

DOI: 10.7667/PSPC161592

暂态保护用小功率电流变换器的研究

须雷, 卢为, 李力, 朱晓彤, 刘东超, 刘鹏, 刘彬, 刘杲培

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 小功率电流变换器在电力系统二次侧对电流实现隔离和变换。随着电力系统的发展, 愈来愈要求电流互感器能在暂态过渡过程中真实地传变暂态故障电流。基于等值电路, 对小功率电流变换器的暂态特性的影响因素进行了深入分析。为了更真实地传变非周期分量电流, 应在保证小功率电流变换器不发生饱和的前提下, 尽量提高二次回路时间常数。对于体积受限的小功率电流变换器, 通过推导二次回路时间常数关于铁芯边宽的变化关系, 提出了一种暂态小功率电流变换器的定量设计和计算方法, 得到了在不同二次线径下的最优设计方案。理论分析结果与样品的测试结果吻合, 得到了实践验证。

关键词: 小功率电流变换器; 暂态特性; 非周期分量; 二次回路时间常数; 铁芯

Research on low power current transducer used for transient protection

XU Lei, LU Wei, LI Li, ZHU Xiaotong, LIU Dongchao, LIU Peng, LIU Bin, LIU Gaopei

(Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Low power current transducer insulates and converts current on the secondary side of the power system. As the power system develops, the current transformer is required to accurately convert transient fault current during the transition period. Based on the equivalent circuit, the influence factor of transient characteristic of low power current transducer is discussed in depth. In order to reach a more realistic effect of aperiodic component transmission, the secondary circuit time constant should be improved as far as possible under the premise that the low power current transducer does not saturate. For low power current transducer with restricted volume, by deducing the relationship between secondary circuit time constant and core width, a quantitative design and calculation method of the low power current transducer is proposed, and then the optimal design schemes are obtained under different secondary wire diameter. The theoretical analysis coincides with the test results of the samples, and the theory is verified by practice.

Key words: low power current transducer; transient characteristic; aperiodic component; secondary circuit time constant; iron core

0 引言

小功率电流变换器是一种体积小、低功率输出的电流互感器(CT), 普遍应用于电力系统微机继电保护及自动化装置中, 在电力系统二次侧实现电流的隔离和变换, 为微机继电保护与自动化装置提供幅相特性线性相关、电平适中及易于传送变换的模拟信号, 其额定输入电流为 1 A 或 5 A, 负荷小、体积小^[1-2]。

当高压电力系统发生短路故障时, 短路电流中

通常含有周期分量(对称分量)和非周期分量(直流分量)两部分, 其中非周期分量对电流互感器特性有严重影响, 衰减较慢的非周期分量常常导致电流互感器传变特性变坏而不能准确传变故障电流, 可能造成继电保护装置的误动和拒动等^[3-6], 而且非周期分量幅值越大, 衰减时间常数越长, 对电流互感器的影响越严重^[7-9]。随着现代电力系统的发展, 一方面故障电流的非周期分量幅值和非周期分量衰减时间常数在增大, 比如模拟量输入式合并单元和电力系统故障动态记录装置要求在 20 倍基波分量、100% 直流偏移、衰减时间常数 100 ms 的故障电流下能正常传变^[10-11]; 另一方面要求保护装置更迅速地排除故障, 具有更高的可靠性^[12]。保护装置通过电流互

基金项目: 国家电网公司科技项目“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”

感器来感受一次电流, 电流互感器的性能直接决定保护装置的运行, 因此愈来愈强调暂态过渡过程中传变的逼真度, 要求电流互感器以最小的失真将一次暂态故障电流变换为二次电流。

