

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190173

直流分量下常规 CT 和抗直流 CT 计量性能对比研究

李敏¹, 靳绍平¹, 宋宏天², 肖霞², 杨爱超¹, 胡琛¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 交直流配网的发展及整流型负荷的不断增加, 使得交流电网中往往存在直流分量。直流分量致使常规单铁芯 CT 超差严重。基于直流分量下常规单铁芯 CT 失准机理的研究, 对一种基于高磁导率铁芯与低磁导率铁芯的复合铁芯结构抗直流 CT, 借助电路及磁路关系, 建立抗直流 CT 的误差传变模型, 对其计量性能进行研究。基于比例直流叠加法进行计量性能试验, 结果表明双铁芯抗直流 CT 工频交流测量性能与常规单铁芯 CT 相当, 精度满足 0.2 级。直流分量占比小于 40% 的交流电流测量性能明显优于常规单铁芯 CT, 比差小于 3%, 角差小于 360', 具备良好的抗直流性能。

关键词: 直流分量; 常规单铁芯 CT; 抗直流 CT; 计量性能; 交直流配网

Research on difference of conventional CT & anti-DC CT

LI Min¹, JIN Shaoping¹, SONG Hongtian², XIAO Xia², YANG Aichao¹, HU Chen¹

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 2. College of Electrical and

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

Abstract: With the development of AC and DC distribution networks and the increasing number of rectifying loads, this paper presents DC components in the AC grid, which causes the error characteristic of conventional Single-core Current Transformer (SCT) to be extremely poor. Based on the study of SCT misalignment mechanism with DC component, a composite dual-core anti-DC Current Transformer (DCT) comprised of high magnetic permeability core and low permeability core is designed to resist DC component. By the analysis of equivalent circuit and magnetic circuit, its error characteristic and measurement performance are studied. The measurement performance test based on proportional DC superposition method shows that the AC measurement performance of DCT is similar to that of SCT, and its accuracy meets the class of 0.2. For AC current with DC component less than 40%, the measurement performance of DCT is obviously better than that of SCT. The ratio difference of DCT is less than 3%, and the phase difference of DCT is less than 360', which shows DCT has good anti-DC performance.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52182018000F).

Key words: DC component; conventional single-core CT; anti-DC CT; measurement performance; AC and DC distribution network

0 引言

交流电网中的非线性负荷, 磁暴影响下的地磁电流等, 使交流电网中产生直流分量^[1-9]。直流分量作用下常规单铁芯 CT 的铁芯工作点易进入饱和区, 由于铁磁材料的非线性, 使得直流分量下互感器二次电流发生严重畸变, 在二次侧电流中形成谐波分

量从而导致计量失准^[8]。同时, 一些非法窃电分子, 通过对配网线路进行半波整流, 产生半波电流, 半波电流中的直流分量严重影响低压计量用互感器的传变特性, 导致在额定电流下比差超差 60% 以上, 角差超差 8° 以上, 直接导致经济损失^[9]。因此, 具备抗直流性能的电流互感器应运而生^[9,13-15], 其可满足直流分量下对工频交流电流的测量, 实现配网侧电能的准确计量。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(52182018000F)

国外早期进行直流偏磁研究的 Kappman 等人

通过实验验证发现,通过增大电磁式电流互感器的变比及减少二次侧电流互感器的负载阻抗可以达到对一次电流中直流分量影响的抑制,但效果并不显著^[10]。国内外研究均发现直流分量会使电磁式互感器比差向负方向增大,而角差向正方向增大^[14-17]。武高所的相关研究表明,相同变比不同铁磁材料的电流互感器受到直流分量影响的程度大不相同。高饱和磁密硅钢片铁磁材料相比于低饱和磁密微合金铁磁材料可以耐受较高的直流分量^[18]。然而对于具备抗直流性能的电流互感器的设计及理论分析尚不多。

