavelet Development and its Applications in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(11):94-100.
- [25] 刘志刚, 曾怡达, 钱清泉. 多小波的多分辨率分析在电力信号处理中的应用[J]. 西南交通大学学报, 2004,39(3):53-58.
LIU Zhi-gang, ZENG Yi-da, QIAN Qing-quan. Application of Multiwavelet Multiresolution Analysis in Signal Processing of Power System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004,39(3):53-58.

收稿日期: 2007-10-25; 修回日期: 2008-03-17

作者简介:

梁劲(1969-)男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力市场和电力系统自动化;

周静(1975-), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为直流输电系统的控制保护和输电线路的故障定位。

E-mail: zhou-jing@sgcc.com.cn

(上接第4页 continued from page 4)

参考文献

- [1] Г И Атабеков. Релейная Защита Высоковольтных Сетей [B] 1949
- [2] А И Федосеев. Релейная Защита Электрических Систем[B]. 1952.
- [3] 王梅义, 蒙定中, 郑奎璋, 等. 高压电网继电保护运行技术[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [4] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [5] 戚卫国. 电流互感器的电磁动态过程及其模拟计算[J]. 电力系统自动化, 1985,9(4).
QI Wei-guo. Transient Process of the Current Transformer and Its Simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1985,9(4).
- [6] Lucas J R, McLaren P G, Keerthipala W W L, et al. Improved Simulation Models for Current and Voltage Transformers in Relay Study [J]. IEEE Trans.
- [7] 阮树骅, 周步祥. 电流互感器暂态仿真研究[J]. 继电器, 1997,25(3):2-7,9.
RUAN Shu-hua, ZHOU Bu-xiang. The Simulation Study of the Current Transformer Transient Process[J]. Relay, 1997,25(3):2-7,9.
- [8] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器; 2002,30(2): 3-7.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le. The Transient Saturation Calculation of the Current Transformer[J]. Relay, 2002,30(2):3-7.
- [9] 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).
YUAN Ji-xiu, ZHUO Le-you, SHENG He-le, et al. Some Issue in the Application of the current Transformer Used in the Protection[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2003,23(8).
- [10] 李艳鹏, 侯启方, 刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备, 2006,26(8).
LI Yan-peng, HOU Qi-fang, LIU Cheng-zhi. The Affect of the Non-periodic Component on the Transient Saturation of the Current Transformer[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2006,26(8).

收稿日期: 2008-05-21

作者简介:

陈德树(1930-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统微机保护、综合自动化、电力系统模拟与安全稳定等领域的工作; E-mail: dschen@21cn.com

尹项根(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统微机保护、综合自动化、电力电子在电力系统中的应用等领域的研究和教学工作;

张哲(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、故障滤波等领域的教学、研究工作。