

· 电网技术 ·

电流互感器铁心剩磁测量方法研究

杨志强¹, 陈卫²

(1. 华中科技大学中欧清洁与可再生能源学院, 湖北 武汉 430074;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要:剩磁是影响电流互感器传变特性的重要因素,剩磁测量对于电流互感器的应用有着重要的意义。为了有效地测量电流互感器铁心剩磁及相关系数,提出了一种利用交流电压源进行剩磁测量的方法。剩磁测量过程使用交流对电流互感器进行充磁,使其达到深度饱和状态。记录电流互感器感应电压,绘制铁心磁通变化曲线,计算电流互感器剩磁及剩磁系数。试验结果表明测得电流互感器剩磁及剩磁系数与理论分析一致,该方法可以准确地测量电流互感器剩磁。

关键词:电流互感器;剩磁;剩磁系数;饱和

中图分类号:TM452

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)03-0038-05

0 引言

电流互感器是电力系统的重要设备之一,可以准确有效地传变电网高压侧电气信息。电流互感器的正常运行,对于电力系统中的暂态保护设备、电能计量设备、运行监控设备均有重要的意义^[1-3]。电力系统正常稳定运行时,电流互感器铁心内不会产生剩磁。但是由于电流互感器铁心的磁性材料具有磁滞特性,当短路故障发生后,短路电流会在铁心内形成大量的剩磁^[4-8]。电流互感器铁心剩磁会提高其正常工作磁通水平,导致其铁心产生饱和现象,引起二次电流的畸变,降低电能计量的精确等级和继电保护动作的可靠性。因此对于电流互感器剩磁的研究是必不可少的工作,铁心剩磁及剩磁相关系数的测量具有重要的意义。

目前对于电流互感器铁心剩磁及剩磁系数测量已有大量的研究。文献[9]利用传统的直流法对电流互感器的剩磁系数进行测量,并且经过补偿系统测量电流互感器两端的感应电压,由于测量原理的局限无法计算电流互感器初始状态的剩磁。文献[10]改进了传统的直流法的测量原理,采用正向激励与反向激励结合的方法对于剩磁进行测量,但是其测量系统需要硬件系统与软件系统的精确配合,大大提高了剩磁测量的难度。文献[11]将试验电路中测量得到的暂态电流信号代入已建立的剩磁-电流关系式中,得到电力变压器铁心中的剩磁,但是由于试验原理的局限性,无法有效地测量电流互感器的剩磁系数。

基于电流互感器饱和铁心磁通变化规律的分析,本文提出一种利用交流电路对电流互感器进行深度饱和充磁的方法。根据此方法设计并进行剩磁测量试验,利用试验得到的磁通变化曲线计算铁心剩磁与剩磁系数,为电流互感器的饱和特性研究提供了有力的支持。

1 剩磁测量方法原理分析

电流互感器铁心剩磁会影响其工作时的传变特性。如图1所示, Φ_r 为铁心剩磁,当铁心存在剩磁时,电流互感器的工作磁通水平会提高,导致其磁滞回线的重心偏离坐标系原点^[12-14]。电流互感器磁滞回线的重心偏离程度与剩磁的大小密切相关。将剩磁作用时的磁滞回线按照时间坐标轴展开,可以得到电流互感器磁通变化时域图。当电流互感器处于深度稳态饱和状态且铁心内无剩磁时,其磁通变化曲线趋向于一种梯形对称形状。但是由于剩磁的存在,铁心磁通会提升或下降一定的水平,呈现出如图1所示的不对称形状。因此利用这种磁通变化特性可以测量电流互感器的剩磁及其剩磁相关系数。

本文利用交流电源对电流互感器进行深度充磁以测量其铁心内的剩磁及剩磁系数。测量电流互感器磁通时,利用数字示波器记录电流互感器两端的电压,利用数学积分的方法绘制出电流互感器铁心磁通变化的时域图,根据其磁通变化可计算出电流互感器剩磁、饱和磁通、剩磁系数。