小功率电流变换器的重要性不亚于高压电力电流互感器, 但两者特点不同, 比如小功率电流变换器的体积通常受到严格限制。目前对一次高压侧的电力电流互感器的暂态特性研究较多^[13-15], 而对二次低压侧的小功率电流变换器的暂态特性研究很少, 当前应用的保护用小功率电流变换器仅能保证在较大非周期分量电流影响下不发生严重饱和, 将故障电流中的少部分非周期分量传变到二次输出端, 不能保证高准确度和逼真的传变非周期分量电流, 不能适应电力系统的发展要求。

1 暂态传变特性的理论分析

小功率电流变换器负载一般为纯电阻, 忽略影响较小的一次绕组内阻、铁芯损耗电阻和漏抗, 并假设励磁特性呈线性, 即励磁电感为常数, 折算到二次侧后的简化等值电路如图 1 所示。

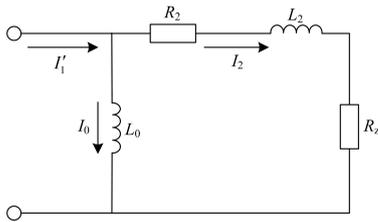


图 1 小功率电流变换器的等值电路(折算到二次侧)

Fig. 1 Equivalent circuit of low power current transducer (converting to the secondary side)

图 1 中: I_1' 为折算到二次侧的一次电流, 单位为 A; I_2 为二次电流, 单位为 A; I_0 为励磁电流, 单位为 A; L_0 为励磁电感, 单位为 H; R_2 为二次绕组内阻, 单位为 Ω ; L_2 为漏电感, 单位为 H; R_2 为负载电阻, 单位为 Ω 。

对于电力系统短路故障时的暂态情况, 一次电流 I_1 由正弦周期分量和按指数规律衰减的非周期分量组成, 即

$$I_1 = I_{1m}[-\cos(\omega t + \theta) + \cos\theta e^{-t/\tau_1}] \quad (1)$$

式中: I_1 为一次电流, 单位为 A; I_{1m} 为一次电流周期分量的幅值, 单位为 A; ω 为角频率, 单位为 rad/s; t 为时间, 单位为 s; τ_1 为一次回路时间常数, 单位为 s; θ 为短路瞬间电压初相角, 单位为 rad。

当 $\theta = 0$ 时, 非周期分量初始值达到最大值, 称为直流量全偏移, 对电流互感器的暂态传变最不利, 此时:

$$I_1 = I_{1m}(-\cos \omega t + e^{-t/\tau_1}) \quad (2)$$

根据图 1, 可得到暂态二次电流^[16]为

$$I_2 = \frac{I_{1m} N_1}{N_2} \left\{ -\cos \omega t + \left(\frac{1 + \omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_{20}^2} \right)^{1/2} \sin(\omega t + \phi) + \frac{\tau_{20} - \tau_2}{\tau_{20} - \tau_1} e^{-t/\tau_1} - \left[\frac{\tau_1 - \tau_2}{\tau_{20} - \tau_1} + \left(\frac{1 + \omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_{20}^2} \right)^{1/2} \sin \phi \right] e^{-t/\tau_{20}} \right\} \quad (3)$$

式中: I_2 为二次电流, 单位为 A; N_1 为一次绕组匝数; N_2 为二次绕组匝数; τ_2 为负荷支路时间常数, 单位为 s; τ_{20} 为二次回路时间常数, 单位为 s; ϕ 为弧度, 单位为 rad。

$$\tau_2 = L_2 / (R_2 + R_z) \quad (4)$$

$$\tau_{20} = (L_2 + L_0) / (R_2 + R_z) \quad (5)$$

$$\phi = \arctan \frac{1 + \omega^2 \tau_2 \tau_{20}}{\omega(\tau_{20} - \tau_2)} \quad (6)$$

由式(3)可得, I_2 由周期分量和随时间常数 τ_1 、 τ_{20} 衰减的非周期分量组成, 其中二次回路时间常数 τ_{20} 越大, 则二次非周期分量衰减得越慢, 传变误差越小。当理想情况下, $\tau_{20} = \infty$ 时, 一次非周期分量完全无畸变传变到二次侧; 当 $\tau_{20} = \tau_2$ 时, 二次电流中不包含非周期分量, 即一次非周期分量完全没有传变到二次侧。

