

## 计及直流偏磁的保护用电流互感器仿真与实验分析

王振浩<sup>1</sup>, 王学斌<sup>1,2</sup>, 李国庆<sup>1</sup>, 陈洪涛<sup>3</sup>, 陶平虎<sup>4</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网甘肃省电力公司兰州供电公司, 甘肃 兰州 730070; 3. 国网吉林省电力公司松原供电公司, 吉林 松原 138000; 4. 国网甘肃省电力公司刘家峡水电厂, 甘肃 永靖 731600)

**摘要:** 保护用电流互感器(Current Transformer, CT)对电力系统继电保护的動作特性影响很大。直流偏磁会对 CT 的传变特性产生影响, 利用其 T 型等值电路推导出了直流偏磁条件下的励磁电流和磁通的表达式。通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件对不同直流偏移系数条件下的 CT 传变特性进行仿真分析, 结果表明, 偏磁条件下 CT 的磁化曲线第三象限部分会减小, 二次电流波形也会发生畸变, 同时二次电流中谐波幅值也在增加, 当偏磁电流增加到一定值时二次谐波将会大于三次谐波, 随着直流偏移系数的增加各次谐波也呈线性增长, 而基波幅值在减小。同时, 设计了交流叠加直流的实验电路来模拟直流偏磁现象以对保护用 CT 的传变特性进行实验分析。实验结果表明, 在偏磁条件下 CT 不能正确传变一次电流, 在偏磁条件下 CT 二次电流有效值会减小, 同时基波幅值也相应减小, 而其余各次谐波的幅值呈线性增加, 对角差的影响较电流误差而言更为严重。由此可见, 直流偏磁改变了保护用 CT 的传变特性, 对采用基波分量算法及谐波制动方案类型的保护构成严重威胁, 降低继电保护的可靠性。

**关键词:** 直流偏磁; 电流互感器; 励磁特性; 谐波; 幅值

### Analysis of simulation and experiment on the characteristic of the current transformer used for protection affected by DC magnetic bias

WANG Zhenhao<sup>1</sup>, WANG Xuebin<sup>1,2</sup>, LI Guoqing<sup>1</sup>, CHEN Hongtao<sup>3</sup>, TAO Pinghu<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Gansu Province Lanzhou Power Supply Company, Lanzhou 730070, China; 3. Jilin Province Songyuan Power Supply Company, Songyuan 138000, China; 4. Gansu Province Liujiaxia Hydropower Station, Yongjing 731600, China)

**Abstract:** The current transformer (CT) used for protection has a great effect on operation characteristics for protective relaying. Its transfer characteristics could be impacted by DC bias and its excitation current and magnetic flux is derived by T-shaped equivalent circuit. Then the analysis of simulation on different DC offset ratio by means of PSCAD/EMTDC software. The simulation result shows that it will cause CT's magnetization curve in third quadrant decrease and its secondary current distortion meanwhile the harmonic of secondary current increase and when the DC offset coefficient increase to a certain value the second harmonic will be greater than the third harmonic, but the fundamental is reduced accordingly. And the transfer characteristic of protective CT could be analyzed by simulating DC bias with the designed AC superposed DC experiment circuit. The result of experiment shows that the CT can not transfer the primary current accurately on DC bias condition, the secondary effective current decreases on DC bias and the fundamental decreases and others harmonic increases, and the impact to the phase error more serious than current error. So, the protective CT's transfer characteristic is changed and it's a serious threat to protection used for fundamental algorithm and harmonic restraint scheme which can reduce the reliability of relay protection.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377016).

**Key words:** DC magnetic bias; current transformer; excitation characteristic; harmonic; amplitude

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)13-0015-08

## 0 引言

当高压直流输电(HVDC)线路处于单极—大地

回路方式运行时, 一般入地电流可达 3 kA。地中直流会经由变压器中性点流入电力系统, 会引起电网中的电磁设备的直流偏磁现象<sup>[1]</sup>。此外, 在太阳活跃期时, 太阳黑子所产生的太阳风和射线会使地球磁场发生变化, 会在地磁场中感应出地磁感应电流

(GIC), 许多现场的监测数据显示, GIC 的幅值可达几百安培, 其频率一般在  $0.001 \sim 0.1$  Hz, 与我国电网工频相比而言, 可以近似地认为 GIC 为直流电流, 由此, GIC 流入电网也可能会引起直流偏磁现象<sup>[2-5]</sup>。目前电力系统中的保护用 CT 大多数都采用电磁式 CT, 直流偏磁也可能对电磁式保护用 CT 产生不利的影 响。由于直流偏磁电流流入电力系统首先进入变压器, 故当前很多研究直流偏磁对电力系统的影响都集中在变压器本体上, 而现场的情况是直流偏磁电流流入电力系统后首先经过的装置就是 CT, 而目前的研究所涉及到直流偏磁影响 CT 的较少<sup>[6-9]</sup>。

