

极端情况下电子式电流互感器防护措施

王 鹏, 张贵新, 李莲子, 朱小梅, 罗承沐

(清华大学电机系, 北京 100084)

Protection Methods for Electronic Current Transformer During Extreme Circumstance

WANG Peng, ZHANG Gui-xin, LI Lian-zi, ZHU Xiao-mei, LUO Cheng-mu

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 在遭受过电压、过电流等极端情况时, 电子式互感器易受冲击而导致性能下降或损坏。以一种有源电子式电流互感器为例, 介绍了其在极端情况下的各环节, 如 LPCT(低功率电流互感器)、Rogowski 线圈、高压侧电源系统和高压侧信号处理电路等的防护问题, 并给出了相应的措施及其设计依据。对防护措施引入的误差进行了分析, 指出通过选择合适的标称电压, 可以减弱防护器件性能对测量准确度的影响。型式试验结果表明, 采用该措施的一种电子式电流互感器满足 IEC 0.2 级要求, 验证了所提出措施的有效性。

关键词: 电子式电流互感器; 过电流; LPCT; 防护措施; 能量释放

中图分类号: TM452

文献标识码: A

Abstract: The performance of electronic current transformer could be deteriorated, even destroyed during some extreme circumstance, for example, overvoltage or over current. This paper introduces the protective problems of several parts for ECT, LPCT (low power current transformer), Rogowski coil, power supply system and signal processing circuits in high-voltage side, the corresponding protective methods and design criterions have been proposed. Errors on LPCT induced by leakage current are analyzed. The analysis results show that errors induced by protection components could be ignored through selecting appropriate parameters. Type test results show the ECT based on the proposed methods meets IEC 0.2 class requirements, and the validity of the measures have been proved.

Key words: electronic current transformer(ECT); over current; low power current transformer(LPCT); protection methods; energy discharge

0 引言

电磁式互感器在一些极端条件下(如过电流、过

电压等)会出现磁饱和或铁磁谐振等现象, 导致输出波形畸变, 甚至还会对设备、人身造成损害或带来危险, 所以在设计电磁式互感器时必须在极端情况下预留相应的余度。与电磁式互感器相比, 电子式互感器虽然具有很多的优越性, 但由于它在高压侧存在有源电子线路, 所以在过电压、过电流情况下对其自身的防护问题变得非常重要。这也是电子式互感器可靠性研究中的一项关键内容。

结合电子式互感器的研究经验, 从实用角度详细阐述电子式互感器在过电流、过电压等极端情况下将会出现的问题, 并给出相应的解决措施。笔者主要针对高压侧传感单元为 LPCT 和 Rogowski 线圈的电子式电流互感器。

1 电子式电流互感器的结构

为了方便分析研究, 在给出基于 LPCT 和 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的结构示意图, 见图 1。

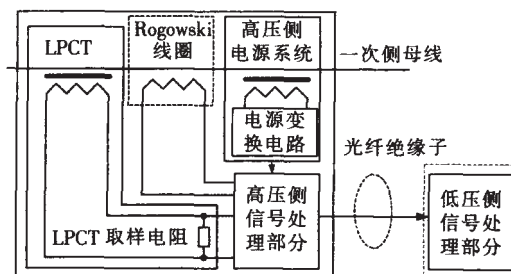


图 1 电子式电流互感器结构示意图

从图中可以看出, 光纤绝缘子担负着高、低压侧的绝缘, 所以在系统遭受过电压的情况下, 系统能否承受主要取决于光纤绝缘子的绝缘性能。在过电压情况下, 如果光纤绝缘子性能不出现问题, 则无需采用额外的防护措施。当电子式电流互感器遭受过电流时, 高压侧的所有部分均会受到影响。由于图中的