本文从铁芯在直流分量下工作特性的角度出发,基于复合铁芯抗直流 CT 等效电路及磁路分析,建立了一种复合铁芯抗直流 CT 误差转变模型。并通过比例直流叠加方法进行直流分量下误差转变性能的相关实验,与直流分量下常规单铁芯 CT 计量性能相比较,测试复合铁芯抗直流 CT 的计量性能。

1 直流分量下单铁芯互感器失准机理

常规单铁芯 CT 等效电路如图 1 所示^[19-20],其中 Z_1 、 Z_2 、 Z_m 、 Z_L 分别为 CT 的一次阻抗、二次折算到一次的阻抗、励磁阻抗和二次折算到一次的负荷阻抗; I_1 、 I_0 、 I_2 分别为一次电流、激磁电流和二次折算到一次的电流; E_1 、 E_2 分别为一次的感应电动势和二次折算到一次的感应电动势。

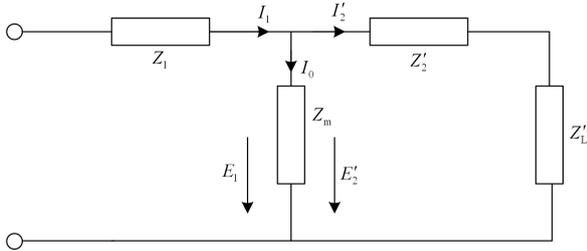


图 1 常规单铁芯 CT 原理图

Fig. 1 Schematic of single core current transformer

在实际工况下,铁芯需要励磁电流提供励磁磁势,同时铁芯中产生功率损耗。因此铁芯中的励磁电流大小是电流互感器误差的根本原因。常规单铁芯 CT 的误差公式可以用式(1)表示。

$$\varepsilon = \frac{K_n I_2 - I_1}{I_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K_n 为电流互感器额定变比; I_1 、 I_2 为一次电流基波分量和二次电流基波分量。结合电流互感器的磁势平衡方程、全电流公式以及电磁感应定律,在磁通正弦变化时,式(1)可写为^[19,24]

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + K \cdot \frac{Z'_m}{(Z'_2 + Z'_L)}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Z'_m 为折算到一次侧铁芯励磁阻抗; K 为铁芯叠片系数。

由式(2)可知,单铁芯 CT 复合误差受到互感器匝数比,励磁阻抗及负载阻抗的影响。其中励磁阻抗直接影响励磁电流大小,励磁电流 i_m 与励磁阻抗 Z'_m 的关系可表示为

$$i_m = \frac{N_2 d\phi_m}{dt} \cdot \frac{1}{Z'_m} \quad (3)$$

式中, ϕ_m 为励磁磁势。而励磁阻抗与磁导率及铁芯结构参数有关,可表示为

$$Z'_m = \omega L = \frac{2\pi f N_1^2 \mu_c S}{l} \quad (4)$$

式中: μ_c 为铁芯磁导率; f 为交流电流频率; S 为铁芯等效截面面积; l 为铁芯等效磁路长度; N_1 为一次绕组匝数;

由式(3)和式(4)可知,励磁电流与铁芯磁导率 μ_c 相关,因此 μ_c 对于电流互感器的误差起到至关重要的作用。

当一次侧交流电流中含有直流分量时,直流分量在铁芯中产生恒定的直流磁通,其与交流磁通叠加,导致铁芯工作点进入饱和区,使电流互感器达到饱和,铁芯工作在低磁导率状态。此时由于铁芯 $B-H$ 曲线的非线性,即铁芯磁导率的非线性,导致励磁阻抗产生较大变化,从而励磁电流发生严重畸变^[17,19-21],致使常规单铁芯 CT 计量失准。

2 直流分量下抗直流 CT 误差转变原理

2.1 抗直流 CT 等效电路

从前述分析可知,降低铁芯磁导率 μ_c 的非线性可减小直流分量对 CT 计量性能的影响。将高磁导率铁芯 C_1 和低磁导率铁芯 C_2 组成复合铁芯抗直流 CT,其中低磁导率铁基非晶铁芯具有高磁饱和磁密,线性范围大,不易饱和的特点,因此复合铁芯的等效磁导率的非线性将减小,可削弱直流分量对计量性能的影响。复合铁芯抗直流 CT 铁芯结构如图 2 所示,其原理如图 3 所示。