对于电力系统安全稳定运行来说, CT 能正确传变一次电流对于继电保护的可靠性有至关重要的意义。CT 一次侧电流是 50 Hz 的工频电流, 当直流偏磁现象发生时 CT 一次侧电流中出现了直流电流, 且直流电流全部作用于 CT 励磁支路, 就有可能引起 CT 的饱和, 一旦 CT 出现饱和现象, CT 二次侧电流波形就会出现畸变、缺损, 进而可能会引起继电保护算法出现误差, 导致继电保护不正确动作<sup>[10-13]</sup>。

目前, 尽管我国电网在大力建设数字化变电站, 具有无饱和现象、抗干扰能力强的电子式 CT 也逐渐向电网推广使用, 但是电子式 CT 工作环境对温度、湿度及防止振动等要求较高, 并且, 目前电子式 CT 的成本较高, 在当前国情条件下大规模使用电子式 CT 的条件尚未成熟, 我国电网中使用电磁型 CT 必将会持续很 长的一个时期<sup>[14-16]</sup>。随着我国不断大力发展高压直流输电以及太阳黑子活动活跃期的到来, 直流偏磁现象将会越来越严重, 电网所遭受直流偏磁影响的风险也在日益增加。深入研究直流偏磁对保护用 CT 的影响机理, 对于防范继电保护遭受直流偏磁影响, 确保电力系统安全稳定运行具有重要的现实意义<sup>[17-18]</sup>。

本文以实验用 CT 为例, 研究了直流偏磁对 CT 传变特性的影响, 在不同大小的直流偏磁电流的情况下, 仿真分析了直流偏磁条件下 CT 饱和特性, 并通过搭建实验电路对直流偏磁条件下电流互感器传变特性进行了相应的实验, 验证了理论分析的正确性。

## 1 直流偏磁等效分析模型

### 1.1 直流偏磁分析模型

如果在入地电流附近有中性点接地变压器存在, 地中电流会经由变压器中性点接地系统流入电力系统, 流经输电线路后会由相邻的变压器中性点接地系统流入大地, 由此与大地形成直流偏磁电

回路, 其流通示意图如图 1 所示。图 1 中  $I_{dc}$  为直流偏磁电流,  $T_1$ 、 $T_2$  为相邻两台中性点接地变压器,  $E_1$ 、 $E_2$  为所在变压器中性点接地系统的直流等效电位,  $Z_1$ 、 $Z_2$  为变压器接地阻抗,  $Z$  为输电线路阻抗。本文主要考虑直流偏磁对 CT 的影响, 本文中一律采用理想变压, 忽略直流偏磁对变压器的影响。

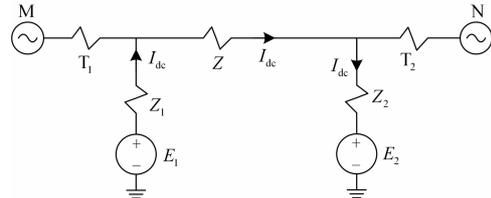


图 1 直流偏磁分析模型

Fig. 1 Model of the DC bias for analysis

### 1.2 CT 等效分析模型

当直流偏磁电流流入电力系统中时, 对电磁式 CT 影响最为严重, 本文根据电磁式 CT 特性作出等值电路如图 2(a)所示, 图中  $Z_1$  为一次阻抗,  $Z_2$  为二次阻抗,  $Z_{en}$  为二次负载阻抗,  $I_1$  为折算到二次侧的一次电流,  $I_2$  为二次电流,  $I_c$  为励磁电流, 通常为了分析方便, 忽略 CT 二次绕组的漏抗和铁芯损耗, 当二次负载为纯电阻  $R_2$  时, 作出 CT 简化等效电路如图 2(b)所示。

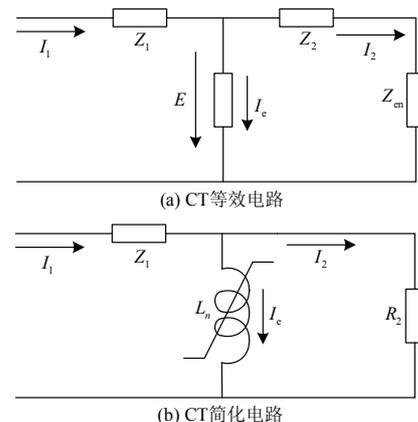


图 2 CT 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of current transformer

本文的分析模型采用建立在 Jiles-Atherton 理论上的 CT 模型, 通常情况下保护用 CT 在现场实际运行时, 我们比较关注它的暂态特性, 除了饱和和深度与暂态特性有较大的联系之外, CT 的励磁特性曲线本身决定了其暂态特性。根据文献[5]对 J-A 模型 的描述, 相应的励磁特性曲线如图 3(a)所示, 其中  $B_m$  为磁密的 最大值,  $B_r$  为 CT 剩磁大小,  $H_m$  为场强的最大值,  $H_c$  为矫顽力大小, 本文中 将 CT 的