收稿日期: 2006-07-09; 修回日期: 2006-07-26

作者简介: 王 鹏(1977-), 男, 博士后, 主要从事高压电气测量技术的研究。

电子式电流互感器具有测量和保护两种功能, LPCT用作测量通道的传感单元, Rogowski 线圈用作保护通道的传感单元。保护通道的准确级次为 5P20, 即要求在 20 倍的额定一次电流情况下, 保护通道的复合误差小于 5%。如果额定一次电流为 600 A, 则 20 倍额定电流将达到 12 kA。考虑到电流互感器对热稳定电流和动稳定电流的要求, 一次侧流过的电流会更大, 如选择 1 s 额定热稳定电流为 31.5 kA, 额定动稳定电流将达到 80 kA(3~5 周波)。此时相对于额定电流值, 过电流将分别达到 52.5 倍和 133.3 倍。这将会给 LPCT、高压侧电源系统和高压侧信号处理电路带来很大的冲击, 在这种情况下, 必须采取相应的防护措施。

2 极端情况下的防护措施

2.1 LPCT 防护措施

在设计过程中, 为了充分提高 LPCT 自身的准确等级, 一般要尽量选用优质铁心材料, 增加线圈的二次匝数, 减小二次绕组电流, 并减小取样电阻阻值, 以减轻线圈的负荷, 达到提高 LPCT 测量准确度的目的。这就导致 LPCT 的铁心在很宽的一次电流变化范围内都不会饱和。这样, 在遭受过电流的情况下, 线圈的二次侧和取样电阻中将流过几十倍甚至一百多倍的额定电流值, 使得 LPCT 的取样电阻和二次绕组烧坏的几率大增。

(1) 取样电阻的防护

为了防止取样电阻烧坏, 可以采取两种措施: 一种是增大电阻功率; 第 2 种是在过电流时采取分流措施, 以减小流过取样电阻的电流。增大电阻功率的方法不是一个很好的解决方案。分流方法在本质上是一个保护电路, 当过电流时, 保护电路动作, 从而分流以实现对其取样电阻的保护目的。取样电阻保护电路见图 2。

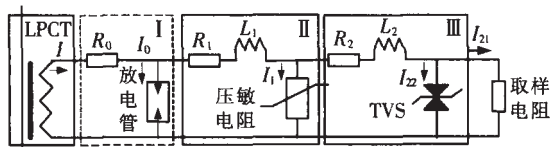


图 2 取样电阻保护电路

图 2 中, I, II 和 III 部分分别为 LPCT 取样电阻的一级、二级和三级保护电路。

第一级保护电路由电阻和气体放电管构成。图中 R_0 为限流电阻。当气体放电管上的电压超过一定幅度时, 器件变为短路状态, 从而将浪涌能量泄放掉。气体放电管由封装在小玻璃管或陶瓷管中相隔一定距离的两个电极组成。如果发生电压冲击, 电极间会产生某种电弧, 电离气体放电的路径是由高阻抗转向低阻抗。该放电过程阻止一个更高的冲击幅值, 此处的弧电压大约降低 10~30 V。气体放电管受到瞬

态高能量冲击时, 它能以 10^{-6} s 量级的速度, 将其两极间的高阻抗变为低阻抗, 吸收高达数千瓦的浪涌功率。气体放电管的优点是容量大, 能够承受很大的电流。缺点是响应时间长, 一般为 ms 级。放电管的寿命约为 50 次($10 \times 1000 \mu\text{s}$, 500 A 峰值电流)^[1]。气体放电管常作为保护电路的第一级能量泄放单元。

第二级保护电路由 R_1 和 L_1 压敏电阻组成。其中, R_1 和 L_1 分别为限流电阻和电感。压敏电阻是一种以氧化锌为主要成份的金属氧化物半导体非线性电阻, 当压敏电阻上的电压超过一定幅度时, 电阻的阻值迅速降低, 从而将浪涌能量泄放掉, 并将浪涌电压的幅度限制在一定范围内, 达到保护后面设备的目的。压敏电阻的响应速度为 10^{-9} s^[1]。压敏电阻在过压冲击下的承受容量小于气体放电管, 可以作为保护电路的第二级能量泄放单元。

