

基于双向直流法的电磁式电流互感器剩磁测量仪研究

闫艳霞¹, 崔建华²

(1. 郑州轻工业学院电子信息工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 洛阳师范学院物理与电子信息学院, 河南 洛阳 471022)

摘要: 针对剩磁系数传统测试法的不足, 提出一种双向直流法测取剩磁系数。省去测试前消磁这一步骤, 对电磁式电流互感器进行正向激励, 去激励, 反向激励和激励操作, 采集相关的励磁电压和电流信号, 计算出激励过程中的磁通变化量从而测试到剩磁系数。基于此直流法研制了剩磁测量仪。通过对比试验和不确定度分析, 结果表明, 基于双向直流法的剩磁测量仪可以准确测取电磁式电流互感器的剩磁系数。

关键词: 铁磁材料; 电流互感器; 剩磁; 剩磁系数; 双向直流法; 不确定度分析

Residual flux measuring instrument for electromagnetic current transformer based on bidirectional DC method

YAN Yanxia¹, CUI Jianhua²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China;

2. College of Physical & Electronic Information Engineering, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China)

Abstract: Aiming at the disadvantage of traditional test method for residual flux factors, this paper proposes a bidirectional DC method to measure residual flux factors. It omits the procedure of demagnetization before test, adopts positive excitation, de-excitation, negative excitation, and excitation on electromagnetic CT, collects relevant excitation voltage and current signals, and calculates the change of magnetic flux during excitation and thus obtains residual flux factors through test. Based on the DC method, a residual flux measuring instrument is designed. The comparison test and uncertainty analysis show that bidirectional DC test method based residual flux measuring instrument can accurately measure the residual flux factors of electromagnetic CT.

Key words: ferromagnetic material; current transformer; residual flux; residual flux factor; bidirectional DC method; uncertainty analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0137-06

0 引言

电磁式电流互感器广泛应用于电力系统的保护, 计量等方面, 其性能直接影响电力系统的安全运行和经济运行^[1-2]。由于铁磁材料的磁滞特性, 在发生短路故障或者直流实验后, 电磁式电流互感器会存在大量剩磁^[3-4], 严重影响电流互感器的暂态特性和稳态特性^[5-7]。剩磁系数用于衡量电流互感器的剩磁量, 根据该参数有助于在互感器设计中采用合理的材质以及运行中量化分析剩磁对互感器性能的影响。

剩磁系数测量主要取决于剩磁通和饱和磁通两个参数。通过施加电流, 促使电流互感器饱和, 根据电流与磁通值可以得到电流互感器的励磁特性

曲线, 在励磁曲线上电流饱和和对应的磁通即为饱和磁通, 因此研究工作主要集中于剩磁通的测取。根据测试原理, 可将测试方法分为直流法和交流法。采用交流法的研究主要包含以下几种方法: 对电流互感器重新励磁, 根据励磁涌流求得剩磁^[8]; 预先励磁法通常用于减少电流互感器的励磁涌流, 在对电流互感器励磁过程中可以获取 ΦI 曲线, 则在 ΦI 曲线中, 当横坐标 I 为 0 时, 对应的磁通为剩磁^[9]。由于测试仪器中包含电容以及测试过程中的噪声, 对低电压信号带来消极影响, 导致上述方法测取的剩磁存在误差。考虑到所用仪器的高额造价以及繁琐的操作, 预先励磁法是很难得到广泛的应用, 仅适用于实验室研究。并且在预先励磁法中需要精准的控制开关切换的时间, 提前操作或者滞后操作都

会带来极大的测量误差。于是文献 [10] 基于漏泄通感应的磁场, 采用精确的磁通门传感器测取磁感应强度, 并通过励磁电压积分获取磁通值。根据磁感应强度和磁通这两个参数即可测取剩磁。但是该方法的难度在于准确的辨识剩磁和漏磁通。