电感分段线性等效如图 3(b)所示。

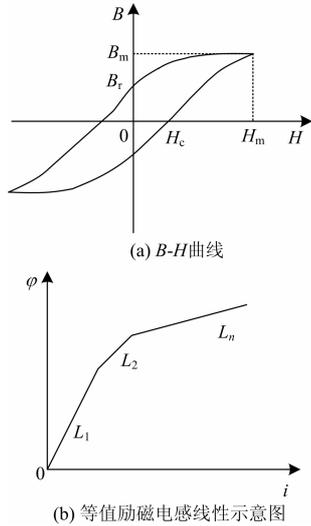


图 3 CT 励磁特性

Fig. 3 Excitation characteristic of current transformer

## 2 直流偏磁对 CT 的传变特性影响

### 2.1 CT 的励磁分析

根据图 2 所示的等效电路, 假设 CT 一次侧流过的电流为  $i_{p1}=I_m\cos\omega t$ , 则折算到二次侧的一次电流为  $i_1=i_{p1}/k$ , 由图 2(b)可知 CT 的二次时间常数  $\tau_2=L_n/R_2$ , 根据 CT 的等值电路可得到

$$\frac{L_n}{R_2} \frac{di_e}{dt} + i_e = i_1 \quad (1)$$

其中:  $k$  为 CT 变比, 有  $k=N_2/N_1$ ;  $i_e$  为 CT 的励磁电流, 通过式(1)可得到励磁电流为

$$i_e = \frac{I_m}{k} \frac{\omega\tau_2 \sin\omega t + \cos\omega t}{\omega^2\tau_2^2 + 1} - \frac{I_m}{k} \frac{e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{\omega^2\tau_2^2 + 1} \quad (2)$$

此时 CT 中的  $L_n$  非常大, 故有二次常数  $\tau_2$  很大, 且一般情况下满足  $\omega^2\tau_2^2 \geq 1$ , 励磁电流中的非周期分量很小, 非周期分量会在较短时间内衰减, 可以忽略不计。此时周期分量的幅值也不是很大, 当前 CT 工作在线性区而未进入饱和区, 因此能够正确地传变一次电流。设此时 CT 的励磁磁通为  $\Phi$ , 同时忽略 CT 的剩磁, 则根据 CT 的励磁基本方程:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{\Phi}{\tau_2} = R_2 i_1 \quad (3)$$

其中,  $R_2$  为 CT 的二次负载电阻, 可以得到

$$\Phi = \frac{I_m L_n}{k} \frac{\omega\tau_2 \sin\omega t + \cos\omega t - e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{\omega^2\tau_2^2 + 1} \quad (4)$$

### 2.2 直流偏磁条件下 CT 励磁特性分析

当直流偏磁现象发生时, 流过 CT 一次侧的电流中就会叠加有直流电流, 此时流过 CT 一次侧的电流为  $i_{p1}=I_m\cos\omega t+I_{dc}$ , 同理, 根据 CT 的等值电路可得到 CT 的励磁电流与磁通关系式分别为式(5)、式(6)所示。

$$i_e = \frac{I_m}{k} \frac{\omega\tau_2 \sin\omega t + \cos\omega t}{\omega^2\tau_2^2 + 1} + \frac{I_{dc}}{k} - \left( \frac{I_m}{k} \frac{1}{\omega^2\tau_2^2 + 1} + \frac{I_{dc}}{k} \right) e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (5)$$

由于二次常数  $\tau_2$  较大, 通常可将 CT 的励磁电流简化为

$$i_e = \frac{I_m}{k} \frac{\omega\tau_2 \sin\omega t + \cos\omega t - e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{\omega^2\tau_2^2 + 1} + \frac{I_{dc}}{k} \quad (6)$$

由式(6)可以看出此时 CT 的励磁电流中含有两种频率的电流成分, 一种是工频电流作为励磁电流, 另一种是直流偏磁电流也进入 CT 铁芯作为励磁电流出现。

同时由 CT 的基本励磁方程可得到此时直流偏磁条件下的励磁磁通为

$$\Phi = \frac{I_{dc} L_n}{k} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) + \frac{I_m L_n}{k} \left( \frac{\omega\tau_2 \sin\omega t + \cos\omega t - e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{\omega^2\tau_2^2 + 1} \right) \quad (7)$$

同理, 可将 CT 的励磁磁通简化为

$$\Phi = \frac{I_{dc} L_n}{k} + \frac{I_m L_n}{k} \left( \frac{\omega\tau_2 \sin\omega t + \cos\omega t - e^{-\frac{t}{\tau_2}}}{\omega^2\tau_2^2 + 1} \right) \quad (8)$$

