

## 电流互感器暂态特性对涌流传变的影响

王育学<sup>1</sup>, 潘远林<sup>2,3</sup>, 刘玮<sup>1</sup>, 尹项根<sup>2,3</sup>, 王增超<sup>1</sup>, 刘琨<sup>1</sup>, 张达钊<sup>2,3</sup>

(1. 广东电网电力调度控制中心, 广东 广州 510000; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;  
3. 湖北省电力安全与高效重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 在涌流期间, 现场发生了多起变压器和相邻输电线路等电力元件差动保护误动的事故, 严重威胁电网的安全稳定运行。原有误动分析中只考虑了变压器涌流暂态过程, 少有考虑其与电流互感器等非线性铁磁元件电磁暂态交互作用过程。首先分析了变压器涌流波形特征量变化规律, 并利用构建的工业保护用 CT(P/PR)的 Lucas 仿真模型, 仿真研究了 CT 暂态传变特性对涌流二次谐波比和间断角的影响规律。研究表明, 涌流的二次谐波比与波形间断角取决于变压器铁心饱和角, 饱和角越大, 二次谐波比越小, 而波形间断角越大, 反之相反。经 CT 传变后涌流的二次谐波比变大, 和应涌流波形间断角变小。励磁涌流波形间断角变化情况取决于负载电阻大小, 可能变大, 也可能变小。研究结论可为改进多非线性铁磁元件交互作用下变压器差动保护提供指导。

**关键词:** 波形特征量; 和应涌流; Lucas 仿真模型; CT 暂态传变特性

### Effect of CT transient characteristics on transfer of inrush

WANG Yuxue<sup>1</sup>, PAN Yuanlin<sup>2,3</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, YIN Xianggen<sup>2,3</sup>, WANG Zengchao<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>, ZHANG Dazhao<sup>2,3</sup>

(1. Power Dispatching Control Center of Guangdong Power Grid, Guangzhou 510000, China;  
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Wuhan 430074, China;  
3. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** During inrush period, multiple misoperation accidents of differential protection of power components such as transformers and adjacent transmission lines happened, which seriously threatened the safe and stable operation of power grid. In the traditional misoperation analysis, only the transformer transient inrush current process is considered, and the electromagnetic transient interaction between the transformer and other nonlinear ferromagnetic components such as CT is hardly considered. In this paper, the variation rule of transformer inrush current waveform characteristic is analyzed at first, and the influence rule of secondary load and type of CT on inrush current is simulated by using the simulation Lucas model of industrial practical CT (P/PR). The results show that second harmonic proportion of the inrush current and the dead angle of the waveform depend on the saturation angle of the transformer core. The larger the saturation angle is, the smaller the second harmonic proportion is, and the larger the dead angle of the waveform is. The second harmonic proportion of the inrush current becomes larger, and the dead angle of sympathetic inrush becomes smaller after CT transfer. The change of the dead angle of the inrush depends on the size of the load resistance, which may become larger and may be smaller. The conclusion can provide guidance for improving the differential protection of transformers under the interaction of multiple nonlinear ferromagnetic components.

This work is supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Limited Liability Company (No. GDKJXM20162461).

**Key words:** waveform characteristics; sympathetic inrush; Lucas simulation model; CT transient transfer characteristics

## 0 引言

随着电力行业的进步, 我国正逐渐形成高密度

交直流混联的复杂大电网, 现场配置的变压器与电流互感器(以下简称 CT)等非线性铁磁元件交互作用更加显著。变压器是电力系统中的主要设备, 在电力系统安全运行中起着重要作用。在进行变压器空投或者故障恢复期间, 变压器铁心饱和而产生励磁涌流, 在相邻运行变压器中往往产生和应涌

流<sup>[1-5]</sup>。涌流因具有差动电流大, 制动电流小的特征而易被差动保护识别为内部故障而造成保护误动。现场已多次出现变压器涌流期间保护误动事故。如何鉴别涌流与故障电流一直是变压器差动保护需要研究的核心问题。