一次绕组穿过复合铁芯,二次绕组均匀绕制在环形复合铁芯上。其中一次绕组匝数为 N_1 ,二次绕组匝数为 N_2 。

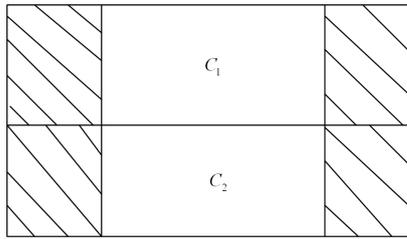


图2 复合铁芯抗直流 CT 铁芯结构

Fig. 2 Structure of anti-DC CT with composite core

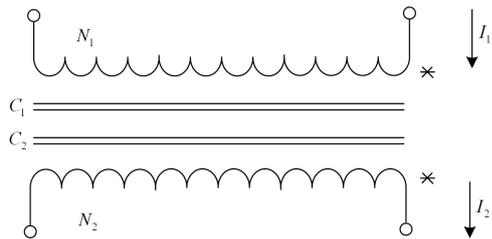


图3 复合铁芯抗直流 CT 原理图

Fig. 3 Schematic of anti-DC CT with composite core

铁芯 C_1 与 C_2 的磁势平衡方程分别为

$$\begin{cases} I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_{m1} N_1 \\ I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_{m2} N_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_{m1} 为铁芯 C_1 的励磁电流; I_{m2} 为铁芯 C_2 的励磁电流。由式(5)可知

$$I_{m1} = I_{m2} \quad (6)$$

根据式(5)、式(6)及图3, 可构建双铁芯抗直流 CT 等效电路图如图4所示。

图4中 Z_{11} 为抗直流 CT 一次侧等效阻抗; Z_{22} 为二次侧折算到一次侧等效阻抗; Z_{m1} 、 Z_{m2} 分别为铁芯 C_1 、 C_2 折算到一次侧的励磁阻抗; Z_L 为二次侧折算到一次侧的负载阻抗。

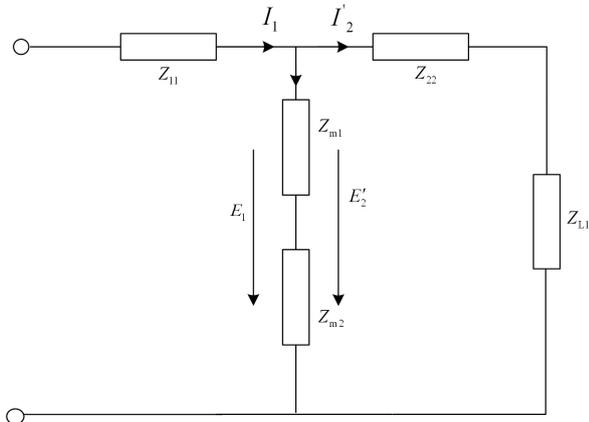


图4 抗直流 CT 等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of anti-DC CT with composite core

通过对比图1和图4, 复合铁芯抗直流 CT 由于没有改变一次绕组与二次绕组结构, 仅将铁芯由单一铁芯结构改进为复合铁芯结构, 其等效电路图的差别主要体现在励磁阻抗上。复合铁芯的等效励磁阻抗 Z_m 可表示为

$$Z_m'' = Z_{m1} + Z_{m2} \quad (7)$$

由式(7)可知, 复合铁芯抗直流 CT 等效励磁阻抗为两个非线性励磁阻抗 Z_{m1} 、 Z_{m2} 的叠加。正常工作时铁芯 C_1 与 C_2 中磁场强度 H 相同, 而由于两者铁芯铁磁参数及 $B-H$ 曲线差异, 等效励磁阻抗在不同磁场强度下表现差异较大。