根据电流互感器铁心磁通变化规律得知,电流互感器只在深度饱和状态时,其铁心磁通图才会趋于梯形状^[15-17]。当电流互感器饱和程度下降时,其铁心磁通会缓慢趋向于正弦状。当铁心磁通变化

收稿日期:2017-12-27;修回日期:2018-02-23

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902901)

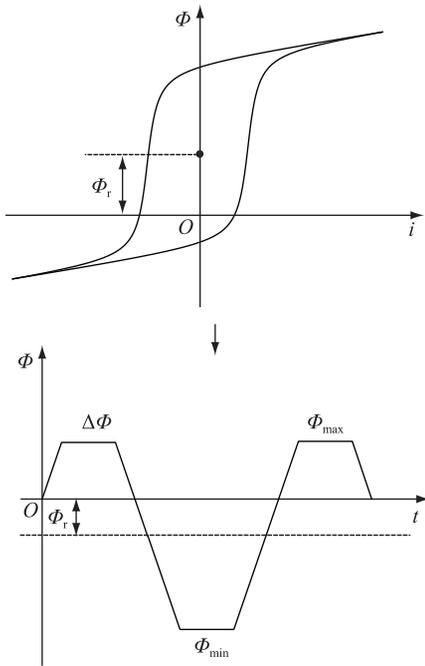


图1 电流互感器铁心磁通变化
Fig.1 Diagram of flux curve of current transformer's core

形状趋于正弦状时,便无法保证其最大磁通值达到饱和磁通,因此便无法测量其铁心剩磁及剩磁系数。

电流互感器铁心剩磁及剩磁系数测量过程可如图1来描述,其中 $\Delta\Phi$ 为电流互感器通入电流时第一个半波磁通变化量, Φ_r 为电流互感器为通入电流前的剩磁, Φ_{\max} 为通入电流第一个半波后磁通的最大值, Φ_{\min} 为通入电流第一个半波后磁通的最小值。假设电流互感器通入电流前,其铁心内存在剩磁。施加交流后第一个半波期间,电流互感器由于交流充磁作用,其铁心磁通达到深度饱和状态,在此期间铁心磁通的变化量为 $\Delta\Phi$ 。交流充磁的第一个半波期过后,电流互感器一直保持在深度饱和的状态,其铁心磁通的变化轨迹趋于梯形状,此时可以得到磁通的最大值 Φ_{\max} 和最小值 Φ_{\min} 。因此利用时域下的磁通变化曲线可以得到处于深度饱和状态的电流互感器的饱和磁通为:

$$\Phi_s = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) \quad (1)$$

电流互感器充磁前,其铁心内的剩磁为:

$$\Phi_r = \Phi_s - |\Delta\Phi| = \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{2} - |\Delta\Phi| \quad (2)$$

如式(2)所示,由于剩磁方向的不确定性,因此对于 $\Delta\Phi$ 作绝对值处理可以简化剩磁计算过程,保持高效性。

因此电流互感器的剩磁系数为:

$$K_r = \frac{\Phi_r}{\Phi_s} = 1 - \frac{2|\Delta\Phi|}{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}} \quad (3)$$

可见利用交流电源对电流互感器进行深度充磁的过程,可以得到其铁心磁通变化曲线,可以准确地计算出电流互感器铁心内的剩磁及剩磁系数。

2 剩磁测量试验设计

为了验证交流深度充磁法测量电流互感器铁心剩磁及相关系数的有效性,试验电路如图2所示。本次试验利用的交流电压源的工作范围为0~800V,因此可以保证电流互感器达到深度饱和。S为安全隔离开关,用以保证试验操作员及试验电路的安全。本次试验使用的电流互感器的变比为6:1,二次侧额定电流为1A,其额定负荷为15V·A。Z为电流互感器二次侧阻抗,为了提高试验的准确性,实际操作中均是纯电阻代替,进行试验时可利用数字式示波器记录电流互感器两端的感应电压。BRK为可控断路器,用以控制交流充磁时铁心通过电流的起始角度与结束角度。断路器的动作受合闸角控制器的控制,为了提高试验数据的准确性,需要利用断路器精确控制充磁电流的起始角度与结束角度,并进行多次试验测量。