目前, 针对励磁涌流的特性已有大量研究<sup>[6-8]</sup>, 相关学者提出了利用涌流二次谐波比, 波形间断角度等特征量进行涌流鉴别。然而还没有特别针对和应涌流的鉴别判据, 而是将和应涌流与励磁涌流笼统地放在一起加以判断<sup>[9]</sup>。有研究表明, 励磁涌流与和应涌流波形相似, 但是和应涌流衰减更为缓慢, 更易造成 CT 饱和, 使得基于波形特点的判据失效导致差动保护误动。以往的研究中, 少见有对涌流特征量变化过程的分析, 其对保护的影响分析还有待完善。在 CT 暂态暂变特性对涌流特征量的影响研究中, 由于 CT 铁心的非线性特性, 以及影响 CT 暂态暂变特性的因素众多, 包括 CT 二次负载和 CT 类型等<sup>[10]</sup>, 造成对 CT 暂变特性的解析分析极为困难。传统的研究中, 例如文献[11], 采用简化的双折线模型来描述 CT 饱和特性。该研究只能定性考察 CT 饱和对涌流特征量的影响, 很难准确考察各因素对 CT 暂变特性的影响。当前研究中, 多采用构建 CT 的仿真模型, 并进行数值求解, 来考察各种因素的影响<sup>[12-14]</sup>。本文首先从理论上分析了变压器涌流二次谐波比与波形间断角度大小的变化规律; 其次, 分析了 CT 饱和对涌流二次谐波比的影响; 最后利用构建的工业保护用 CT(P/PR)的 Lucas 仿真模型, 通过仿真深入研究了二次负载与 CT 类型两个因素对励磁涌流与和应涌流二次谐波比、波形间断角度大小的影响。

## 1 涌流特征量

变压器差动保护涌流闭锁中, 常利用涌流的波形特征量进行闭锁判据设计。本节先后讨论分析了励磁涌流与和应涌流的二次谐波比、波形间断角特征。

### 1.1 励磁涌流波形特征量分析

#### 1.1.1 二次谐波比

单相变压器空载合闸产生励磁涌流的 T 型等值电路如图 1 所示。其中,  $u_s$  为系统电源,  $r_s$  与  $L_s$  为系统电阻电抗,  $r_{11\sigma}$ 、 $r_{12\sigma}$  和  $L_{11\sigma}$ 、 $L_{12\sigma}$  分别为变压器一二次侧的电阻与漏感;  $r_{1m}$  与  $L_{1m}$  为励磁电阻与励磁电感。

在变压器未进入饱和时,  $L_{1m}$  将非常大, 远大于上述其他的电阻电感。而在极度饱和时,  $L_{1m}$  将降为漏感值水平。研究表明, 在变压器剩磁为 0, 合闸角度从  $90^\circ$  至  $0^\circ$  逐渐减小时, 变压器饱和程度

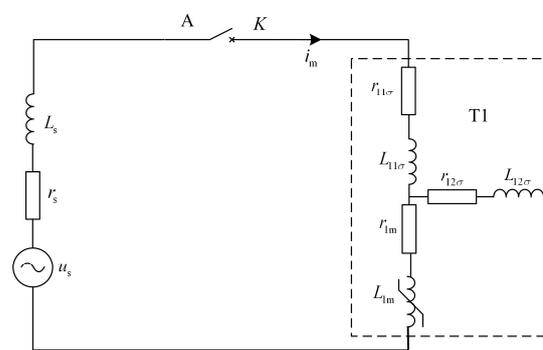


图 1 单相变压器空载合闸等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase transformer no-load closing

将逐渐加深, 涌流幅值也将逐渐变大。

在合闸过程中, 二次侧空载,  $r_{12\sigma}$  与  $L_{12\sigma}$  将不参与涌流产生过程。实际上,  $r_s$  与  $r_{11\sigma}$  显然远小于  $L_s$  与  $L_{11\sigma}$ , 简化分析时, 可假设为 0。即合闸回路中只有电感, 此时励磁涌流将不会衰减, 此时变压器磁通为式(1)<sup>[15]</sup>。

$$\phi = -\phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \phi_m \cos \alpha + \phi_t \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为合闸角;  $\phi_t$  为合闸前变压器铁心剩磁。

在变压器未饱和时,  $L_{1m}$  值将非常大, 励磁涌流几乎为零, 在铁心饱和后,  $L_{1m}$  将大大减小, 励磁涌流将大大增加。如图 2 所示, 假设在  $\omega t = \theta$  时, 变压器铁心进入饱和, 易知在  $\omega t = 2\pi - 2\alpha - \theta$  时, 将退出饱和。则在一个工频周期内, 变压器励磁涌流可以表示为式(2)。

$$i_m = \frac{1}{L} \int_{\theta/\omega}^t U_m \sin(\omega t + \alpha) dt \quad (2)$$

式中:  $L$  为合闸回路总电感, 有  $L = L_s + L_{11\sigma} + L_{1m}$ ;  $\theta$  为铁心饱和时刻对应电角度, 简称为饱和角。