上述讨论的前提是励磁特性处于线性区, 励磁电感 L_0 不发生较大的变化。因此, 为提升小功率电流变换器的暂态传变特性、尽量真实地传变一次侧非周期分量电流, 应做到: 在保证暂态大电流情况时小功率电流变换器不发生饱和的前提下, 尽量提高二次回路时间常数 τ_{20} 。

文献[10]对暂态传变特性的要求主要体现在最大峰值瞬时误差和非周期分量衰减时间常数误差。

1) 最大峰值瞬时误差。测试波形为双脉冲 C-t'-O-t''-C-t''-O (两次通电时的磁通极性相同)。t' 是第一次电流通过时间, 为 40 ms; t'' 是第二次电流通过时间, 为 40 ms; t_{fr} 是无电流时间, 为 960 ms。测试波形的电流直流分量时间常数为 100 ms。要求在永久性故障 20 倍大电流、非周期分量 100% 时的最大峰值瞬时误差不大于 10%。

2) 非周期分量衰减时间常数误差。模拟短路故障, 短路电流的基波分量为 3 倍额定电流值, 控制合闸角使短路电流的非周期分量达到最大, 非周期分量衰减时间常数为 0.1 s, 要求非周期分量衰减时间常数的误差小于 10%。用故障启动后第 5 周波最大值来计算传变后的非周期分量衰减时间常数, 首

先通过计算得到小功率电流变换器二次测量波形的衰减时间常数 τ_x 。

$$\tau_x = 0.09 / \ln \frac{I_p}{I_5 - I_p} \quad (7)$$

式中： I_5 为故障后第 5 周波峰值，单位为 A； I_p 为故障稳态电流峰值，单位为 A。

τ_x 与一次时间常数 $\tau_1=0.1$ s 之间的相对误差即为非周期分量衰减时间常数误差。根据式(7)的计算方法可以得到经小功率电流变换器传变后的二次电流非周期分量衰减时间常数 τ_x 与 τ_{20} 的关系曲线，如图 2 所示。

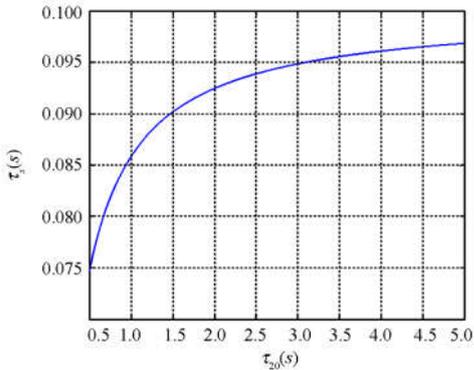


图 2 τ_x 随 τ_{20} 的变化关系

Fig. 2 Relationship between τ_x and τ_{20}

由图 2，为获得非周期分量衰减时间常数误差 < 10% 的传变效果，即 $\tau_x > 0.09$ s，则小功率电流变换器应保证 $\tau_{20} > 1.5$ s。

对非周期分量衰减时间常数误差的要求超出了 TPY 级暂态保护用电流互感器的要求^[1]，这一要求保证了暂态电流的传变具有“高逼真度”，是小功率电流变换器设计的主要难点，本文主要讨论非周期分量衰减时间常数误差特性。

2 暂态小功率电流变换器的设计

小功率电流变换器常常在体积上受到限制，不能单纯地通过增大体积来提升性能。以某厂家模拟量输入式合并单元为例，对单个小功率电流变换器的最大允许外尺寸为 54×54×38(长×宽×高，mm)。在有限的空间内，如何获得 CT 铁芯截面积、一次匝数、二次匝数和线径等的最优配置方案，是一个值得思考的问题，本文提供了一种可行的思路。

