

# 电流互感器局部放电试验干扰的分析与抑制

孙江平, 赵刚, 傅正财, 孙伟, 陈坚

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 电流互感器的可靠性影响到整个电网的安全运行, 而电流互感器运行的可靠性, 在很大程度上取决于其绝缘的可靠性, 局部放电试验是检测电流互感器绝缘状况的重要手段。笔者详细分析了电流互感器局部放电的检测方法—脉冲电流法, 以及局部放电检测的试验回路。针对局部放电检测易受干扰的情况, 实测了现场各种干扰信号的图谱, 通过对干扰图谱特点的分析, 判别出干扰信号的来源, 并采取相应的措施抑制干扰。

**关键词:** 电流互感器; 局部放电测量; 脉冲电流法; 干扰抑制

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)06-0555-03

## Interference Suppression in Partial Discharge Experiments of Current Transformer

SUN Jiang-ping, ZHAO Gang, FU Zheng-cai, SUN Wei, CHEN Jian

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The reliability of a current transformer affects the safe operation of a power grid, which highly depends on its dielectric performance. Partial discharge detection is a very important method for the evaluation of dielectric performance of a current transformer. In this paper, the pulse current method for detecting partial discharge (PD) is analyzed, and the PD test circuit was discussed. Because PD detection is easily disturbed, different kinds of interference signals are detected for investigating their characteristics, finding out the sources of the signals, and hence taking special measures to suppress the interference signals.

**Key words:** current transformer; partial discharge measurement; pulse current method; interference suppression

## 0 引言

近些年来, 高压电流互感器的爆炸事故时有发生, 严重威胁电力系统的安全运行。据统计高压电气设备所发生的事故中 70% 左右是由于绝缘老化和损坏而造成的<sup>[1]</sup>, 不论是制造部门还是运行部门, 都把局部放电试验作为电流互感器绝缘试验的重要项目之一。视在放电量是局部放电水平重要的表征参数, 同时应结合放电图谱来综合进行分析<sup>[2]</sup>, 判断电流互感器的绝缘状况。局部放电信号非常微弱(几十毫伏左右), 很容易受试验现场干扰的影响, 所以如何从现场的强干扰环境中提取出局部放电信号是局部放电检测的难点和重点。笔者应用 JF-2002 型局部放电检测仪, 对高压电流互感器进行局部放电检测, 得到现场干扰信号的图谱, 通过对干扰图谱特点的分析, 提取出干扰信号的典型特征。干扰图谱为高

压电气设备的局部放电试验、干扰的识别与分类以及干扰的抑制提供了重要的参考依据。

## 1 电流互感器的绝缘结构和放电类型

### 1.1 电流互感器内部绝缘结构

110 kV 及以上电压等级的电流互感器大多采用油浸纸电容型绝缘结构<sup>[3]</sup>, 根据二次绕组放置位置分为正立式与倒立式两种, 正立式二次绕组置于下部的油箱中, 倒立式置于顶部油箱中。试验中所用的试品 LB6-110 型电流互感器为单相、正立式、油纸电容型绝缘结构的电流互感器, 由器身、油箱、瓷套、金属膨胀器等组成。油浸纸电容芯是电容式电流互感器的主绝缘, 电容芯由若干电容屏串联组成, 电容屏由铝箔制成, 电容屏间绝缘由电缆纸连续缠绕制成, 一次绕组弯成“U”字形, 主绝缘全部包在一次绕组上。二次绕组由测量级和保护级组成, 分别套装在一次绕组上, 整个器身用一个托架支撑并固定在油箱内。

收稿日期: 2007-12-05; 修回日期: 2008-06-27

作者简介: 孙江平(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压现场试验技术。

1.2 电流互感器内部放电类型

运行中的电流互感器在高压电场作用下,由于油纸绝缘浸渍不良、受潮、油中存在气泡等,会产生局部放电。其内部放电的类型有:一次绕组外绝缘端部的沿面放电、油纸绝缘内部的气隙放电、电容末屏接地不良引起悬浮电位放电、一次绕组与其出线端子之间的连接松动引起的尖端放电等。

2 试验方法

2.1 局部放电的检测方法

用于高压电气设备局部放电检测的方法有脉冲电流法、超声波检测法、超高频检测法、化学检测法等<sup>[4]</sup>,笔者采用脉冲电流法对电流互感器进行局部放电检测。

脉冲电流法的原理:当试品发生局部放电时,试品两端产生一个瞬时的电压变化,此时如果经过一个耦合电容将这个电压耦合到一个检测阻抗上,回路中就会产生脉冲电流,将脉冲电流流经检测阻抗产生的脉冲电压予以采集、放大、滤波等处理,就可以测定表征局部放电的视在放电量等基本参量。用于脉冲电流检测的试验回路有串联试验回路、并联试验回路和平衡试验回路,其中最常用的是并联试验回路(即检测阻抗与试品相并联)。用于电流互感器局部放电检测的并联试验回路见图1,其中, $u$ 为施加的试验电压, $C$ 为铁心, $F$ 为外壳, $P_1$ 、 $P_2$ 为电流互感器一次绕组端子, $S_1$ 、 $S_2$ 为电流互感器二次绕组端子。