故式(2)可以积分为式(3)。

$$i_m = \frac{U_m}{\omega L} (\cos \theta - \cos \omega t), \quad \theta < \omega t < 2\pi - 2\alpha - \theta \quad (3)$$

对励磁涌流进行傅里叶分解, 可以提取出  $n$  次

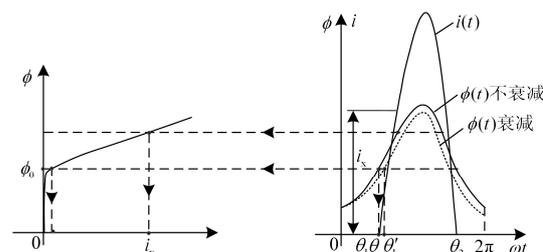


图 2 单相变压器励磁涌流图解

Fig. 2 Diagramming of magnetizing inrush current of single-phase transformer

谐波电流分量的有效值  $I_m(n)$ ，可得式(4)。

$$I_m(n) = \frac{U_m T_0}{2\omega_0 L T} \left[ S_a \frac{(n-1)\omega_0 T_0}{2} - 2 \cos \frac{\omega_0 T_0}{2} \times S_a \frac{n\omega_0 T_0}{2} + S_a \times \frac{(n+1)\omega_0 T_0}{2} \right] \quad (4)$$

式中： $T = 2\pi/\omega_0$  是工频周期； $T_0 = 2\theta/\omega_0$  为从断路器合闸到变压器铁心饱和的时间； $S_a(x) = \sin x/x$  是采样函数。

因此，励磁涌流的基波分量和二次谐波分量有效值分别为式(5)和式(6)。

$$I_m(1) = \frac{U_m}{2\omega_0^2 L T} (\omega_0 T_0 - \sin \omega_0 T_0) \quad (5)$$

$$I_m(2) = \frac{U_m}{2\omega_0^2 L T} \left( \sin \frac{\omega_0 T_0}{2} - \frac{1}{3} \sin \frac{3\omega_0 T_0}{2} \right) \quad (6)$$

最终，励磁涌流的二次谐波比为式(7)。

$$K_2(T_0) = \frac{\sin \frac{\omega_0 T_0}{2} - \frac{1}{3} \sin \frac{3\omega_0 T_0}{2}}{\omega_0 T_0 - \sin \omega_0 T_0} \quad (7)$$

可以看出，励磁涌流的二次谐波比值大小取决于  $T_0$ ，根本上取决于饱和角  $\theta$ 。如图 3 所示， $T_0$  越大，饱和角越大，励磁涌流二次谐波比将越小。

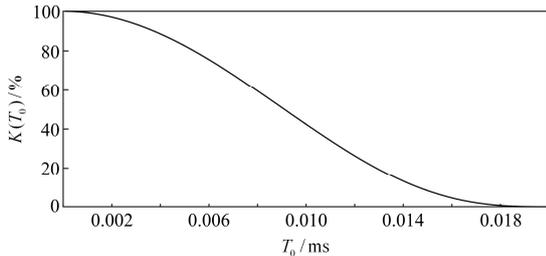


图 3 不同饱和时间下励磁涌流的二次谐波比  
Fig. 3 Second harmonic proportion of magnetizing inrush at different saturation times

假设变压器铁心的饱和磁通为  $\phi_0$ ，在一个励磁涌流周期内有等式(8)成立。

$$\phi_0 = -\phi_m \cos(\theta + \alpha) + \phi_m \cos \alpha + \phi_r \quad (8)$$

在实际情况下，因合闸回路中电阻的存在，变压器磁通的非周期分量  $\phi_m \cos \alpha + \phi_r$  将会衰减，引起励磁涌流衰减，等效的饱和角  $\theta$  变大，如图 2 中虚线所示。故随着励磁涌流的衰减，涌流的二次谐波比将会减小，如仿真图 4 所示。

### 1.1.2 波形间断角

由图 2 的励磁涌流图解分析可知，在一个工频周期内，只有在  $\theta < \omega_0 t < 2\pi - 2\alpha - \theta$  期间才有涌流产生。而在其他时刻，因励磁电抗值很大，励磁涌流几乎为零，而产生波形间断角。这也是用于鉴别励

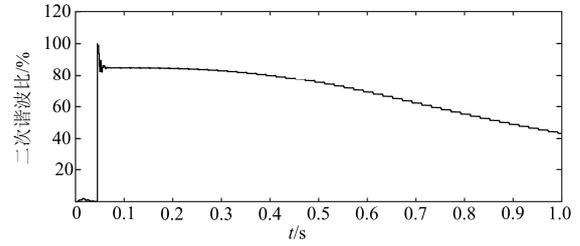


图 4 励磁涌流二次谐波比变化仿真图  
Fig. 4 Simulation diagram of second harmonic proportion of magnetizing inrush