2.2 直流分量下复合铁芯抗直流 CT 误差分析

直流分量主要影响铁芯工作点, 进而影响励磁阻抗的大小。结合式(2)和式(7), 复合铁芯结构的抗直流 CT 误差可表示为

$$\varepsilon_{ac} = \frac{1}{1 + K \times \frac{Z_{m1} + Z_{m2}}{Z_{22} + Z_{L1}}} \times 100\% \quad (8)$$

当不存在直流分量时, 单比较式(8)和式(2), 当将一二次绕组阻抗变化忽略不计, 通过调整复合铁芯中两铁芯的截面积及等效磁路长度等相关参数, 可以满足在铁芯总截面积基本不变的情况下, 双铁芯抗直流 CT 的总励磁阻抗与单铁芯 CT 励磁阻抗相等, 因此在合适的结构参数下, 复合铁芯抗直流 CT 在稳态交流下的测量精度基本不会因铁芯结构变化而改变, 能达到常规单铁芯 CT 的测量精度。

当存在直流分量时, 假设铁芯 C_1 与 C_2 饱和磁密大小为 B_{ST1} 、 B_{ST2} , 直流分量对应磁密 B_{dc} , 交流分量对应磁密 B_{ac} 。在直流分量与一次侧交流电流较小时, $B_{dc} + B_{ac} < B_{ST1}$, 铁芯 C_1 与 C_2 均未进入饱和, 励磁阻抗 Z_{m1} 、 Z_{m2} 大小未发生较大变化, 则式(8)基本不变, 直流分量的影响可基本忽略不计。

当直流分量与一次侧交流电流较大时, $B_{dc} + B_{ac} > B_{ST1}$, 对于常规单铁芯 CT, 铁芯进入饱和, 励磁阻抗 Z_m'' 远小于未饱和情况下励磁阻抗, 由式(2)可知, 常规单铁芯 CT 误差明显变大。对于复合铁芯抗直流 CT, 铁芯 C_1 进入饱和, 此时励磁阻抗 Z_{m1} 远小于未饱和情况下励磁阻抗, 而铁芯 C_2 未进入饱和, 励磁阻抗 Z_{m2} 基本不变, 根据式(7)和式(8), 此时 $Z_m'' \approx Z_{m2}$, 铁芯 C_1 饱和后, 复合铁芯抗直流 CT 的误差大小与 Z_{m2} 大小相关。

综上所述: 高磁导率铁芯 C_1 用于保证交流正弦稳态电流测量误差, 低磁导率铁芯 C_2 用于保证直流分量下交流稳态电流测量误差。其中误差大小随二次负载阻抗的增大而增大, 随直流分量的增大, 励磁阻抗的减小而增大。

3 试验线路及原理

基于比例直流叠加法, 对复合铁芯抗直流 CT 与常规单铁芯 CT 进行直流分量下误差性能的相关实验。实验对象选用 250 A/5 A 常规单铁芯 CT 以及 250 A/5 A 复合铁芯抗直流 CT。

实验原理图如图 5 所示, 试验设备参数如下。

- (1) 升流器。输出范围: 0~1 000 A。
- (2) 标准互感器。量程: 0~800 A, 准确度: 0.05%。
- (3) 直流源。输出范围: 0~10 A, 5 min 稳定度: 0.05%。
- (4) 0.1 Ω 负载电阻。
- (5) 1 Ω 负载电阻。
- (6) 互感器校验仪。准确度: 0.05%。