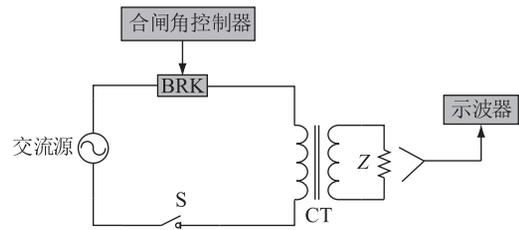


图2 剩磁及相关系数试验电路
Fig.2 Diagram of circuit of measuring remanence and its coefficient

为了保证试验的正确性,需要进行多组试验,不同组试验的主要变量为电流互感器二次侧电阻及充磁电流大小,其中充磁交流的大小由可调交流电压源控制^[18]。进行试验前断路器的初始状态应为断开状态,由于进行剩磁测量时需要交流充磁,因此断路器的一次完整动作状态依次为关闭状态、断开状态。因此本次试验具体的剩磁测量过程为:

(1) 通过合闸角控制器设定充磁电流的起始角度、结束角度及持续时间,设定交流电压源输入电压大小,设定电流互感器二次侧电阻大小;

(2) 通过合闸角控制器控制断路器连续进行4次深度充磁操作,利用示波器采集电流互感器两端感应电压数值;

(3) 利用示波器采集的电压数据描绘电流互感器铁心磁通变化曲线,计算其铁心剩磁及剩磁系数。

本次剩磁测量试验需要进行多组试验,为了提

高便捷性,合闸角控制器设定充磁电流的起始角度等变量保持不变。不同试验之间的变量仅为交流电压源输入电压及电流互感器二次侧电阻。

3 数据分析

进行电流互感器铁心剩磁测量过程中,利用数字式示波器可以采样记录电流互感器两端的电压值。根据电磁感应定律,电流互感器铁心感应电压的积分值便是其铁心磁通变化值。本次试验所使用的电流互感器的二次侧漏抗与绕组电阻远小于二次侧负荷电阻,因此可以利用示波器采样电压进行数值积分,得到电流互感器铁心磁通变化曲线。

本次剩磁测量试验总共进行 4 组试验,每组试验改变的变量为充磁电流及二次侧电阻。4 组试验改变的一次侧电流与二次电阻分别为: $I_p=24\text{ A}, Z=20\ \Omega$; $I_p=25\text{ A}, Z=3.75\ \Omega$; $I_p=50\text{ A}, Z=10\ \Omega$; $I_p=96\text{ A}, Z=5\ \Omega$ 。本次电流互感器铁心剩磁测量试验的电压与磁通变化曲线如图 3 所示,剩磁计算结果如表 1 所示。由示波器记录的电流互感器电压波形得知试验设定的充磁交流的起始角度为 180° ,结束角度为 0° ,充磁总持续时间为 60 ms。

测量电流互感器铁心剩磁时,第一组试验设定通入电流互感器的一次侧电流为 24 A,为额定电流的 4 倍,并且其二次侧电阻为 $20\ \Omega$ 。此时电流互感器二次侧波形畸变为尖型波,表明交流充磁使电流互感器达到了深度饱和的状态,达到了试验设计的要求。电压录波图表明在 8.3 ms 时电流互感器开始充磁,总充磁时间为 3 个周波即 60 ms。在 8.3~18.3 ms 期间,由于铁心剩磁提高了电流互感器的饱和速度,因此电流互感器二次侧电压明显小于 18.8 ms 以后的电压。可以得知利用交流深度充磁的第一个半波期间,剩磁与充磁的累加使电流互感器达到深度饱和状态,铁心磁通变化曲线由于剩磁的影响偏移了 x 坐标轴。在 18.3 ms 以后,电流互感器在交流的作用下保持在饱和状态,其磁通变化的形状近似为梯形,因此在第一个半波后,利用计算得到的磁通最大值与最小值可以得到铁心的饱和磁通值。最后根据饱和磁通与剩磁可以得到电流互感器的剩磁系数。由表 1 得知测量得到饱和磁通 $\Phi_s=0.000\ 298\text{ Wb}$,剩磁 $\Phi_r=0.000\ 124\text{ Wb}$,剩磁系数为 $K_r=0.42$,并且 4 组数据间的随机误差较小,体现出试验方法的合理性。