磁涌流的常用特征量之一。假设励磁涌流波形间断角为  $\beta$ ，则有式(9)。

$$\beta = 2\alpha + 2\theta \quad (9)$$

根据上述分析，当合闸角度  $\alpha$  确定时，随着励磁涌流的衰减，波形间断角度将会越来越大，如仿真图 5 与表 1 所示。

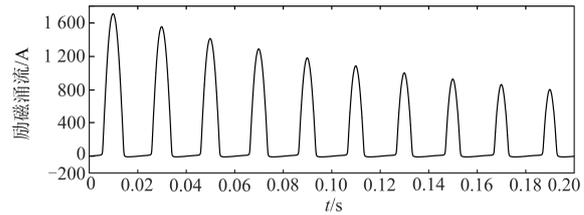


图 5 励磁涌流波形间断角变化仿真图  
Fig. 5 Simulation diagram of dead angle of magnetizing inrush

表 1 不同周期下的励磁涌流波形间断角

Table 1 Dead angle of magnetizing inrush in different period						
第 $n$ 个涌流周期	1	2	3	4	5	6
间断角/(°)	157	175	188	205	224	227

## 1.2 和应涌流波形特征量分析

### 1.2.1 二次谐波比

选择单相变压器 T1 空载合闸，并联运行变压器 T2 产生和应涌流的情况进行分析。和应涌流产生的等值电路如图 6 所示。由于系统电阻电抗很小，可以认为合闸后，两并联变压器一次侧电压为电源电压，此时和应涌流二次谐波比的计算公式将与励磁涌流相同，均可采用式(7)进行计算。

但是，需要明白的是，和应涌流产生过程与励磁涌流不同。简单说来，励磁涌流中包含直流分量，当该直流分量电流流过系统阻抗时会产生压降，使得变压器一次侧电压中包含直流分量，造成变压器铁心磁通逐渐积累至饱和，最终导致和应涌流产生<sup>[16-18]</sup>。而励磁涌流的产生是由于磁通的不可突变性。在刚合闸时，会产生一个较大的暂态磁通导致铁心饱和而产生涌流。

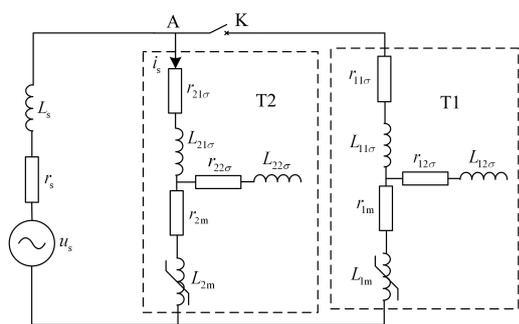


图 6 并联和应涌流产生的等值电路

Fig. 6 Equivalent circuit of sympathetic inrush in parallel

由此可将和应涌流二次谐波比变化分为三个阶段。

第一阶段：在变压器空载合闸后到和应变压器铁心进入饱和前。这段时间内和应涌流几乎为零，铁心饱和角 $\theta$ 等效为 $2\pi$ ，代入式(7)中进行计算可知，和应涌流的二次谐波比约为0。

第二阶段：而后，变压器 T2 铁心进入饱和，饱和角 $\theta$ 将逐渐减小，二次谐波比将随之增大；

第三阶段：由于和应涌流回路中的电阻损耗作用，变压器 T2 铁心磁通又将逐渐较小，直至退出饱和，此阶段，饱和角 $\theta$ 又将逐渐增大，二次谐波比随之减小。

图 7 为在合闸角度为 $0^\circ$ 下，和应涌流二次谐波比变化的仿真图。

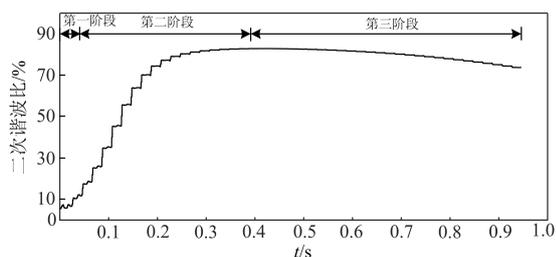


图 7 励磁涌流二次谐波比变化仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of second harmonic proportion of sympathetic inrush

