

DOI: 10.7667/PSPC161579

## 保护用电流互感器传变特性分析

戴 魏, 郑玉平, 白亮亮, 邹志扬, 潘书燕, 吴崇昊

(智能电网保护和运行控制国家重点实验室(国电南瑞科技股份有限公司), 江苏 南京 211000)

**摘要:** 电流互感器(CT)是继电保护的数据源头。随着电网建设的发展, 各种不同类型 CT 混联接入继电保护装置的情况越来越多, 对继电保护适应性提出了新的课题。针对这一问题, 从单个 CT 的传变特性分析着手, 首先分析了 P 级和 TPY 级电磁型 CT 的传变特性, 指出了影响电磁型 CT 传变特性的主要因素。推导并建立了 TPY 型 CT 等值电路模型, 从理论上解释了 TPY 级 CT 剩磁较低的原因。同时, 采用 Jiles-Atherton 磁滞回线理论, 对 TPY 级 CT 进行了仿真, 并分析了 TPY 级和 P 级 CT 暂态传变特性的差异。研究并得出了电磁型 CT 暂态饱和的特征和规律。推导了罗氏线圈型电子式 CT 完整的传变公式, 从数学上指出了其与电磁型 CT 传变特性的一致性。最后, 在此基础上, 综合分析了三种 CT 传变特性差异及对继电保护的影响。

**关键词:** TPY 级电流互感器; 电子式电流互感器; 罗氏线圈; 磁滞回线; 剩磁; 差动保护

### Analysis of protective current transformer transient response

DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, ZOU Zhiyang, PAN Shuyan, WU Chonghao

(State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control (NARI Technology CO., LTD), Nanjing 211000, China)

**Abstract:** The current transformer (CT) is the data source of relay protection. With the development of grid, a new topic is presented due to various class CT connected to relay protection. To solve this problem, the transfer characteristics of P and TPY class CT are analyzed firstly and the main affecting factors are pointed out in this paper. Then the reason of low remanence is explained theoretically based on equivalent circuit model of TPY class CT and the numerical simulation for which is carried out using Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis. The characteristics and laws during a saturated condition are described. Formulas are developed for estimating the transient response of Rogowski coil CT, which show the consistency with P and TPY class CT. Finally, the transient response of three types CT is compared and its effect on relay performance is discussed.

**Key words:** TPY CT; ECT; Rogowski coil; hysteresis loop; remanent flux; differential protection

## 0 引言

电流互感器(CT)是继电保护装置的数据源头, 因此对电流互感器的基本要求就是能够真实地反应一次电流, 特别是在故障时, 不但要正确反映故障电流的大小, 有时还会对电流的相位和波形传变提出要求。目前广泛采用的电磁式电流互感器是利用电磁感应原理通过铁芯电磁耦合实现一、二次电流变换。由于铁芯具有非线性励磁特性, 当一次故障电流很大, 尤其是非周期分量以及铁芯剩磁的存在

将可能使互感器传变误差变大, 甚至可能出现铁芯磁通饱和, 造成二次电流失真, 导致继电保护的可靠性下降。近年来, 随着智能变电站技术的不断发展, 电子式电流互感器的应用得到了快速发展。电子式电流互感器具有体积小、重量轻、频带响应宽、无饱和现象、抗电磁干扰性能佳、无油化结构、绝缘可靠、便于向数字化、微机化发展等优点。

国内外针对电磁型电流互感器的研究, 从早期(1949年)Агабеков开展的物理试验, 对其暂态过程的认识奠定了很好的基础, 但限于当时测量及分析手段, 对一些深入工况的影响, 未做出详细分析<sup>[1]</sup>。随着技术的不断发展, 对电磁式电流互感器暂态特性的研究, 由线性分析、物理模拟试验逐渐转向数字仿真。IEEE关于互感器研究工作组报告系统地

**基金项目:** 国家电网公司科技项目资助“提升数据源差异及数据异常情况下保护设备可靠性关键技术研究”(合同号 DW1600017)

总结了电磁型 CT 的选型、剩磁控制及各种保护应用的具体问题<sup>[2]</sup>。文献[3-4]关注了 Jiles-Atherton 磁滞回线理论和电磁型 CT 的建模与仿真。

对于电子式互感器的应用, 目前在国内供继电保护应用较多的主要是罗氏线圈式 CT。IEEE 电力系统继电保护委员会 (Power System Relaying Committee) 于 2007 年对罗氏线圈 CT 提出了指导性文件 (Std C37.235-2007), 文献[5]对罗氏线圈 CT 的设计、安装、接口、检测、传变特性以及对各种保护的适应性给出了具体的指导意见。

近年来, 在电网改造建设中输电线路两侧、母线的不同间隔、变压器的各侧均可能存在不同类型电流互感器混用的情况, 这些不同的应用组合无疑增加了问题分析的复杂性。本文从目前继电保护常用的 P 级、TPY 级、罗氏线圈 CT 着手, 在分别分析了其传变特性的基础上, 侧重了对不同类型 CT 传变特性差异的分析和研究, 并初步分析了对相关继电保护的影响。

## 1 电磁型电流互感器的传变特性

IEC 第 38 技术委员会第 14 工作组提出的保护用电流互感器技术标准草案中把保护用电磁型电流互感器按其功能分为: P 级、TPS 级、TPX 级、TPY 级、TPZ 级电流互感器, 目前 330 kV 等级以上的线路保护和变压器保护一般均要求采用 TPY 型 CT, 母线保护、220 kV 及以下保护目前采用较多的仍然是 P 级 CT。

