

外部恒定磁场对电流互感器传变特性影响分析

刘 钢¹,付志红¹,侯兴哲²,郑 可²,欧习洋²

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

2. 重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401123)

摘要: 通过分析电流互感器(TA)与永磁铁的相对位置,推导了外部恒定磁场对TA传变特性影响的定量关系式,并得出了以下结论:外部恒定磁场对TA的影响在有恒定交链磁通绕组处与直流偏磁相似,随着外部磁感应强度增加,TA传变误差增大,同时在输出中产生大量谐波,严重影响电能计量的结果。

关键词: 电流互感器;永磁铁;外部恒定磁场;传变特性

中图分类号: TM 93

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.018

0 引言

电磁式电流互感器(TA)大量应用在电力系统的继电保护和电能计量中^[1-2]。外部磁场对TA的传变性能会有一定影响,当其达到某种强度时将影响继电保护可靠性和电能计量精度。实际发现,当外部磁场较强时,通过TA影响电能表的计量精度误差可达到20%,因此,研究外部磁场对TA特性的影响具有重要理论意义和实用价值。

现阶段,TA周围的载流体产生的磁场对互感器性能的影响已有研究报道^[3]。实际电能表运行环境可能存在强静磁场或违法窃电行为的人为强静磁场,本文关注静磁场对TA传变特性及对电能表的影响,对于电能表运行电磁环境和防窃电措施的制定具有一定指导意义。

1 TA原理简介

TA的原理与变压器相同。设初级线圈电流为 i_1 ,次级线圈感应电流为 i_2 ,初级线圈匝数为 N_1 ,次级线圈匝数为 N_2 ,则令:

$$K = N_2 / N_1 \quad (1)$$

TA的等效电路如图1所示^[4],其中 i_1' 为一次侧换算到二次侧的电流, R_e 和 L_e 为励磁阻抗, R_2 与 L_2 、 R_L 与 L_L 分别为二次绕组和负载的电阻、电感。为了维持铁芯中的磁场,存在励磁电流 i_e 。此时TA的基本输入输出关系式为:

$$i_1' = i_1 / K = i_e + i_2 \quad (2)$$

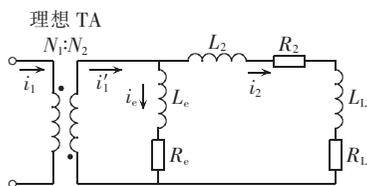


图1 TA等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of CT

TA的铁芯磁化曲线如图2所示,图中 H_m 和 B_m 分别为磁场强度 H 和磁感应强度 B 的最大值, H_c 为矫顽磁力, B_r 为剩磁^[5-7]。

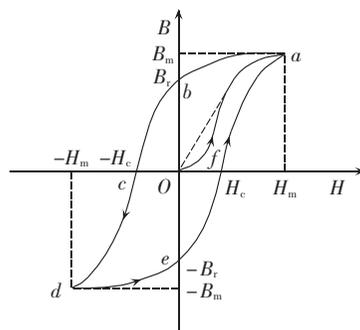


图2 TA铁芯磁化曲线

Fig.2 Magnetization curve of CT iron core

2 永磁铁与TA的相对位置关系分析

目前,电能表中使用的TA多是穿心式微型TA。TA在电能表内主板上的位置示意图见图3。

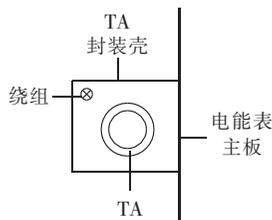
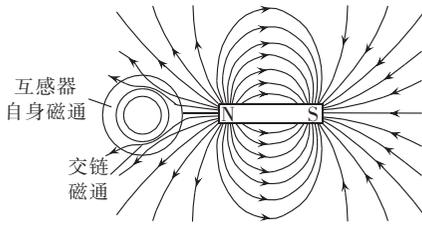


图3 TA在电能表内位置示意图

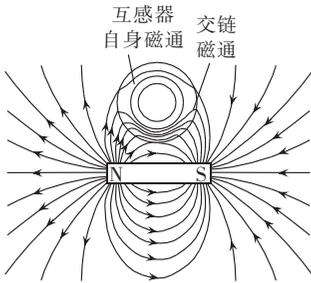
Fig.3 Location of CT in energy meter

以矩形永磁铁为干扰源,永磁铁与TA的可能相对位置及TA的磁场分布见图4。永磁铁充磁方向为其长轴方向,即长轴两端为极端。

由图4(a)可以看出,当永磁铁轴向与互感器铁芯径向重合时,永磁铁与互感器交链的磁通以永磁铁轴向对称分布,相互抵消,故该情况下永磁铁对TA无影响;当永磁铁轴向与互感器铁芯径向存在一定角度时,由于抵消不完全,对TA将产生一定影响。图4(b)情况下,永磁铁与互感器交链的磁通最大,此时