改善暂态传变特性的关键在于提高二次回路时间常数 τ_{20} ，暂态小功率电流变换器的二次绕组匝数多，漏电感远小于励磁电感，忽略漏电感 L_2 ，由式(5)可得到

$$\tau_{20} = L_0 / (R_2 + R_z) \quad (8)$$

对于带气隙的铁芯电感器，电感量可按式(9)计算^[17]。

$$L = \frac{4\pi N^2 S}{l_g + \frac{l_c}{\mu_r}} \times 10^{-7} \quad (9)$$

式中： L 为电感，单位为 H； l_g 为铁芯磁路中的非磁性气隙长度，单位为 m； μ_r 为铁芯的交流相对磁导率； N 为线圈匝数； S 为铁芯有效截面积，单位为 m^2 ； l_c 为铁芯平均磁路长度，单位为 m。

式(9)可改写为

$$L = \frac{4\pi \mu_e N^2 S_c}{l_c} \times 10^{-7} \quad (10)$$

式中， μ_e 为铁芯磁路的有效相对磁导率。

$$\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \mu_r \frac{l_g}{l_c}} \quad (11)$$

忽略小功率电流变换器传变过程中的铜耗和铁损，可采用式(10)来计算励磁电感，代入式(8)得

$$\tau_{20} = \frac{4 \times 10^{-7} \pi N_2^2 S}{(l_g + \frac{l_c}{\mu_r})(R_2 + R_z)} \quad (12)$$

小功率电流变换器的一次额定输入为 1 A 和 5 A 共两种，二次负载为纯电阻，额定二次输出均设计为 0.175 V。为避免饱和，减小工作磁密，保证 1 A 和 5 A 小功率电流变换器传变特性一致，按一次最少匝数选择，即 1 A 的小功率电流变换器选择为 5 匝，5 A 的小功率电流变换器选择为 1 匝，额定安·匝数均为 5 A·匝，需为一次线包预留 3 mm 宽的绕线空间。

EI 插片式铁芯是最常用的小功率电流变换器的铁芯型式，由 E 片和 I 片组成完整的磁回路，并由多层铁芯片叠片插装而成，铁芯磁路在 E 片和 I 片之间存在气隙，外形如图 3 所示。这里以 EI 插片式铁芯为例来介绍小功率电流变换器的设计和计算方法，其他铁芯型式类似。

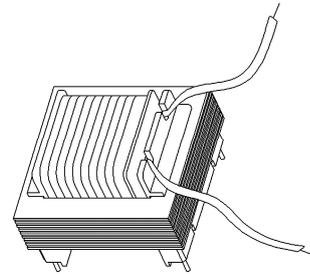


图 3 EI 插片铁芯 CT

Fig. 3 EI blade core type CT

EI 铁芯形状如图 4 所示, 设 E 片的边宽为 x , 单位为 mm。

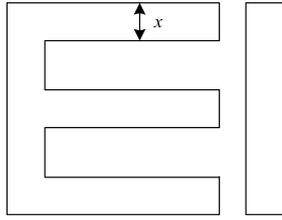


图 4 EI 铁芯

Fig. 4 EI type iron core

小功率电流变换器应尽量完全利用全部的空间来达到最佳性能, 利用其各组成部分(包括外罩壳、铁芯、骨架、一次绕组、二次绕组、绝缘层和屏蔽层等)相互之间在三维空间上的约束关系, 可得到二次线包的截面积 $S_1(\text{m}^2)$ 为

$$S_1 = 4 \times 10^{-6} (23 - x)(11.9375 - x) \quad (13)$$

考虑到二次绕组在绕制中为分层绕制, 如图 5 所示, 二次绕组截面为圆形, 线径为 $d(\text{mm})$, 每个绕组周边有一定的大小不一的剩余空间, 为了较准确地估算匝数, 以方形区域面积来计算单根绕组所占的空间, 可得到二次绕组匝数为