### 1.1 P 级 CT 传变特性研究

#### 1.1.1 稳态传变特性

稳态情况下, P 级 CT 比差和角差在不同工作电流下的变化与磁导率  $\mu$  和损耗角  $\varphi$  相关, 以下给出 CT 比差和角差的公式<sup>[6]</sup>。

CT 比差的公式为

$$\varepsilon = \frac{I_2' - I_1 \cos \delta_i}{I_1} \times 100\% = -\frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \times \sin(\varphi + \alpha) \times 100\% = -\frac{I_2 Z_2 l_c}{4.44 f N_2 S_c \mu (I_1 N_1)} \times \sin(\varphi + \alpha) \times 100\% \quad (1)$$

CT 角差的公式为

$$\delta \approx \sin \delta = \frac{I_0 \cos(\varphi + \alpha)}{I_1} = \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \cos(\varphi + \alpha) = \frac{I_2 Z_2 l_c}{4.44 f N_2 S_c \mu (I_1 N_1)} \cos(\varphi + \alpha) \quad (2)$$

式中:  $\mu$  为铁芯材料的磁导率;  $\varphi$  为介质损耗角;  $l_c$  为磁路平均长度;  $S_c$  为铁芯有效截面积;  $N_1$ 、 $N_2$  为

一、二次的匝数;  $f$  为电源频率;  $\alpha$  为二次回路阻抗角;  $Z_2$  为二次回路总阻抗。

稳态情况下, 一次电流增加时, 磁导率  $\mu$  增大, 损耗角增大,  $\cos(\varphi + \alpha)$  减小, CT 的角差减小。而  $\sin(\varphi + \alpha)$  随着一次电流增大而上升, 但是在负荷电流范围内,  $\sin(\varphi + \alpha)$  的增大小于  $\mu$  的增大, 所以 CT 比差仍随着一次电流的增大而减小。

#### 1.1.2 暂态传变特性

设一次系统暂态短路电流表达式<sup>[7]</sup>为

$$i_p(t) = \sqrt{2} I_{psc} \left[ e^{-\frac{t}{T_p}} \cos \theta - \cos(\omega t + \theta) \right] \quad (3)$$

式中:  $i_p$  为一次电流;  $I_{psc}$  为短路电流稳态有效值;  $T_p$  为一次系统时间常数;  $\theta$  为短路初始时刻 ( $t=0$ ) 的电压相角。

求解后的 CT 励磁电流和二次电流的表达式为

$$i_0(t) = \frac{\sqrt{2} I_{psc}}{N} \cdot \left[ \frac{T_p}{T_p - T_s} e^{-\frac{t}{T_p}} \cos \theta - \frac{T_p}{T_p - T_s} e^{-\frac{t}{T_s}} \cos \theta + \frac{\sin \theta}{\omega T_s} e^{-\frac{t}{T_s}} - \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] \quad (4)$$

$$i_s(t) = \frac{\sqrt{2} I_{psc}}{N} \cdot \left[ \frac{T_s}{T_s - T_p} e^{-\frac{t}{T_p}} \cos \theta - \frac{T_p}{T_s - T_p} e^{-\frac{t}{T_s}} \cos \theta - e^{-\frac{t}{T_s}} \sin \theta - \cos(\omega t + \theta) + \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\omega T_s} \right] \quad (5)$$

式中:  $i_0$  为励磁电流;  $i_s$  为 CT 二次电流;  $T_p$  为二次系统时间常数。由式(4)可知, 造成 CT 暂态传变误差的主要有两部分组成, 一部分是励磁电流的周期分量, 另一部分是励磁电流的非周期分量。对于周期分量, 误差与二次时间常数成反比, 二次时间常数越大, 传变周期分量造成的误差越小。对于相位差, 在二次负载为纯感性负载时, 励磁电流周期分量与一次电流相位相同。在二次负载为纯电阻时, 励磁电流周期分量滞后一次电流一个角度 (小于  $90^\circ$ ), 与稳态时的传变特性相同。

对非周期分量, 励磁电流中除了有按一次时间常数衰减的非周期分量, 还与 CT 二次时间常数有关。对闭合铁芯的 P 级电流 CT, 一般情况下  $T_s$  可达几秒, 因此一般情况下存在  $T_s > T_p$ 。由上式可知, 在故障开始的最初一段时间内 ( $t=0$ ), 对  $i_s$  中总非周期分量 ( $i_{se}$ ) 影响较大的主要是式(5)中的第一项, 即由系统一次时间常数确定的非周期强制分量, 随着第一项的衰减, 影响总非周期励磁电流的变为第二项

和第三项,即主要由CT二次时间常数确定。由于 $i_{se}$ 衰减过程受到一、二次时间常数的共同影响,因此 $i_{se}$ 衰减过程中将出现符号改变,即出现电流过零。过零时间点 $t_0$ 的表达式见式(6)。图1给出了不同 $T_s$ 情况下 $i_{se}$ 随时间变化的曲线,其中 $T_p$ 设为0.12 s,  $\theta=0^\circ$ 即电流全偏移的情况。

$$t_0 = \frac{T_s T_p}{T_s - T_p} \ln \frac{\omega T_s^2 \cos \theta}{\omega T_s T_p \cos \theta - T_s \sin \theta + T_p \sin \theta} \quad (6)$$