由于交流方法的不足, 直流法测剩磁成为新的关注点。直流法采用直流电压源对在二次侧对互感器励磁, 采用示波器采集互感器二次侧两端电压和励磁电流, 对电压进行积分运算得到磁通值, 建立磁通与励磁电流的数值关系, 求出剩磁^[11]。采用小波分析法对电压和电流信号降噪, 提高测试精度^[12]。进一步提高测试精度可以对磁通采用数字化测量, 数字磁通测量环节自动将测量线圈中的磁通变化量转换成相应的脉冲串, 计算脉冲电压面积实现对磁通量的测量, 同时采用高准确度的标准磁通对磁通的数字化测量环节进行实时定标与校准。增大励磁电流, 增加放电电阻旁路开关, 采用单片机控制的继电器等措施可以提高测试的便捷^[13]。

直流法虽然进行了改进, 但是每次测试前都需要进行消磁, 当消磁不充分时, 测取的剩磁系数偏小。于是本文提出一种双向直流法, 对电流互感器交替进行正向和反向双向充电操作, 实现剩磁系数的准确测取, 并基于该方法研制了剩磁测量仪, 实验结果和不确定度分析表明该仪器可以准确测取剩磁。

2 实验原理

为了克服传统直流法的不足, 本文提出了双向直流法测试剩磁系数。该方法省略了测试前消磁这一步骤, 电流互感器一次进行充电, 放电, 反向充电和放电操作, 记录测试过程中的励磁电流和励磁电压。图 1 为双向直流法基本电路。

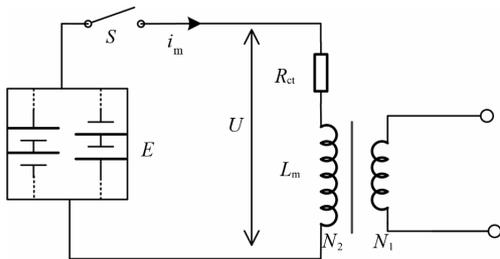


图 1 双向直流法基本电路

Fig. 1 Schematic diagram of bidirectional DC method

图中: E 为双向直流电源; R_{ct} 为电流互感器二次绕组直流电阻; U 为电流互感器二次端子两端电压; i_m 为励磁电流; N_1 , N_2 分别为一次、二次绕组匝数。应用双向直流法时, 将电流互感器一次

绕组开路, 在二次绕组通过直流电压源对互感器励磁。对励磁电感两端的电压进行积分可得到磁通量:

$$\Phi(t) = \int_0^t (U - R_{ct} \times i_m) dt \quad (1)$$

按照式(1)计算以上四个过程的磁通量, 以励磁电流为横坐标, 磁通量为纵坐标, 即可得到如图 2 所示的励磁特性曲线。

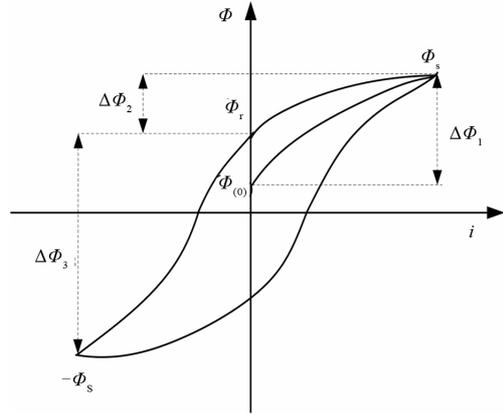


图 2 双向直流法测试结果

Fig. 2 Test result of bidirectional DC method

根据图 2 正向充电, 放电以及反向充电三个过程的磁通变化量为

$$\begin{cases} \Delta\Phi_1 = \Phi_s - \Phi_{(0)} \\ \Delta\Phi_2 = \Phi_r - \Phi_s \\ \Delta\Phi_3 = -\Phi_s - \Phi_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta\Phi_1$ 、 $\Delta\Phi_2$ 、 $\Delta\Phi_3$ 是正向充电, 放电以及反向充电三个过程的磁通变化量; $\Phi_{(0)}$ 是初始磁通; Φ_s 是饱和磁通; Φ_r 是剩磁; $-\Phi_s$ 表示反向饱和磁通。