(a) 永磁铁轴向与互感器铁芯径向重合



(b) 永磁铁轴向与互感器铁芯径向呈 90°

图 4 TA 与永磁铁相对位置不同时的磁场分布
Fig.4 Magnetic field distribution for different CT positions relative to permanent magnet

对 TA 的影响也最大。U 形磁铁与该情况类似。本文以图 4(b)的位置分布作为研究对象。

3 永磁铁对 TA 传变特性的影响分析

3.1 永磁铁对 TA 影响的机理分析

永磁铁存在的情况下,会在其周围空间形成以永磁铁为中心的恒定磁场,当永磁铁靠近 TA 时,由于 TA 铁芯良好的导磁性能,恒定磁场会以 TA 铁芯为磁路,通过铁芯,在部分二次绕组中产生恒定交链磁通,见图 4;绕组距离永磁铁越远,磁感应强度越小,永磁铁在该绕组处产生的恒定交链磁通越小。

对有交链磁通部分的绕组,由于恒定交链磁通的存在,会改变该绕组处 TA 铁芯的状态。由于各绕组处恒定交链磁通的方向一定,当励磁信号形成的交流磁通与恒定交链磁通方向一致时,有交链磁通绕组处铁芯饱和程度随着交链磁通强度的不同受到不同程度的加强;当励磁信号形成的交流磁通与恒定交链磁通方向相反时,铁芯的饱和程度减弱,这使得各有交链绕组处铁芯的状态严重不均衡,进而影响励磁电流,改变 TA 的传变特性。对于某匝有恒定交链磁通的二次绕组,恒定磁通的存在相当于一次侧磁通以直流在铁芯中产生恒定磁场,其作用与一次绕组中通直流电流类似:恒定磁通和交流磁通叠加,形成铁芯的总磁通,与恒定磁通方向一致的半周铁芯饱和程度大幅增加,另外半周饱和程度减弱,使得励磁电流正负半周不对称^[8-9]。因此,对于每匝有恒定交链磁通的绕组,可以利用研究直流偏磁的方法对其进行研究,综合各绕组的情况即得外部恒定磁场对 TA 传变特性的影响情况。

3.2 永磁铁存在下 TA 的传变特性分析

设有交链磁通的绕组匝数为 n ,则二次绕组可看成 N_2-n 匝无交链磁通的绕组和 n 个有交链磁通的单匝绕组串联而成,其等效电路如图 5 所示,其中, Z_{bm} 为二次侧 N_2-n 匝无交链绕组与负载阻抗之和, $Z'_{1m}=Z'_{2m}=\dots=Z'_{nm}=Z_m$ 为二次侧 n 个有交链磁通的单匝绕组阻抗, Z_{em} 为励磁阻抗, R, L 为单匝绕组 Z 的电阻、电感部分, R_b, L_b 为 Z_b 的电阻、电感部分。下标 m 为谐波次数,由于图 5 不特指某次谐波下的电路图,故未标出 m 。

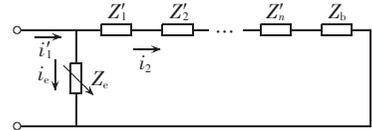


图 5 TA 等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit of CT

设输入电流 $i_1(t) = I_1 \sin \omega t$, 输出电流 $i_2(t) = \sum_m I_{2m} \sin(m\omega t + \varphi_m)$, 其中, I_1, I_{2m} 分别为输入电流、输出 m 次谐波电流幅值, φ_m 为 m 次谐波电流相位。

则由式(2)有:

$$i_c(t) = \frac{1}{K} I_1 \sin \omega t - \sum_m I_{2m} \sin(m\omega t + \varphi_m) \quad (3)$$