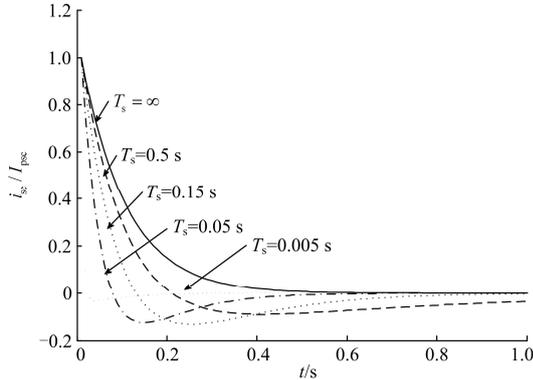


图1 电流互感器二次电流非周期分量

Fig. 1 Offset DC component of CT secondary current

由上述分析可知,暂态情况下,P级CT对非周期分量的传变会发生畸变,畸变的程度取决于 $T_p$ 、 $T_s$ 两者之间的关系,在 $T_s > T_p$ 的情况下, $T_s$ 越大,一、二次电流中非周期分量的传变误差越小; $T_s$ 越小,则误差越大。因此如果需要减小非周期分量的传变误差,则需要增大CT二次时间常数 $T_s$ ,例如:可通过降低CT二次负载电阻来实现。

### 1.2 TPY级CT传变特性研究

前面主要分析了P级CT在各种情况下的传变特性,P级CT只对稳态对称一次电流下的复合误差提出要求,不考虑暂态情况下的传变误差,在系统短路时,由于短路电流中含有较大的非周期分量,铁芯中磁通会迅速增大,导致电流传变误差增大,甚至出现明显畸变。同时,由于P级CT采用闭合铁芯,因此开关切除后铁芯中会存在较大的剩磁,以冷轧硅钢片为例,这类材料的剩磁系数可达80%以上,且剩磁不易消除,特别是考虑重合闸于故障时,二次电流波形可能出现严重畸变。因此,目前330 kV及以上电压等级多采用TPY级CT。

#### 1.2.1 带气隙铁芯电磁特性

目前TPY级CT主要是通过通过在闭合铁芯中增加小气隙<sup>[8]</sup>,从而达到改善P级CT暂态情况下传变特性,且控制开关切除后的剩磁水平的目的。

增加气隙后的铁芯电磁特性理论<sup>[9]</sup>分析如下:假定认为铁芯沿平均磁路上的横截面积不变,而且

气隙断面的各点上气隙的长度是相同的。取气隙平均磁力线的长度作为 $l$ (由于气隙边缘磁力线的凸出,铁芯气隙总的计算长度 $l$ 与几何长度有区别,本文下述分析不考虑气隙边缘磁力线凸出因素)。显然,在这种条件下,气隙小磁通的横截面积等于铁芯的横截面积,且铁芯中的磁通密度与气隙中的磁通密度也是相等的,即 $B_{gap} = B_{iron} = B$ 。

由全电流定律可知:

$$\oint_1 \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \left( \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s} = i_0 \quad (7)$$

对于CT,上式可简化为

$$\vec{H}_{iron} l_{iron} + \vec{H}_{gap} l_{gap} = i_0 = \frac{i_p}{N} - i_s \quad (8)$$

将式(8)进行变换,可得:

$$\frac{i_0}{l_{iron}} = \vec{H}_{iron} + \frac{\vec{H}_{gap} l_{gap}}{l_{iron}} \quad (9)$$

设铁磁材料 $B$ - $H$ 曲线的关系为 $H_{iron} = f(B_{iron})$ ,其曲线如图实线所示。气隙中 $H_{gap} = u_0 B_{gap}$ ,并由上述分析可得 $B_{iron} = B_{gap}$ ,代入上式可得:

$$\frac{i_0}{l_{iron}} = f(\vec{B}) + \frac{\vec{B} l_{gap}}{u l_{iron}} \quad (10)$$

由式(10)可知,带气隙铁芯励磁曲线可由铁磁材料的 $B$ - $H$ 曲线平移后得到。平移后的曲线如图虚线所示。

由图2所示,带气隙的励磁曲线经过平移后,剩磁水平由没开气隙前的 $B_r$ 降低至 $B_{ra}$ ,因此TPY级CT可有效降低铁芯中的剩磁水平。一般情况下,只要气隙长度为铁芯总磁路长度的万分之一,就可以将铁芯剩磁减小到10%的水平<sup>[10]</sup>。

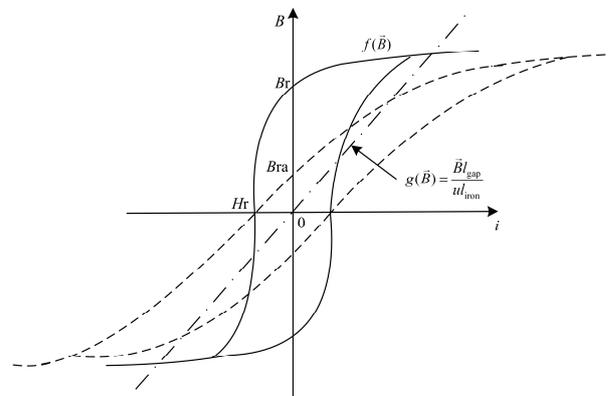


图2 TPY级CT铁芯的磁滞回线

Fig. 2 Hysteresis loop of TPY class CT

#### 1.2.2 TPY级电流互感器等值电路

上节主要研究了TPY级CT铁芯的电磁特性,由式(8),且 $B_{gap} = B_{iron} = B$ ,可得:

$$\Phi \cdot \left( \frac{L_{\text{iron}}}{S\mu_{\text{iron}}} + \frac{L_{\text{gap}}}{S\mu_0} \right) = i_0 \quad (11)$$

