

套管型电磁式电流互感器及其应用

张书琴

(河南平高东芝高压开关有限公司, 平顶山 467013)

摘要: 电流互感器(CT)是联接高压一次回路与控制保护回路的核心元件。笔者从CT的电磁转换原理探寻CT的结构尺寸及其内在规律,分析了CT误差产生的主要原因是漏磁通和励磁电流,而励磁电流又决定于CT的电气参数、铁心材质及结构尺寸。图解了CT制造时二次绕组均匀分布可将漏磁通降至最低,也只有绕组抽头各级都均匀绕制的CT,其复合误差试验的间接法与直接法才具有等价性。在满足CT使用要求的情况下,适当调整CT的电气参数,如多抽头CT的负载分级、无重合闸要求的暂态保护级CT工作方式由双循环变更为单循环等,可减小CT的误差、降低制造成本。最后,对内置式CT绝缘材料的选择、外置式CT的防潮性进行了说明,特别是对外置式CT现场组装时形成闭合回路的原因、闭合回路对误差的影响以及检测闭合回路存在的方法进行了详尽的解读。

关键词: 电磁型式电流互感器; 二次极限感应电势; 励磁电流; 均匀绕制; 闭合回路

中图分类号: TM452.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)09-0117-06

Sleeve-type Electromagnetic Current Transformer and Its Application

ZHANG Shu-qin

(Henan Pinggao Toshiba High Voltage Switchgear Co., Ltd., Pingdingshan 467013, China)

Abstract: Current transformer (CT) is a key component that links high voltage primary circuit and control protection circuit. This paper ascertains the structural dimension of CT on the basis of electromagnetic conversion principle. It is found that the leakage flux and exciting current are main sources to introduce the error of CT, and the exciting current depends on electrical parameters, core material and structural dimension of CT. It is demonstrated that uniformly distributed secondary windings of CT can minimize the leakage flux, and indirect test and direct test of composite error are equivalent only for the CT with uniform distribution of tapped windings. On the premise that performance requirements of CT are met, the error and manufacturing cost of CT can be reduced by appropriately changing CT's electrical parameters, such as grading load of the CT with multi-tapped windings, and changing duty cycle of the CT with transient protection and without reclosing requirement from double-cycle to single-cycle. In addition, the selection of insulation materials for internal CT and the moisture resistance for external CT are described. Especially, the reason why closed circuit is formed in spot installation of external CT, the effect of the closed circuit on CT's error, and the methods for detecting the closed circuits are discussed.

Key words: electromagnetic current transformer; secondary limiting electromotive force; exciting current; uniformly distributed secondary windings; closed circuit

0 引言

电流互感器(CT)是发电厂、变电站内一次系统和二次系统间的联络元件,是将高压一次回路的大

电流转换成低压二次回路小电流的变换电器^[1-4],其主要作用是:①把主回路的大电流变换成保护继电器和计量装置便于使用的小电流(1 A, 5 A);②使测量、保护和控制装置与高电压绝缘、隔离;③使测量仪器、仪表和保护、控制装置小型化、标准化。

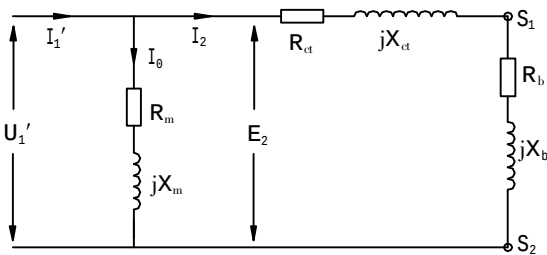
收稿日期:2012-03-11; 修回日期:2012-04-14

文中所述的是一次导体穿过 CT 的正中、匝数固定为 1 匝,二次绕组分布在环形铁心上的套管型电流互感器(CT),主要用于 GIS 及 T-GCB 中。

1 CT 的等效电路及二次极限感应电势

1.1 CT 的等效电路

电力系统对 CT 的要求除变比、精度外,就是容量。由 CT 额定二次电流 I_{2n} 、容量及其功率因数,即可算出 CT 的额定二次负载阻抗 $Z_b=R_b+jX_b$ 。CT 的等效电路见图 1。