由图 3(b)可以看出, 当偏磁电流较小时, 等效电感  $L_1$  处在未饱和区域的线性段, 此时 CT 铁芯中由直流偏磁电流提供的励磁电流和励磁磁通都很小, 因此在这种条件下直流偏磁电流不会对 CT 的运行工况产生实质性的影响, 此时的 CT 可以正常工作, 并能准确传变一次电流; 当偏磁电流增加时, 此时 CT 铁芯中的磁链将会急剧增加, CT 的工况发生较大变化, 直流磁通将会增加很多, 此时 CT 工作在饱和点附近, 工作特性变差, 从而 CT 不能准确传变一次电流, 二次电流波形开始畸变; 当直流偏磁电流较大时, 此时会引起 CT 中的直流励磁电流和直流磁通将会大于工频电流所产生的励磁电流和励磁磁通, 此时 CT 会出现严重饱和特性, 并且二次电流波形明显畸变, 从而导致 CT 不能正确传变一次电流, 极大地威胁了电力系统继电保护的可靠性。

### 3 仿真分析

本文利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件根据图 1 所示的原理图搭建了保护用 CT 的仿真模型, 相关参数为: 110 kV 输电线路, 额定电流为 700 A。基于 J-A 模型的 CT 能较为准确地模拟铁磁材料的磁滞现象, 本文采用建立在 J-A 理论上的 CT 模型对电流互感器在直流偏磁条件下的工作特性进行仿真。主要参数为 CT 二次负载  $R=0.5 \Omega$ ,  $X=0.8 \times 10^{-3} \text{ H}$ 。直流偏磁电流的模拟本文采用直流电源来提供, 并且通过定义直流偏移系数  $K_{dc}$  这一概念来定量地衡量直流偏磁电流对 CT 传变特性的影响。

$$K_{dc} = \frac{\text{直流偏磁电流}}{\text{CT一次侧电流}}$$

由图 4~图 12 可以得知, 在直流偏磁条件下, 二次电流波形会发生畸变, 随着偏磁电流的增大, 二次侧电流的畸变会越来越严重, 并且相位和电流出现偏差, 在对二次电流进行谐波分析之后可以看出, 当 CT 铁芯中出现直流偏磁电流时, 二次侧电流中出现了偶次谐波, 并且偶次谐波幅值的增长较奇次谐波幅值增长较为明显。当直流偏磁电流增加到一定程度之后偶次谐波中的二次谐波将大于奇次谐波中的三次谐波, 二次电流的畸变会随着直流偏移系数的增加越来越严重。同时也可以从图中看出, 直流偏磁条件下 CT 的铁芯中磁化曲线的第三象限部分会向原点方向移动。

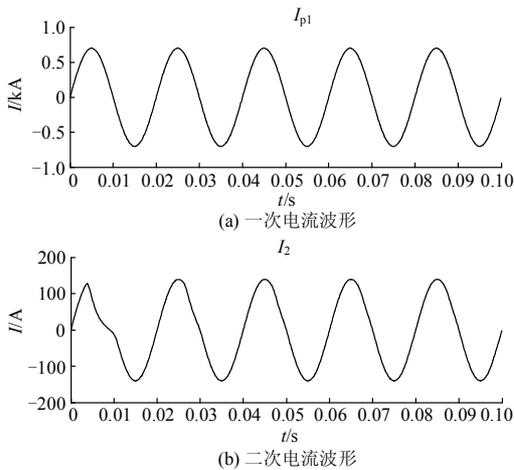


图 4  $K_{dc}=0$  时的 CT 两侧电流波形  
Fig. 4 Current wave of CT for  $K_{dc}=0$

此时, 可以明显地看出 CT 二次电流波形无畸变, 并且与一次电流相位相同, 比例误差在允许误差 10% 以内, 图 5 为  $K_{dc}=0$  时的二次电流基波与谐波的幅值与相位, 在这种情况下 CT 铁芯稳定工作在线性区, 能准确传变一次侧工频电流。

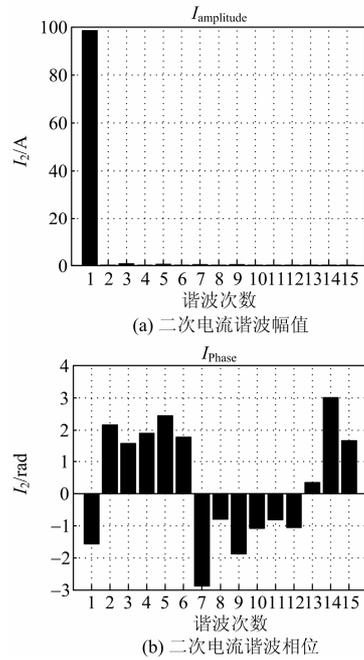


图 5  $K_{dc}=0$  时的 CT 二次侧电流各次谐波幅值和相位  
Fig. 5 Amplitude and phase of CT for  $K_{dc}=0$