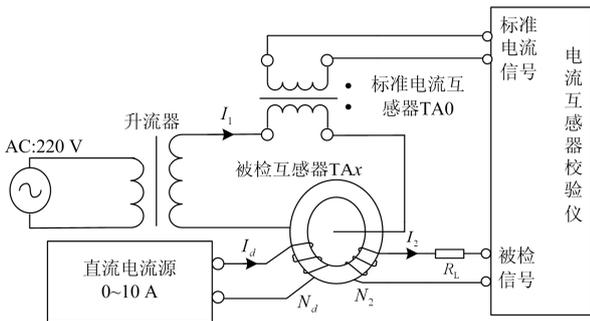


图 5 比例直流叠加法误差性能测试原理图

Fig. 5 Schematic of error test based on proportional DC superposition method

图 5 中一次侧电流 I_1 由升流器调节, 匝数为 1 匝, 一次侧电流穿过 0.05 级的标准互感器 T_{A0} , 作为标准电流信号串接入互感器校验仪的标准电流信号通道。一次侧电流穿过被检互感器 T_{Ax} , 二次侧绕组为 N_2 , 二次回路中串入负载电阻 R_L , 二次电流输入互感器校验仪的被检信号通道。其中直流分量由 0~10 A 的直流电流源提供, 通过等安匝的方式叠加直流分量^[22-23], 大小为 $N_d I_d$ 。对于直流分量占比 K_{dc} , 通过直流分量幅值占据交流分量有效值的比例大小反映, 即 $K_{dc} = N_d I_d / I_1 \times 100\%$ 。

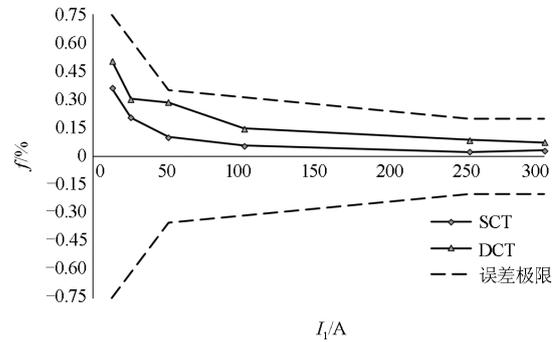
4 试验结果及分析

将常规单铁芯 CT 及复合铁芯抗直流 CT 通过控制变量的方法, 分别探究其一次电流大小及直流占比, 二次负荷大小对互感器计量性能影响。记常规单铁芯 CT 为 SCT, 复合铁芯抗直流 CT 为 DCT, 比差角差分别为 f 和 β , 单位分别为%和($^{\circ}$)。

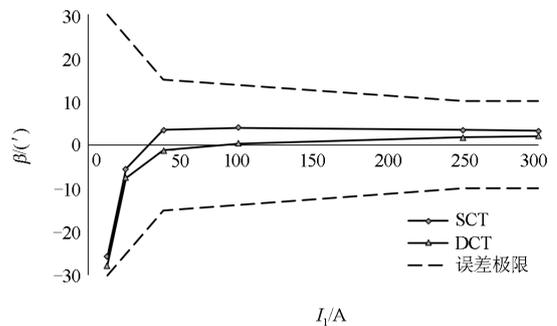
4.1 无直流分量时 SCT、DCT 计量性能测试

直流源输出直流为 0 A, 此时被测试互感器不

受直流分量影响。全量程下 SCT 与 DCT 误差性能测试比差和角差分别如图 6(a)和如图 6(b)所示。



(a) 无直流分量下比差测试



(b) 无直流分量条件下 CT 角差测试

图 6 无直流分量条件下 SCT、DCT 全量程计量性能测试

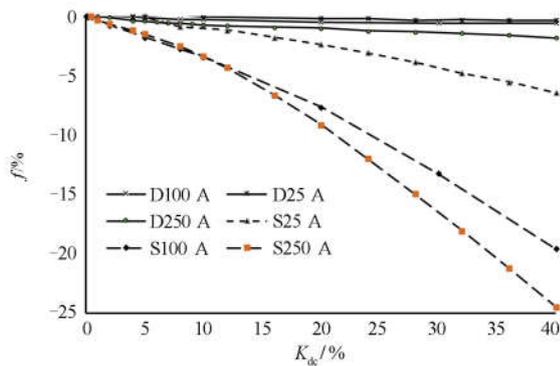
Fig. 6 SCT & DCT test without DC current

