

The Harmonics Analysis of Current Transformer under DC Bias Induced by GIC*

Jingping Ma, Wei Zong, Lianguang Liu

Institute of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing
Email: majp1987@163.com

Received: Oct. 21st, 2013; revised: Nov. 15th, 2013; accepted: Nov. 23rd, 2013

Copyright © 2013 Jingping Ma et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Jingping Ma et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Geomagnetic induced current (GIC) and the High Voltage Direct Current (HVDC) systems under mono-polar operation may lead to DC bias of current transformers (CT), which may have an effect on transferring characteristics of CT and result in the mal-operation of metering devices and transformer differential protection. This paper analyzes the generation mechanism of DC bias of CT caused by GIC, and an equivalent analysis model for CT in the AC power system is established based on Jiles-Atherton model in PSCAD/EMTDC. This article also analyzes the distortion levels of the exciting current and its harmonics under the condition of DC bias induced by different amplitudes of GIC, and how CT ratios have effect on its saturation is discussed as well.

Keywords: Geomagnetic Induced Current (GIC); Current Transformer (CT); DC Bias; Harmonics Analysis

电磁式电流互感器的 GIC 直流偏磁谐波分析*

马京萍, 宗伟, 刘连光

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京
Email: majp1987@163.com

收稿日期: 2013 年 10 月 21 日; 修回日期: 2013 年 11 月 15 日; 录用日期: 2013 年 11 月 23 日

摘要: 地磁感应电流(GIC)和运行于单极-大地回路方式的高压直流输电系统会使电力系统中的电磁式电流互感器(TA)产生直流偏磁效应, 可能引起计量装置的误差和继电保护装置误动。本文分析了在 GIC 作用下, 电流互感器的直流偏磁的产生机理, 并应用 PSCAD/EMTDC 软件, 基于电流互感器的 Jiles-Atherton 模型, 建立了交流系统中电流互感器的直流偏磁的等效分析电路并进行仿真, 研究分析了不同大小的 GIC 入侵电流互感器一次绕组, 励磁电流畸变程度及谐波分布关系, 以及电流互感器线圈变比对饱和程度的影响。

关键词: 地磁感应电流; 电流互感器; 直流偏磁; 谐波分析

1. 引言

在地磁暴发生时, 在地磁感应电流(GIC)经中性点接地的变压器流入的电网, 以及运行于单极-大地回路方式的高压直流输电系统(HVDC)中, 会有直流或

准直流电流流入电力系统中的铁磁设备, 导致其铁心发生直流偏磁饱和^[1,2]。直流偏磁不仅对变压器本身造成比较严重的影响, 还会干扰其他电气设备如电磁式电流互感器(TA)的正常运行^[3,4]。电磁式电流互感器是目前广泛应用于电力系统中的继电保护设备, 电流互感器发生直流偏磁可能会对电力系统的保护与计量

*项目资助: 由国家自然科学基金项目(41374189)和国家电网公司科技项目(GY71-12-016)资助。

装置产生一定的影响, 研究不同原因引起的电磁式电流互感器的直流偏磁问题对防止保护装置误动, 减小计量装置的误差, 以及确保电网安全稳定运行都具有重要的意义。

目前国内外对变压器的直流偏磁饱和问题开展过大量的研究^[5,6], 但是对电磁式电流互感器的直流偏磁则研究较少。如文献[7]指出了直流偏磁对保护用电流互感器的起始饱和和时间的影响; 文献[8]表明, 直流偏磁条件下电流互感器更容易发生局部暂态饱和, 可能导致变压器差动保护误动。这些研究工作主要集中于电流互感器发生直流偏磁对继电保护的影响。此外, 目前研究直流偏磁的影响时, 一般将由 GIC 引发的直流偏磁和由 HVDC 引发的直流偏磁视作等同, 但本质上仍有所区别。HVDC 引发的偏磁电流在系统运行方式不变时, 偏磁电流恒定且为纯粹的直流电流, 仅对直流接地极附近的电网产生一定的影响。而 GIC 引发的偏磁电流的方向、幅值和频率是随着全球性地磁场扰动而变化的, 其幅值可能高达上百安, 影响范围比较广, 并且越高电压等级的电网所受影响更为严重。因此, 本文提出研究在 GIC 作用下电磁式电流互感器发生直流偏磁的谐波问题, 深入研究了 GIC 对电磁式电流互感器的影响机理, 并在 PSCAD/EMTDC 中建立等效的直流偏磁模型进行仿真, 分析电流互感器直流偏磁饱和条件下的谐波变化的特点以及影响因素。