饱和磁通和剩磁通可由式(2)推导出来:

$$\begin{cases} \Phi_s = -(\Delta\Phi_2 + \Delta\Phi_3)/2 \\ \Phi_r = (\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_3)/2 \end{cases} \quad (3)$$

则剩磁系数为

$$K_r = \frac{\Phi_r}{\Phi_s} = \frac{\Delta\Phi_3 - \Delta\Phi_2}{\Delta\Phi_3 + \Delta\Phi_2} \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 采用双向直流法可以忽略测试前的消磁过程, 避免消磁不充分带来的测量误差。

3 剩磁测量仪器

3.1 硬件电路

测试仪主要包括测试系统和控制系统。其中测试系统由电源、测试电路、数据采集组成。直流电压源可用蓄电池或 AC-DC 变换器, 要求输出电压可调, 输出功率大于 100 W。直流源输出端需接换向开关, 实现输出电压反向。测试电路包括开关、

限流电阻、放电电阻和电流电压传感器等, 通过切换开关实现电路状态的转换。测试励磁电流可选用霍尔传感器或取样电阻; 测试电压使用电阻分压器或者霍尔传感器。数据采集卡实现对电压和电流信号的采集。因为电压信号存在突变, 所以需要采集卡具有较高的采样率。工控机采用特殊的机械结构和屏蔽材料, 可以在复杂的现场环境下正常工作^[14]。为了提高系统的自动化程度, 可以将电源的选择与切换、测试电路的状态切换等操作通过程序控制, 这部分构成控制系统。

图3说明了剩磁测量仪的基本硬件组成。其中 E 为直流电源; R_l 为保护电阻; R_d 为放电电阻; R_{ct} 为电流互感器二次绕组直流电阻。N1, N2 分别为一次, 二次绕组匝数。NO 为继电器常开触点; NC 为继电器常闭触点; HCS 为霍尔电流传感器; HVS 为霍尔电压传感器; CH1 为数据采集卡电流信号通道; CH2 为数据采集卡电压信号通道。数据采集卡采集电压电流数据, 并发出数字指令到继电器线圈, 控制继电器触点的闭合以完成电路状态切换。

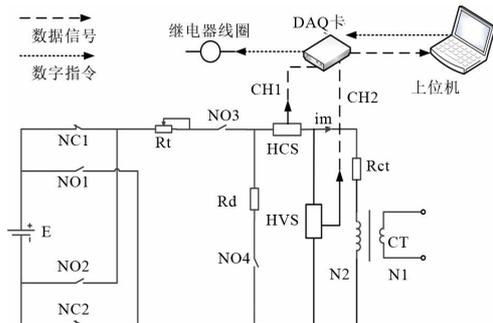


图3 剩磁测量仪原理图

Fig. 3 Schematic diagram of residual flux measuring instrument

E 为可编程直流稳压源, 设置稳定输出电压为 12, 最大输出电流为 15 A, 保护电流为 30 A; R_l 限制回路中电流, 防止电流互感器两端电压过大, 采用 50 Ω 电位器, 功率为 200 W; R_d 主要作用为在切断直流电源后, 构成放电回路, 为二次绕组放电电流提供途径, 选取 2 Ω /200 W 的电阻; DAQ 卡为最大 250 kS/s 采样率; 上位机采用工控机, 具有良好的抗干扰能力。

3.2 软件系统

软件部分主要实现数据接受、数据处理、电路控制和数据保存功能。LabVIEW 具备与数据采集卡进行数据交互的通讯模块, 可以接受测试电路传输的电流和电压数据信号。进行数据分析和处理得出电流互感器的直流电阻以及各个变化过程的磁通变化量, 并进一步计算出初始磁通、剩磁、饱和磁通