$$N_2 = k_1 \frac{S_1}{d^2} = \frac{4k_1(23 - x)(11.9375 - x)}{d^2} \quad (14)$$

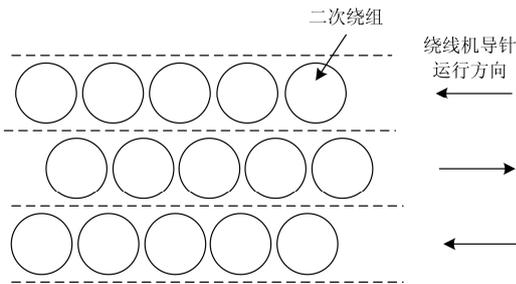


图 5 二次绕组截面的分布

Fig. 5 Distribution of the secondary winding section

式(14)中, 系数 k_1 反映绕线的密集程度, $0 < k_1 < 1$ 。匝数在一定范围时, k_1 主要受线径的影响, 一般情况下, 线径越大, 弯曲性差, k_1 越小。这里给出了在多次实践中获得的几种典型线径 d 和 k_1 的经验关系, 如表 1 所示。

表 1 d 和 k_1 的经验关系

Table 1 Empiric relationship between d and k_1

d/mm	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12
k_1	0.9	0.89	0.86	0.83	0.79

骨架的截面为矩形, 二次绕组以骨架为轴绕制, 二次绕组的轮廓形状如图 6 所示。

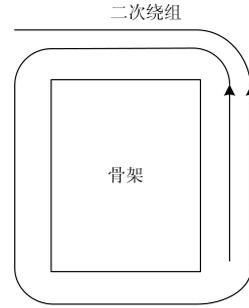


图 6 二次绕组的轮廓形状

Fig. 6 Contour shape of the secondary windings

由图 6 可得到二次绕组的总长度 $l(\text{m})$ 为

$$l = N_2 [(2x + 2.875) \times 2 + (H + 2.375) \times 2 + 2\pi \frac{E}{2}] = \frac{22.8672 \times 10^{-3} k_1 (23 - x)(11.9375 - x)(x + 10.3215)}{d^2} \quad (15)$$

铜在 20°C 时电阻率为 $\rho = 0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 可得到二次绕组的内阻 $R_2(\Omega)$ 为

$$R_2 = \frac{\rho l}{\pi (d/2)^2} = \frac{1.6 \times 10^{-3} k_1 (23 - x)(11.9375 - x)(x + 10.3215)}{\pi d^4} \quad (16)$$

由磁动势平衡得二次额定电流 $I_2(\text{A})$ 为

$$I_2 = \frac{I_1 N_1}{N_2} = \frac{1.25 d^2}{k_1 (23 - x)(11.9375 - x)} \quad (17)$$

小功率电流变换器的额定二次输出为 $U_0 = 0.175 \text{ V}$, 可得到取样电阻 $R_z(\Omega)$ 为

$$R_z = \frac{U_0}{I_2} = \frac{0.14 k_1 (23 - x)(11.9375 - x)}{d^2} \quad (18)$$

铁芯截面积 $S(\text{m}^2)$ 为

$$S = 8 \times 10^{-6} k_2 x (x - 3.3125) \quad (19)$$

式(19)中, k_2 为叠装系数(或叠片率), 是指硅钢片叠片后, 每个硅钢片的真实厚度和占叠片总厚度的比例, 反映硅钢片的压紧程度, 与硅钢片表面平整程度和实际插片情况有关。叠片空隙越多, 则叠片系数越小。这里取 $k_2 = 0.95$, 则

$$S = 7.6 \times 10^{-6} x (x - 3.3125) \quad (20)$$

对于 EI 插片式 CT, 非气隙磁路长度 $l_c(\text{m})$ 为

$$l_c = 4 \times 10^{-3} (38.25 - x) \quad (21)$$

根据感应电动势 $e = 4.44 f N_2 B_n S$, 可粗略估算得到, 小功率电流变换器在额定电流时的磁密 B_n 约为 0.001 T , 小功率电流变换器在暂态电流下的励磁电流非线性增加, 磁密和磁导率是动态变化的量, 为便于计算, 这里选择硅钢铁芯(材质为新日铁 35ZH115)在 $B = 0.1 \text{ T}$ 、 $f = 50 \text{ Hz}$ 时的磁导率, $\mu_r = 27056$ 。对

