

直流偏磁对电流互感器影响分析

保护用电流互感器（TA）对电力系统继电保护的動作特性影响很大。直流偏磁会对TA的传变特性产生影响，利用其T型等效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TA传变特性进行仿真分析。结果表明偏磁条件下TA的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2次谐波将会大于3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。由此可见，直流偏磁改变了保护用TA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。

薛田良 曲天润/三峡大学电气与新能源学院



薛田良/讲师

关键词/Keywords

直流偏磁·
电流互感器·
励磁特性·
谐波·
幅值·

当高压直流输电（HVDC）线路处于单极大地回路方式运行时会引起电网中的电磁设备的直流偏磁现象^[1]。此外，太阳黑子活跃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0.001~0.1 Hz之间，与我国电力系统工频相比而言，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^[2, 3]。目前电力系统中的保护用TA大多数都采用电磁式TA，直流偏磁也可能对电磁式保护用TA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，而直流偏磁电流流入电力系统后就是装置TA，目前的研究所涉及到直流偏磁影响TA的较少。

对于电力系统安全稳定运行来说，TA能正确传变一次电流对于继电保护的

可靠性有至重要意义。TA一次电流是50 Hz的工频电流，当直流偏磁现象发生时TA一次电流中出现了直流电流，且直流电流全部作用于TA励磁支路，就有可能引起TA的饱和，一旦TA出现饱和现象，TA二次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。

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TA也逐渐向电网推广使用，但是电子式TA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TA的成本较高，在当前国情条件下大规模使用电子式TA的条件尚未成熟，我国电网中使用电磁型TA必将会持续很长的一个时期。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TA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。

本文以实验用TA为例，分析研究了直流偏磁对实验用TA传变特性影响，在不同大小的直流偏磁电流的情况下，通过仿真分析了直流偏磁条件下TA饱和特性，验证了理论分析的正确。

直流偏磁等效分析模型

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流回路,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。主要考虑直流偏磁对TA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。

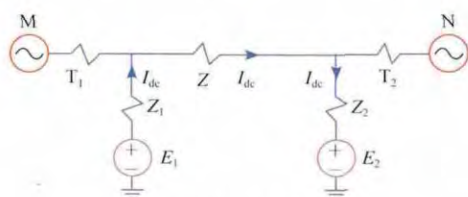


图1 直流偏磁分析模型

2. TA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TA影响最为严重,本文根据电磁式TA特性作出等效电路如图2a所示,图2a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_e 为励磁电流。通常为了分析方便,忽略TA二次绕组的漏抗和铁心损耗,当二次负载为纯电阻 R_2 时,作出TA简化等效电路如图2b所示。

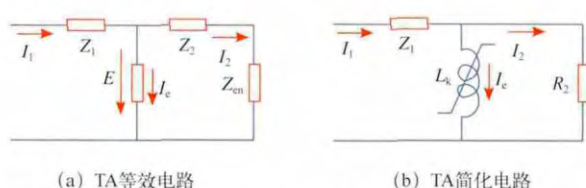


图2 TA等效电路

本文的分析模型采用建立在Jiles-Atherton理论上的TA模型,通常情况下保护用TA在现场实际运行时,比较关注其暂态特性,除了饱和深度与暂态特性有较大的联系之外,TA的励磁特性曲线本身决定了其暂态特性。根据文献[4]对J-A模型描述,相应的励磁特性曲线如图3a所示,图3a中, B_m 为磁密的最大值; B_r 为TA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TA的电感分段线性等效如图3b所示。

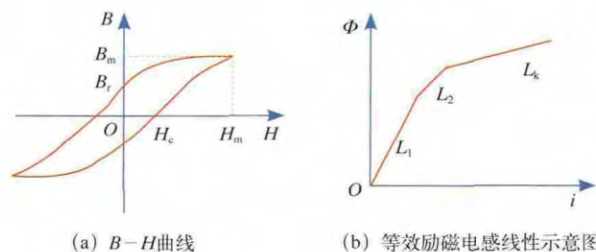


图3 TA励磁特性

直流偏磁对TA的传变特性影响

1. TA的励磁分析

根据如图2所示的等效电路,假设TA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2b可知TA的二次时间常数 $\tau_2 = L_k/R_2$,根据TA的等效电路可得到

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

式中, k 为TA电流比,有 $k = N_2/N_1$; i_e 为TA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TA中的 L_k 非常大,故有二次常数 τ_2 很大,且一般情况下满足 $\omega^2 \tau_2^2 \gg 1$,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TA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TA的励磁磁通为 Φ ,同时忽略TA的剩磁,则根据TA的励磁基本方程

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

式中, R_2 为TA二次负载电阻,可以得到

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

2. 直流偏磁条件下TA励磁特性分析

当直流偏磁现象发生时,流过TA一次电流中就会叠加有直流电流,此时流过TA一次电流为 $i_{p1} = I_m \cos \omega t + I_{dc}$,同理,根据TA的等效电路可得到TA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 τ_2 较大,通常可将TA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TA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TA铁心作为励磁电流出现。

同时由TA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

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

同理,可将TA的励磁磁通简化为

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

由图3b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TA铁心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TA的运行工况产生实质性的影响,此时的TA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TA铁心中的磁链将会急剧增加,TA的工况发生较大变化,直流磁通将会增加很多,此时TA工作在饱和点附近,工作特性变差,从而TA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TA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TA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TA不能正确传变一次电流,极大威胁了电力系统继电保护的可靠性。