由上式可知, 对于 TPY 级 CT 的励磁回路, 可在普通闭合铁芯等值电路的基础上, 通过在励磁回路并联一个电感进行等效, 其等值电路如图 3 所示。图中,  $L_e$  为铁芯电感,  $L_g$  为并联电感,  $R_{ct}$  和  $L_{ct}$  分别为二次绕组电阻和电感(低漏磁互感器可忽略),  $R_l$  为负荷电阻。

对 TPY 级 CT 建模仿真的另一个难点是如何准确对铁芯的动态磁化特性进行数学描述, 即如何建立动态磁滞回线模型。Jiles-Atherton 理论建立在已有的磁畴运动理论<sup>[11]</sup>之上, 运用了非磁滞磁化的概念, 准确地描述了铁磁材料的磁化强度  $M$  和磁场强度  $H$  的关系, 很好地建立了铁芯的动态磁滞回线模型。本文基于上面推导的 TPY 型等值电路, 利用 Jiles-Atherton 理论, 对 TPY 级 CT 的暂态传变特性进行了仿真, 下文相关波形均基于上述理论仿真得出。

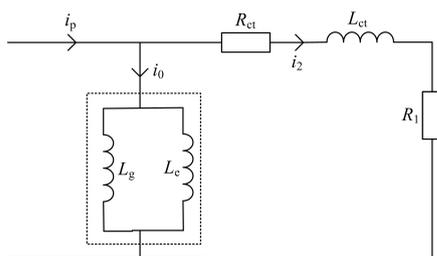


图 3 TPY 级 CT 等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit model of TPY class CT

### 1.2.3 TPY 级和 P 级 CT 传变特性差异

相较相同铁芯尺寸的 P 级 CT, 由于 TPY 级 CT 等效励磁电感减小, 因此稳态情况下, 传变相同的一次电流, TPY 级 CT 需要更大的励磁电流, 因此稳态误差也会随之增大。暂态情况下, 由于 TPY 级 CT 等效励磁电感的减小,  $T_s$  也随之减小。根据上文结论, 暂态电流中非周期分量的传变误差随  $T_s$  的减小而增大, 因此 TPY 级 CT 较同尺寸铁芯的 P 级 CT, 对非周期分量的传变误差将会明显变大<sup>[12]</sup>。

实际情况, 通过增大 TPY 级 CT 铁芯面积可补偿稳态和暂态传变误差变大的影响, 这也是一般情况下 TPY 级 CT 尺寸远大于 P 级 CT 的原因之一。在实际应用过程中, TPY 级 CT 误差符合限值条件, 因此由于稳态传变特性差异造成的影响可不特别考虑。对于暂态误差, TPY 级 CT 按规定一次系统时间常数、规定 C-O-C-O 工作循环等情况下的最大峰值瞬时误差来校核。

图 4 给出了 TPY 级和 P 级 CT(5P20)在全偏移

故障电流( $T_p=0.12$  s)情况下电流传变的特性(初始剩磁均为零)。由图可知, 随着时间推移, P 级 CT 由于电流中非周期分量的影响, 导致铁芯中磁通迅速增加, 磁导率急剧下降, 因此对非周期分量的传变误差明显不断增大。相反, TPY 级 CT 最大峰值瞬时误差满足 10% 的误差要求, 二次波形未发生明显畸变。

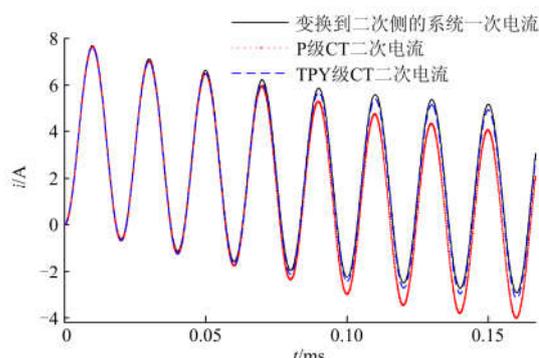


图 4 TPY 级和 P 级 CT(5P20)暂态电流传变特性

Fig. 4 Transient response of TPY and 5P20 class CT

另一个影响两者传变特性差异的因素是两者剩磁水平不同。剩磁一旦形成, 一般很难消除。剩磁未消除前再次发生故障, 若暂态非周期分量产生的磁通与剩磁通方向相反, 剩磁可部分抵消非周期分量的影响, 这种情况有利于 CT 正确传变。若两者方向相同, 则可能造成 CT 快速进入饱和, 饱和和深度规律可参考前文, 特别是当开关重合闸于故障时, P 级 CT 二次电流可能发生严重畸变。

另外, 电网故障后开关一般在一次电流过零点开断, 此时 CT 铁芯磁通正处于最大值附近, 由于磁通不能突变, 随着磁通的衰减, 开关开断后 CT 二次电流不会立刻衰减为零, 即电流会出现“拖尾”现象<sup>[13]</sup>。本文通过对电磁型 CT 传变特性的研究, 对 CT 拖尾电流起始时刻电流瞬时值大小、衰减时间常数、对相关保护的影响进行了具体定量研究, 研究发现: 拖尾电流产生的本质是因为开关开断时二次电流超前于一次电流, 即一次电流过零时, 二次电流并不为零且等于此时的励磁电流, 因此 P 级和 TPY 级 CT 均会产生拖尾现象, 且对于 P 级 CT 更易发生饱和, 拖尾电流的初值一般也应较 TPY 级大, 二次回路时间常数也更大。但通常分析相关问题时, 电流拖尾问题仅考虑 TPY 级 CT。究其原因, 主要是因为同样的一次电流虽然 P 级 CT 拖尾电流初值更大, 但由于 P 级 CT 剩磁较大, 磁通在衰减时的局部磁滞回线较为平坦, 等效电感较小, 因此电流会很快衰减至零。而 TPY 级 CT, 随着磁通的衰减, 局部磁滞回线斜率逐步变大, 等效励磁电感