I_0 —励磁电流; $Z_m=R_m+jX_m$ —励磁阻抗; I_2 —CT 二次电流; E_2 —CT 二次感应电势; $Z_{ct}=R_{ct}+jX_{ct}$ —二次阻抗; $Z_b=R_b+jX_b$ —负载阻抗。

图 1 CT 等效电路图

Fig. 1 CT equivalent circuit schematic

从电路的角度讲,能够满足 CT 现场使用要求的二次极限感应电势为

$$E_{2e}=kI_{2n}\sqrt{(R_{ct75^\circ C}+R_b)^2+(X_{ct}+X_b)^2} \quad (1)$$

式(1)中: $R_{ct75^\circ C}$ 为折算到 75℃的 CT 内阻,与绕制 CT 所用的漆包铜线的直径与长度有关; X_{ct} 为 CT 的漏感,与 CT 的绕制均匀度有关,均匀绕制且铁心不开槽时很小约 0.5 Ω; I_{2n} 为 CT 的额定二次电流; k 为不同种类 CT 的限值条件(过电流倍数),其取值以示例的形式详见表 1^[5-6]。表 1 中的 I_{exc} 为限值条件下的励磁电流。

表 1 CT 的精度/限值条件/复合误差

精度等示例 参数	限值条件下 k 的 取值	复合误差
0.2SFS5, 0.2FS10	仪表保安系数 FS, k=5 或 10。	$\frac{I_{exc}}{I_{sn} \times FS} \geq 10\%$
5P30, 10P40 5PR30, 10PR40	准确限值系数 ALF, k=30 或 40。PR 级有 剩磁要求,用于重合 闸时。	$\frac{I_{exc}}{I_{sn} \times AFL} \leq 10\% \text{ or } 5\%$
PX(E_k, R_{ct}, I_{exc})	计算系数 K_x ,其值由 用户指定。	不要求误差,但要求 拐点电势 E_k 及其下的 励磁电流 I_{exc} ,为此尚 需提供 75℃时的 R_{ct0} 。
TPY (K_{ssc} , 工 作循环等)	对称短路电流倍数 K_{ssc} 和暂态面积增大系数 K_{td} 的积; $k=K_{ssc} \cdot K_{td}$	$\frac{\hat{I}_{exc}}{\sqrt{2} I_{sn} \times K_{ssc} \cdot K_{td}} \leq 10\%$

1.2 由铁心中变化的磁场所引起的二次感应电势

环形 CT 见图 2。主回路的一次电流 I 在 CT 铁心中产生磁通 Φ ,该磁通又在二次线圈中感生出电势 $e=-N \frac{d\Phi}{dt}$ 。考虑到电磁式 CT 铁心的非线性性,

设 CT 铁心中的主磁通 $\Phi=\Phi_m \sin \omega t$, 则有

$$e=-N \frac{d\Phi}{dt}=-N \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t)=$$

$$2\pi f N \Phi_m \sin(\omega t-90^\circ)=E_m \sin(\omega t-90^\circ)$$

二次极限感应电势有效值

$$E_{2\phi}=2\pi f N \Phi_m / \sqrt{2}=4.44 f N \Phi_m=4.44 f N B_m S \quad (2)$$

式(2)中, B_m 为铁心中的磁通密度。式(1)是 CT 现场的使用要求,式(2)与 CT 的形体尺寸和铁心性能有关。设计时,将它们关联起来,得出 $B_m \cdot S$ 的取值范围,进而就可得出具体 CT 的尺寸及参数。这是将 CT 现场的使用要求转化成 CT 制品(尺寸)的一个很重要的关系式。