第三级保护电路由 R_2 和 L_2 瞬变电压抑制二极管(简称 TVS)组成。其中 R_2 和 L_2 分别为限流电阻和电感。当 TVS 上的电压超过一定幅度时, TVS 将以极高的速度改变自身阻抗, 器件迅速导通, 从而将能量泄放掉, 并将浪涌电压的幅度箝位于一个预定值, 有效地保护后级回路中的器件, 免受各种浪涌脉冲的损坏。TVS 的响应速度为 10^{-12} s 量级^[1], 比压敏电阻和气体放电管要快, 但其所能承受的能量较低, 可以作为保护电路快速限压模块。

实际上, 电子式电流互感器在过电流情况下, 不会遭受很快速的能量冲击, 一般都是工频电流, 图 2 中的三级保护的响应速度都能够满足要求。但由于保护器件所能承受的能量不同, 一般要选择合适的参数, 以保证快速限压模块即第三级保护先动作, 实现快速保护后级元件的目的。

(2) 二次绕组的防护

为了防止二次绕组烧坏, 可以通过设置合适的铁心磁饱和点来解决。当一次电流超过一定值时, 由于铁心达到磁饱和点, 一次电流再增加时其二次侧电流不会线性增加。不过, 二次绕组能否烧坏, 还同 LPCT 变比或者二次绕组匝数以及二次绕组导线的选择密切相关。

LPCT 是一种穿心式低功率电流互感器, 一次侧绕组只有一匝, 一般为母线导杆。对于这种单匝式电流互感器, 当一次电流较小时, 其测量误差会迅速增大, 可能会无法满足准确等级要求。笔者设计 LPCT 的额定一次电流为 600 A, 并且其准确级次要达到 0.1 级以上, 这不但需要选择具有优质磁性能的铁心材料, 而且需要增大二次线圈匝数, 以提高线圈安匝数, 达到提高测量准确度的目的^[2-3]。

二次绕组导线多采用漆包线和双玻璃丝包圆铜线, 可用单根或多根并绕来绕制二次绕组。导线截面主要考虑最大二次电流和误差性能要求, 如果按最

大二次电流选择二次绕组导线截面，铜线的短时热电流密度不应超过 $160 \text{ A} \cdot \text{mm}^2$ ，则二次绕组导线计算截面为^[4]：

$$S_2 = I_{2\text{max}} / 160 \tag{1}$$

式中： $I_{2\text{max}}$ 为最大二次电流，二次绕组出现的最大电流值有两种可能：当铁心未饱和时，应按一次绕组流过短时热稳定电流按变比折算后的二次电流值；当铁心已经达到高度饱和时，则应按照二次最大感应电势与二次侧阻抗 Z_2 的比值确定的二次电流，此时：

$$I_{2\text{max}} = 4.44fN_2B_sS_c / Z_2 \tag{2}$$

式中： f 为一次电流频率，等于 50 Hz ； N_2 为二次绕组匝数； B_s 为铁心的饱和磁感应强度，单位为 T ； S_c 为铁心截面积，单位为 m^2 。

对所设计的 LPCT 而言，其变比为 16000 ，当一次绕组通过短时热稳定电流 31.5 kA 时，铁心没有饱和，此时 $I_{2\text{max}}$ 的值如下：

$$I_{2\text{max}} = 31.5 \text{ kA} / 16000 = 5.25 \text{ A}$$

代入式 (1) 中，可得：

$$S_2 = I_{2\text{max}} / 160 = 5.25 / 160 = 0.033 \text{ mm}^2$$

所以只要选择截面面积大于 0.033 mm^2 的导线，即可满足要求。此外，考虑到导线电阻会影响 LPCT 的准确度，为了减小导线电阻，导线的电流密度需要选得小一些。笔者最终选取的导线截面是 1 mm^2 ，额定一次电流为 600 A ，二次输出额定电流为 0.1 A ，电流密度约为 $0.127 \text{ A} \cdot \text{mm}^2$ 。