以及剩磁系数。在测试过程中, 分析电压电流变化情况, 决定是否需要状态切换, 发出控制信号, 完成对电路中继电器的开关切换。

4 测试

使用基于双向直流法的剩磁测量仪对互感器样品进行测试, 同时采用 GB16847-1997《保护用电流互感器暂态特性技术要求》中规定的直流测试法, 使用示波器观测试验波形, 对比分析两种方法测取的剩磁系数。

4.1 示波器测取剩磁系数

国标 GB16847-1997《保护用电流互感器暂态特性技术要求》中规定了直流法测取剩磁系数。严格按照按照规定步骤, 在测试前充分消磁, 采用图4的测试电路, 观测取样电阻 R_{sh} 两端电压可以得到励磁电流的变化信息, 将互感器两端电压、励磁电流与直流电阻按照积分公式(1)可以得到磁通量, 使用示波器分别观测励磁电流与磁通量, 测试曲线为图5。

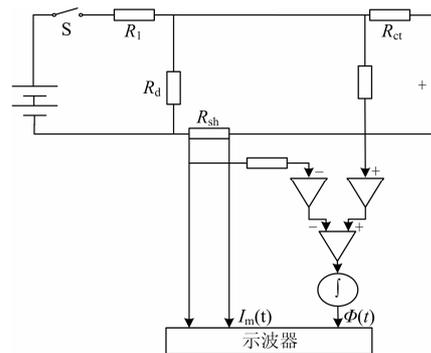


图4 国标中直流测量法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of DC method according to GB16847-1997

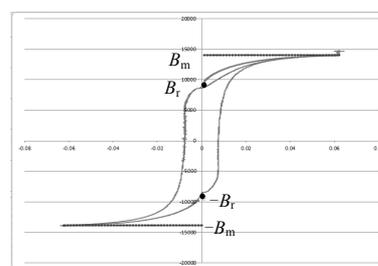


图5 电流互感器铁芯磁滞回线

Fig. 5 Hysteresis loop current transformer

由磁滞回线可知 B_m 为 14 000, B_r 为 8 100, 计算出剩磁系数 $K_{r1} = B_r / B_m = 57.80\%$ 。

4.2 剩磁测量仪测取剩磁系数

使用基于双向直流法的剩磁测量仪对互感器样

品进行测试, 重复进行五次实验, 结果如表 1 所示。

表 1 剩磁测量仪测取剩磁系数结果

Table 1 Test result of residual flux measuring instrument

	$\Delta\Phi 1 /$ Wb	$\Delta\Phi 2 /$ Wb	$\Delta\Phi 3 /$ Wb	$\Delta\Phi 4 /$ Wb	剩磁系数/ %
1	0.1414	-0.1218	-0.3189	0.1224	57.59
2	0.1409	-0.1582	-0.3452	0.1158	57.87
3	0.1399	-0.1314	-0.3470	0.1143	57.38
4	0.1414	-0.1517	-0.3386	0.1239	56.48
5	0.1392	-0.1464	-0.3571	0.1174	57.14

表中 $\Delta\Phi 1$ 是正向充电过程中磁通变化量; 是 $\Delta\Phi 2$ 正向充电后放电过程中磁通变化量; $\Delta\Phi 3$ 是反向充电过程中磁通变化量; $\Delta\Phi 4$ 是反向充电后放电过程中磁通变化量。

经过分析可知剩磁、饱和磁通、剩磁系数和初始磁通的标准差分别为 0.009、0.005、0.53 和 0.025。测取参数的离散度小, 仪器测取结果准确稳定。

5 不确定度分析

剩磁测量仪硬件包括电源系统, 控制系统, 数据采集系统。剩磁测量软件主要包括数据采集模块, 数据处理模块, 数据保存模块。本章节主要从数据采集系统和数据处理模块对剩磁测量结果的不确定度进行分析。