### 1.2.2 波形间断角

与二次谐波比变化的分析思路相同，间断角同样分为三个阶段，根据式(9)。

第一阶段：变压器 T2 铁心未饱和，和应涌流几乎为零，波形间断角度约为 $360^\circ$ 。

第二阶段：变压器 T2 铁心饱和，随着饱和逐渐加深，饱和角 $\theta$ 变小，波形间断角度逐渐减小。

第三阶段：电阻损耗作用逐渐占据主导地位，变压器铁心逐渐退出饱和，饱和角 $\theta$ 又变大，波形间断角度又将逐渐变大。

在合闸角度为 $0^\circ$ 时进行仿真，结果如图 8 所示。可见波形间断角随时间变化规律正好与二次谐波比相反。

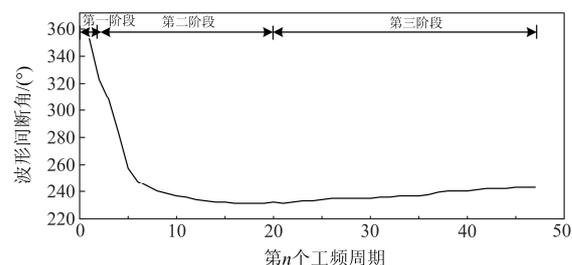


图 8 和应涌流波形间断角变化仿真图

Fig. 8 Simulation diagram of dead angle of sympathetic inrush

## 2 CT 暂态特性对涌流二次谐波比的影响

保护采集电流为 CT 传变后的二次侧电流，所以 CT 对涌流特征量传变的好坏将直接影响着以二次谐波比及波形间断角等波形特征量构造制动判据的变压器差动保护对涌流能否可靠制动。CT 的等值电路如图 9(a)所示，其中 $L_m$ 和 $R_m$ 为 CT 励磁电感与励磁电阻， $L_2$ 和 $R_2$ 为经换算后的二次绕组漏电感与电阻， $L_L$ 和 $R_L$ 为经换算后的负载电感和电阻。CT 一次侧相当于外接一个等效电流源，大小为一次侧电流 $i_1$ 。因为励磁支路中 $L_m \gg R_m$ ，则等值电路可以简化为图 9(b)。其中 $L'_L = L_L + L_2$ ， $R'_L = R_L + R_2$ 。

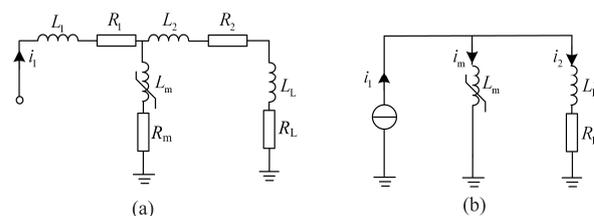


图 9 CT 的等值电路

Fig. 9 Equivalent circuit of CT

在一个工频周期内，CT 铁心可能处于交替饱和状态。假设 CT 的平均励磁电感为 $L_{ma}$ ，一次侧电流的 $n$ 次谐波分量有效值为 $I_{1n}$ ，二次侧电流的 $n$ 次谐波分量有效值为 $I_{2n}$ 。根据电路理论，有式(10)。

$$I_{2n} = \frac{n\omega_0 L_{ma}}{\sqrt{n\omega_0 (L_{ma} + L'_L)^2 + R'_L{}^2}} I_{1n} \quad (10)$$

定义 $K(n)$ 为式(11)。

$$K(n) = \frac{I_{2n}}{I_{1n}} \quad (11)$$

则有式(12)。

$$K(n) = \frac{n\omega_0 L_{ma}}{\sqrt{n\omega_0 (L_{ma} + L'_L)^2 + R'_L{}^2}} \quad (12)$$

则  $K(n)$  的导数为

$$\frac{dK(n)}{dn} = \frac{\omega_0 L_{ma} R_L'^2}{\{[n\omega_0(L_{ma} + L_L)']^2 + R_L'^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

显然  $\frac{dK(n)}{dn} > 0$ ，则有  $K(2) > K(1)$ ，即

$$\frac{I_{22}}{I_{12}} > \frac{I_{21}}{I_{11}} \quad (14)$$

进一步推导有：

$$\frac{I_{22}}{I_{21}} > \frac{I_{12}}{I_{11}} \quad (15)$$

可以看出，在经过 CT 传变之后，涌流的二次谐波比将变大。以此类推，涌流经 CT 传变后的高次谐波比都将增大。

### 3 CT 暂态特性对涌流波形间断角度的影响

本节将利用作者已构建的 CT(P/PR)Lucas 仿真模型<sup>[19-20]</sup>，从理论和仿真的角度，考虑 CT 暂态传变特性影响因素中二次负载及 CT 类型对涌流波形间断角的影响。