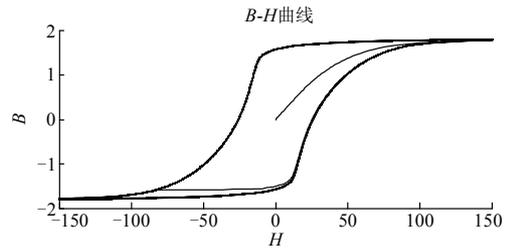


图 6  $K_{dc}=0$  时的 CT 的磁化曲线  
Fig. 6 Magnetization curve of CT for  $K_{dc}=0$

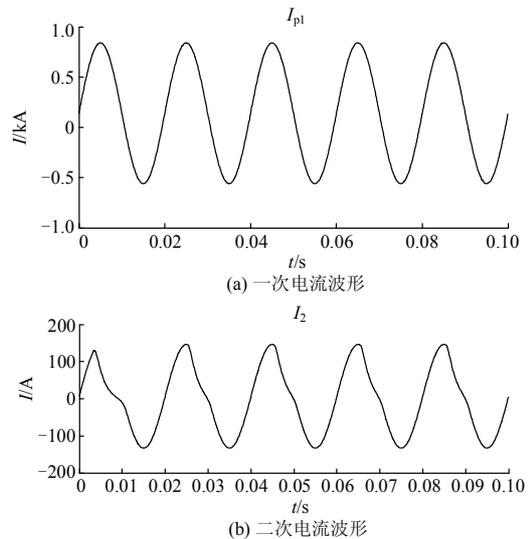


图 7  $K_{dc}=0.05$  时的 CT 两侧电流波形  
Fig. 7 Current wave of CT for  $K_{dc}=0.05$

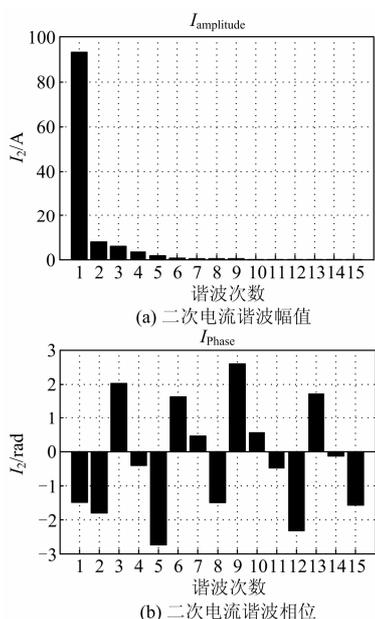


图 8  $K_{dc}=0.05$  时的 CT 二次侧电流各次谐波幅值和相位

Fig. 8 Amplitude and phase of CT for  $K_{dc}=0.05$

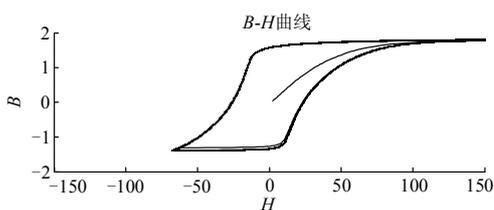


图 9  $K_{dc}=0.05$  时的 CT 磁化曲线

Fig. 9 Magnetization curve of CT for  $K_{dc}=0.05$

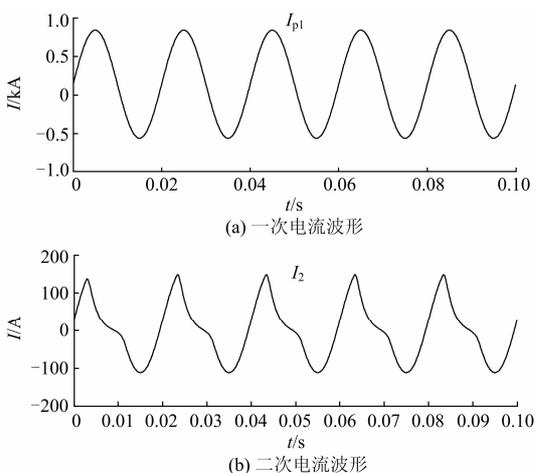


图 10  $K_{dc}=0.2$  时的 CT 两侧电流波形

Fig. 10 Current wave of CT for  $K_{dc}=0.2$

不同直流偏移系数时 CT 二次侧电流谐波的幅值和相位如表 1 所示, 其中  $M$ 、 $P$  分别为所对应的幅值和相角。

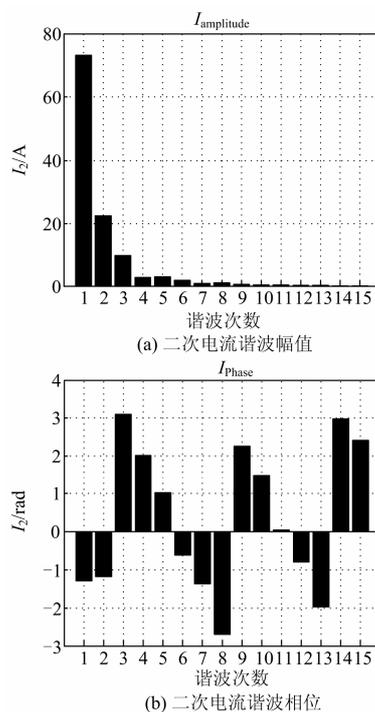


图 11  $K_{dc}=0.2$  时的 CT 二次侧电流各次谐波幅值和相位

Fig. 11 Amplitude and phase of CT for  $K_{dc}=0.2$

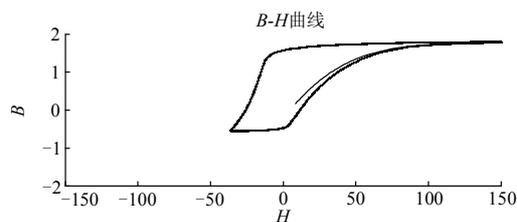


图 12  $K_{dc}=0.2$  时的 CT 磁化曲线

Fig. 12 Magnetization curve of CT for  $K_{dc}=0.2$

表 1 不同直流偏移系数条件下的二次电流幅值和相位

Table 1 Amplitude and phase of CT's second current for different  $K_{dc}$

$K_{dc}$	基波		二次		三次		四次		五次	
	$M$	$P$	$M$	$P$	$M$	$P$	$M$	$P$	$M$	$P$