根据 JJF1059-1999《测量不确定度评定与表示》标准中对不确定度的定义和评定要求, 对剩磁测量仪的不确定度进行如下分析。

5.1 数据采集系统

数据采集系统主要包括电流霍尔传感器, 电压霍尔传感器。电流传感器和电压传感器具有较高的准确度($\pm 0.5\%$), 数据采集卡分辨率为 16 位, 最大 250 kS/s 采样率。在选用 $-10\sim+10\text{V}$ 测量范围内, 精度为 2.1mV, 灵敏度为 86.5 μV 。

设仪器的分辨力为 δ_x , 则其区间半宽度为 $a = \delta_x/2$ 。按均匀分布考虑, 故标准不确定度为

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{\delta_x}{2\sqrt{3}} = 0.3\delta_x \quad (5)$$

采集卡的分辨率为 250 μV , 则标准不确定度为

$$u_{\text{卡}} = 0.3 \times 250 = 75.0 \mu\text{V} \quad (6)$$

测量的计量器所保证的误差界为 $\pm a$, 其标准不确定度为

$$u_x = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

采用标准不确定度的相对标准差表示自由度。计算公式为

$$v = 1/2\left(\frac{\sigma_u}{u}\right)^2 \quad (8)$$

测取的电压值受电压传感器与采集卡分辨率影响, 需要将两部分不确定度合成。实际电压与被测电压比值为 2.1, 当用于处理数据时, 需要将所测电压值转换为实际电压值, 这时采集卡所测电压的不确定度为

$$u_{\text{卡}U} = 75.0 \times 2.1 = 157.5 \mu\text{V} \quad (9)$$

电压传感器测取的电压值不确定度为

$$u_{\text{HU}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \quad (10)$$

则电压值的不确定度为

$$u_U = \sqrt{u_{\text{卡}U}^2 + u_{\text{HU}}^2} = 0.0030 \quad (11)$$

电压值数据准确稳定, 考虑 10% 的不可靠性, 自由度为

$$v_U = \frac{1}{2 \times 0.1^2} = 50 \quad (12)$$

测取的电流值受电流传感器与采集卡分辨率影响, 需要将两部分不确定度合成。实际电流与被测电压比值为 0.25, 当用于处理数据时, 需要将所测电压值转换为实际电流值, 这时采集卡所测电流的不确定度为

$$u_{\text{卡}I} = 75.0 \times 0.25 = 18.75 \mu\text{A} \quad (13)$$

电流传感器测取的电压值不确定度为

$$u_{\text{HI}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \quad (14)$$

则电流值的不确定度为

$$u_I = \sqrt{u_{\text{卡}I}^2 + u_{\text{HI}}^2} = 0.0029 \quad (15)$$

电流值数据准确稳定, 考虑 10% 的不可靠性, 自由度为

$$v_I = \frac{1}{2 \times 0.1^2} = 50 \quad (16)$$

5.2 剩磁测量软件

软件部分主要从计算直流电阻与计算磁通的过程来分析不确定度。计算直流电阻部分包括计算电流的平均值和电压的平均值, 考虑采用 A 类评定。磁通运算与 Labview 中梯形积分方法有关, 根据公式分析不确定度。

在 Labview 软件的积分计算中, 采用梯形计算方法, 具体公式为

$$\begin{cases} Y_i = \frac{dt}{2} \sum_j^i (x_j + x_{j-1}) \\ i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \end{cases} \quad (17)$$

式中: n 表示采集的数据点数; dt 表示采样间隔取 $1/n$; Y_i 表示在第 i 个数据点时的积分值 x_j 表示在第 i 个数据点时时积分量; 当 $j=0$ 即初始时刻 $x_{-1}=0$ 。

简化公式后的积分值为

$$Y = \frac{1}{2n} \left(\sum_{j=0}^{n-2} 2x_j + x_{n-1} \right) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j - \frac{x_{n-1}}{2n} \quad (18)$$