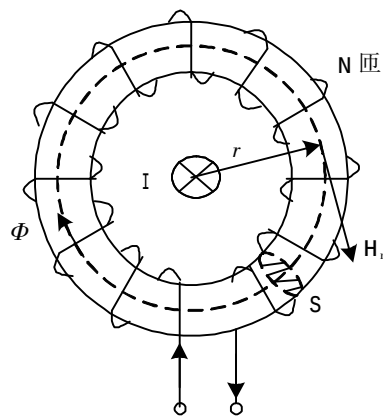


图 2 环形 CT

Fig. 2 Circular CT

1.3 拐点电势 E_k

CT 的励磁特性曲线见图 3。图 3 中,电压增加 10%、励磁电流增加 50%的点为拐点 E_k ,其所对应的磁通为饱和磁通。

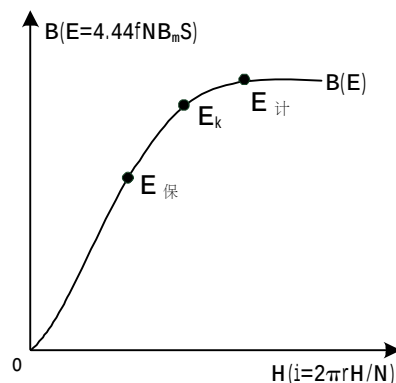


图 3 CT 的励磁特性曲线

Fig. 3 CT exciting characteristic curve

额定电流下 CT 工作在励磁特性的线性段, 精度一般都能得到保证。限值条件下的误差用极限感应电动势下的励磁电流 I_{exc} 所占限值条件下二次电流百分数来表示(详见表 1)。用途不同的 CT, 复合误差的要求也不一样, 为此, 保护用 CT 的 E 值宜取在铁心励磁曲线的拐点电压 E_k 之下, 计量和测量用 CT 的 E 值宜取在 E_k 之上, 详见图 3。

2 CT 误差

2.1 误差产生的原因

交流电流 I 在铁心中所形成的磁路见图 4。其中 Φ 为通过铁心闭合的主磁通, Φ_σ 为经过非导磁媒质闭合的漏磁通, 则有电流 $i_1 = i_\sigma + i_0 + Ni_2$ 。

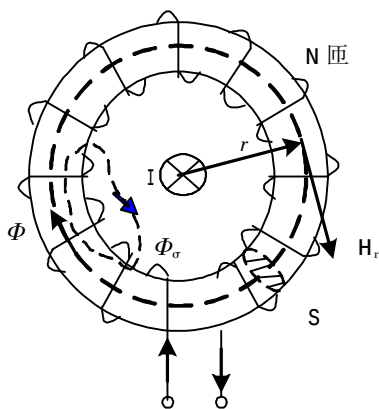


图 4 铁心中的磁路

Fig. 4 Magnetic circuit in core

漏磁通没有完全与二次线圈匝链, 所以产生漏磁通的电流 i_σ 就是误差的一部分; 主磁通是将一次电流传变到二次的媒质, 产生主磁通的励磁电流 i_0 也是误差的一部分。也就是说, CT 的误差主要是由漏磁通和励磁电流产生的^[7]。

2.2 减少漏磁通的方法

环形 CT 必须是低漏磁结构, 见图 2, 如果线圈均匀缠绕时, 基本上没有泄露磁通。但是相同的匝数, 只在局部缠绕时漏磁通就不可避免, 见图 5(a)。特别是对于如图 5(b)所示的有中间抽头的 CT, 半绕式结构是要避免的, 虽然它可以降低 CT 的高度、减少用铜量, 但是中间抽头的漏磁通很大。这种情况虽对正常工作电流下的误差影响不大, 但对短路时的复合误差影响很大。

正确的做法是: $S_1 \sim S_2$ 之间的绕线要在铁心整周 360° 范围内均匀缠绕, $S_2 \sim S_3$ 之间的绕线也要在铁心整周 360° 上均匀缠绕。另外, 二次出线口也要缩小无绕线的范围。

