

# 直流偏磁下 CT 饱和对变压器差动保护的影响

陈进美

(江苏省电力公司检修分公司南京分部, 江苏 南京 210019)

**摘 要:**直流偏磁条件下对电流互感器传变特性进行了实验和仿真分析, 利用低频正弦电流拟合直流偏磁电流, 研究了直流偏磁电流对电流互感器传变特性的影响, 对其引起的电流互感器饱和对变压器差动保护可能造成的影响进行了仿真研究。

**关键词:**直流偏磁; CT 饱和; 传变特性; 误动

## 0 引言

电力系统中, 当两个中性点接地的变压器之间存在电位差时, 变压器的绕组中将产生直流电流, 该直流通过两个接地变压器及输电线路构成通路, 流过变压器绕组和线路中的电磁式电流互感器, 造成回路中的变压器、电流互感器等铁磁元件磁通发生变化, 并引发一系列的电磁效应, 即为直流偏磁(DC Bias)。

研究表明, 引起直流偏磁现象的主要原因有两种, 其一是高压直流输电系统在采用单极大地回线或双极不对称运行方式时, 接地极的直流直接流入大地回路, 而由于大地土壤的高电阻率, 电流在大地中流通会在附近的交流电网不同接地点处感应出不同的电位, 即会在直流输电接地极附近的变电站接地网中产生电势差, 从而在交流电网中形成一个恒定的直流电流。如 2002 年 12 月上海单极直流输电调试时, 在江苏武南 500kV 主变压器的中性点监测到直流量达到 12.8A, 从变压器油箱壁测得振动值超过允许值的一倍<sup>[1]</sup>。

另一种原因是太阳磁暴引起的地磁感应电流。由于大地是一个导电的球体, 太阳活动引发地球磁场暂态波动并产生地磁暴, 使得大地的一部分处于这个随时间变化的磁场中, 在地球表面形成电位梯度, 从而在土壤高电阻率的地区引发大小为每公里几伏到几十伏的地面电势。该电势能够持续几分钟到几个小时不等, 并在东西走向长距离输电系统中的不同变压器接地点之间诱发地磁感应电流, 该电流通过大地和变压器及输电线路组成回路<sup>[2]</sup>。电流频率一般为 0.001 到

0.1Hz 之间, 较 50Hz 工频, 可看成准直流。图 1 为 2006 年 12 月 14 日至 16 日磁暴发生期间, 广东九潭站、唐美站、仙溪站主变中性点监测到的直流偏磁电流变化, 可以看出各站变压器中性点均出现不同大小变化的直流量<sup>[3]</sup>。

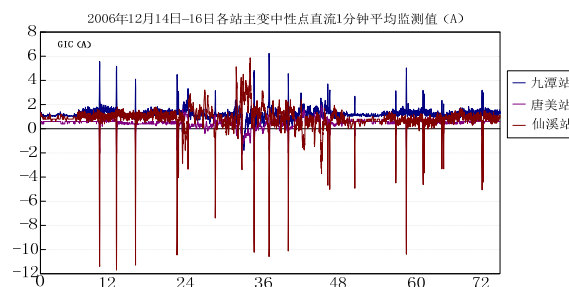


图 1 磁暴发生时变压器中性点的直流监测值

目前直流偏磁对电力系统的影响研究, 主要集中在对变压器的影响及其附加效应上, 而电流互感器作为一种特殊的变压器, 其特性与变压器有一定的类似。因此, 直流偏磁能够引起变压器饱和, 也同样会造成电磁式电流互感器的饱和, 改变其传变特性, 影响仪表测量、电能计量的精度<sup>[4]</sup>。本文重点分析直流偏磁引起的电流互感器饱和对变压器差动保护造成的影响, 为运行现场的故障分析和保护相关处理提供理论和仿真依据。