由以上分析可知,TA 的磁路被分为了 $n+1$ 个部分,则由磁路的基尔霍夫第二定律有^[11]:

$$N_2 i_c = \sum_{i=1}^{n+1} H_i l_i \quad (4)$$

即有:

$$i_c = \frac{1}{N_2} \sum_{k=1}^{n+1} H_k l_k = \frac{l}{N_2^2} \left[(N_2 - n) H_b + \sum_{i=1}^{n+1} H_i \right] \quad (5)$$

其中, H_i 为第 i 个有交链磁通绕组处的磁场强度, H_b 为无交链磁通绕组处磁场强度, l 为铁芯磁路平均长度。

联立式(3)、(5),即可求得 TA 的输出特性关系式。

基于 TA 铁芯的磁滞回线 Jiles-Atherton 模型^[10-14]很好地描述了 TA 铁芯中磁感应强度与磁场强度二者的关系。以 Jiles-Atherton 模型描述 TA 的铁芯状态,可表示为^[15]:

$$H = \frac{B}{B_m} H_m + \sigma \left[1 - \left(\frac{B}{B_m} \right)^2 \right] H_c \quad (6)$$

其中, $dB/dt > 0$ 时, $\sigma = 1$; $dB/dt < 0$ 时, $\sigma = -1$ 。

则有:

$$H_i = \frac{B_i}{B_m} H_m + \sigma \left[1 - \left(\frac{B_i}{B_m} \right)^2 \right] H_c \quad (7)$$

$$H_b = \frac{B_b}{B_m} H_m + \sigma \left[1 - \left(\frac{B_b}{B_m} \right)^2 \right] H_c \quad (8)$$

其中, B_i 为第 i 个有交链磁通绕组处的磁感应强度, B_b 为无交链磁通绕组处磁感应强度。

又设永磁铁在第 i 个有交链磁通绕组处产生的

平均磁感应强度为 B_{w} , 则由电磁感应定律有:

$$B_i = \frac{1}{S} \int \sum_m I_{2m} |Z_m| \sin(m\omega t + \varphi_m + \theta_m) dt + B_{w_i} = -\frac{1}{S} \sum_m \frac{I_{2m} |Z_m|}{m\omega} \cos(m\omega t + \varphi_m + \theta_m) + B_{w_i} \quad (9)$$

$$B_b = \frac{1}{(N_2 - n)S} \int \sum_m I_{2m} |Z_{1m}| \sin(m\omega t + \varphi_m + \delta_m) dt = -\frac{1}{(N_2 - n)S} \sum_m \frac{I_{2m} |Z_{1m}|}{m\omega} \cos(m\omega t + \varphi_m + \delta_m) \quad (10)$$

其中, S 为 TA 铁芯截面积; $|Z_m|$ 为绕组 i 的 m 次谐波阻抗值, 且 $|Z_m| = \sqrt{R^2 + (m\omega L)^2}$; $\theta_m = \arctan(m\omega L/R)$; $|Z_{1m}|$ 为 Z_b 的 m 次谐波阻抗值, $|Z_{1m}| = \sqrt{R_b^2 + (m\omega L_b)^2}$; $\delta_m = \arctan(m\omega L_b/R_b)$ 。

将式(7)~(10)代入式(5)并在 $B_b=0, B_i=B_{w_i}$ 处展开成泰勒级数^[15]:

$$i_e = \left[b\sigma - a \frac{I_{21} |Z_{b1}|}{\omega(N_2 - n)S} \cos(\omega t + \varphi_1 + \delta_1) + \dots \right] + \sum_{i=1}^n \left[pB_{w_i} + q\sigma - qc\sigma B_{w_i}^2 - (p - 2qcB_{w_i}\sigma) \times \frac{I_{21} |Z_1|}{\omega S} \cos(\omega t + \varphi_1 + \theta_1) + \dots \right] \quad (11)$$

$$a = (N_2 - n)H_m l / (N_2^2 B_m)$$

$$b = (N_2 - n)H_c l / N_2^2$$

$$c = 1 / B_m^2$$

$$p = H_m l / (N_2^2 B_m)$$

$$q = H_c l / N_2^2$$

联立式(3)、(11), 取基波部分进行对比分析可得:

$$b\sigma + \sum_{i=1}^n [pB_{w_i} + q\sigma - qc\sigma B_{w_i}^2] = 0 \quad (12)$$

$$-a \frac{I_{21} |Z_{b1}|}{\omega(N_2 - n)S} \cos(\omega t + \varphi_1 + \delta_1) - \left[\sum_{i=1}^n (p - 2qcB_{w_i}\sigma) \right] \frac{I_{21} |Z_1|}{\omega S} \cos(\omega t + \varphi_1 + \theta_1) = \frac{1}{K} I_1 \sin \omega t - I_{21} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (13)$$