CT 的漏电抗 X_{ct} 很难计算, 对于均匀绕制的

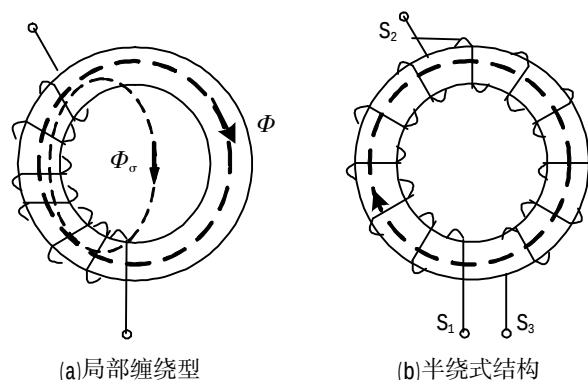


图 5 不当的 CT 绕线方式

Fig. 5 Improper CT winding form

CT, 其漏电抗 X_{ct} 一般小于 0.5Ω , 远小于几十 Ω 的 CT 内阻 R_{ct} , 在按式(1)计算极限感应电势 E_{Δ} 时可略去 X_{ct} 或直接取为 0.5Ω , E_{Δ} 所对应的励磁电流 i_{Δ} 较小; 而不均匀绕制时由于 CT 漏抗 X_{ct} 增大, 由式(1)所得的 $E_{非匀}$ 将会增大, 其所对应的励磁电流 $i_{非匀}$ 也将增大, 见图 6。由于难以知道 X_{ct} 增大后 $E_{非匀}$ 的具体数值, 常用均匀绕制 E_{Δ} 下的励磁电流 i_{Δ} 来计算复合误差(间接法, 计算方法见表 1), 其值将会比直接法测量的误差值小很多, 需要特别注意。

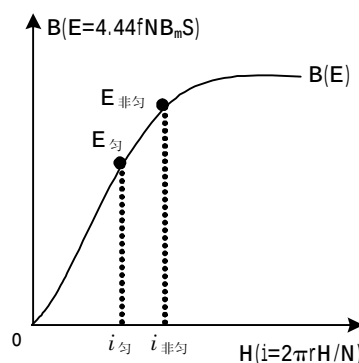


图 6 两种情况下励磁特性对比

Fig. 6 The comparison of exciting characteristics at two conditions

某 220 kV GIS 站曾因带中间抽头的 CT 采用半绕式结构, 致使使用中的复合误差远大于出厂测试值, 后经在武高院用直接法测量, 证实了复合误差的不同确实是由 CT 的半绕式结构所致。

关键是线圈绕制结束后无法用励磁特性等手段判定出是否均匀绕制, 所以制造时应予避免^[9]。

2.3 影响励磁电流误差的因素

铁心要有磁性, 必然要有励磁电流 I_0 , CT 也就因此有了误差^[9]。

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{(Z_{ct} + Z_2) \times I_{cp} \times 10^8}{222 \mu N^2 S K_{Fe}} \quad (3)$$

式(3)中: L_{cp} 为平均磁路长度, 取决于 CT 的内/

外径; S 为铁心的截面积; K_{Fe} 为铁心叠片填充系数; N 为电流比,或二次绕组匝数。

对于穿心式的CT,内/外径及铁心工艺方法(K_{Fe})一定时,CT的误差 f 可简记为

$$f \propto \frac{Z_1 + Z_2}{\mu N^2 h} \quad (4)$$

式(4)中, h 为铁心的高度。由式(4)可以看出:

1)误差与电流比 N 的平方成反比,所以小变比的CT(如200/5 A)误差大、制作困难,必要时可将二次电流设定为1 A;

2)负载 Z_2 越大,误差越大,但不是成正比的增加;

3)选用导磁率 μ 高的材料,可以减小误差,并降低CT的高度 h ;

4)有中间抽头的CT,小变比时误差大,大变比时误差小,为了平衡二者,可将负载分级,小变比负载低、大变比负载高。比如:1 500~3 000 A/1 A,30 V·A的CT,若将中间抽头1 500/1 A的容量变更为20 V·A、满匝3 000/1 A的容量变更为40 V·A,CT的形体尺寸将大为减小,将节约成本、方便制作。