图 6 中虚线为电流互感器标准规定的 0.2 级电流互感器误差极限^[25]。无直流分量时, 在 5%~120%额定电流范围内, SCT 与 DCT 比差角差均满足 0.2 级准确度要求。实验结果表明, 在合适的结构参数及铁芯材料配比下, 复合铁芯结构可以保证交流稳态电流测量精度要求。

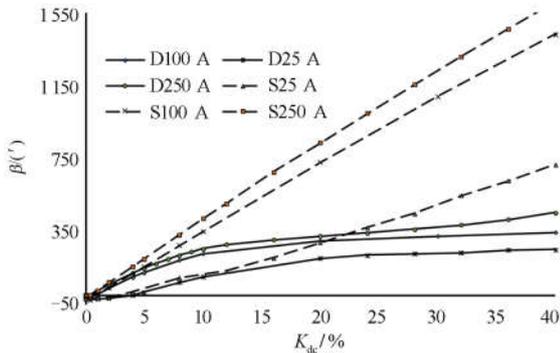
4.2 直流分量占比对 SCT、DCT 计量性能影响

直流分量在不同系统中的占比不同, 同一系统的不同时段占比也可能不同。如在对于窃电设备, 在窃电时常用整流后的半波交流作为低压电流互感器输入, 其直流占比为 $1/\pi$ 。因此测试不同占比的直流分量对计量性能的影响。试验时, 通过等安匝法向被测试互感器中加入直流分量, 最大直流分量占比 $K_{dc}=40\%$ 。SCT、DCT 在不同直流分量占比下的比差角差测试结果分别如图 7(a)和图 7(b)所示。

图 7 中, S25 A, S100 A, S250 A 分别对应 SCT 在 10%, 40%和 100%额定电流运行时, 常规单铁芯 CT 比差角差曲线。D25 A, D100 A, D250 A 分别对应 DCT 在 10%, 40%和 100%额定电流运行时, 复合铁芯抗直流 CT 比差角差曲线。根据图 7 分析可得到以下结论:



(a) 直流分量下不同直流占比比差测试



(b) 直流分量下不同直流占比角差测试

图 7 直流分量下不同直流占比 CT 计量性能测试
Fig. 7 SCT & DCT measurement performance with DC current when $K_{dc} \in [0, 40\%]$

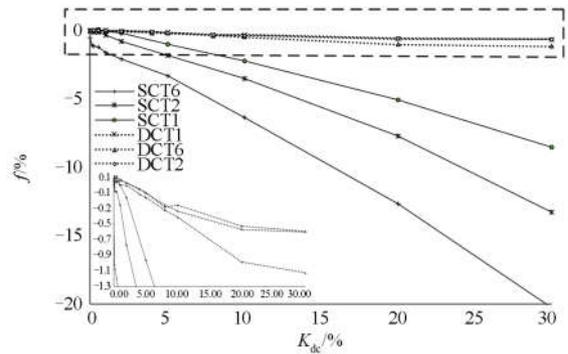
1) 复合铁芯抗直流 CT 有效改善了常规单铁芯 CT 在直流分量下比差超差严重的现象。复合铁芯抗直流 CT 在 $K_{dc} \in [0, 40\%]$ 时, 比差均不超过 3%, 角差均不超过 $360'$ 。而常规单铁芯 CT 在 $K_{dc}=40\%$, 一次侧 100% 额定电流运行时, 比差超过 25%, 角差超过 $1550'$ 。

2) 随着直流分量占比的增加, 复合铁芯抗直流 CT 及常规单铁芯 CT 的比差均朝负方向增大, 角差均朝正方向增大。

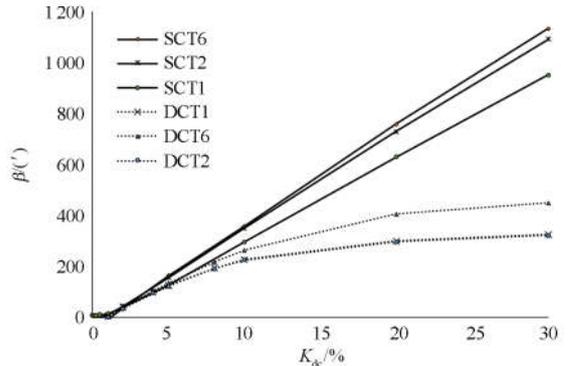
3) 在相同直流占比 K_{dc} 下, 复合铁芯抗直流 CT 比差、角差均明显小于常规单铁芯 CT。