2. 电流互感器直流偏磁机理与模型

2.1. 电流互感器发生直流偏磁的机理

对于电力系统而言, 地磁暴发生时, 可在地表可产生 1~10 V/km、持续几分钟到几小时电势, 造成地表较大范围内的电位变化。若两个变电站接地网之间存在电位差, 在输电线路、中性点接地的变压器以及大地之间构成流通的回路中会有直流电流通过, 直流电流通过接地的中性点流入变压器, 从而引起变压器的直流偏磁现象, 直流电流的流通过程如图 1 所示。其中 T_1 , T_2 代表两个变电站的变压器, E_1 , E_2 代表两变电站变压器所在的地网, R_1 , R_2 为变电站的接地电阻, I_{dc} 为直流偏磁电流^[8]。

电磁式电流互感器作为电力系统测量及保护的主要元件, 其一次侧串联在线路中, 因此当地磁暴发

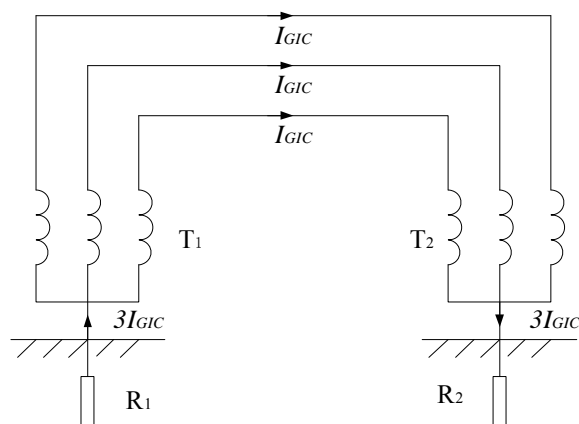


Figure 1. The flow path of DC current
图 1. 直流电流的流通过程

生时, GIC 通过三相变压器的绕组和线路流入电流互感器的一次绕组中, 与工频电流叠加在一起, 使电流互感器铁心发生半波磁饱和, 进而导致励磁电流波形畸变, 引发直流偏磁现象。

2.2. 电磁式电流互感器的等效模型

电磁式电流互感器的等效电路如图 2 所示。其中 Z_1 代表 TA 的一次阻抗, Z_B 代表包含二次侧绕组及负载在内的等效阻抗, Z_e 代表 TA 的等效励磁阻抗; I_1 、 I_2 、 I_e 分别代表折算到二次侧的一次电流、二次电流和励磁电流。

目前用于电力系统电磁暂态仿真软件的电流互感器模型可分为 4 种^[9-11]:

- (1) 完全基于基本磁化特性的静态模型;
- (2) 基于动态磁化特性的动态模型;
- (3) 基于非线性等效电路的 Lucas 模型;
- (4) 基于 Jiles-Atherton 铁磁材料的 J-A 模型。

然而模型 1 虽然简单直观, 但是饱和点的时间与实际情况有较大偏差, 仅适用于定性分析 TA 饱和; 模型 2 的时域特性较好, 但是在谐波和衰减直流分量较大时误差也比较大; PSCAD/EMTDC 的自带元件库中提供了 Lucas 模型和 J-A 模型的电流互感器, 多数情况下这两种电流互感器的二次仿真波形与实际电流互感器测得的二次波形非常相似, 能够较好地反映出电流互感器的饱和特性。电流互感器的 Lucas 模型采用几个非线性电路元件来模拟电流互感器的非线性因素, 具有简化铁心磁化过程的优点, 但不适用于仿真具有铁心截面积较大的电流互感器; J-A 模型的

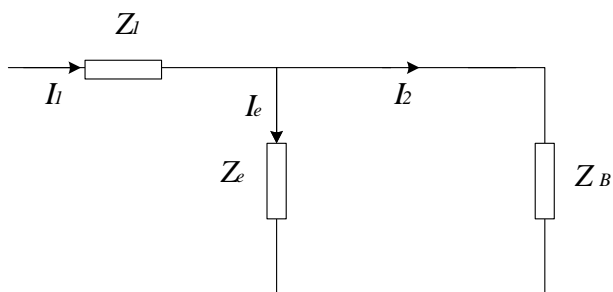


Figure 2. Equivalent circuit of CT
图 2. TA 的等效电路

电流互感器建立于 Jiles-Atherton 关于铁磁材料的现象学理论上，利用改进朗之万函数得到具有饱和特性的数学模型，建立了磁通密度 B 和磁场强度 H 之间的函数关系，其 $B-H$ 曲线如图 3 所示^[12]。图中 H_m 和 B_m 分别代表磁场强度 H 和磁感应强度 B 的最大值； H_c 代表矫顽力， B_r 代表剩磁。