## 1 电流互感器的工作原理

### 1.1 电流互感器概述

电流互感器(CT)作为电力系统中各种测量仪表、继电保护装置获取一次系统信息的电气设备, 能够将一次回路中的大电流按比例变换为小

电流(5A, 1A)。电流互感器的一次绕组串联在被测量的一次电路里, 而二次绕组通过电缆或者导线串接在二次设备中<sup>[5,6]</sup>。

目前电力系统中保护用电流互感器使用电磁式的较为广泛，其原理特性与一般变压器类似。因此，在直流偏磁条件下，电流互感器一次回路的铁芯绕组会流过直流分量，并可能造成互感器铁芯磁通饱和，进而影响二次电流的准确传变。而变压器差动保护常配置的 P 级电流互感器，这种准确级较易受磁通饱和的影响，造成两侧电流互感器暂态特性的不一致而引起变压器差动保护的误动。随着直流偏磁问题的日益凸显，研究偏磁时电流互感器的特性，探明其作用机制，对运行现场的故障分析、保护定值整定以及保护装置改进都具有重要的意义。

### 1.2 电流互感器的稳态特性

电流互感器的等值电路如图 2 所示, 其一次绕组和二次绕组绕在同一个闭合的铁芯磁路上, 一次绕组中的压降等于铁芯磁通在该绕组中感应的电动势, 同时铁芯磁通也会在二次绕组中感应出相应的电动势<sup>[7]</sup>。

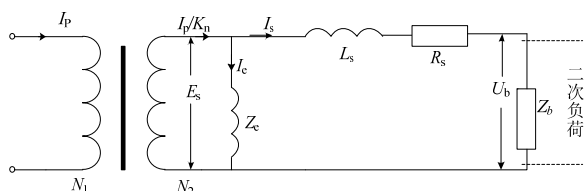


图 2 电流互感器等值电路

其中,  $I_p$ ——一次侧电流;  $I_s$ ——二次侧电流;  $I_e$ ——励磁电流;  $E_s$ ——二次感应电动势;  $U_b$ ——二次负荷电压;  $Z_e$ ——励磁阻抗,  $Z_e=R_e+L_e$ ;  $L_s$ ——二次绕组电感;  $R_s$ ——二次绕组电阻;  $Z_b$ ——二次负荷阻抗,  $Z_b=R_b+L_b$ ;  $N_1$ ——一次侧匝数;  $N_2$ ——二次侧匝数;  $K_n$ ——匝数比,  $K_n=N_2/N_1$

理想情况下，电流互感器一次电流与二次电流成正比，即：

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

由于互感器励磁损耗的存在，一次安匝( $I_p N_1$ )不能全部转换成二次安匝( $I_s N_2$ )，其中一小部分用来产生铁芯中所需的磁通( $I_c N_2$ )，即：

$$I_n / K_n = I_s + I_e \quad (2)$$

稳态时电流互感器的测量误差主要是由励磁电流  $I_e$  引起的, 这种误差通常用电流误差(比差) $R_{CF}$ 、相位差(角差) $\beta$  和复合误差  $\varepsilon_c$  来衡量[8]

比差  $RCF$ : 电流误差是电流互感器在测量电流时的数值误差, 是由于励磁电流的存在而引起的实际电流比与额定电流比不相等, 定义为:

$$RCF = \frac{K_n I_s - I_p}{I_n} \times 100\%$$

(3)

角差  $\beta$  ——相位差是电流互感器一次电流与二次电流相量的相位差值。按规定的正方向定义,若二次电流的相量超前一次电流相量时,定义相位差为正值。复合误差  $\varepsilon_c$  ——在铁芯磁通接近饱和等情况下,电流互感器的二次电流与励磁电流不再是标准的正弦波,此时误差无法用比值差和相位差来准确表示,而利用稳态一次电流瞬时值与  $K_0$  倍的二次电流瞬时值之差的方均根指定义复合误差,表示为:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{T_n} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 dt} \quad (4)$$

式中,  $i_s$  是一次电流瞬时值,  $i_p$  是二次电流瞬时值,  $T$  是一个周波的时间。

### 1.3 电流互感器的暂态特性

电流互感器的暂态特性是指一次系统不正常运行或故障时, 电流互感器一、二次侧电流及励磁电流、铁芯磁通和暂态误差的变化特性。

在图 2 中, 当电流互感器未饱和时, 其励磁支路  $Z_0$  可认为是线性的, 在不考虑二次漏抗、负荷电感和铁芯损耗等时, 可以得到如下关系式:

$$\frac{i_p}{K_n} = i_e + i_s \quad (5)$$

$$L_e \frac{di_e}{dt} = L_z \frac{di_s}{dt} + R_z i_s \quad (6)$$

$$\Psi = N_\gamma \Phi = L_\rho i_\rho \quad (7)$$

其中,  $R_Z = R_S + R_b$  为二次回路电阻,  $L_Z = L_S + L_b$  为二次回路电感,  $\Phi$  为铁芯中的磁通,  $\Psi$  为磁通对应的磁链。