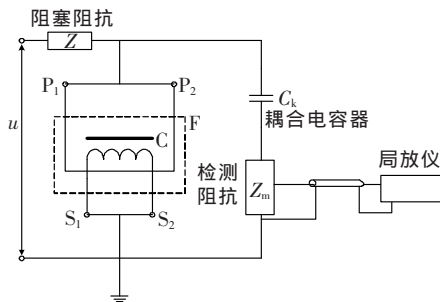


图1 并联检测回路

并联法试验回路的特点是检测阻抗接在耦合电容器的接地侧,适用于有一端接地的试品(如电力变压器、电流互感器等)。试品和高压电源间的阻塞阻抗 $Z$ ,用以衰减来自高压电源的干扰,阻塞阻抗还阻止试品的局部放电脉冲信号经电源侧阻抗旁路,从而可以提高检测的灵敏度。

2.2 试验回路

试验中电流互感器局部放电检测的试验回路见图2,其中, $R$ 为保护电阻,5 k $\Omega$ ;  $C_x$ 为电流互感器等效电容;  $C_k$ 为耦合电容器,电容值为400 pF;  $G$ 为校正脉冲发生器;  $C_0$ 为注入电容;  $Z_m$ 为RLC型检测阻抗,调谐电容范围为100~400~1 500 pF;  $M$ 为JF-

2002型局部放电检测仪。被测电流互感器为LB6-110型电流互感器,其参数见表1, LB6-110型电流互感器有5个二次绕组端子,试验中把二次绕组端子全部短接并接地,一次绕组端子短接再接到试验电源的高压端。试验电源由500 kV试验变压器提供,其视在放电量 $<5$  pC,表2列出了其参数。试验回路中的电源滤波器为低通滤波器,为更好地抑制来自电源侧的干扰,通常设计成 $\pi$ 型滤波器。

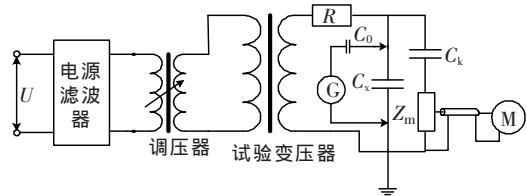


图2 电流互感器局部放电检测试验回路

表1 LB6-110型电流互感器参数

线路电压/kV	额定电流比	准确度等级	相数	额定频率/Hz
110	600/5	10P/10P/10P/0.5/0.2	单相	50

表2 YDTJW-250/2×250型试验变压器额定参数

容量/kV·A	原边电压/kV	原边电流/A	副边电压/kV	副边电流/A
250	0.6	417	500	0.5

2.3 仪器频带的选择

试验中所用的JF-2002型局部放电检测仪的主要技术指标:放大器频带为低端-10、20、40 kHz,高端-80、200、300 kHz;两个时间窗,窗宽可在15°~150°的范围内调节。局部放电信号功率谱密度的分析表明,典型窄脉冲局部放电信号的能量主要集中在 $\leq 10$  MHz频带范围内<sup>[5]</sup>。试验中测量回路所用的检测频带为40~300 kHz,因为局部放电信号中的高频部分在设备中传播时大量衰减,检测阻抗能测得的基本上为其低频部分,同时这样还可以避开无线电干扰以及电力系统载波通讯干扰(频率在500 kHz以上)<sup>[6]</sup>,又能够确保测量系统能抓住局部放电信号的主要部分的能量,使测量结果能真实地反映放电本来的面目。

2.4 视在放电量的校准

视在放电量的校准是指在试品不带电的条件下,确定整个试验回路的刻度因数 $K$ ,参见图2。刻度因数受回路 $C_x$ 、 $C_k$ 、 $C_z$ (高压对地杂散电容)及 $Z_m$ 等元件参数的影响。因此,试验回路每改变一次(包括更换试品,更换耦合电容器,改变试验回路接线等)必须重新进行校准,来确定试验回路新的刻度因数。

对校正脉冲发生器所串联的注入电容 $C_0$ 的要求

$$\begin{cases} C_0 \geq 10 \text{ pF} \\ C_0 \leq 0.1 \times (C_x + \frac{C_k \times C_m}{C_k + C_m}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $C_m$ 为与检测阻抗相并联的电容, $C_0$ 的最小值因受校正脉冲发生器连线杂散电容的影响,其最

小值应不小于 10 pF,  $C_0$  的最大值受校正脉冲发生器的内阻的限制, 其值应不大于 100 pF<sup>[7]</sup>。试验中所用的校正脉冲发生器为 JZF-9 型校正脉冲发生器, 表 3 列出了其参数。