仿真分析

本文利用PSCAD/EMTDC仿真软件根据如图1所示的原理图搭建了保护用TA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TA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TA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TA二次负载 $R=0.5 \Omega$, $X=0.8 \times 10^{-3} \text{ H}$ 。直流偏磁电流模拟本文采用直流电源来提供。

其中,图4为无直流偏磁条件下的TA二次电流波形图,图5为二次电流FFT后的频谱图,显示了各次谐波的分布结果。

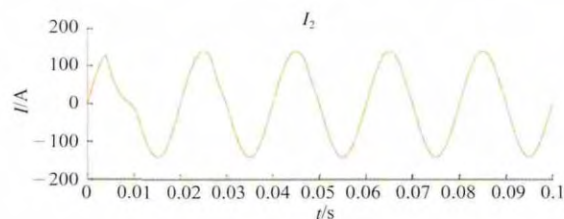


图4 $I_{dc}=0 \text{ A}$ 时的TA二次电流波形

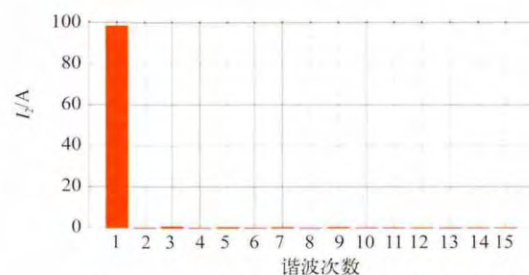


图5 $I_{dc}=0 \text{ A}$ 时的TA二次电流各次谐波幅值

图4中,可以明显看出TA二次电流波形无畸变(第一个周波发生了畸变是由于涌流的影响而造成的),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 $I_{dc}=0$ 时的二次电流基波与谐波的幅值与相位,此时TA铁心稳定工作在线性区,能准确传变一次工频电流。

再给TA一次侧施加较小的直流电流,对TA的传变特性进行仿真,图6为直流电流为35 A时的二次电流波形,图7为相应的FFT结果。

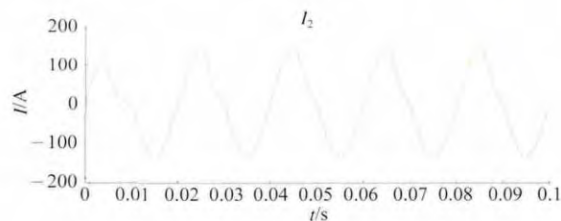


图6 $I_{dc}=35 \text{ A}$ 时的TA二次电流波形

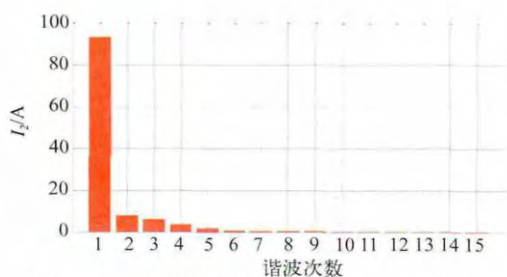


图7 $I_{dc}=35$ A时的TA二次电流各次谐波幅值

然后施加140 A的直流电流在TA一次侧时的二次电流波形图如图8所示，相应的FFT结果如图9所示。

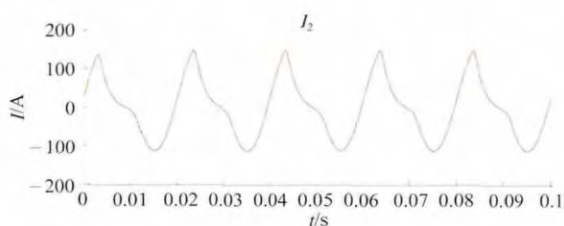


图8 $I_{dc}=140$ A时的TA二次电流波形

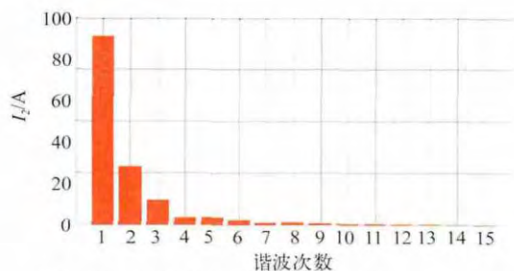


图9 $I_{dc}=140$ A时的TA二次电流各次谐波幅值

由图4~图9可以得知，在直流偏磁条件下，TA二次电流会发生畸变（在涌流的作用下二次电流第一个周波出现畸变，但很快趋于稳定），随着偏磁电流的增大，二次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TA铁心中出现直流偏磁电流时，二次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2次谐波将大于奇次谐波中的3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TA的铁心中磁化曲线的第Ⅲ象限部分会向原点方向移动。

结束语

本文根据TA的等效分析模型，并根据TA的基本方程，推导出直流偏磁条件下TA的励磁电流和TA励磁磁通的表达式，从数学角度分析了直流偏磁对TA的影响。同时本文利用PSCAD/EMTDC仿真软件中的基于J-A理论的TA铁心模型对直流偏磁条件下的TA传变特性进行仿真分析，本文的分析结果可作为保护用TA选用的参考依据。

1) 通过TA的T型等效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TA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，TA铁心会出现严重饱和状态，磁化曲线在第Ⅲ象限中的面积会变小。

2) 直流偏磁条件下TA的二次电流会发生畸变，并且随着偏磁电流的增加二次电流的畸变会越来越严重，并且出现了谐波。

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，应当引起电力系统科研工作者的深入研究。

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.
- [3] 田晓倩, 李宝树, 申路. 直流偏磁下电流互感器误差特性分析 [J]. 高压电器, 2013, 49 (11): 104-109.
- [4] Annakkage 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.

(收稿日期: 2014-09-26) EA