#### 3.1 二次负载

首先分析二次负载对励磁涌流的影响。采用低漏磁电感的 PR 型保护用 CT 进行分析，则有 CT 二次侧漏感  $L_2$  约为 0(见图 9(a))。保护用 CT 二次负载大多为纯电阻性，假设二次负载为纯电阻。假设 CT 的铁心饱和磁通为  $\phi_{ct0}$ ，在铁心未饱和时，一次侧电流几乎全部流入负载支路中，此时 CT 的铁心磁通表达为式(16)。

$$\phi_{ct} = \int_0^t i_1 R_L' dt \quad (16)$$

一个工频周期内，当  $\theta_1 < \omega t < \theta_2$  时，励磁涌流  $i_1$  大于 0，在  $0 < \omega t < \theta_1$  与  $\theta_2 < \omega t < 2\pi$  内，励磁涌流  $i_1$  约为 0。CT 的二次侧电流可以通过图解法表示为图 10。

如图 10(a)所示，当 CT 的等效负载电阻  $R_L'$  很小时，在  $\theta_1 < \omega t < \theta_2$  内，CT 铁心磁通将不能达到饱和，这为第一种情况。则在  $\omega t = \theta_2$  时， $\phi_{ct}$  达到最大，此后励磁涌流为 0，铁心磁通在励磁支路电感与等效负载电阻共同作用下以时间常数  $\tau = L_m / R_L'$  衰减。

在  $R_L'$  很小且铁心未饱和时， $\tau$  很大，磁通衰减缓慢。由  $i_2 = \frac{d\phi}{dt R_L'}$  易知在  $\theta_1 < \omega t < \theta_2$  内，CT 二次侧电流大于 0，在  $\theta_2 < \omega t < \theta_3$  内，CT 二次侧电流小于 0。显然，这种情况下励磁涌流经 CT 传变后的波形间断角减小。可能在一个工频周期内，磁通不能衰减到 0，此时波形间断角为 0。

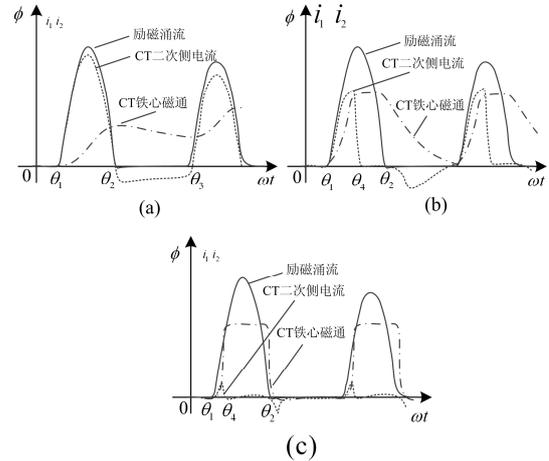


图 10 二次负载对励磁涌流波形间断角的影响

Fig. 10 Influence of secondary load on dead angle of inrush current waveform

继续增大等效负载电阻  $R_L'$ ，假设 CT 铁心在  $\omega t = \theta_4$  时饱和。如图 10(b)所示，为第二种情况。此后在  $\theta_4 < \omega t < \theta_2$  时间内，铁心磁通将保持不变，在  $\theta_2 < \omega t < 2\pi$  时间内，励磁涌流为 0，铁心磁通将衰减，较第一种情况而言，衰减时间常数变大。由上分析可知，在  $\theta_4 < \omega t < \theta_2$  内，CT 二次侧电流产生间断角，而在  $\theta_2 < \omega t < 2\pi$  有无间断角，将取决于磁通衰减速度。

第三种情况，继续增大  $R_L'$  直至很大，易知 CT 铁心饱和时间角  $\theta_4$  将进一步缩小，如图 10(c)所示。由于铁心严重饱和， $L_m$  将变得很小，在铁心退出饱和期间，衰减时间常数  $\tau$  将变得很小。在励磁涌流消失后，CT 二次侧电流仅仅能维持很短的时间。所以在一个工频周期内，CT 二次侧电流大部分时间都为 0，波形间断角将大于励磁涌流间断角。