4.3 二次负荷对 SCT、DCT 计量性能影响

由式(8)可知二次负荷大小也会影响误差大小。实验时一次电流为 100 A, 在 SCT、DCT 二次侧分别接入 0.1Ω 、 0.2Ω 、 0.6Ω 二次负载, 分别记为 SCT1、SCT2、SCT6、DCT1、DCT2、DCT6。探究负载阻抗对于直流分量下互感器误差影响。不同负载下 SCT、DCT 比差角差测试结果如图 8(a)和图 8(b)所示。



(a) 直流分量下不同负载时比差测试



(b) 直流分量下不同负载时角差测试

图 8 直流分量下不同二次负荷 CT 计量性能测试
Fig. 8 SCT & DCT measurement performance with DC current when $RL=0.1, 0.2, 0.6 \Omega$

图 8(a)中虚线框部分抗直流 CT 在直流分量下不同负载时 DCT 比差变化图放大至左下角显示。由图 8 可知:

1) 负载的变化对 SCT、DCT 计量性能均有影响, 但对 SCT 影响更大。

2) 二次侧负载阻抗越大, 对 SCT、DCT 的比差角差影响越大。

3) DCT 在负载阻抗小于 0.6Ω 时, 在直流占比高达 30% 时, 比差为 -1.17% , 角差为 $475'$, 远小于 SCT 的误差。

5 结论

1) 通过对常规单铁芯 CT 与基于复合铁芯结构的抗直流 CT 等效电路及磁路关系分析, 对直流分量下两者误差演变特性进行推导。理论上分析复合铁芯抗直流 CT 计量性能与二次负荷及直流分量大小之间的关系。

2) 根据比例直流叠加法对常规单铁芯 CT 及复合铁芯抗直流 CT 进行试验。试验结果显示 $250 \text{ A}/5 \text{ A}$ 双铁芯抗直流 CT 交流稳态误差满足 0.2

级要求;在直流分量占比小于40%情况下,比差均小于3%,角差均小于360'。

3)二次负荷越大,常规单铁芯CT及复合铁芯抗直流CT比差角差越大。直流分量下,二次负荷对常规单铁芯CT影响更大。可通过减小二次负荷提高CT的计量性能。

基于复合铁芯结构的抗直流CT减弱了铁芯等效磁导率的非线性,大大改善了其抗直流性能,可在配网中得到广泛应用。

参考文献

- [1] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.
- [2] LI Zhou, ZHAN Ruopei, LI Yazhou, et al. Recent developments in HVDC transmission systems to support renewable energy integration[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 595-607.
- [3] SASS F, SENNEWALD T, LINKE F, et al. System security of hybrid AC-HVDC-systems challenges and new approaches for combined security assessment, preventive optimization and curative actions[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 585-594.
- [4] 曾钰, 邹贵彬, 孙辰军, 等. 一种柔性直流配电网直流侧故障保护方法[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(7): 80-86.
ZENG Yu, ZOU Guibin, SUN Chenjun, et al. A DC-side fault protection method for flexible DC distribution networks[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(7): 80-86.
- [5] 李剑鸣, 朱玮琪, 刘开乐, 等. 基于用电信息采集系统对居民用户低电压监测的研究[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(2): 23-27.
LI Jianming, ZHU Weiqi, LIU Kaile, et al. Research on low-voltage monitoring of residential users based on the power user data acquisition system[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(2): 23-27.
- [6] 樊艳芳, 耿山, 巩晓玲, 等. 基于直流偏磁风险指标的变电站选址[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 59-65.
FAN Yanfang, GENG Shan, GONG Xiaoling, et al. Substation site selection considering the risk index of DC bias[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 59-65.
- [7] 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.
- [8] 王保帅, 肖霞, 宋宏天, 等. 一种新型抗直流电流互感器检定系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 68-74.
WANG Baoshuai, XIAO Xia, SONG Hongtian, et al. Research on test system of a novel anti-DC current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 68-74.
- [9] 靳绍平, 李敏, 刘见, 等. 低压抗直流电流互感器及检测装置研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 59-64.
JIN Shaoping, LI Min, LIU Jian, et al. Research on low anti-DC current transformer and its detection device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(13): 59-64.
- [10] KAPPENMAN J G. Current transformer and relay performance in the presence of geomagnetically-induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(3): 1078-1088.
- [11] 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): 127-132.
LI Chunlai, TANG Xiaoyu, HUANG Ye'an, et al. Measurement and analysis of transfer characteristic for metering CT with DC magnetic bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 127-132.
- [12] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.
DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [13] 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.
- [14] 赵志刚, 刘福贵, 张俊杰, 等. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 71-76.
ZHAO Zhigang, LIU Fugui, ZHANG Junjie, et al.

- Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.
- [15] 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.
- [16] 赵震宇, 朱亮, 祝婧, 等. 电流直流分量对低压电流互感器计量特性影响的试验研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 44-49, 55.
ZHAO Zhenyu, ZHU Liang, ZHU Jing, et al. Experimental study on the influence of current DC component on the metrological characteristics of low-voltage current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(20): 44-49, 55.
- [17] 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, 25(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, 25(19): 127-132.
- [18] 王欢, 毛安澜, 汪泉, 等. 直流偏磁下计量用 CT 误差特性的研究[J]. 自动化仪表, 2014, 39(6): 47-49, 53.
WANG Huan, MAO Anlan, WANG Quan, et al. Research on the error characteristics of measurement for CT under DC magnetic bias[J]. Process Automation Instrumentation, 2014, 39(6): 47-49, 53.
- [19] 卢树峰, 杨世海, 蔡霖霖, 等. 直流偏磁对电流互感器的作用机理研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(14): 6-11.
LU Shufeng, YANG Shihai, CAI Jilin, et al. Action principle of DC magnetic bias to current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(14): 6-11.
- [20] 熊魁, 岳长喜, 李登云, 等. 高磁导率比双铁芯电流互感器原理和误差性能研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 114-119.
XIONG Kui, YUE Changxi, LI Dengyun, et al. Research of theory and error characters of high magnetic permeability ratio two cores current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 114-119.
- [21] 李红斌, 陈庆. 电子式低功耗电流互感器的设计[J]. 传感器技术, 2004(3): 31-33.
LI Hongbin, CHEN Qing. Design of electronic low power current transformer[J]. Journal of Transducer Technology, 2004(3): 31-33.
- [22] 冯宇, 尹志荣, 王欢, 等. 采用等安匝原理的自校式 CT 误差测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 158-164.
FENG Yu, YIN Zhirong, WANG Huan, et al. An error measurement method of self calibration current transformers by using the theory of equal ampere-turns[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 158-164.
- [23] 冯宇, 王晓琪, 汪本进, 等. 采用等安匝合成电源的电流互感器谐波特性测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3154-3160.
FENG Yu, WANG Xiaoqi, WANG Benjin, et al. A measurement method of current transformers' harmonic characteristics by using equal ampere-turns synthetic power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3154-3160.
- [24] 赵修民. 电流互感器[M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1990.
- [25] 电流互感器: GB 1208—2006[S].

收稿日期: 2019-02-18; 修回日期: 2019-06-06

作者简介:

李敏(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能计量技术研究工作; E-mail: liminbest86918@126.com

靳绍平(1959—), 男, 大专, 教授级高级工程师, 研究方向为电能计量技术研究工作; E-mail: 13870881746@139.com

宋宏天(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电磁测量等方面的研究工作。E-mail: songhongtian@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)