3 CT的分类选型及参数协调

电网在不同的工作状态下对CT的要求也不相同,见图7。系统正常工作时,测量级工作;系统短路时,对容量大、特别重要的系统要求快速保护,CT线圈应具备TP级的暂态保护特性;对容量较小的系统,开关动作时间和继保时间都比较大(通常大于短路暂态时间),此时只要CT在短路稳态时提供一定准确的保护信息就够了,就是常用的5P(R)、10P(R)、PX级电流互感器。

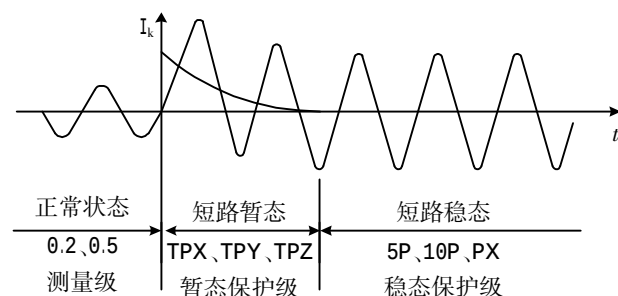


图7 CT的3种工作状态

Fig. 7 The three operating modes of CT

3.1 直流分量的衰减时间

系统中短路电流直流分量的衰减时间取决于其一次回路的时间常数 τ ,当回路中直流分量的百分数不超过交流分量的20%时^[10],就可以认为已由短路暂态进入短路稳态。

由 $DC\% = e^{-t/\tau}$ 可知,直流分量衰减到 $DC\% = 20\%$ 所需要的时间 $t = \tau \ln 5$,不同 τ 值所对应的 t 值

见表2。

表2 各时间常数下直流分量的衰减时间

Tab. 2 Attenuate time of DC component at different time constant					
参数	数值				
τ/ms	45	60	75	100	120
t/ms	72	97	121	161	193
衰减周波数	3.6	4.8	6.0	8.0	9.6

系统的标准时间常数为45 ms,对于超高压系统由于回路具有较高的 X/R ,其时间常数 τ 较大。

3.2 保护级CT的选取

结合系统的时间常数、短路电流的大小及系统保护的时间要求来选择所用保护级CT是暂态保护、还是稳态保护。

对于P级保护用CT,其性能要求是按照对称正弦稳态短路电流所规定的,系统方面要采取措施(比如采用高阻抗电压差动保护等)以防止在短路暂态过程中、铁心可能已饱和的情况下,由直流分量引起的保护拒动或误动。必要时参数选型阶段可提高CT的额定限值系数 k ,以降低实际故障发生时CT的误差。另外,CT一次回路通过含直流分量较大的故障电流时,铁心残磁较大,对励磁特性有影响,所以有重合闸保护功能的CT,宜选用PR级。

超高压电网短路时短路电流中的直流分量衰减期长达90~200 ms,短路对系统稳定性的危害很大,要求GCB快速切除故障,此时,需采用在短路暂态过程中具有良好暂态响应的TP级CT。

3.3 暂态保护用CT工作方式的选取

对于架空线用GCB由于有重合闸的要求,所以保护线路用的TP级CT,其工作循环应为双循环制[如C-100 ms-0-500 ms-C-100 ms-0],且应有剩磁的要求,所以要选用TPY级CT;而对于保护变压器及母线用的TP级CT采用单循环制即可[如C-100 ms-0]。另外,在通电100 ms的时间内再给出能够保证误差、且能满足使用要求的铁心不饱和时间如40 ms。参数这样合理选择后,将会大大缩小CT的形体尺寸、降低制造成本。

3.4 带抽头的CT问题

考虑到保护级CT的主要作用是满足短路电流下复合误差尽可能小,运行时可将保护回路尽量接在变比较大的抽头上,变比大、误差小可更好地起到保护作用。

上海曾有某站因短路电流过大、而保护接在P级CT的中间抽头上,最终导致主保护断路器失灵、后备保护动作的情况。

另外,在 CT 的制作方面,正如在误差一节中所分析的那样:有中间抽头的 CT,不论是保护级还是测量级,都存在小变比时误差大、大变比时误差小的问题,为了协调二者、可将负载分级,减少小变比的负载或增加大变比的负载。