于小功率电流变换器，气隙 l_g 与实际的工艺水平有关，根据经验，这里按 $6 \mu\text{m}$ 处理。

将上述结果代入式(12)，可得到

$$\tau_{20} = \frac{0.64571\pi k_1 x(x - 3.3125)(23 - x)(11.9375 - x)}{(78.834 - x)(x + 10.3215 + \frac{10^3 d^2}{3.6394})} \quad (22)$$

二次线径 d 的选取有一定范围，从加工的角度考虑，不能太细，否则易断；也不能太粗，否则绕线密度小，二次匝数过少。分别选取表 1 中 5 种典型的线径 d ，代入对应的 k_1 ，最终可分别获得二次回路时间常数 τ_{20} 关于唯一变量 x 的关系。这里分别选取 d 为 0.08 mm 、 0.1 mm 、 0.12 mm ，可绘图得到图 7。图 7 中 x 的取值范围为 $3.3125 < x < 11.9375$ ，原因在于此范围之外的 EI 铁芯边宽取值不能完全利用全部空间，造成浪费和设计的不合理，小功率电流变换器性能较差，这里不再赘述。

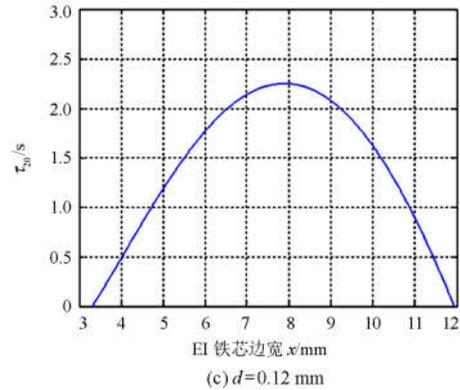
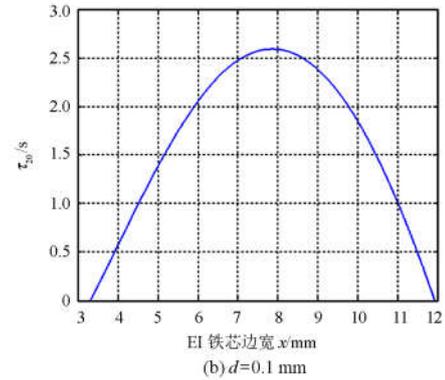
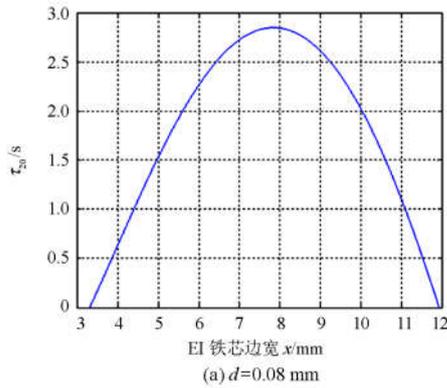


图 7 二次回路时间常数 τ_{20} 与 EI 铁芯边宽 x 的关系
Fig. 7 Relationship between the secondary circuit time constant τ_{20} and edge width x of EI iron core

由图 7，可以得到在不同线径下的最优小功率电流变换器设计方案及各自对应的衰减时间常数误差，如表 2。

表 2 不同二次线径 d 时的最优 EI 型 CT 设计方案

Table 2 Optimal design scheme of EI type CT with different secondary winding diameter