因此，本文选择 J-A 模型的电流互感器为研究对象，对 TA 发生直流偏磁时励磁电流畸变产生的谐波进行仿真并分析其变化特点。

3. GIC 作用下电流互感器谐波分析

为了研究 GIC 对电磁式电流互感器直流偏磁励磁电流谐波特性的影响，在 PSCAD 中建立了如图 4 所示的等效电路模型进行仿真实验。

由于 GIC 的频率范围是 0.001~0.1 Hz，与工频电流相比可视为准直流。在此模型中，用理想直流源来模拟 GIC 的输入，并与 10 kV 系统的理想交流源叠加，作为电流互感器的一次侧电流输入信号，负载选择 1 Ω 的电阻。

设置 J-A 模型的电流互感器的线圈变比为 400/1，二次侧绕组电阻和电抗分别为 0.5 Ω 和 0.8e-3 H，铁心截面积为 2.601e-3 m²，铁心平均磁路长度为 0.6377 m，铁心类型选择 PSCAD 软件中材料 1，并且不计 TA 铁心剩磁的影响^[13,14]。

当 TA 在正常工作条件下传变工频电流时，励磁电流波形如图 5 所示。可以看出，TA 的励磁曲线工作在线性区时，由于其励磁阻抗很大，励磁电流 I_e 值较小且波形是对称的，无谐波。

当 $I_{dc} = 100$ A 时，对 TA 进行偏磁实验。在 $t = 8.18$ s 左右时，TA 进入稳定饱和，其励磁电流波形及其谐波分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出，电流互感器的铁心饱和达到稳定之后，TA 的励磁电流发生了明显的畸变，其波形的上半部分呈现类似于尖顶波的形状，下半部分畸变不特别明显。在饱和过程中各次谐波都在不断变化，在当直流磁通稳定之后，电流互感器的波形呈周期性的饱和；图 7 表明，TA 偏磁饱和时，其谐波以二次谐波为主，其次是三次谐波，四次谐波及以上的高次谐波含量很少。畸变后的励磁电流出现偶次谐波分量是 GIC 作用下的重要特征。

为研究 GIC 的大小对 TA 饱和程度的影响，在 $I_{dc} = 200$ A 时对 TA 进行仿真实验，在 $t = 4.20$ s 左右时，

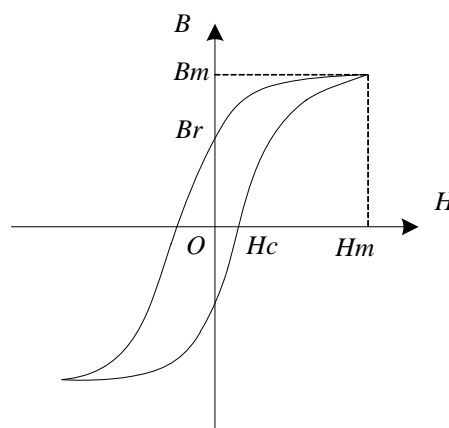


Figure 3. The B-H curves of CT based on Jiles-Atherton model
图 3. 基于 Jiles-Atherton 模型电流互感器的 B-H 曲线