由式(18)可以看出积分运算相当于对积分量进行累加运算。在实际计算中取 $n=20000$, 并且 $x_{n-1} < 0.0001$ 所以公式可以简化为

$$Y = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} (U_j - R_{CT} \times I_j) \quad (19)$$

磁通量的不确定度需由电压、电流不确定度合成, 合成不确定度的公式为

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} u_i u_j} \quad (20)$$

由于各分量相互独立, 根据式(1), 得到磁通量的不确定度为

$$u_\phi = \sqrt{(u_U)^2 + (u_I)^2} = 0.0049 \quad (21)$$

正向充电过程、正向放电过程、反向充电过程以及反向放电过程中的磁通变化量的计算都采用公式(1)计算, 这四个磁通值的不确定度相同 $u_{\phi_1} = u_{\phi_2} = u_{\phi_3} = u_{\phi_4} = 0.0049$ 。只有一次测量结果采用最大误差法, 自由度为 $\nu_{\phi_1} = \nu_{\phi_2} = \nu_{\phi_3} = \nu_{\phi_4} = 0.8$ 。

5.3 测量不确定度的合成

根据式(2)~式(4)可知饱和磁通, 剩磁, 剩磁系数的不确定度分量包括 u_{ϕ_2} 、 u_{ϕ_3} 。再联合前文提到的电压不确定度分量 u_U , 电流不确定度分量 u_I , 则可以得到了完整的不确定度分量。

表 2 饱和磁通、剩磁、剩磁系数不确定度和自由度表

Table 2 The uncertainty and freedom degree of saturation flux, residual flux and residual flux factor

不确定度			自由度	
符号	来源	数值	符号	数值
u_U	霍尔传感器	0.0030	ν_U	50
u_I	霍尔传感器	0.0029	ν_I	50
u_{ϕ_2}	数据运算	0.0049	u_{ϕ_2}	0.8
u_{ϕ_3}	数据运算	0.0049	u_{ϕ_3}	08

饱和磁通, 剩磁合成不确定度为

$$u_{\phi_r} = u_{\phi_s} = \sqrt{u_U^2 + u_I^2 + u_{\phi_2}^2 + u_{\phi_3}^2} = 0.0086 \quad (22)$$

剩磁系数的合成不确定度为

$$u_{K_r} = \sqrt{u_{\phi_r}^2 + u_{\phi_s}^2} = 0.0119 \quad (23)$$

对于高精度的测量系统, 除了提供测量数据的合成不确定度以外还需要给出扩展不确定度。扩展

不确定度使测量结果区间包含被测量真值的置信概率较大, 即给出一个测量结果的区间, 使被测的值大部分位于其中。

饱和磁通, 剩磁, 剩磁系数的有效自由度为

$$\nu_{eff\phi_0} = \frac{u_{\phi_0}^4}{\frac{u_U^4}{\nu_U} + \frac{u_I^4}{\nu_I} + \frac{u_{\phi_2}^4}{\nu_{\phi_2}} + \frac{u_{\phi_3}^4}{\nu_{\phi_3}}} \quad (24)$$

代入数值计算结果可以认为是 ∞ , 根据《JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示》中自由度和置信概率表, 可知包含因子 $k=3$ 。剩磁测量仪饱和磁通, 剩磁, 剩磁系数扩展不确定度为 $U_k=3 \times 0.0086=0.0258$, 置信水平 $P=99\%$ 。剩磁、饱和磁通与剩磁系数的扩展不确定度较小, 可知研制的剩磁测量仪可以稳定的测取相关参数