0.0	98.3	-1.6	0.0	1.2	0.7	1.6	0.0	2.2	0.5	2.4
0.1	86.9	-1.4	14.0	-1.6	8.8	2.4	4.1	0.2	1.3	-1.3
0.2	73.2	-1.3	22.5	-1.2	9.7	3.1	2.7	2.0	3.0	1.0
0.3	59.6	-1.2	26.4	-0.9	7.0	-2.4	4.5	-2.7	2.9	2.2
0.4	46.7	-1.1	26.6	-0.6	5.0	-1.3	5.4	-1.9	1.9	-2.5
0.5	35.1	-1.0	23.9	-0.4	6.1	-0.2	4.0	-1.1	2.5	-1.0

#### 4 实验分析

本文为了进一步验证理论分析的正确性, 根据图 1 搭建了实验电路。本文用台湾致茂电子公司的

61511 可编程交流电源供应器，其可以提供任意频率和幅值的电流，在实验中与采用工频与直流电流相叠加来模拟直流偏磁。示波器采用 Tektronix MSO3034，二次电流测量采用 GWINSTEK GDM-8245，电流源探头采用 A621，本文通过对不同型号的 CT 大量试验之后，以试验用 CT 为样本进行分析，其相关参数为：变比为 20/5 A，容量为 10 VA。由于本文不考虑 CT 铁芯剩磁的影响，在实验开始前先对 CT 进行去磁。

在实验中利用电流表统计出不同直流偏移系数条件下 CT 二次侧电流的有效值，并利用 Matlab 作出直流偏移系数与二次侧电流的关系如图 13 所示。

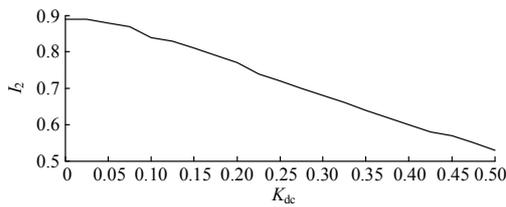


图 13 CT 二次侧电流有效值与  $K_{dc}$  关系  
Fig. 13 Relationship of of CT's secondary RMS current and  $K_{dc}$

从上图可以看出当  $K_{dc}$  小于 0.025 时，二次侧电流有效值几乎没有变化，此时偏磁电流对 CT 二次电流的影响不大，当直流偏磁电流大于一次电流的 2.5% 时，二次电流的有效值开始逐渐减小，并且随着偏磁电流的增大，其有效值呈线性减小的趋势。

其中不同偏移系数条件下的一次、二次电流波形及二次电流的谐波含有率分别如图 14、图 15 所示。

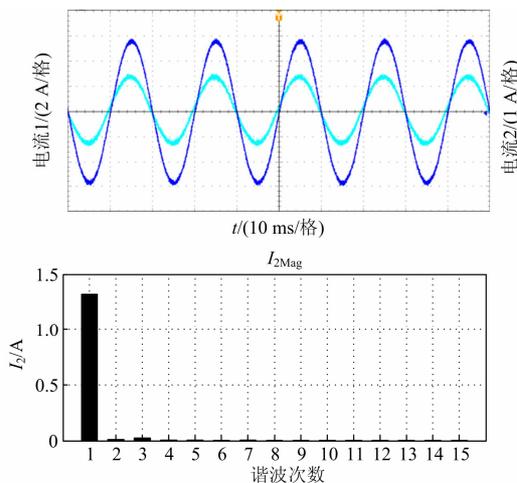


图 14  $K_{dc}=0.025$  时的 CT 二次侧电流波形及谐波幅值  
Fig. 14 Current wave and harmonic magnitude of CT for  $K_{dc}=0.025$