不断变大, 因此电流衰减会持续较长时间。图 5 给出了 TPY 级 CT 和 P 级 CT 在开关切除后二次电流变化情况。

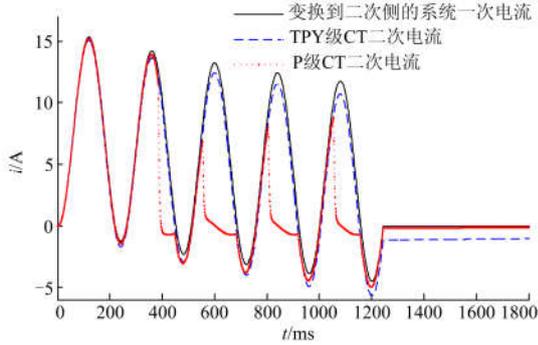


图 5 TPY 级和 P 级 CT 开关切除后暂变特性  
Fig. 5 Transient response of TPY and P class CT

### 1.3 电磁型电流互感器暂态饱和的特征和规律

前面主要分析了电磁型 CT 在铁芯未发生饱和时的暂变特性, 本节主要针对 CT 暂态饱和的特征和规律进行研究。首先, 暂态饱和的第一个规律是 CT 第一次进入饱和状态时, 二次电流的缺损程度有一定的随机性。CT 饱和时在电流波形的哪一点发生缺损, 取决于磁密何时达到铁芯饱和磁密。在接近饱和点时, 磁密中工频交流分量占总磁密的比例很低, 相当于在线性增加的磁密上叠加了幅值很小的交变磁密, 见图 6。

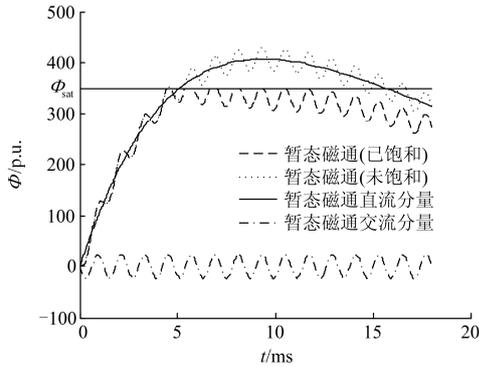


图 6 CT 暂态饱和磁密

Fig. 6 Magnetic induction intensity of CT transient saturation

因为故障电流参数的随机性和 CT 制造时铁芯参数的离散, CT 进入饱和时, 在交变磁密的哪一点超过饱和磁密  $\Phi_{sat}$  是随机的, 所以二次电流的缺损程度是随机的, 可能很严重, 也可能很轻微。

但 CT 第一次进入饱和状态时二次电流的最大可能缺损程度仍有确定的规律。从图 7 可以看出, CT 第一次进入饱和的饱和磁通  $\Phi_{sat}$  肯定不小于前一个工频周波铁芯磁通的最大值  $\Phi_0$ , 否则 CT 在前

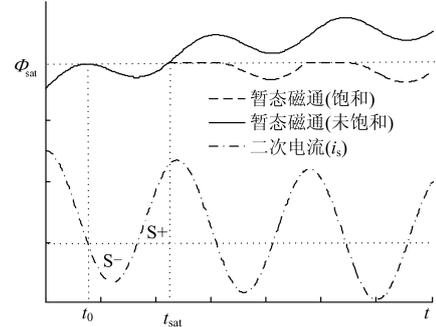


图 7 CT 暂态饱和和第一周波最严重情况

Fig. 7 The most severe situation of CT transient saturation at the first cycle

一个周波就已进入饱和。因此 CT 第一次进入饱和状态时, 二次电流的最大缺损必然发生在饱和和磁通  $\Phi_{sat}$  等于前一个工频周波铁芯磁通最大值  $\Phi_0$  时。

$$\begin{cases} \int_{t_0}^{t_{sat}} e_s dt = -N_2 (\Phi|_{t_{sat}} - \Phi|_{t_0}) \\ \Phi|_{t_{sat}} = \Phi|_{t_0} = \Phi_{sat} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $e_s$  为 CT 二次感应电动势;  $N_2$  为 CT 二次绕组匝数;  $t_0$  为饱和前一个工频周波铁芯磁通达到最大值  $\Phi_0$  的时刻;  $t_{sat}$  为 CT 第一次进入的时刻。可得

$$\int_{t_0}^{t_{sat}} e_s dt = 0 \quad (13)$$

考虑 CT 二次负载接近阻性, 设 CT 二次负载为纯电阻负载, 则二次电流  $i_s$  与  $e_s$  成正比, 可得

$$\int_{t_0}^{t_{sat}} i_s dt = 0 \quad (14)$$

由上式可知, 在 CT 第一次进入饱和状态时二次电流缺损程度最严重的情况下, 饱和前一周波磁通达到峰值时刻与进入饱和时刻之间, CT 二次电流  $i_s$  与时间轴围成的正负区域的面积的代数和为 0。

而前一个工频周波铁芯磁通在  $t_0$  处达到极大值  $\Phi_0$ , 即磁通的一阶导数在  $t_0$  时刻为 0:

$$\left. \frac{d\Phi}{dt} \right|_{t_0} = 0 \quad (15)$$

因为 CT 二次负载为纯电阻负载  $R_s$ , 可得此时二次电流  $i_s$  为

$$i_s(t_0) = e_s(t_0)/R_s = -\frac{N_2}{R_s} \left. \frac{d\Phi}{dt} \right|_{t_0} = 0 \quad (16)$$