二次线径 d/mm	EI 铁芯边宽 x/mm	铁芯截面积/ mm^2	二次匝数 N_2	取样电阻 R_s/Ω	τ_{20} / s	估算的非周期分量衰减时间常数误差/%
0.08	7.86	271.6	34 725	1215	2.85	-5.42
0.09	7.87	272.6	27 048	947	2.75	-5.61
0.1	7.88	273.5	21 104	739	2.59	-5.94
0.11	7.89	274.5	16 780	587	2.43	-6.31
0.12	7.90	274.4	13 379	468	2.25	-6.79

选取表 2 中 $d=0.1 \text{ mm}$ 方案，按此方案制作了 10 只小功率电流变换器样品，施加短路基波分量为 3 倍额定电流值、非周期分量 100% 偏移、衰减时间常数为 0.1 s 的暂态电流，依据本文第 1 部分的测试方法，实测得到非周期分量衰减时间常数误差的平均值约为 -5.8% ，和表 2 理论分析结果基本吻合，实测传变前后的电流波形如图 8 所示。

另外，根据式(12)和式(16)，可以进一步估算小功率电流变换器由于温度变化导致二次绕组内阻变化，进而得到非周期分量衰减时间常数误差的变化

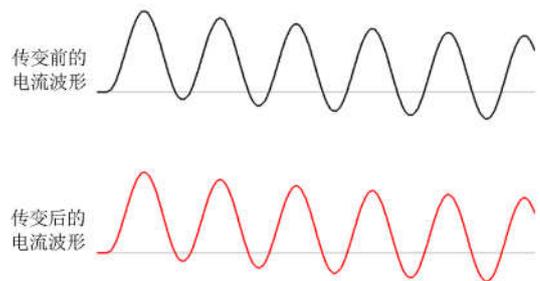


图 8 试制 CT 样品的暂态电流传变波形
Fig. 8 Transient transmission waveform of CT sample

规律。以铜的电阻率温度系数为 $0.0039/^{\circ}\text{C}$ 来计算,表 3 是计算值和实测值的比较。

表 3 小功率电流变换器在不同温度下的暂态特性

Table 3 Transient characteristic of low power current transducer under different temperature

温度/ $^{\circ}\text{C}$	非周期分量衰减时间常数误差/%	
	计算值	实测值
20	-5.94	-5.81
70	-6.88	-6.93
-40	-4.78	-5.05

由表 3 可知,随着温度升高,铜的电阻率增大,二次绕组内阻增大,而其他参数不变,因而二次回路时间常数减小,非周期分量衰减时间常数误差的绝对值变大,反之亦然。

经实测,在 $C-t'-O-t_{fr}-C-t''-O$ 循环中,最大峰值瞬时误差也远小于 10%。研制的小功率电流变换器满足 TPY 级要求,且满足文献[10-11]对暂态传变特性的要求。

3 结论

1) 在小功率电流变换器尺寸受限制的前提下,本文基于二次回路时间常数,提出了一种暂态小功率电流变换器的定量设计和计算方法。该方法通过推导二次回路时间常数关于小功率电流变换器某单一参量的变化关系,可得到在不同二次线径下的最优设计方案。

2) 研制的小功率电流变换器的暂态特性满足相关标准的要求,并通过实践得到了验证。

3) 本文研究结果可为暂态保护用小功率电流变换器的设计和选择提供参考依据。

参考文献

- [1] 互感器 第 2 部分: 电流互感器的补充技术要求: GB 20840.2—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Instrument transformer-part 2: additional requirements for current transformers: GB 20840.2—2014[S]. Beijing: China Standards Press, 2014.
- [2] 小功率电流电压变换器 通用技术条件: JB/T 10635—2006[S]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
General specification for current & voltage transducer with small power: JB/T 10635—2006[S]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [3] 李志武. 电流互感器饱和对继电保护的影响及解决措施[J]. 电力学报, 2009, 24(2): 137-139.
LI Zhiwu. The influence and solution to the saturated state of the electric current mutual inductance machine on relay protection[J]. Journal of Electric Power, 2009, 24(2):