4 CT 制造组装中的注意事项

4.1 内置式 CT

所谓内置式 CT,就是 CT 装在 GIS 壳体内、处于 SF_6 气体中。内置式 CT 要慎重选择 CT 中所用的绝缘材料,要选用耐 SF_6 气体及其分解物、耐电弧性能好的绝缘材料,如 PET、电工绝缘纸板等。另外,由于 CT 中所用的材料在空气中容易吸潮,所以 CT 组装前要对其进行干燥处理,否则 CT 气室中的水分含量容易超标。

2007 年时曾出现过某 GIS 制造厂的内置式 CT 由于采用了含有零价态硫的耐油橡胶板,最后导致运行中的 GIS 设备绝缘击穿后果。该橡胶在温度作用下挥发出含硫气体,与电连接上涂抹的导电脂及镀银层发生化学反应、生成黑色的 Ag_2S 粉末,该粉末附着在绝缘盆表面、积累到一定数量、引起电场畸变、最后导致击穿事故发生。

4.2 外置式 CT

所谓外置式 CT,就是 CT 装在 GIS 壳体之外、周围是潮湿的空气。外置式 CT,首先要解决的就是 CT 单体的受潮问题:在 CT 单体成型后外表面要用绝缘性能良好、有自粘着力、耐热、防潮的橡胶带不留缝隙、空地的严实包裹,最后再用阻燃型电气绝缘胶带包绕等。其次,CT 在组装时其罩子的设计也要尽可能采用以防防水进入为主、水不慎进入后尚能排出的结构。

某 UHV 变电站所用的 CT 是外置式的,曾在现场进行过受潮处理,想尽了二次线圈通流驱潮、抽真空处理、大功率的热风机驱潮及几种方法组合并用等各种办法,很是繁琐。

4.3 外置式 CT 的闭合回路

在现场安装时,外置式 CT 由于固定电缆的桥架、支架等辅助件的存在很容易形成除一次导体以外的闭合回路,见图 8。主回路电流 I 在 CT 铁心中产生了磁场 B , B 的变化在闭合回路中产生了感生电流 I_c , I_c 的流通又在铁心中产生了与 B 反向的磁场 B_c ,所以闭合回路的存在势必削弱了主回路电流 I 在 CT 铁心中产生的磁场 B ,削弱了将一次电流传变到二次的能力从而使从 CT 的励磁电流增加、误差增大。

闭合回路说起来容易理解,但应用中由于其隐

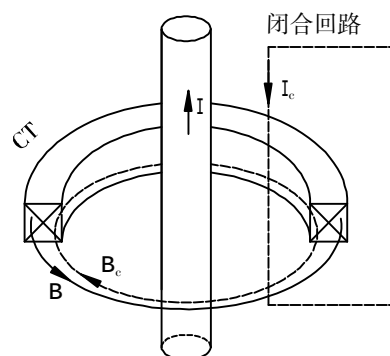


图 8 CT 闭合回路示意图

Fig. 8 Diagram of CT closed circuit

蔽性很强、不容易被发现,有时甚至是由相间短接或由二次配线形成的闭合回路,需要特别注意。

检测闭合回路存在的简易方法:多个叠放在一起的 CT 线圈,对其中一个线圈从二次侧加电压通流,其他线圈的二次侧能检测到电压或电流,说明有闭合回路存在。

5 结语

1)为减小 CT 的制造误差,CT 的每级绕组都要沿铁心在 3 600 范围内整周均匀绕制,即便一层密绕不完,剩余不多的匝数也要沿整周均匀绕制,只有每级绕组都均匀绕制的 CT,其复合误差试验的间接法与直接法才具有等价性;

2)对于带有抽头的 CT,为兼顾其额定电流下的精度和限值条件下的误差,可将其负载分级;