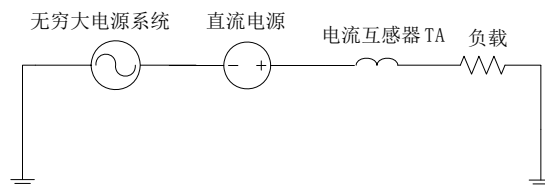


Figure 4. The simulation model for CT DC bias analysis
图 4. 电流互感器直流偏磁仿真示意图

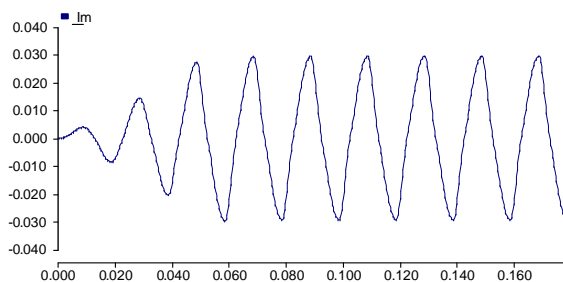


Figure 5. The exciting current waveforms without DC bias
图 5. 无偏磁的励磁电流波形

TA 饱和达到稳定，并得到励磁电流 I_m 波形及其谐波含量分析图，如图 7 所示。

由图 7 可以看出，当 I_{dc} 增大一倍时，TA 进入饱

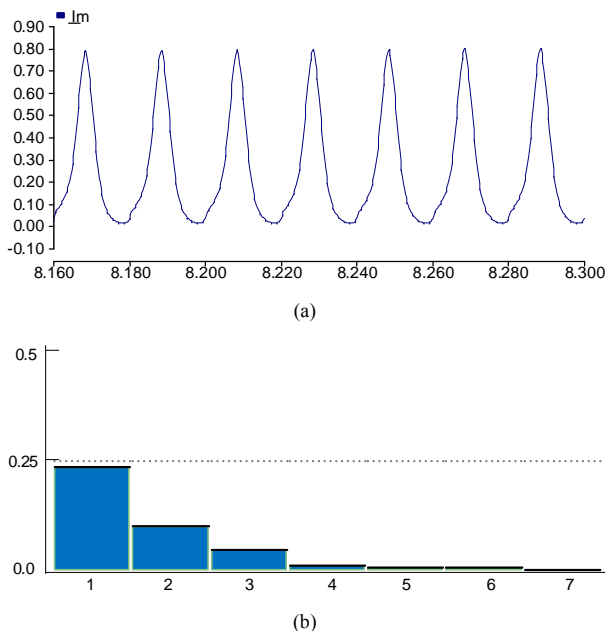


Figure 6. (a) The exciting current waveforms with $I_{dc} = 100$ A; (b) The harmonic content of exciting current with $I_{dc} = 100$ A
图 6. (a) $I_{dc} = 100$ A 时励磁电流 I_m ; (b) $I_{dc} = 100$ A 时励磁电流 I_m 的谐波

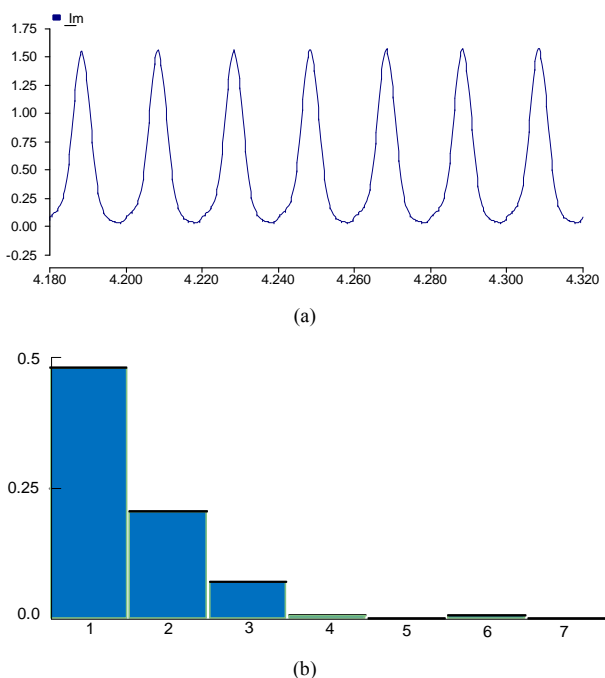


Figure 7. (a) The exciting current waveforms with $I_{dc} = 200$ A; (b) The harmonic content of exciting current with $I_{dc} = 200$ A
图 7. (a) $I_{dc} = 200$ A 时励磁电流 I_m ; (b) $I_{dc} = 200$ A 时励磁电流 I_m 的谐波

和稳定状态的时间大为缩短，并且也缩短了近一半的时间，但是 I_m 的波形畸变程度与 $I_{dc} = 100$ A 时相比，变化不明显。此时励磁电流的二、三次谐波含量也有较为明显的增大。

除了 GIC 的大小，电磁式电流互感器自身的参数也会对直流偏磁的饱和程度产生一定的影响，如 TA 线圈的变比^[4]。因此，当设置 TA 二次侧线圈的匝数为 1:100， $I_{dc} = 100$ A 时再次进行直流偏磁的饱和实验，图 8 为得到励磁电流波形及其谐波含量柱状图。

由此看出，当线圈匝数比变小时，即 TA 将一次侧大电流转换为二次侧小电流的能力变小，励磁电流 I_m 的波形与上述试验相比，畸变非常严重。而且各次谐波都有了明显增长：二次、三次谐波的成分仍占主要优势，但是四次谐波及以上的高次谐波也从原来几乎为 0 的状态有了大幅度的增长。可以得出，电流互感器的线圈变比越大，发生直流偏磁饱和时励磁电流波形畸变程度越小。