2.2 Rogowski 线圈防护措施

由于 Rogowski 线圈是电流互感器保护通道的传感单元，在一次电流为额定值的情况下其输出电压设计为 75 mV 。由于输出电压较小，所以在过电流情况下对高压侧信号处理电路的影响不大。但由于 Rogowski 线圈输出信号为一次电流微分，为防止高频脉冲对后级电路造成损坏，需在电路入口处加一级 TVS。此外，在过电流时对线圈自身绕组的影响也不大。不过，由于 Rogowski 线圈的输出受其与一次导体相对位置的影响，在组装时应将线圈安装牢固，以避免当一次侧通过大电流时因传感头震动而对 Rogowski 线圈的输出造成影响。

2.3 高压侧电源系统防护措施

高压侧电源系统主要包括两个部分，一是恒流源变压器单元（也可以称为取能线圈^[5-6]），另一部分是电源变换单元。高压侧电源系统在过电流情况下的防护问题也主要是针对这两个单元。对恒流源变压器而言，防护目的主要是在过电流情况下使其自身不致损坏；对电源变换单元而言，防护的目的则是使恒流源变压器在过电流情况下的输出信号不致过大，以免对电源变换单元造成损害。

(1) 恒流源变压器的防护

在过电流情况下，恒流源变压器可能遇到的问

题就是二次绕组烧坏或者铁心烧坏。下面首先分析二次绕组的选择问题。

由于恒流源变压器是一种穿心式电流互感器，其二次绕组的匝数一般不多（文中取 60 匝）。所以当一次电流超过一定值后，铁心就会到达磁饱和点，此时恒流源变压器的二次电流不再随一次电流而线性增加。在遭受过电流冲击（如通过动、热稳定电流）时，其二次侧最大电流可由式 (2) 计算得到。对于文中设计的恒流源变压器，由于 $f=50 \text{ Hz}$ ， $N_2=60$ ， $B_s=1.25 \text{ T}$ ， $S_c=9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ，假设恒流源变压器的等效负载 $Z_2=100$ ，则：

$$I_{2\text{max}} = \frac{4.44fN_2B_sS_c}{Z_2} = \frac{4.44 \times 50 \times 60 \times 1.25 \times 9 \times 10^{-4}}{100} = 0.15 \text{ A}$$

代入式 (1) 中，可得：

$$S_2 = I_{2\text{max}} / 160 = 0.15 / 160 = 0.001 \text{ mm}^2$$

从以上计算可以看出，要满足短时过电流情况下对二次绕组通流的要求，只需其截面积大于 0.001 mm^2 即可。在实际设计中，二次绕组导线的截面积取为 1 mm^2 。从上面的分析可以看出，恒流源变压器的二次绕组在过电流情况下损坏的可能性不大。

电子式电流互感器高压侧电子线路所需能量一般都不大（小于 500 mW ），所以恒流源变压器的负荷其实是很小的；再加上恒流源变压器自身的绝缘很简单，一般外包绝缘层很薄，散热条件较好，只要合理选择铁心截面面积，铁心烧坏的可能性也是非常小的。

(2) 电源变换单元的防护

恒流源变压器的铁心在进入磁饱和区后，由于其工作在非线性区，所以二次输出电压会产生畸变。当进入深度磁饱和区后，二次输出电压会变成窄脉冲波形，峰值可达几百伏。如果将它直接输出至电源变换单元，可能会造成电源变换单元的损坏，所以需要采用能量泄放回路将恒流源变压器传送过来的多余能量泄放掉。电源变换单元保护电路见图 3。

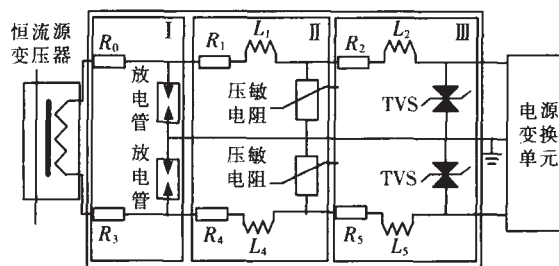


图 3 电源变换单元保护电路

图 3 与图 2 中 LPCT 的保护电路类似，不过由于恒流源变压器的二次输出并不与电源变换单元的地连接在一起，所以将三级保护的防护器件增加了一倍。该保护电路的工作原理与图 2 类似，在此不再多作介绍。