由式(5)和(6), 可得

$$T_1 \frac{di_e}{dt} + i_e = T_2 \frac{di_p}{dt} + \frac{i_p}{K_n} \quad (8)$$

其中,  $T_1 = \frac{L_e + L_z}{R_z}$ ,  $T_2 = \frac{L_b}{R_z}$ 。

假设电力系统发生短路故障时, 短路一次电流为:

$$i_p = I_{pm} [e^{-\frac{t}{T_p}} \cos \theta - \cos(\omega t + \theta)] \quad (9)$$

其中,  $I_{pm}$  为短路电流周期分量的幅值,  $T_p$  为一次系统的时间常数,  $\theta$  为短路初相角,  $\cos \theta$  为全偏移系数。

短路电流  $i_p$  包括交流分量和按  $T_p$  衰减的非周期分量两部分。在短路发生瞬间, 若初相角  $\theta = 0$ , 则非周期直流分量最大, 一次短路电流全偏移。此时, 全偏移系数  $\cos \theta = 1$ , 式(9)可改写为:

$$i_p = I_{pm} [e^{-\frac{t}{T_p}} - \cos \omega t] \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 一次电流中按指数衰减的非周期分量, 是导致电流暂态变化的原因。且  $\theta$  越接近零,  $T_p$  越大, 非周期分量对暂态的影响越大。考虑到:

$$\omega^2 T_1^2 \geq 1, \delta \approx \pi / 2 \quad (11)$$

设二次负荷为纯电阻, 则  $T_2 = 0$ , 可近似得到:

$$i_e = \frac{I_{pm}}{K_n} \left[ \frac{T_p}{T_p - T_1} (e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) \cos \theta + \frac{\sin \theta}{\omega T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_1} \right] \quad (12)$$

由式(5)可得到二次电流为:

$$i_e = \frac{I_{pm}}{K_n} \left[ \frac{1}{T_p - T_1} (T_p e^{-\frac{t}{T_p}} - T_1 e^{-\frac{t}{T_1}}) \cos \theta - \frac{\sin \theta}{\omega T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos(\omega t + \theta) + \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_1} \right] \quad (13)$$

由式(7)和(12)可得暂态磁通为:

$$\Phi = \frac{L_e I_{pm}}{K_n N_2} \left[ \frac{T_p}{T_p - T_1} (e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_1}}) \cos \theta + \frac{\sin \theta}{\omega T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_1} \right] \quad (14)$$

在暂态过程中, 电流互感器的一次电流取决于系统状况, 暂态磁通大小与一次电流分量有关。而二次电流取决于磁通密度、剩磁及饱和程度, 所以二次电流的准确传变, 不仅与一次电流有关, 还与铁芯的非线性特性有关。

电流互感器的饱和具体可以分为两类, 一类是短路电流中混合有非周期分量或铁芯中存在剩磁, 这时电流互感器的工作区间非对称, 称为暂态饱和。在系统发生不对称故障或初始合闸时, 电流互感器一次侧电流会产生一个持续数十到数百毫秒的暂态分量, 引起电流互感器的暂态饱和。根据磁通和二次电流的变化情况, 暂态饱和可分为两种状态: 一种是饱和磁通小于稳态周期分量磁通, 这种情况时电流互感器在稳态分量磁通和暂态分量磁通的共同作用下迅速饱和, 一般是短路第一个半波即开始饱和。另一种情况是饱和磁通大于周期分量磁通, 此时电流互感器开始不饱和, 但随着磁通非周期分量的不断增加, 在总磁通达到饱和后电流互感器进入饱和状态, 一般在短路几个半波后才开始饱和。

另一类是由于线路短路时的稳态对称电流幅值较大, 进入了电流互感器的饱和区域, 导致一次电流不能准确传变到二次, 这类称为稳态饱和。稳态饱和是在电压峰值时线路发生故障, 此时故障电流没有偏移。发生稳态饱和时, 电流互感器在一个周波的开始几毫秒能够正确传变一次电流。此后, 由于励磁阻抗的减小, 一次电流大部分转化为励磁电流, 使得二次电流逐渐按指数规律衰减。当电流衰减到与一次电流相等时, 饱和和停止。此过程随一次电流的反向而重复发生。