即从饱和前 CT 二次电流  $i_s$  反向过零时刻与进入饱和时刻之间, CT 二次电流  $i_s$  与时间轴围成的正负区域 S- 和 S+ 的面积相等。而 S- 的面积又取决于故障电流的偏移程度, 偏移程度越大 S- 的面积越小。因此, 可知故障电流偏移程度越高则 CT 第一次进入饱和状态时二次电流的最大可能缺损程度越严重。详见图 7。

CT 饱和的第二个特点是, 第二次及后续的 CT 饱和时二次电流的缺损程度取决于故障电流偏移程度, 偏移程度越高则二次电流缺损越严重, 分析如下。

仍设 CT 二次负荷为纯阻性, 则 CT 饱和后磁通不变, 二次电流降为零。当一次电流极性反向后, 铁芯磁通下降, 二次电流重新正确传变。设一次电流极性反后的开始时刻为  $t_1$ , 磁通再次达到饱和时刻为  $t_2$ 。在  $t_1$  和  $t_2$  时刻 CT 铁芯都处于饱和状态, 磁通等于饱和磁通, 则可得

$$\begin{cases} \int_{t_1}^{t_2} e_s dt = -N_2 (\Phi|_{t_2} - \Phi|_{t_1}) \\ \Phi|_{t_2} = \Phi|_{t_1} \\ i_s = e_s / R_s \end{cases} \quad (17)$$

可推得:

$$\int_{t_1}^{t_2} i_s dt = 0 \quad (18)$$

上式含义为,  $t_1-t_2$  段即 CT 的线性传变区中二次电流  $i_s$  与时间轴围成的正负区域  $S_1$  和  $S_2$  的面积相等, 即总的线性传变区的面积等于负区域  $S_1$  面积的两倍。而  $S_1$  的面积又取决于故障电流的偏移程度, 偏移程度越大  $S_1$  的面积越小。所以可以得到故障电流偏移程度越高则二次电流缺损越严重, 如图 8 所示。

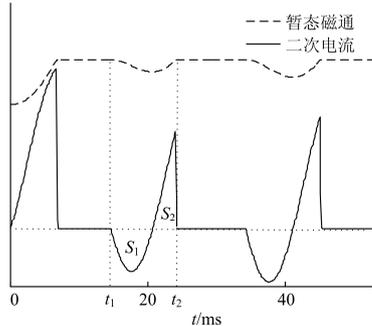


图 8 CT 暂态饱和深度与故障电流偏移程度的关系

Fig. 8 Correlation of CT transient saturation depth and fault current offset

结合前两条规律, 可得到以下结论, CT 饱和时从第一个饱和区到第二个饱和区, 二次电流缺损程度的变化是随机的, 可能加重, 也可能减轻。而从第二个周波开始, 一次电流非周期分量衰减使线性传变区逐步加宽, 且从第二个周波开始 CT 最大饱和深度有规律可循, 即可通过预测下一周波线性传变区的最大长度, 在线性传变区内可进行差动保护判断, 加快转换性故障的动作时间。

## 2 电子式电流互感器的传变特性

电子式互感器与电磁型互感器相比, 具有绝缘

简单、体积小、重量轻、无磁饱和等优点, 并且电子式电流互感器动态范围宽, 二次输出可开路, 因而受到普遍关注, 并逐步在工程中广泛应用。其中, 罗氏线圈电流互感器的非磁性骨架的磁导率基本为一常数, 基本不存在传统电磁式互感器的铁芯饱和问题, 因此, 电流的测量范围大, 常用于高电压等级暂态电流较大的场合。

罗氏线圈原理电子式电流互感器输出值与一次电流的微分成正比, 需经积分恢复为与一次电流成正比后供二次设备使用。因此罗氏线圈原理的电子式互感器由罗氏线圈加积分器构成。由于理想积分器可将直流分量无限放大, 实用积分器需设计直流负反馈回路来抑制直流分量。积分器直流负反馈回路对直流分量衰减的时间常数即为整个互感器的二次时间常数, 决定了互感器的下限截止频率和暂态误差。罗氏线圈模拟积分器原理如图 9 所示, 图中,  $R_1$  为积分电阻;  $R_2$  为反馈电阻, 用于抑制积分漂移;  $R_f$  为平衡电阻, 用于消除输入偏置电流的影响;  $C$  为积分电容。

由法拉第电磁感应定律可得, 罗氏线圈输出的感应电动势  $e(t)$  为

$$e(t) = -\frac{nd\phi}{dt} = -\frac{\mu_0 n S}{2\pi r} \cdot \frac{di(t)}{dt} = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (19)$$

式中:  $M = \mu_0 n S / 2\pi r$  为罗氏线圈与载流导体之间的互感系数;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $n$  为线圈匝数;  $r$  为线圈中心半径;  $S$  为铁芯截面面积。