对式(13)进行三角变换可得, TA 角差 φ_1 和比差 ε_r 分别为:

$$\varphi_1 = \arctan \frac{X \cos \delta_1 + Y \cos \theta_1}{1 + X \sin \delta_1 + Y \sin \theta_1} \quad (14)$$

$$\varepsilon_r = \{ 1 / [(1 + X \sin \delta_1 + Y \sin \theta_1)^2 + (X \cos \delta_1 + Y \cos \theta_1)^2]^{1/2} - 1 \} \times 100\% \quad (15)$$

$$X = \frac{a |Z_{b1}|}{\omega(N_2 - n)S}, \quad Y = \left[\sum_{i=1}^n (p - 2qcB_{w_i}\sigma) \right] \frac{|Z_1|}{\omega S}$$

式(14)、(15)给出了永磁铁对 TA 传变特性影响的定量关系式, 可用于研究外磁场对 TA 的影响以及 TA 抗干扰能力的评估。式(14)、(15)与文献[15]的分析结果形式相近, 由此可看出在永磁铁存在情况下的 TA 传变特性与直流偏磁具有相通性。

对于某频率输入信号, 由式(14)、(15)可知, 角

差 φ_1 随着 $\sum_{i=1}^n B_{w_i}$ 的增大而增大, 比差 ε_r 的绝对值随着 $\sum_{i=1}^n B_{w_i}$ 的增大而增大。

4 实例分析

4.1 理论计算

以表 1 所示电能表用微型 TA W2969168(HL×2) 为研究对象, 分析外部恒定磁场对 TA 传变特性的影响。TA 铁芯参数为: $B_m=0.3 \text{ T}$, $B_r=0.2 \text{ T}$, $H_m=71 \text{ A/m}$, $H_c=146 \text{ A/m}$ 。

表 1 TA 参数
Tab.1 Parameters of CT

参数	数值	参数	数值
变比	1:300	准确度等级	0.05
额定电流	1.5~6 A	额定负载	20 Ω

利用式(14)、(15)计算得到 TA 的角差与比差随 $\sum_{i=1}^n B_{w_i}$ 变化的趋势曲线见图 6。

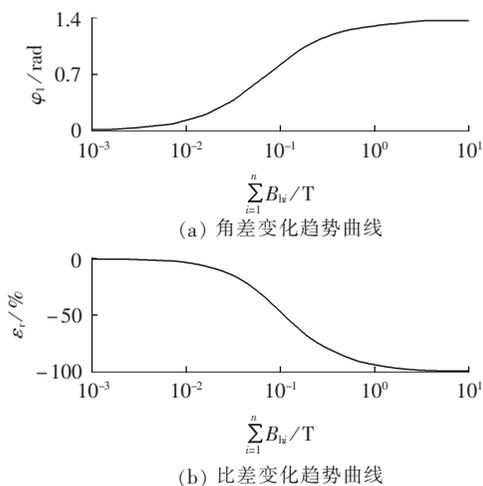


图 6 理论变化趋势曲线

Fig.6 Theoretical trend curves

4.2 实验研究

实验永磁铁选用钕铁硼 N50 型号, 参数见表 2。图 7 为轴线处外部空间的磁感应强度随距离变化的曲线。

表 2 永磁铁参数

Tab.2 Parameters of permanent magnet

参数	数值	参数	数值
剩磁 B_r	1.38~1.45 T	最大磁能积	374~406 kJ/m ³
矫顽力	≥835 kA/m	工作温度	≤80℃
内禀矫顽力	≥955 kA/m	尺寸	75 mm×55 mm×15 mm