2.4 高压侧信号处理电路防护措施

过电流情况对高压侧信号处理电路的影响主要在模拟输入和电源两个端口侧。通过前面对 LPCT 和 Rogowski 线圈的防护问题的介绍可知,在过电流情况下对模拟输入侧的影响已经消除。对电源侧的影响,由于电源系统输出的是+5 V 稳压直流电源,可以在信号处理电路的电源入口处再加一级高频滤波和稳压保护措施。此外,在一些重要芯片的电源和地之间加上独石电容和 TVS,可以避免静电放电等电磁干扰造成元件故障。

3 防护措施对互感器测量准确度的影响

在信号处理电路模拟输入的前端,即 LPCT 和 Rogowski 线圈的输出侧,均采用了保护电路。保护器件的泄漏电流将对互感器系统的测量准确度造成影响。假设图 2 中取样电阻流过电流为 I_{21} , TVS 泄漏电流表示为 I_{22} , 压敏电阻泄漏电流表示为 I_1 , 放电管泄漏电流表示为 I_0 , LPCT 二次输出电流为 I 。考虑 TVS、压敏电阻和放电管泄漏电流情况下, LPCT 的比差可表示为:

$$\% = \frac{I_0 + I_1 + I_{22}}{I} \times 100 \quad (3)$$

如果将因保护器件泄漏电流引起的误差限制在 $\pm 0.1\%$ 以内,则由式(3)可得,TVS、压敏电阻和放电管泄漏电流之和与 LPCT 二次输出电流关系为:

$$I_0 + I_1 + I_{22} < I \times 10^{-3} \quad (4)$$

取 LPCT 额定二次输出电流为 0.1 A, 由式(4)知,在 120% 额定电流点,若各保护器件泄漏电流之和小于 0.12 mA, 则因保护器件泄漏电流引起的误差小于 0.1%。在 5% 额定电流点,若各保护器件泄漏电流之和小于 0.2 mA, 则因保护器件泄漏电流引起的误差小于 0.4% (对 0.1 级电流互感器, 5% 额定电流点比差限值为 0.4%)。

放电管的标称电压一般大于 70 V, 在实际保护电压较低时,其泄漏电流是比较小的。对某品牌标称电压为 70 V 的放电管,在端电压为 4~6 V 交流 (50 Hz) 电压下,实测泄漏电流约为 0.1 μ A, 则由此给 LPCT 带来的误差约为 0.000 1% (由于数值较小,在实际中可以将其影响忽略)。压敏电阻的标称电压一般在 18 V 以上,TVS 的标称电压在 6.8 V 以上。对于一定标称电压的 TVS 和压敏电阻,如果器件两端电压增大,则其泄漏电流也相应增加。实际电压距离其标称电压越近,泄漏电流也就越大。在保护电路设计中,就 TVS、压敏电阻和放电管三者而言,所选择的 TVS 的标称电压一般最小,接近实际保护电压,所以其泄漏电流对式(3)中总泄漏电流的贡献最大。对某品牌标称电压为 6.8 V 的 TVS,在 4 V 交流 (50 Hz) 电压下泄漏电流实测为 200.4 μ A, 6 V 交

流 (50 Hz) 电压下泄漏电流实测为 3 098.9 μ A。如果取图 2 中取样电阻两端的电压额定值为 4 V (有效值),采用标称电压为 6.8 V 的 TVS,则仅在额定值由其泄漏电流引起的误差就大于 0.2%。图 4 为对某品牌不同标称电压的 TVS 和压敏电阻泄漏电流值的实际测试结果。