第二组剩磁测量试验设定充磁电流为 25 A,但将电流互感器二次电阻减少为 $3.75\ \Omega$,因此相同电流水平下,电流互感器需要的感应电压降低,铁心

磁通水平降低。由图 3(b)所示电压变化曲线得知,虽然电压第一个周波为尖形波,但是经过 10 ms 以后电压波形逐渐变为正弦波。因此本组试验进行交流充磁时,电流互感器未达到深度饱和阶段,此时经电压积分得到的磁通变化曲线也逐渐趋于正弦。由表 1 得知本组试验计算的饱和磁通值为 $0.000\ 129\text{ Wb}$,电流互感器铁心磁通未达到饱和磁通。因此本组试验无法准确测量电流互感器剩磁及剩磁系数。

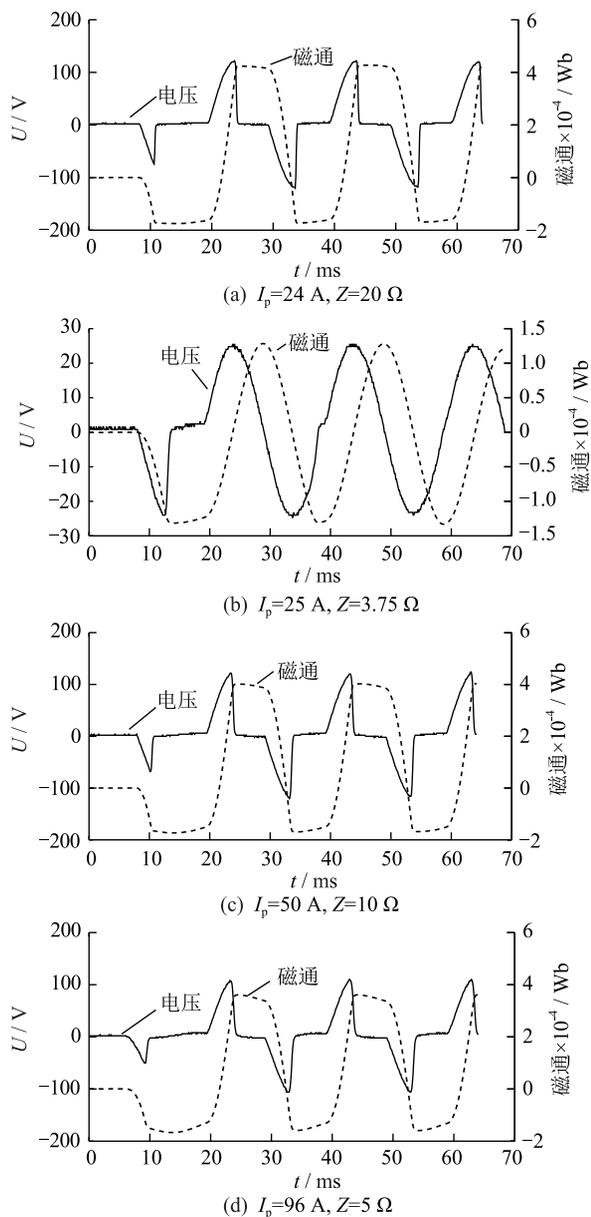


图 3 电流互感器电压与磁通变化

Fig.3 Diagram of voltage and flux of current transformer

为了提高电流互感器的饱和程度,第三组、第四组剩磁测量试验的充磁电流与二次电阻均有变化。由图 3(c)(d)所示电压波形得知相比于图 3(b),电流互感器饱和和深度较为加强,电流互感器电

压波形畸变严重,可以较为精确地测量剩磁及剩磁系数。但是由表 1 得知两组测量得到的饱和磁通为 0.000 285 Wb,0.000 26 Wb,均小于第一组测量的