由式(4)~(7), 可得:

$$\Psi(t) = \Psi(0) + (L_z i_p + \int_0^t i_p(t) R_z dt) - (L_z i_e + \int_0^t i_e(t) R_z dt) \quad (15)$$

可以看出, 如果电流互感器的一次绕组中存在直流分量, 经过积分而使磁通不断增加, 也会

使电流互感器达到饱和。直流偏磁条件下，电流互感器一次绕组流过直流分量，在铁芯中直流磁通和交流磁通相叠加，总的磁通很有可能会造成铁芯饱和，影响电流互感器的传变特性，降低稳态测量用和暂态保护用的电流互感器的精度，对此本文将从仿真的角度进行研究。

## 2 CT 饱和对变压器差动保护的影响

在 PSCAD 中以常用的 Yn-△接线的三相双绕组变压器为模型，对其差动保护进行了仿真。通过采集变压器两侧的电流，经电流互感器变换后用于求取差流。由于直流偏磁以变压器接地中性点和输电线路为回路流通，因此只有变压器 Yn 侧电流互感器中存在偏磁电流，△侧不受影响。因此对直流偏磁效应的模拟是在 Yn 侧所测得的线路电流基础上叠加定量的直流分量作为电流互感器的一次侧电流，将其经电流互感器变换后的二次侧电流作为求取变压器差动电流的一部分。

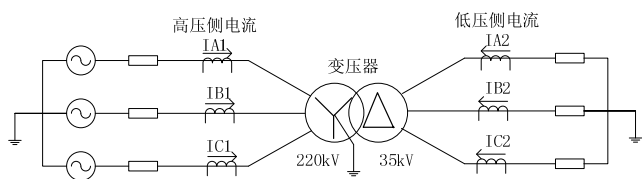


图3 直流偏磁下的变压器差动保护仿真模型

仿真中，变压器容量为 360MVA，高压 220kV，低压 35kV，高压侧电流为 240A，当引入频率为 0.05Hz，大小为 25A 的直流偏磁电流 GIC 时，仿真到 1.8s 发现电流互感器进入局部暂态饱和状态，工作于局部磁滞回环，如图 4 所示。此时变压器 Y 侧二次电流波形未出现明显的畸变，但相比一次电流出现一定的相位和幅值偏差，如图 5 所示。

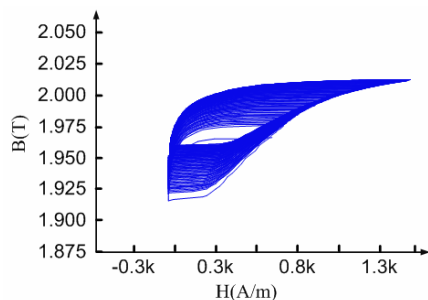


图4 电流互感器的局部暂态饱和

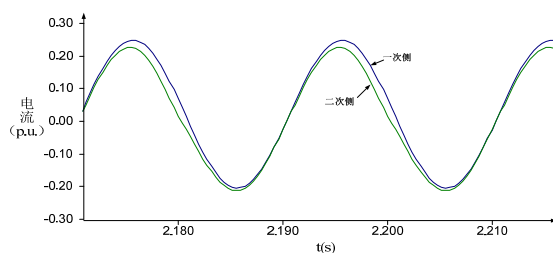
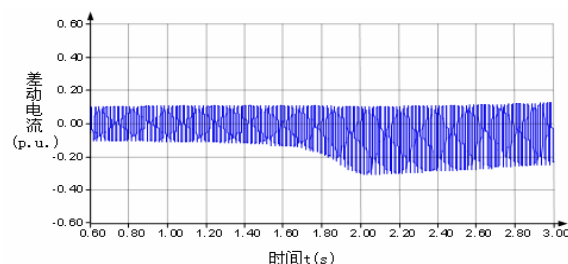
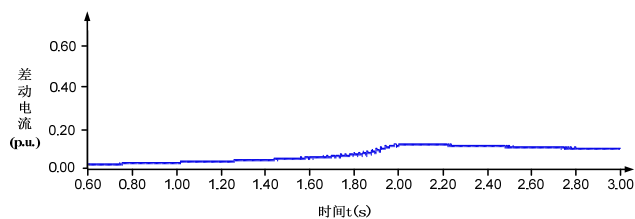