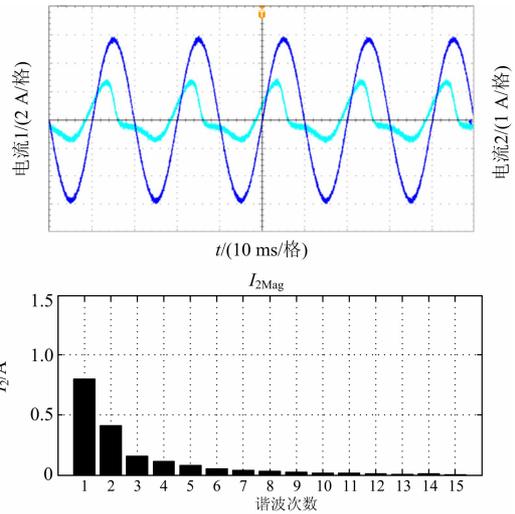


图 15  $K_{dc}=0.5$  时的 CT 二次侧电流波形及谐波幅值  
Fig. 15 Current wave and harmonic magnitude of CT for  $K_{dc}=0.5$

图 14 为偏磁电流为 0.1 A ( $K_{dc}=0.025$ ) 时的二次电流波形和各次谐波的幅值相位图，可以看出此时二次电流无明显畸变，并且二次电流相位无明显变化，但是谐波中出现了偶次谐波，并且反映出基波幅值有所减小。

图 15 为偏磁电流是 2 A ( $K_{dc}=0.5$ ) 时的二次电流和谐波幅值实验结果，此时可以看出二次电流已经严重畸变，并且基波的幅值较未发生偏磁现象时下降 40%，反而其余各次谐波的幅值在线性增加，此时二次电流相位较一次电流偏移 119.4 厘弧度，电流误差达到 -0.49，通过大量实验数据不难发现，在随着直流偏移系数增加时角差正方向增加，而比差在朝着负方向增加。但是比差增长的幅度相比角差增长幅度而言小很多，由此可见直流偏磁对 CT 的角差影响较比差明显。本文给出了角差和比差的部分数据如表 2 所示。

表 2 不同直流偏移系数下的误差实验数据(部分)

Table 2 Experiment data of CT's error on differents of  $K_{dc}$  (part)

$K_{dc}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0
角差/厘弧度	31.4	56.5	87.9	100.5	119.4
比差/%	-0.11	-0.18	-0.29	-0.4	-0.49

根据以上的实验数据可知，当直流偏磁现象发生时，若继电保护采用均方根算法时，由于在偏磁条件下，二次电流有效值会随着偏磁电流的增加而减小，此时会明显地影响继电保护的正常动作，若继电保护采用傅里叶算法时，由于 CT 二次电流基波分量在减小，此时对保护的正常动作也会产生相

应的影响,同时对于采用谐波制动方法的保护来讲,由于谐波分量幅值的增加,可能会导致继电保护失效,本文统计了不同直流偏移系数条件下的二次电流各次谐波幅值如表3所示。

表3 不同直流偏移系数下的二次电流幅值实验数据(部分)

Table 3 Experiment data of CT's second current harmonic magnitude on differents of  $K_{dc}$  (part)

$K_{dc}$	基波	二次	三次	四次	五次
0.0	1.32	0.0	0.02	0.0	0.006
0.05	1.30	0.05	0.05	0.02	0.017
0.1	1.26	0.121	0.097	0.053	0.035
0.2	1.15	0.251	0.163	0.084	0.048
0.3	1.04	0.339	0.18	0.095	0.065
0.4	0.91	0.389	0.174	0.104	0.077
0.5	0.79	0.407	0.157	0.114	0.08

本文的实验验证在实验室中进行,实际的实验现场布置如图16所示。

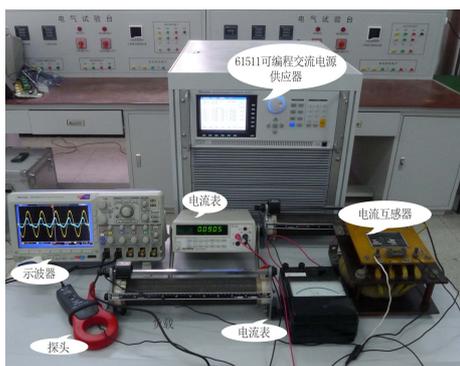


图16 实验现场

Fig. 16 Test site layout

## 5 结论

本文根据CT的等效模型,并依据CT的基本方程,推导出直流偏磁条件下的励磁电流和励磁磁通的表达式,从数学角度分析了直流偏磁对CT的影响。同时本文利用PSCAD/EMTDC仿真软件中的基于J-A理论的CT铁芯模型对直流偏磁条件下的CT传变特性进行仿真分析,最后通过搭建实际电路进行实验分析,本文的分析结果可作为保护用CT选用的参考依据。

(1) 基于CT的T型等值电路推导了直流偏磁条件下的励磁电流和磁通表达式,通过对直流偏磁条件的CT进行仿真可以看出其磁化曲线会朝着原点方向移动,当偏磁电流增加时,CT铁芯会出现严重饱和状态,磁化曲线在第三象限中的面积会变小。