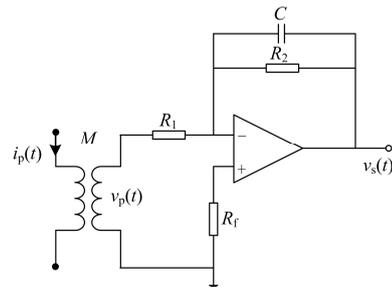


图 9 罗氏线圈模拟积分器原理图

Fig. 9 Integrating circuit of Rogowski coil

对罗氏线圈模拟积分器列写电压、电流方程得:

$$\begin{cases} v_p(t) = e_p(t) = -M \frac{di_p(t)}{dt} \\ -i_s(t) = -\frac{v_p(t)}{R_1} = C \frac{dv_s(t)}{dt} + \frac{v_s(t)}{R_2} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $v_p(t)$  为折算到二次侧的电压;  $i_p(t)$  为一次电流;  $v_s(t)$  为二次侧输出电压;  $i_s(t)$  为二次电流。整理上式得:

$$\frac{dv_s(t)}{dt} + \frac{v_s(t)}{CR_2} = -\frac{e_p(t)}{CR_1} \quad (21)$$

解上式一阶非齐次线性微分方程，并对其进行0到t积分得：

$$v_s(t) = -\frac{e^{-\frac{t}{T_s}}}{R_1 C} \int_0^t e_p(\tau) e^{\frac{\tau}{T_s}} d\tau + v_c(0_+) e^{-\frac{t}{T_s}} = \frac{Me^{-\frac{t}{T_s}}}{R_1 C} \int_0^t \frac{di_p(\tau)}{d\tau} e^{\frac{\tau}{T_s}} d\tau \quad (22)$$

式中： $T_s=R_2C$  积分回路时间常数； $v_c(0_+)$ 为电容零时刻初始电压，假设其初值为0。

暂态条件下，发生短路故障，将短路电流式(3)代入式(22)，则罗氏线圈二次侧二次电压为

$$v_s(t) = \frac{\sqrt{2}I_p M}{\sqrt{1+(\frac{1}{\omega T_2})^2}} [\cos(\theta + \beta) e^{-\frac{t}{T_2}} - \cos(\omega t + \theta + \beta)] + \frac{\sqrt{2}I_p M}{R_1 C} \cdot \frac{T_2}{T_p - T_2} (e^{-\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) \cos\theta \quad (23)$$

式中： $\omega=2\pi f$  为角频率； $\theta$ 为电压初相角； $\beta=\tan^{-1}(1/\omega T_2)$ ，为角差。

$\theta=90^\circ$  时，短路电流无偏移， $\theta=0^\circ$  时，短路电流全偏移。根据上式，计算短路电流全偏移时瞬时最大误差可表示为

$$\varepsilon(t) = \frac{i_s(t) - i_p(t)}{\sqrt{2}I_p} = \frac{T_p}{T_s - T_p} (e^{-\frac{t}{T_s}} - e^{-\frac{t}{T_p}}) + \frac{1}{1 + T_s^2 \omega^2} e^{-\frac{t}{T_s}} + \frac{1}{\sqrt{1 + T_s^2 \omega^2}} \sin(\omega t + \beta) \quad (24)$$

从上述推导可知，罗氏线圈电子式互感器传变特性在物理上同电磁型CT是一致的，暂态电流中的非周期分量传变误差主要由一次电流直流分量的衰减时间常数  $T_p$  和罗氏线圈积分回路的积分时间常数  $T_s$  决定。规律同电磁型CT的分析也是一致的，即在  $T_p$  一定的情况下， $T_s$  越大，罗氏线圈CT传变误差越小，如下表所示，工作循环为单循环 C-100 ms-O。

表1  $T_s$ 对罗氏线圈CT传变误差影响

$T_p/ms$	$T_s/ms$	瞬时最大误差 $\varepsilon_{max}/\%$
100	500	11.91
	600	10.10
	700	8.77
	800	7.75
120	500	12.77
	600	10.83
	660	9.98
	700	9.40
	800	8.30

对于5TPE级电子式互感器，在准确限值条件下，额定一次时间常数和额定工作循环下的最大峰值瞬时误差要求为10%。当额定一次时间常数  $T_p=0.12$  s时，要保证最大峰值瞬时误差  $\varepsilon_{max}(t) \leq 10\%$ ，则  $T_s$  需大于0.66 s。

### 3 传变特性差异对继电保护的影响

上文分别对单个P级、TPY级、罗氏线圈电子式CT的传变特性进行了研究。综合上文，对不同类型互感器的传变特性比较<sup>[14]</sup>如表2。

表2 CT传变特性差异

项目	5P	TPY	罗氏线圈
额定限值电流下复合误差	5%	5%	5%
准确限值下最大峰值误差	无要求	10%	10%
剩磁水平	可达80%	小于10%	无剩磁
进入暂态饱和时间	较TPY级快	取决于暂态面积系数	不饱和
二次时间常数	几秒以上	数百毫秒至一两秒	数百毫秒至一两秒
开关切除后电流衰减快慢	衰减较快	衰减较慢	衰减较慢

目前，差动保护因其突出的优点，已成为电网各元件保护首选的主保护。当前在电网改造建设中，在某一时期可能出现不同间隔配置不同类型CT的情况，例如母线保护的不同间隔配置不同类型CT，不同类型CT传变特性差异对差动保护而言就是差流。由表2可知，稳态对称一次电流下，在单个CT满足精度校核情况下，各型CT传变误差基本相当，不会对差动保护造成影响。暂态情况下(各CT均不饱和)，如上文分析，暂态电流中的对称分量误差同稳态情况下是一致的，传变差异较大的主要是暂态电流中的非周期分量，对于TPY和罗氏线圈式电子式CT，按照考虑特定系统一次时间常数和在工作循环时在准确限值下的最大峰值误差来校核，P级CT在暂态电流较大时传变非周期分量会产生较大误差，上述误差对差动保护即是差流，需定量分析此时误差特性曲线与比率制动曲线的关系。