4. 结论

GIC 引起的直流偏磁不仅会影响变压器的运行，同时也会造成传统的电磁式电流互感器的铁心饱和，

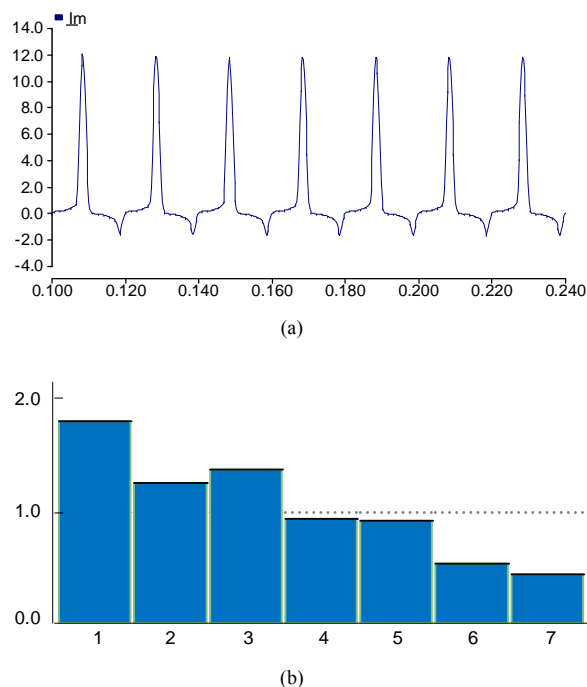


Figure 8. (a) The exciting current waveforms with $N = 100$; (b) The harmonic content of exciting current with $N = 100$
图 8. (a) $N = 100$ 时的励磁电流 I_m ; (b) $N = 100$ 时谐波次数

励磁电流畸变，并会产生含量较高的奇次和偶次谐波。本文对电流互感器直流偏磁的模型进行仿真实验，得到主要结论如下：

(1) GIC 引起的直流偏磁会导致 TA 发生饱和，使 TA 工作状态从线性区进入饱和区，其励磁电流发生畸变，低次谐波在励磁电流的谐波分布中占主要成分，高次谐波所占比例较小。

(2) 随着 GIC 呈倍数增大时，TA 饱和程度加深，并且进入饱和稳定的时间也呈相应倍数的缩短；且二次谐波的增长较为明显，接近于线性增长，三次及高次谐波则呈非线性增长。

(3) 在不计 TA 剩磁的条件下，除了 GIC 的大小以外，TA 自身线圈的匝数比也会对饱和程度产生影响，并且匝数比越大的电流互感器，直流偏磁时励磁电流波形畸变程度越小，谐波含量也较少。

参考文献 (References)

- [1] 刘连光, 张冰, 肖湘宁 (2009) GIC 和 HVDC 单极大地运行对变压器的影响. *变压器*, **46**, 32-35.
- [2] Pirjola, R. (2000) Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **28**, 1867-1873.
- [3] Kappenman, J.G., Albertson, V.D. and Mohan, N. (1981) Current transformer and relay performance in the presence of geomagnetically-induced currents. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-100**, 1078-1088.
- [4] Li, C.Y., Li, Q.M., Yao, J.X., et al. (2009) The characteristics of electromagnetic current transformers with DC bias. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Nanjing, 6-7 April 2009, 1-6.
- [5] Price, P.R. (2002) Geomagnetically induced current effect on transformers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, **7**, 1002-1008.
- [6] 彭晨光 (2010) 用于电网 GIC 分析的大型变压器暂态模型. 华北电力大学, 北京.
- [7] 李长云, 李庆民, 李贞, 等 (2010) 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性. *中国电机工程学报*, **30**, 127-132.
- [8] 郑涛, 陈佩露, 刘连光, 等 (2012) 计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响. *电力系统自动化*, **36**, 89-93.
- [9] 孙明洁, 徐政 (2007) 电流互感器两种常用模型的电磁暂态仿真研究. *浙江理工大学学报*, **24**, 190-194.
- [10] 任先文, 徐宏雷, 孙楷淇, 等 (2009) 非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真. *电力系统保护与控制*, **37**, 6-9.
- [11] Annakkage, U.D., McLaren, P.G., Dirks, E., et al. (2000) A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, 57-61.
- [12] 黄莉, 杨卫星, 张雪松 (2010) 基于 PSCAD/EMTDC 的带气隙电流互感器建模及仿真. *电力系统保护与控制*, **38**, 178-182.
- [13] 陈武恕, 朱永海 (2009) 基于 PSCAD 的电流互感器饱和特性分析. *大功率交流技术*, **1**, 39-42.
- [14] Liu, S.-T., Huang, S.-R., Chen, H.-W. and Hsien, T.-Y. (2005) Current transformer module basing the Jiles-Atherton hysteresis model in EMTP/ATP simulation. *The 7th International Power Engineering Conference*, **2**, 653-656.