由以上分析可知，在励磁涌流下，随着 CT 负载电阻增大，CT 二次侧电流间断角增大，但相对于励磁涌流来说，传变后的波形间断角可能变大也可能变小。

对比分析二次负载对和应涌流波形间断角的影响。因为和应涌流一般远小于励磁涌流，由式(16)可知和应涌流不易引起 CT 饱和。则可按上述励磁涌流的第一种情况分析。可知，在不同负载下，和应涌流经 CT 传变后的波形间断角均会减小。

选用 PR 型保护用 CT 仿真在不同二次负载下，CT 传变特性对涌流间断角的影响，如图 11 所示。由图可见，在二次负载为  $0.1 \Omega$  时，励磁涌流间断角消失，传变后间断角变小；在二次负载为  $1 \Omega$  时，励磁涌流间断角较传变前变小；在二次负载为  $10 \Omega$

时, 励磁涌流间断角较转变前变大。而对于和应涌流, 即使二次负载为  $10\ \Omega$  时, 转变后的间断角仍减小。

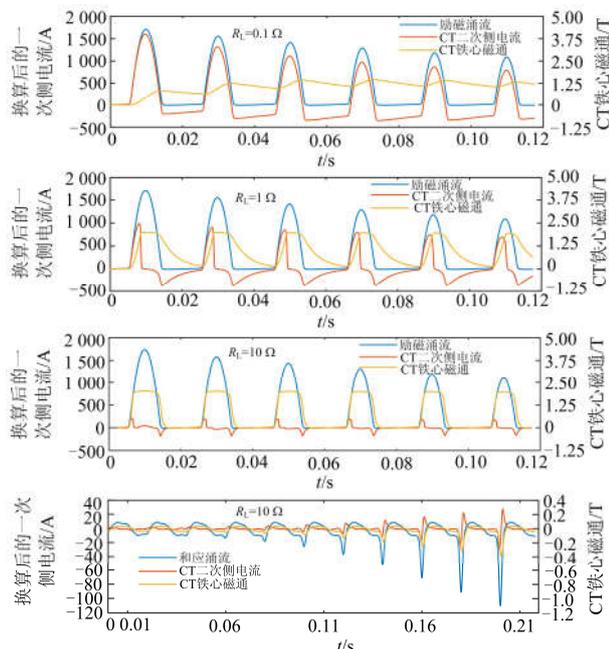


图 11 二次负载对涌流间断角影响仿真图

Fig. 11 Simulation diagram of secondary load on inrush current dead angle

### 3.2 CT 类型

不同类型的 CT 暂态转变特性也不同。额定负载下, P 型 CT 的励磁电感较大, 励磁电流较小, 但容易饱和。PR 型 CT 带有气隙, 不易饱和, 但是在额定负载下, 励磁电感较小, 励磁电流较大。

图 12 仿真对比了 P、PR 两种类型 CT 在相同工况下对涌流波形间断角度的影响。

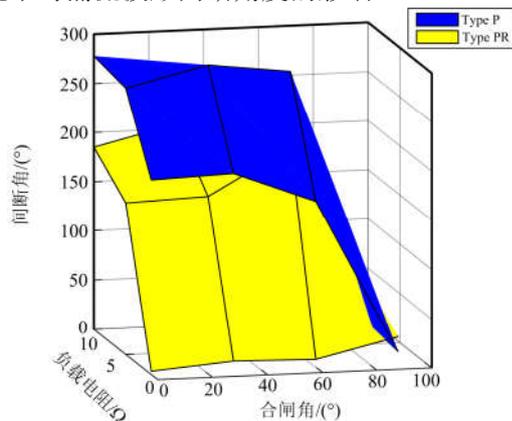


图 12 不同类型 CT 对间断角的影响

Fig. 12 Effect of different types of CT on the dead angle

可见, 在各种工况下, 经 PR 型 CT 转变后的涌流间断角较 P 型 CT 均较小。可推断 CT 越不易饱和, 经过 CT 转变后的涌流波形间断角度越小, 反

之越大。

## 4 结语

变压器和应涌流期间, 涌流的特征量及其经过 CT 转变后的特性是变压器差动保护制动判据研究中的核心问题。本文主要分析了变压器涌流特征量的变化规律, 并利用构建的 CT lucas 仿真模型, 分析了 CT 暂态转变特性对涌流特征量的影响规律。主要得出以下几点结论:

1) 涌流的二次谐波比与波形间断角取决于变压器铁心饱和角, 饱和角越大, 二次谐波比越小, 波形间断角越大, 反之相反。

2) 经 CT 转变后的涌流二次谐波比会增大, 更有利于以二次谐波比作为制动判据的差动保护对涌流进行制动。

3) CT 的等效二次负载电阻越大且选用的 CT 类型越容易饱和, 经 CT 转变后的涌流波形间断角越大, 更有利于以间断角作为制动判据的差动保护对涌流进行制动。