3)在系统保护方面要合理选择和使用保护类 CT,P 级 CT 适用于短路稳态保护,TP 级 CT 适用于短路暂态保护,TP 级用于架空线保护时由于存在重合闸宜选用双循环工作制,用于母线及变压器保护时可选用单循环工作制;

4)对于内置式 CT,要注意 CT 单体中及 CT 组装中所用的绝缘材料与 SF_6 气体及所在气室中所用其他材料的相容协调性;

5)对于外置式 CT 要注意其长期处于大气中的防潮性及组装作业中闭合回路的形成,现场试验若出现 CT 误差与出厂试验值相差很大,可对叠放在一起的 CT 线圈中的一个从二次侧加压通流,其他线圈的二次侧能检测到电压或电流,说明有闭合回路存在,查找后消除即可。

参考文献:

- [1] 郭天兴,王玉桥,刘 海,等.国内外电流互感器的发展现状[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(1):4-6.

- GUO Tian-xing, WANG Yu-qiao, LIU Hai, et al. Development status of high-voltage current transformers at home and abroad [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(1): 4-6.
- [2] 王程远, 陈幼平, 张 冈, 等. 磁阀式饱和电流互感器的理论研究[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 203-207.
- WANG Cheng-yuan, CHEN You-ping, ZHANG Gang, et al. Research on the theory of magnetic valve type saturable current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 203-207.
- [3] 闫 东, 王 伟, 韩金华, 等. 特高压套管式电流互感器励磁特性测试[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 1-4.
- YAN Dong, WANG Wei, HAN Jin-hua, et al. Excitation characteristics test of UHV bushing-type current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 1-4.
- [4] 费 烨, 吴士普, 胡卫东, 等. 1 000 kV GIS 中电流互感器驱潮技术研究及防潮处理[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 1-5.
- FEI Ye, WU Shi-pu, HU Wei-dong, et al. Research on dehumidification of 1 000 kV GIS current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 1-5.
- [5] GB 1208—2006. 电流互感器[S].
- GB 1208—2006. Current transformers[S].
- [6] GB 16847—1997. 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S].
- GB 16847—1997. Requirements for protective current transformers for transient performance[S].
- [7] 尚耀辉, 赵建洲, 刘 海, 等. 电流互感器 TPY 级铁心暂态特性分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(1): 44-47.
- SHANG Yao-hui, ZHAO Jian-zhou, LIU hai, et al. Analysis of transient characteristics of TPY core in current transformer 110 kV[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(1): 44-47.
- [8] 杨 茜, 郭天兴, 刘 海, 等. 电流互感器电场分析与绝缘结构改进 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(1): 31-34.
- YANG Qian, GUO Tian-xing, LIU Hai, et al. Electric field analysis and insulation structure improvement for 110 kV current transformer [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(1): 31-34.
- [9] 黎 斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] GB 1984—2003. 高压交流断路器[S].
- GB 1984—2003. High-voltage alternating-current circuit-breakers[S].
- 张书琴(1966—), 女, 工程师, 从事封闭式组合电器的设计工作。

《高压电器》2012 年第 9 期广告单位

彩色广告

封一: 西安高压电器研究院有限责任公司
封二: 北京京东方真空电器有限责任公司
封三: 中山市泰峰电气有限公司
封四: 湖北武高电力新技术有限公司
前插 1: 西安神电电器有限公司
前插 2: 汕头市盈照开关有限公司
前插 3: 珠海经济特区恒迪科技有限公司
前插 4: 上海乐研电气科技有限公司
前插 5: 陕西斯瑞工业有限责任公司
前插 6: 武汉科新电力设备有限公司

前插 7: 朗松珂利(上海)仪器仪表有限公司
前插 8: 浙江温岭市雅博输送设备有限公司
前插 9: 江苏常新密封材料有限公司
前插 10: 武汉市国电华瑞电业测试科技有限公司
前插 11: 西安博能电力技术有限公司
前插 12: 上海利驰软件有限公司

黑白广告

单色 123: 陕西维柯瑞电气有限责任公司
单色 124: 上海苏特电气有限公司