6 总结

由于铁磁材料的磁滞特性, 电磁式电流互感器在短路故障后形成大量的剩磁, 剩磁在正常运行时不容易消除, 将严重影响互感器的暂态特性和稳态特性。剩磁系数作为互感器一项重要参数, 在互感器设计、生产、出厂检验中必不可少。针对原有的测试方法的不足, 本文提出采用双向直流法测取剩磁系数, 分别测取正向充电, 放电, 反向充电过程中的电流与电压, 并计算得出磁通变化量, 对这三个磁通变化量进行相关运算, 可以得到剩磁系数。并根据 GB16847-1997《保护用电流互感器暂态特性技术要求》中规定的直流测试法, 使用示波器观测试验波形, 验证剩磁测量仪测量结果的准确性。将剩磁测量仪从数据采集系统与测量软件两部分来分析不确定度, 给出剩磁、饱和磁通、剩磁系数的不确定度, 经过分析得知研制的剩磁测量仪可以稳定的测取剩磁系数。

参考文献

- [1] 唐毅, 江波, 李红斌, 等. 数字电能计量系统检定方法综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 372-377.
TANG Yi, JIANG Bo, LI Hongbin, et al. Survey on the verification methods for digital electrical energy metering [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 372-377.
- [2] 韦家旗, 唐菁. 电磁式电流互感器运行状态评价应用研究[J]. 电测与仪表, 2010, 47(1): 51-54.
WEI Jiaqi, TANG Qing. Research on applicable state assessment for electro-magnetic current transformers[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(1): 51-54.

- [3] 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.
- [4] 武一, 李奎, 王尧. 磁调制式剩余电流传感器的动态励磁过程分析与仿真[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 244-252.
WU Yi, LI Kui, WANG Yao. Analysis and simulation of dynamic process of excitation current of magnetic modulation residual current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 244-252.
- [5] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁和剩磁同时作用下保护用电流互感器的暂态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 107-111.
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Research on the transient characteristics of the protective CTS with co-impacts of DC bias and remnant flux[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 107-111.
- [6] 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 on error of protective type CT due to residual magnetism[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(1): 26-28.
- [7] 胡家为, 葛荣尚, 尹明铨, 等. CT过饱和特性及对过流速断保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 133-138.
HU Jiawei, GE Rongshang, YIN Mingxuan, et al. Characteristics of CT over-saturation and its influence on over-current/instantaneous trip protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 133-138.
- [8] YACAMINI R, ABU-NASSER A. Numerical calculation of inrush current in single-phase transformers[J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, 1981, 128(6): 327-334.
- [9] TAYLOR D I, FISCHER N, LAW J D, et al. Using labview to measure transformer residual flux for inrush current reduction[C] // Proceeding of North American Power Symposium, IEEE, 2009: 1-6.
- [10] CAVALLERA D, OIRING V, COULOMB J L, et al. A new method to evaluate residual flux thanks to leakage flux application to a transformer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2).
- [11] 来磊. 保护用电流互感器励磁特性的直流法测量[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1528-1530.
LAI Lei. DC measurement of protection current transformer excitation characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1528-1530.
- [12] 田文革. 护用电流互感器暂态特性的直接法试验[J]. 变压器, 2005, 42(2): 1-3.
TIAN Wenge. Direct method for transient characteristic test of protective current transformer[J]. Transformer, 2005, 42(2): 1-3.
- [13] 王茂松, 田文革, 杜建嵩, 等. 测定保护用电流互感器铁芯励磁特性的直流法[J]. 变压器, 2005, 42(4): 1-3.
WANG Maosong, TIAN Wenge, DU Jiansong, et al. DC method to measure core magnetizing characteristic in protective current transformer[J]. Transformer, 2005, 42(4): 1-3.
- [14] 卢斌先, 王泽忠, 李云伟, 等. 金属屏蔽盒强瞬态电场屏蔽效能实验[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 7-12.
LU Binxian, WANG Zezhong, LI Yunwei, et al. Experimental evaluation of shielding effectiveness against high electric pulse for metal enclosures with an aperture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 7-12.

收稿日期: 2014-10-10; 修回日期: 2014-12-05

作者简介:

闫艳霞(1980-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为传感器与精密测量; E-mail: zzyanzi802@163.com

崔建华(1981-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为无线传感器网络和信息处理。

(编辑 张爱琴)