上述分析为各CT均不饱和情况，P级和TPY级CT虽然进入饱和时间不同，但均可能发生饱和，特别是P级CT，由于剩磁较大，在线路重合闸时，有可能出现饱和程度小于5 ms的极度饱和。罗氏线圈式CT其非磁性骨架的磁导率基本为一常数<sup>[15]</sup>，不存在饱和问题，但其在小电流时测量精度可能存在不足。实际工程使用的电子式互感器，一般同时配置罗氏线圈和低功率线圈(具有低功率输出特性的电磁式电流互感器，LPCT)，LPCT一般供测量使用，

在小电流时具有较高的精度。

另外, 如前所述, 对TPY级CT, 在系统故障开关分断时, CT二次电流不会立刻消失, 会出现一“拖尾”电流。本文通过建立采用Jiles-Atherton磁滞回线理论的TPY级CT模型, 对TPY级CT“拖尾”电流的大小和衰减特征等进行了研究, 具体定量分析由于篇幅所限另文介绍, 不在本文详细推导和分析, 结论是该“拖尾”电流衰减较慢, 最长可达秒级。特别是当出现深度暂态饱和时, 非周期分量不仅衰减时间长, 而且初值较大。在当前压缩断路器失灵保护动作时间的背景下, 必须考虑上述电流对断路器失灵保护的影响。同时, 由于P级CT在开关切除后电流衰减较快, 因此当存在TPY级和P级CT混联的情况时, 上述电流对差动保护而言即为差流, 特别是对采用采样值算法的差动保护, 在故障切除后的一个周波内, 可能存在差动保护误动的风险<sup>[16]</sup>。

#### 4 结语

随着各种不同类型电流互感器的发展和应用, 多类型电流互感器混联运行的情况也越来越多。本文针对不同类型 CT 混联接入继电保护装置的情况, 分别研究了 P 级、TPY 级、罗氏线圈式电子式互感器稳态和暂态情况下的传变特性, 指出励磁回路电感、剩磁水平和二次时间常数是影响其传变的主要因素, 并初步探讨了不同类型 CT 传变特性差异对继电保护的影响以及可能导致的严重后果。

本文的研究内容及成果深化了电流互感器传变特性的研究, 对电流互感器的选型和工程应用具有一定的参考和实践意义。由于篇幅所限, 本文未涉及对继电保护影响的定量分析和改进措施, 将在后续文章中予以重点关注<sup>[16-18]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-75.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-75.
- [2] KOJOVIC L A. Guidelines for current transformers selection for protection systems[C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, Canada, 2001: 21-24.
- [3] EHSAN H, MEHDI V, MAJID. Current-transformer saturation compensation for transformer differential relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 25-28.
- [4] JILES D C, THOELKE J B, DEVINE M K. Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 1992, 28(1): 27-35.
- [5] Power System Relaying Committee. IEEE guide for the application of Rogowski coils used for protective relaying purposes: IEEE Standard C37.235—2007[S]. 2007: 33-37.
- [6] 陈乔夫, 李湘生. 互感器电抗器的理论与计算[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
- [7] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [8] 王振浩, 王学斌, 李国庆, 等. 计及直流偏磁的保护用电流互感器仿真与实验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 15-21.  
WANG Zhenhao, WANG Xuebin, LI Guoqing, et al. Analysis of simulation and experiment on the characteristic of the current transformer used for protection affected by DC magnetic bias[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 15-21.
- [9] HUNTZ R. Impact of CT errors on protective relays — case studies and analyses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(1): 33-36.
- [10] 王涛, 张宁, 刘琳, 等. 有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 74-78.  
WANG Tao, ZHANG Ning, LIU Lin, et al. Research and application of electronic transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 74-78.
- [11] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.  
LUO Sunan, TIAN Zhaobo, ZHAO Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 108-113.
- [12] BENNETT J R, OPIE A M T, XU Q. Hybrid spectral micro-CT: system design, implementation, and preliminary results[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2014, 61(2): 15-17.
- [13] 李旭, 黄继东, 倪传坤, 等. 不同电流互感器混用对线路差动保护的影响及对策的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 141-115.

- LI Xu, HUANG Jidong, NI Chuankun, et al. Influence of mixing different types of current transformers on line differential protection and the countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 141-115.
- [14] 束洪春, 林敏. 电流互感器暂态数学建模及其仿真的比较研究[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 11-14.  
SHU Hongchun, LIN Min. Comparative study on transient simulation of current transformer[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 11-14.
- [15] 钱家骊, 关永刚, 徐国政, 等. 剩磁对保护型电磁式电流互感器误差影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 26-28.  
QIAN Jiali, GUAN Yonggang, XU Guozheng, et al. Simulation and analysis of error of protective type CT due to residual magnetism[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 26-28.
- [16] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s 41601-016-0012-2
- [17] 冯利民, 王晓波, 吴联梓, 等. 500kV GIS变电站VFTO对于电子式互感器的电磁骚扰研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 85-90.
- FENG Limin, WANG Xiaobo, WU Lianzi, et al. Study on the impact of VFTO lectromagnetic interference on electronic transformers in 500 kV GIS substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 85-90.
- [18] 张小庆, 张宜阳, 薛建, 等. 电流互感器大电流饱和测试技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(7): 58-64.  
ZHANG Xiaoqing, ZHANG Yiyang, XUE Jian, et al. research on saturation test under high current for current transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(7): 58-64.

---

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-12-20

作者简介:

戴 魏(1981—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

郑玉平(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化;

白亮亮(1987—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: bailiangliang@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)