饱和磁通,因此第三组、第四组充磁时电流互感器饱和程度仍然略弱于第一组,测量得到的剩磁及剩磁系数也略小于第一组的结果。

表 1 剩磁测量试验结果

Tab.1 Data of measuring residual flux

试验编号	Φ_{\max}/Wb	Φ_{\min}/Wb	Φ_s/Wb	$\Delta\Phi/\text{Wb}$	Φ_r/Wb	K_r
1	0.000 412	-0.000 182	0.000 297	-0.000 183	0.000 114	0.38
	0.000 424	-0.000 172	0.000 298	-0.000 174	0.000 124	0.42
	0.000 424	-0.000 172	0.000 298	-0.000 174	0.000 124	0.42
	0.000 424	-0.000 172	0.000 298	-0.000 175	0.000 123	0.41
2	0.000 121	-0.000 131	0.000 126	-0.000 131	-0.000 005	-0.04
	0.000 126	-0.000 131	0.000 129	-0.000 131	-0.000 003	-0.02
	0.000 128	-0.000 130	0.000 129	-0.000 131	-0.000 002	-0.02
	0.000 125	-0.000 131	0.000 128	-0.000 132	-0.000 004	-0.03
3	0.000 397	-0.000 171	0.000 284	-0.000 175	0.000 109	0.38
	0.000 401	-0.000 169	0.000 285	-0.000 173	0.000 112	0.39
	0.000 401	-0.000 169	0.000 285	-0.000 173	0.000 112	0.39
	0.000 401	-0.000 167	0.000 284	-0.000 174	0.000 110	0.39
4	0.000 361	-0.000 158	0.000 260	-0.000 166	0.000 094	0.36
	0.000 361	-0.000 158	0.000 260	-0.000 166	0.000 094	0.36
	0.000 361	-0.000 158	0.000 260	-0.000 167	0.000 093	0.36
	0.000 361	-0.000 158	0.000 260	-0.000 166	0.000 094	0.36

4 结语

利用交流电源进行深度充磁的方法,可以得到电流互感器深度饱和和铁心磁通变化曲线,并且可以计算电流互感器铁心剩磁及剩磁系数。试验测得电流互感器铁心的剩磁为 0.000 124 Wb,剩磁系数为 0.42,试验结果与理论分析相符,证明试验方法的正确性;多组试验结果证明利用交流充磁法测量电流互感器铁心剩磁及剩磁系数的关键是使电流互感器达到深度饱和和状态,因此提高电流互感器的二次电阻可以提高试验测量的准确性及可操作性。本文提出的铁心剩磁测量新方法原理清晰,操作简单,可以准确地测量电流互感器相关参数,为电流互感器的实际应用及饱和特性研究提供了有利的支持。

参考文献:

[1] GB 16847—1997 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S]. 北京:国家质量技术监督局,1997.
GB 16847—1997 Requirements for protective current transformers for transient performance[S]. Beijing: State Quality and Technical Supervision Bureau, 1997.

[2] DL/T 866—2004 电流互感器和电压互感器选择及计算导则[S]. 北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2004.
DL/T 866—2004 The guide for selection and calculation of current transformers and voltage transformers [S]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2004.

[3] 隆万军. 暂态保护互感器暂态绕组励磁特性及剩磁测试[J]. 高电压技术,2000,26(3):57-59.
LONG WanJun. Investigation of the exciting performance test of the secondary winding of current transformer for transient protection[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3): 57-59.

[4] 周雪青,郝晓光,张岩坡,等. 基于分段拟合算法的电流互感器误差研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(03):139-143.
ZHOU Xueqing, HAO Xiaoguang, ZHANG Yanpo, et al. Research on the error of current transformer based on subsection fitting algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2017. 45(03): 139-143.

[5] 郑涛,马玉龙,黄婷,等. 保护用电流互感器铁心剩磁衰减规律分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):126-131.
ZHENG Tao, MA Yulong, HUANG Ting, et al. Attenuation law analysis of core residual magnetism for protective current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 126-131.