(2) 直流偏磁条件下CT的二次侧电流会发生畸变,并且随着偏磁电流的增加二次侧电流的畸变会

越来越严重,并且出现了谐波。

(3) 通过具体的实验装置对保护用CT进行实验分析,实验结果表明,当 $K_{dc}$ 小于0.025时,二次电流的有效值基本上不受偏磁电流的影响,当随着直流偏移系数增大时,二次电流有效值呈线性减小;同时对二次电流进行傅里叶分析不难发现,随着直流偏移系数的增加基波分量在减小,同时二次电流中出现了偶次谐波,各次谐波分量在增加,当 $K_{dc}$ 大于0.05时二次谐波幅值大于三次谐波,二次电流波形也在随着 $K_{dc}$ 的增加畸变会越来越严重,并且随着直流偏移系数的增加相角误差正向偏移、比例误差负向偏移,从实验数据可以看出直流偏磁对相角误差的影响较比例误差大。

当前条件下,直流偏磁现象发生的频率较低,尚未引起人们普遍关注,但是随着太阳活跃期的到来和我国高压直流输电工程的飞跃式发展,直流偏磁现象会越来越严重,将会严重威胁继电保护的正确动作,为了确保电网的安全稳定运行,应当值得电力系统科研工作者对其进行深入研究。

## 参考文献

- [1] 袁季修. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 朱林, 韦晨, 余洋. 单相变压器的直流偏磁励磁电流问题及其对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 158-162.  
ZHU Lin, WEI Chen, YU Yang. Analysis of DC bias exciting current of the single-phase transformer and its effect on protection[J]. Power System Protection and Control, 2010 38(24): 158-162.
- [3] 赵志刚, 刘福贵, 张俊杰. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 71-76.  
ZHAO Zhigang, LIU Fugui, ZHANG Junjie. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.
- [4] 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.
- [5] ANNAKAGE U D, MCLAREN P G, DIRKS E, et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 57-61.

- [6] 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.
- [7] EMANUEL A E, ORR J A. Current harmonics measurement by means of current transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1318-1325.
- [8] 李贞, 李庆民, 李长云, 等. 直流偏磁条件下变压器的谐波畸变特征[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 52-55.  
LI Zhen, LI Qingmin, LI Changyun, et al. Harmonic distortion feature of AC transformers caused by DC bias[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 52-55.
- [9] LIU S T, HUANG S R, CHEN Hungwei. Using TACS functions within EMTP to set up current-transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2222-2227.
- [10] 公茂法, 夏文华, 张晓明, 等. 基于 HHT 的抗 CT 饱和和变压器故障识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 64-70.  
GONG Maofa, XIA Wenhua, ZHANG Xiaoming, et al. New method to identify transformer fault with anti-CT saturation based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 64-70.
- [11] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流输电地中电流对电网设备影响的分析与处理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 81-82.  
KUAI Dizheng, WAN Da, ZOU Yun. Analysis and handling of the impact of geomagnetically induced current upon electric network equipment in DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 81-82.
- [12] 李晓萍, 文习山, 蓝磊, 等. 单相变压器直流偏磁实验与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 33-40.  
LI Xiaoping, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 33-40.
- [13] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁和剩磁同时作用下保护用电流互感器的暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 107-111.  
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Research on the transient characteristics of the protective CTS with co-impacts of DC bias and remnant flux[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 107-111.
- [14] 郭满生, 梅桂华, 刘东升, 等. 直流偏磁条件下电力变压器铁心 B-H 曲线及非对称励磁电流[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 46-51.  
GUO Mansheng, MEI Guihua, LIU Dongsheng, et al. B-H curve based on core and asymmetric magnetizing current in DC-biased transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 46-51.
- [15] 李鸿志, 崔翔, 刘东升, 等. 直流偏磁对三相电力变压器的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 88-96.  
LI Zhihong, CUI Xiang, LIU Dongsheng, et al. Influence on three-phase power transformer by DC bias excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [16] 王振浩, 王学斌, 宋丽, 等. 直流偏磁对输电线路距离保护的影响分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(15): 42-47.  
WANG Zhenhao, WANG Xuebin, SONG Li, et al. Affect of DC magnetic bias on transmission line distance protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(15): 42-47.
- [17] 文俊, 刘连光, 项颂, 等. 地磁感应电流对电网安全稳定运行的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 24-30.  
WEN Jun, LIU Lianguang, XIANG Song, et al. Influences of geomagnetic induced currents on security and stability of power systems[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 24-30.
- [18] 熊兰, 周健瑶, 宋道军, 等. 基于改进 J-A 磁滞模型的电流互感器建模及实验分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 482-488.  
XIONG Lan, ZHOU Jianyao, SONG Daojun, et al. Modeling and experimental analysis of current transformer based on modified J-A hysteretic model[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 482-488.

收稿日期: 2014-09-25; 修回日期: 2015-03-18

作者简介:

王振浩(1964-), 男, 教授, 长期从事电力系统自动化科技研发及教学工作; E-mail: zhenhaowang@126.com

王学斌(1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wxb368@126.com

李国庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统安全性和稳定性分析、电力系统继电保护和配电系统自动化等领域的研究工作。

(编辑 魏小丽)