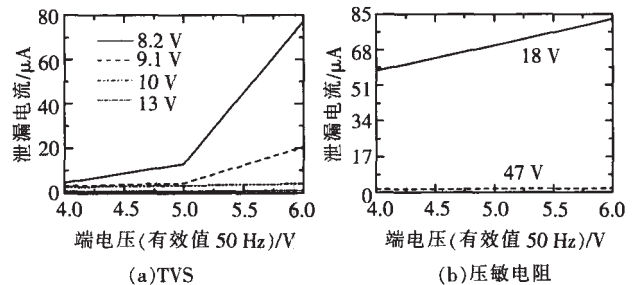


图 4 保护器件在不同标称电压下的泄漏电流与端电压关系曲线

若以 4 V 为额定值,由图 4 并结合式(3)可计算出在 150% 额定值点,标称电压为 8.2 V 和 13 V 的 TVS 因泄漏电流给 LPCT 带来的误差为 0.051 3% 和 0.000 5%, 标称电压为 18 V 和 47 V 的压敏电阻因泄漏电流给 LPCT 带来的误差分别为 0.055 1% 和 0.001 2%。综合考虑 TVS 和压敏电阻泄漏电流的影响,对标称电压为 8.2 V 的 TVS 和 18 V 的压敏电阻,因其泄漏电流给 LPCT 造成的误差将大于 0.1%。在实际防护措施中,应根据对误差的要求选择合适标称电压的器件进行组合。

考虑到保护器件的特性存在分散性^[7],在条件许可的情况下,应尽量对所采用的器件进行测试,以确保能够满足误差特性要求。在误差允许的情况下,可以将保护器件并联使用,以增加其容量,提高系统长期运行的可靠性和稳定性。

采用文中所述防护方法的一种电子式电流互感器,已于 2005 年 8 月通过武汉高压研究所的委托型式试验。型式试验中的误差试验分为初试和复试两部分,其中复试是在各种绝缘特性试验和动、热稳定电流试验后进行的。型式试验中该电子式电流互感器测量通道的比差、角差见表 1。

表 1 测量通道比差、角差数值

误差	额定电流百分数/%				
	5	20	100	120	
初试	比值差/%	-0.02	+0.04	+0.04	+0.02
	相位差/()	+2	+3	+2	+2
复试	比值差/%	+0.1	+0.08	+0.06	+0.04
	相位差/()	+2	+2	+1	+2

从表 1 可以看出,互感器误差在初试和复试过程中基本一致,比差、角差满足 IEC 0.2 级要求。在各种绝缘特性试验和动、热稳定电流试验中,该互感器没有出现任何故障,这进一步 (下转第 142 页)

3 ATAnalyzer 的应用

事例 1: 某 245 kV GIS 在进行耐压试验时放电, 3 次加压放电电压分别为: 435, 380, 260 kV。因为放电电压越来越低, 所以可确定为绝缘件故障。将传感器安装在 GIS 上, 布置见图 3。加压放电后定位仪显示传感器 1 先收到信号, 传感器 2 后收到信号。显然, 故障发生在断路器的盆式绝缘子上。拆开 后, 明显可见放电痕迹。

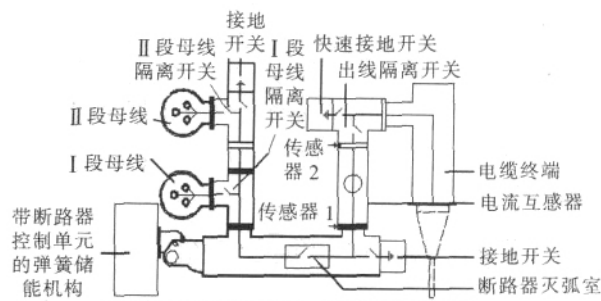


图 3 245 kV GIS 结构图及传感器布置位置

事例 2: 同型号的 GIS 在某现场安装完毕后进行耐压试验, B 相在 350 kV 时发生放电, 于是将传感器布置为图 4, 进行第二次试验。在 290 kV 时放电再次发生, 定位仪显示传感器收到信号的先后次序为: 传感器 15, 16, 5, 10, 9。因放电电压降低, 所以应为绝缘件发生故障。放电点应靠近 15 号传感器, 但不应是断路器的绝缘盆, 因为如果断路器的绝缘盆发生故障, 5 号传感器应比 16 号传感器离绝缘盆近而先收到信号, 但实际情况是 16 号传感器先收到了信号, 所以故障应在断路器内部的绝缘件上, 即灭弧室或绝缘拉杆及其外绝缘罩。现场将断路器灭弧