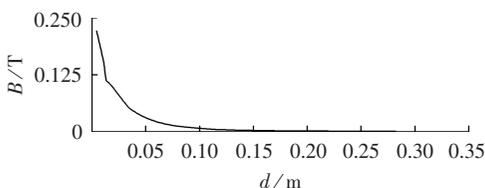


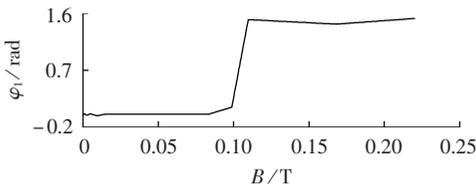
图 7 外部磁感应强度曲线

Fig.7 Curve of external magnetic induction intensity

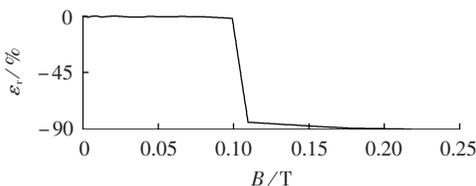
实测曲线。

设永磁铁和 TA 两者之间的距离为 d ,分析可知, $\sum_{i=1}^n B_{wi}$ 与 d 成反比。由于 $\sum_{i=1}^n B_{wi}$ 的值不可实测,实验中,以改变永磁铁和 TA 铁芯的相对距离来量化外磁场磁感应强度对 TA 的影响关系。通过电流源给 TA 一个输入,同时改变永磁铁与 TA 铁芯的相对位置,观测 TA 输出电流的变化,进而分析永磁铁产生的外部磁场对 TA 传变特性的影响。

实验采用电能表校验台输出电流,电流幅值为 2.996 A,频率 50 Hz,改变永磁铁与 TA 的相对位置,分析不同距离时,TA 输出的角差和比差的变化情况。为了明确外磁场的影响关系,利用图 7 的曲线,在结果中将距离归算为磁感应强度,见图 8。



(a) 角差变化曲线



(b) 比差变化曲线

图 8 输出变化曲线
Fig.8 Output curves

结合图 6、8 可以看出,实验结果与理论分析基本一致。当永磁铁与 TA 的相对距离小于 0.02 m(此时永磁铁外部磁感应强度大于 100 mT, $\sum_{i=1}^n B_{wi}$ 小于某值)时,TA 的传变误差较小,此时交链磁通与 TA 自身磁通的叠加未能使铁芯进入非线性区域;随着相对距离的减小, $\sum_{i=1}^n B_{wi}$ 增大,铁芯进入非线性区域,TA 传变的比差与相位误差急剧增大;继续减小相对距离, $\sum_{i=1}^n B_{wi}$ 与互感器自身磁通叠加使得铁芯进入深度饱和,传变误差维持在一个极限水平,小幅波动。

设此时电压端电压有效值为 220 V,电压相位超前电流 30°,在电流经过 TA 后,有功功率误差变化曲线见图 9。由曲线可以看出,随着外部磁场的增强,有功功率急剧减小,误差急剧增大,随着外部净磁场的增加,计量结果将小于真实值。折算到永磁铁距离对功率测量的影响,当永磁铁距离 TA 0.02 m 时,功率误差超过 0.5%,对计量精度的影响已不可忽视了;而实际电能表中的 TA 距离表壳约为 0.03 m,若采用比本文更为强力的永磁铁,在表壳处就能对电

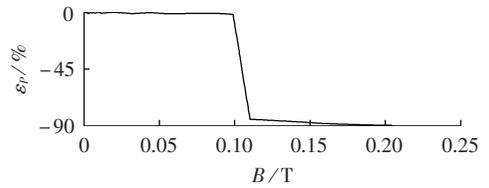


图 9 功率误差变化曲线
Fig.9 Power error curve

能计量的结果产生极大的影响。

由图 10 可以看出,外部恒定磁场存在情况下,即使仅输入基波,输出中也会产生大量的谐波,3 次谐波含量高达 16%,将直接影响计量的结果,使得谐波计量结果偏大。

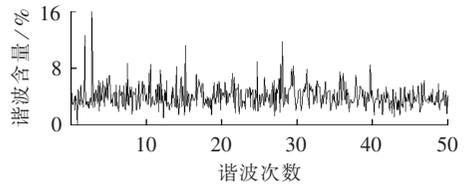


图 10 $d=0.015$ 时输出信号中各次谐波含量
Fig.10 Harmonics in output signal when $d=0.015$

5 结论

外部恒定磁场会对 TA 的传变特性产生影响,其作用机理与直流偏磁类似,使得 TA 相位误差向正的方向变大,输出幅值变小,角差向负的方向变化;随着 TA 与永磁铁相对距离的减小,交链磁通增大,TA 误差增大,当交链磁通大到一定程度时,TA 误差急剧增大,严重影响其传变特性,进而影响电能计量的结果,使得电能计量结果偏小;同时在输出中产生大量谐波,影响谐波计量结果。通过分析看出,通过外磁场影响 TA 从而实现窃电的方式理论上是存在的,在电能表的设计中应进行这方面防窃电的设计考虑。

参考文献:

[1] 陈黎来. 电流互感器对电能计量的影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1):138-141.
CHEN Lilai. Effect of CT on electric energy measurement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1):138-141.