- 137-139.
- [4] 黄少锋, 谷君, 郑涛, 等. 内桥接线方式下变压器差动保护误动原因及防范措施[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3099-3106.
HUANG Shaofeng, GU Jun, ZHENG Tao, et al. Mal-operation of transformer differential protection with inner bridge connection and countermeasure[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3099-3106.
- [5] 刘中平, 陆于平, 袁宇波. 数字差动保护抗电流互感器饱和的线性区方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 66-70.
LIU Zhongping, LU Yuping, YUAN Yubo. Linear anti-saturation strategy of digital differential protection for current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 66-70.
- [6] 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): 15-22.
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): 15-22.
- [7] 姜自强, 刘建勇. 南阳特高压断路器失灵保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 117-122.
JIANG Ziqiang, LIU Jianyong. Study on Nanyang substation of UHV circuit failure protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 117-122.
- [8] 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): 69-76.
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): 69-76.
- [9] 崔迎宾, 谭震宇, 李庆民, 等. 电流互感器剩磁影响因素和发生规律的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 87-91.
CUI Yingbin, TAN Zhenyu, LI Qingmin, et al. Simulation study of influences of different factors on residual flux occurrence in current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 87-91.
- [10] 模拟量输入式合并单元检测规范: Q/GDW 11015—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
Testing specification for merging unit with analogue input: Q/GDW 11015—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [11] 220 kV~500 kV 电力系统故障动态记录装置检测要求:

- DL/T 663—1999[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
Test requirement for 220 kV~500 kV power system fault and dynamics recorder: DL/T 663—1999[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [12] 嵇建飞, 袁宇波, 王立辉, 等. 某 110 kV 智能变电站合并单元异常情况分析及对策[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 255-260.
JI Jianfei, YUAN Yubo, WANG Lihui, et al. Analysis and countermeasure on abnormal operation of one 110 kV intelligent substation merging unit[J]. Transformer of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 255-260.
- [13] 刘素梅, 毕天姝, 薛安成, 等. 具有不对称故障穿越能力的双馈风力发电机组短路电流分析与计算[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 182-190.
LIU Sumei, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Analysis and calculation for short-circuit current characteristics for doubly-fed induction generators with asymmetrical fault-ride-through capability[J]. Transformer of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 182-190.
- [14] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0025-x
- [15] 兀鹏越, 孙钢虎, 徐金, 等. 发电机断路器失灵保护误动原因分析及建议[J]. 热力发电, 2013, 42(4): 107-108.
WU Pengyue, SUN Ganghu, XU Jin, et al. Analysis of causes and suggestion on misoperation of generator breaker failure protection[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(4): 107-108.
- [16] 李子峰. 厂用电系统继电保护优化[J]. 热力发电, 2015, 44(9): 113-116.
LI Zifeng. Optimization of relay protection for a auxiliary power system[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(9): 113-116.
- [17] 李艳鹏, 侯启方, 刘承志. 非周期分量对电流互感器暂态饱和的影响[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 15-18.
LI Yanpeng, HOU Qifang, LIU Chengzhi. Influence of non-periodic components on transient saturation of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 15-18.
- [18] 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.
- [19] 胡晓光, 于文斌. 电流互感器的暂态仿真及其铁芯饱和的小波分析[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 58-61.
HU Xiaoguang, YU Wenbin. Transient simulation of current transformer and wavelet analysis of its core saturation[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 58-61.
- [20] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [21] 王全保. 电子变压器手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2007.

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-12-26

作者简介:

须雷(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能变电站; E-mail: xul@nrec.com

卢为(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为智能一次设备。E-mail: luwei@nrec.com

(编辑 周金梅)