图5 电流互感器Y侧一次和二次电流

观察此时的差流幅值和谐波含量，如图 6(a)(b)所示，可以看到，差流幅值为 0.31p.u.，二次谐波含量为 0.148。



(a) 差动电流



(b) 差流的二次谐波含量

图6 差动电流及谐波大小

对于采用比率制动特性的变压器差动保护而言，如图 7 所示，这种比率制动的动作判据为：

$$\begin{cases} I_{op} > I_{op,0} & I_{res} \leq I_{res,0} \\ I_{op} > I_{op,0} + K_1(I_{res} - I_{res,0}) & I_2 \geq I_{res} > I_{res,0} \\ I_{op} > I_{op,0} + K_1(I_2 - I_{res,0}) + K_2(I_{res} - I_2) & I_{res} > I_2 \end{cases} \quad (16)$$

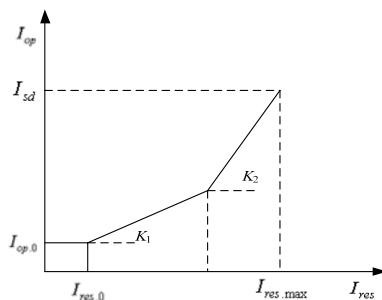


图7 三折线比率制动特性

图中， $I_{op}$  为动作电流； $I_{res}$  为制动电流； $I_{op,0}$

为最小动作电流;一般整定为  $0.2\sim 0.3$ ;  $I_2$  为第二个折点的制动电流;  $K_1$  和  $K_2$  为相应段的斜率。

对比仿真结果发现,直流偏磁下差流的大小达到  $0.31\text{p.u.}$ ,能够引起差动保护的動作,而此时差流二次谐波比仅为  $0.148$ ,低于一般设定的二次谐波制动比使差动保护未能闭锁,从而有可能造成差动保护的误动。分析可知,由于 GIC 直流偏磁的存在,造成变压器 Y 侧电流互感器的局部暂态饱和,引起此侧经电流互感器传变后的电流出现轻微的畸变和相位偏差,而变压器  $\Delta$  侧电流则不受直流偏磁的影响,能够正常传变,从而导致差流幅值变大的同时二次谐波的含量较低,增加了差动保护误动的可能性。

### 3 结论

本文对直流偏磁条件下的电流互感器传变特性进行了实验和仿真分析,其中对直流偏磁量的引入是利用低频正弦电流来拟合偏磁 GIC,针对工频电流叠加偏磁 GIC 的情况,研究了偏磁 GIC 的幅值和频率对电流互感器传变特性的影响,其引起的电流互感器饱和对变压器差动保护可能造成的影响进行了仿真研究,得出:偏磁 GIC 能够引起变压器高压侧电流互感器暂态饱和,从而导致变压器差流增大,同时差动保护的二次谐波含量降低,进而加大了变压器差动保护误动的可能性,分析结论能够为运行现场的故障分析和保护相关处理提供理论和仿真依据。

#### 参考文献:

- [1] 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(02):81-82.
- [2] 白锋.电力变压器耐受直流偏磁能力的仿真研究[D].北京,华北电力大学,2010.
- [3] 肖冬.直流输电和磁暴引起变压器直流偏磁的相关研究[D].武汉,华中科技大学,2007.
- [4] Kappenman, J.G. Current Transformer and Relay Performance in the Presence of Geomagnetically-Induced Currents[J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on Power Systems, 1981, 100(3): 1078-1088.
- [5] 谢有鹏,林匹,阙小生.测量用与保护用电流互感器研究[J].机电信息,2011,294(12):47-49.
- [6] 袁季修,盛和乐,吴聚业.保护用电流互感器应用指南[M].中国电力出版社,2004.
- [7] 杨青.考虑电流互感器饱和影响的差动保护新判据的研究[D].北京,华北电力大学,2007.
- [8] 赵满江,李仰平.保护用电流互感器饱和特性及其误差曲线研究[J].高压电器,2010,46(12):29-31.

#### 作者简介:

陈进美(1987—),男,福建莆田人,从事变电运行工作,  
E-mail: chenjinmei@outlook.com。