4) 经 CT 转变的和应涌流波形间断角会减小, 较励磁涌流来说, 波形间断角制动判据更易失效。

## 参考文献

- [1] 戚宣威, 尹项根, 张哲, 等. 变压器空投导致相邻元件差动保护误动分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 129-134.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Analysis on mal-operation for current differential protection due to adjacent transformer switching-on and its countermeasures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 129-134.
- [2] 李德佳, 王维俭, 毕大强. 变压器暂态饱和与和应涌流实例分析[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 12-15.  
LI Dejia, WANG Weijian, BI Daqiang. Analysis of transient saturation and sympathetic inrush of transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 12-15.
- [3] 王怀智, 孙显初, 常林. 和应涌流对变压器差动保护影响的试验研究[J]. 继电器, 2001, 29(7): 52-54.  
WANG Huaizhi, SUN Xianchu, CHANG Lin. Test and study on the effect of surge current on differential protection for transformer[J]. Relay, 2001, 29(7): 52-54.
- [4] 张炳如, 胡丽萍. 万家寨水电厂主变保护动作分析[J]. 电力学报, 2006, 21(2): 210-211.  
ZHANG Bingru, HU Liping. Analysis of protection action of Wanjiashai hydropower plant[J]. Journal of Electric Power, 2006, 21(2): 210-211.
- [5] 周云波, 曹良. 一起主变压器差动保护误动事故及防止对策[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 71-74.

- ZHOU Yunbo, CAO Liang. Inspection and analysis of a maloperation of transformer differential protection and its preventive measures[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 71-74.
- [6] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.
- YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 149-154.
- [7] 邵文权, 乔妮, 焦在滨, 等. 利用电流变化率极值特征的变压器涌流识别研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 64-70.
- SHAO Wenquan, QIAO Ni, JIAO Zaibin, et al. A method to detect inrush currents in power transformer using current derivation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 64-70.
- [8] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.
- YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [9] 郝治国, 张保会, 褚云龙. 变压器励磁涌流鉴别技术的现状和发展[J]. 变压器, 2005, 42(7): 23-27.
- HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong. Trend and situation of distinguish technology of transformer magnetizing inrush current[J]. Transformers, 2005, 42(7): 23-27.
- [10] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 电磁式电流互感器暂态特性试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 1-4.
- CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Test study on the transient performance of the electro-magnetic type current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 1-4.
- [11] 孙向飞, 束洪春, 于继来. 电流互感器暂态饱和和对涌流传变的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 83-88.
- SUN Xiangfei, SHU Hongchun, YU Jilai. Effect of CT transient saturation on transfer of sympathetic inrush[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 83-88.
- [12] WU Yahui, DONG Xinzhou, SOHRAB M. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach Theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [13] 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 mathematical modeling and simulation of current transformer[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 11-14.
- [14] 黄莉, 杨卫星, 张雪松. 基于 PSCAD/EMTDC 的带气隙电流互感器建模及仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 178-182.
- HUANG Li, YANG Weixing, ZHANG Xuesong. Modeling and simulation of air-gap current transformer based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 178-182.
- [15] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [16] 毕大强, 王祥珩, 李德佳, 等. 变压器和应涌流的理论探讨[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 1-8.
- BI Daqiang, WANG Xiangheng, LI Dejia, et al. Theory analysis of the sympathetic inrush in operating transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 1-8.
- [17] 袁宇波, 李德佳, 陆于平, 等. 变压器和应涌流的物理机理及其对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 9-14.
- YUAN Yubo, LI Dejia, LU Yuping, et al. Research on sympathetic inrush in operating transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 9-14.
- [18] 束洪春, 贺勋, 李立新. 变压器和应涌流分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 7-12.
- SHU Hongchun, HE Xun, LI Lixin. Research on sympathetic inrush in operating transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 7-12.
- [19] GUO Qian, YIN Xianggen, PAN Yuanlin, et al. Modeling of practical protective ct based on lucas model[C]// Transportation Electrification Asia-Pacific, August 7-10, 2017, Harbin, China: 1-6.
- [20] JILES D C, ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55(6): 2115-2120.

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-08-03

作者简介:

王育学(1988—), 男, 博士, 主要研究方向为大型发电机组继电保护技术;

潘远林(1993—), 男, 本科, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 2410329909@qq.com

刘 玮(1973—), 男, 硕士, 从事电力系统继电保护运行管理工作。

(编辑 张爱琴)