单元抽出后, 在绝缘拉杆外面的绝缘罩上有明显的放电痕迹。

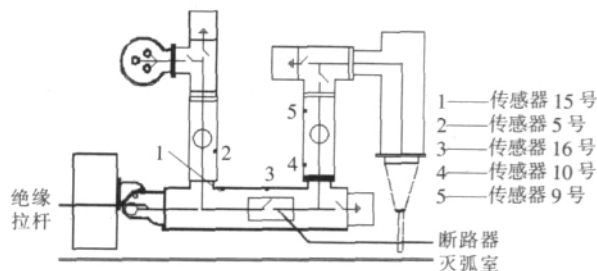


图 4 传感器布置位置

4 结语

(1) 采用声学检测法可有效地进行 GIS 放电定位, 抗干扰能力强, 检测灵敏度高。

(2) 基于声学检测法的放电定位仪 ATAnalyzer 已在日常工作中成功的应用, 解决了 GIS 在出厂试验和现场试验中的放电定位的难题。

参考文献:

- [1] 侍海军, 孔闻宇. 气体绝缘组合电器绝缘现场试验 [J]. 江苏电机工程, 2005, 24(2): 82-84.
- [2] 钱勇, 黄成军, 江秀臣, 等. GIS 中局部放电在线监测现状及发展 [J]. 高压电器, 2004, 40(6): 453-456.
- [3] WANG Juan, LI Fu-qi, WANG Zhong-dong. Experiment Analysis of Influence of External Coupling Network on Partial Discharge Monitoring of Transformer [C]// Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China, 2000: 21-26.
- [4] 赵春阳, 宋志国, 黄中华, 等. GIS 局部放电定位技术及其应用 [J]. 河南电力, 2004, 32(3): 5-9.

(上接第 139 页) 验证了这些防护措施的有效性。

4 结语

过电压、过电流等极端情况下, 电子式互感器自身的防护问题是其在实际运行过程中必须认真考虑的, 也是保证其在实际系统中长期稳定、可靠运行的关键。笔者在介绍一种有源电子式电流互感器结构的基础上, 重点分析了其在过电流情况下各环节, 如 LPCT、Rogowski 线圈、高压侧电源系统和高压侧信号处理电路等的防护问题, 并给出了相应的措施及其设计依据。通过分析防护措施给系统测量准确度造成的影响, 结合对不同类型防护器件的泄漏电流的实测结果, 指出通过采用合适标称电压的保护器件可以减小防护措施给系统带来的误差。型式试验结果验证了笔者所提出防护措施的有效性。该防护措施可作为研制与开发电子式电流互感器产品时的参考。

参考文献:

- [1] 白同云, 吕晓德. 电磁兼容设计 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001: 220-233.
- [2] 赵修民. 测量用互感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 21-23.
- [3] 王鹏, 罗承沐, 张贵新. 基于低功率电流互感器的电子式电流互感器 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 98-101.
- [4] 凌子恕. 高压互感器技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 157-158.
- [5] 李澎, 蔡志斌, 罗承沐. 光电电流互感器的供电电路的研究 [J]. 电工电能新技术, 2003, 22(4): 44-47.
- [6] 刘忠战. 电子式电流互感器高压侧自励源供电方法研究 [J]. 高压电器, 2006, 42(1): 55-57.
- [7] HE J, CHEN S, ZENG R, et al. Electrical Parameter Statistic Analysis and Parallel Coordination of ZnO Varistors in low-voltage Protection Devices [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2005, 20(1): 131-137.