[2] 李春来, 汤晓宇, 黄业安, 等. 计量用 TA 在直流偏磁条件下传变特性的实验与分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 143-149.
LI Chunlai, TANG Xiaoyu, HUANG Yean, et al. Measurement and analysis of transfer characteristic for metering CT with DC magnetic bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 143-149.

[3] 钟思正. 外界磁场对电流互感器工作的影响[J]. 高压电器, 2004, 40(2):148-149.
ZHONG Sizheng. Influence of the external magnetic field on the current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 148-149.

[4] 肖耀荣, 高祖锦. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳: 辽宁科学技

- 术出版社,2003:68-71.
- [5] 张粒子,武晋辉,余保东,等. 电力电流互感器铁芯磁滞回环的拟合[J]. 电力系统自动化,1998,22(3):6-8.
ZHANG Lizi,WU Jinhui,YU Baodong,et al. Fitting of the hysteresis loop of core in current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(3):6-8.
- [6] STONER E C,WOHLFARTH E P. A mechanism of magnetic hysteresis in heterogeneous alloys[J]. IEEE Transactions on magnetism,1991,27(4):3475-3518.
- [7] 李贞,李庆民,李长云,等. J-A 磁化建模理论的质疑与修正方法研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(3):124-131.
LI Zhen,LI Qingmin,LI Changyun,et al. Queries on the J-A modeling theory of the magnetization process in ferromagnets and proposed correction method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(3):124-131.
- [8] 覃文继. 电流互感器饱和与微机保护的拟合法电流测量探讨[J]. 继电器,2007,35(4):1-5.
QIN Wenji. Saturation of current transformer and fitting calculation for the current of microprocessor-based protection[J]. Relay,2007,35(4):1-5.
- [9] 孙向飞,束洪春,于继来. 电流互感器暂态饱和和对和应涌流转变的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):83-87.
SUN Xiangfei,SHU Hongchun,YU Jilai. Effect of CT transient saturation on transfer of sympathetic inrush[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):83-87.
- [10] JILES D C,ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Applied Physics,1984,55(6):2115-2120.
- [11] JILES D C,ATHERTON D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,1986,61(1-2):48-60.
- [12] ANNAKAGE U D,MCLAREN P G,DIRKS E,et al. A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000,15(1):57-61.
- [13] EMANUEL A E,ORR J A. Current harmonics measurement by means of current transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(3):1318-1325.
- [14] LIU S T,HUANG S R,CHEN Hungwei. Using TACS functions within EMTP to set up current-transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2007,22(4):2222-2227.
- [15] 李长云,李庆民,李贞,等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):127-132.
LI Changyun,LI Qingmin,LI Zhen,et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(19):127-132.
- [16] 汤蕴璆,罗应立,梁艳萍. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,2008:13-16.

作者简介:

刘 钢(1986-),男,四川广安人,硕士研究生,从事电能计量及电流互感器非线性特性方面的研究(E-mail:cqliugang@163.com);

付志红(1966-),男,重庆人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力电子、电能计量、瞬变电磁法方面的研究;

侯兴哲(1965-),男,重庆人,高级工程师,硕士,从事电能计量技术管理和技术研究。

Impact of external constant magnetic field on transfer characteristics of current transformer

LIU Gang¹,FU Zhihong¹,HOU Xingzhe²,ZHENG Ke²,OU Xiyang²

(1. State Key Laboratory of Transmission Equipment & System Security and New Technology,Chongqing University, Chongqing 400044,China;2. Chongqing Electric Power Research Institute,Chongqing 401123,China)

Abstract: By analyzing the position of CT(Current Transformer) relative to permanent magnet,the quantitative relationship between the external constant magnetic field and its impact on the transfer characteristics of CT is deduced and the conclusions are obtained;the impact of external constant magnetic field on the transfer characteristics of CT is similar to that of DC bias at the windings with constant linkage flux,the transfer error of CT increases along with the increase of external magnetic induction intensity,and there is a great deal of harmonics in its output signal,seriously affecting the measurements.

Key words: current transformers; permanent magnet; external constant magnetic field; transfer characteristics