[6] 尹项根,张哲,王友怀,等. 变压器间及其与电流互感器暂态交互作用分析和保护对策[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(23):1-9.
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, WANG Youhuai, et al. Multiple transformers and CTs interactive effect and its impact on the protective relay [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 1-9.

[7] 柳焕章,王兴国,周泽昕,等. 一种利用电流突变量采样值的电流互感器饱和识别方法[J]. 电网技术,2016,40(11):3574-3579.
LIU Huanzhang, WANG Xingguo, ZHOU Zexin, et al. A CT

- saturation identification method using sampled current fault component data[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3574-3579.
- [8] 郭一飞,高厚磊. 直流偏磁对电流互感器暂态传变特性的影响[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):126-131,144.
GUO Yifei, GAO Houlei. Effect of DC bias on transient transferring characteristics of current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 126-131,144.
- [9] 王茂松,田文革,杜建嵩,等. 测定保护用电流互感器铁心励磁特性的直流法[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.
- [10] 阎艳霞,崔建华. 基于双向直流法的电磁式电流互感器剩磁测量仪研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(14): 137-142.
YAN Yanxia, CUI Jianhua. Residual flux measuring instrument for electromagnetic current transformer based on bidirectional DC method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 137-142.
- [11] 戈文祺,汪友华,陈学广,等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报,2015,30(16):10-16.
GE Wenqi, WANG Youhuan, CHEN Xueguang, et al. Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 10-16.
- [12] 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 protection current transformer excitation characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1528-1530.
- [13] 李军,胥昌龙,曹宣艳,等. 电流互感器饱和和铁心的剩磁在额定工况下的状态分析[J]. 电测与仪表,2014,51(2): 14-18.
LI Jun, XU Changlong, CAO Xuanyan, et al. State analysis on remanence of CT saturated core under rated condition[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(2): 14-18.
- [14] LI Jiangtao, LI Zheng, LI Tao, et al. Novel remanence detection for power transformers based on modified J-A model[C]// TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference, 2015: 1-3.
- [15] HONG Y Y, WEI D W. Compensation of distorted secondary current caused by saturation and remanence in a current transformer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 47-54.
- [16] FRANCISOC D L, ASHKAN F, SAEED J, et al. Elimination of residual flux in transformers by the application of an alternating polarity DC voltage source[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1727-1734.
- [17] 陈刚,王忠东,白浩,等. 电流互感器剩磁相关参数测量的直流法[J]. 高电压技术,2014,40(8):2416-2421.
CHEN Gang, WANG Zhongdong, BAI Hao, et al. DC method for measuring parameters of remanence of current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2416-2421.
- [18] 牛帅杰,赵莉华,陈凌,等. 基于时间-电流曲线的变压器剩磁检测方法研究[J]. 电测与仪表,2017,54(7):64-68,80.
NIU Shuaijie, ZHAO Lihua, CHEN Ling, et al. Study on transformer residual flux detection method based on the time-current curve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7): 64-68,80.

作者简介:



杨志强

杨志强(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail: yangzhiqiang17@foxmail.com);

陈卫(1970—),男,博士,副教授,从事电力系统继电保护领域研究工作(E-mail: 318355167@qq.com)。

Research on the Method of Measuring Residual Flux in the Core of Current Transformer

YANG Zhiqiang¹, CHEN Wei²

(1. China-EU Institute for Clean and Renewable Energy, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic

Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The residual flux is an important factor which affects the transfer characteristic of current transformer. The measuring residual flux is of important significance to the application of current transformer. In order to effectively measure residual flux and its coefficient, a new method to measure residual flux with alternating current voltage source is proposed. In the process of measuring residual flux, the current transformer is deeply magnetized by applying alternating current. By recording the induction voltage of current transformer and drawing the curve of core flux, the residual flux and its coefficient are calculated. The experimental results show that the measured residual flux and its coefficient is consistent with theoretical analysis. Besides, the proposed method can accurately measure residual flux of current transformer.

Key words: current transformer; residual flux; remanence coefficient; saturation

(编辑 钱悦)