表 3 JZF-9 型校正脉冲发生器的技术指标

输出电荷量/pC	上升时间/ $\mu$ s	重复频率/kHz	注入电容/pF
0.5、5、50、500	< 0.1	1.2	10、100

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 干扰信号图谱的分析

由于实验室没有屏蔽, 各种干扰信号通过电源进入测量系统。图 3~6 给出了电流互感器在不加电压时用 JF-2002 型局部放电检测仪测得的干扰信号的图谱, 图 7 为电流互感器施加 20 kV 电压时发生尖端电晕放电的图谱, 具体分析如下:

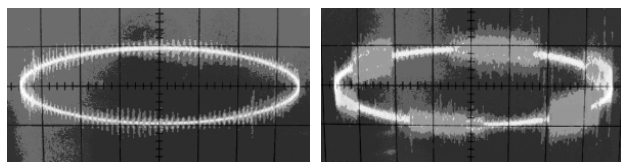


图 3 异步电动机引起的干扰图谱 图 4 变频电源引起的干扰图谱

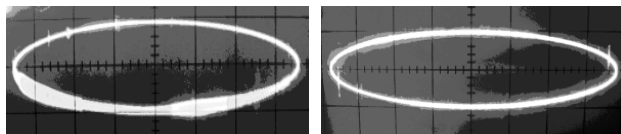


图 5 高频设备引起的干扰图谱 图 6 相位固定的干扰图谱

##### (1) 旋转异步电机引起的干扰

干扰脉冲的幅值相差不大, 占满整个椭圆基线, 并且干扰脉冲会在椭圆基线上沿逆时针方向做定向等速旋转, 这种干扰是由距离实验室 15 m 的铁心制作车间里切割硅钢片用的异步电动机引起的, 电动机工作时, 干扰信号经过电源进入测量系统, 其图谱见图 3。

##### (2) 变频电源引起的干扰

干扰脉冲的幅值与试验电压无关, 电压降为零时, 干扰脉冲依然存在。这种干扰是由距离实验室 40 m 的一个环氧桶制作车间里的 FW-4000 型缠绕机引起的, 缠绕机的主轴电动机是由 SJ300-150HFE 型变频电源供电, 缠绕机在工作时, 干扰信号经过电源进入测量系统, 干扰信号的图谱见图 4。

##### (3) 高频工业设备引起的干扰

干扰信号在椭圆基线上连续发生, 但仅在半波内出现, 这种干扰是由现场的感应加热设备等引起的, 其图谱见图 5。

##### (4) 相位固定的干扰

信号特点为干扰脉冲出现的相位固定, 这种干扰是由供电网络中存在的可控硅整流器件引起的, 可以通过时域开窗的办法来避开相位固定的干扰,

其图谱见图 6。

##### (5) 尖端为高压端的电晕放电

当在电流互感器上施加 20 kV 左右的电压时, 发生尖端电晕放电, 其图谱见图 7。当电压再升高后, 脉冲数量增多, 但幅值不变, 等间隔等高度的脉冲对称分布在峰值的两侧。从图谱中可以看出, 放电脉冲都严格地叠加于正弦波的负峰处, 说明尖端为高压端, 经检查发现电流互感器与试验变压器之间的高压引线连接不可靠有尖端, 把尖端消除后, 放电消失。

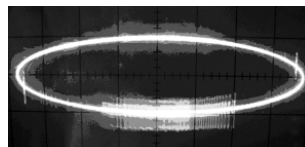


图 7 尖端电晕放电的干扰图谱

#### 3.2 干扰信号的抑制

从 3.1 节中干扰信号的分析可知, 实验室进行局部放电检测时, 应根据放电图谱的特点, 判断出干扰信号的来源, 采取相应措施来抑制干扰, 具体措施如下:

(1) 加装电源滤波器, 用于滤除异步电机、变频电源等引起的干扰, 试验中所用的电源滤波器的技术参数见表 4。

表 4 LBQ-250/0.38 型电源滤波器的技术参数

额定电压/kV	额定电流/A	工作频率/Hz	衰减特性
0.38	417	50	40~100 kHz 40 dB 100 kHz~1 MHz 60 dB

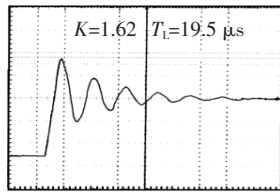
(2) 时域开窗, 用于避开可控硅整流器件等引起的相位固定的干扰。

(3) 把试品周围的相关引线可靠接地, 把试区周围的金属栅栏和停电设备推至试区 4 m 外并可靠接地, 避免悬浮电位放电的发生。

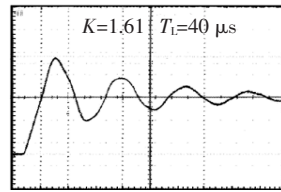
(4) 对于高压带电端要加装均压环, 高压连线要用无晕导电杆或直径 10 cm 左右的铝筒, 从而防止在加压试验时被测电流互感器的高压端发生尖端电晕放电。

#### 3.3 试验结果分析

干扰抑制前, 对 LB6-110 型电流互感器进行局部放电试验, 在电流互感器的两端施加 80 kV 的测量电压, 测得视在放电量为 600 pC, 严重超标, 其图谱见图 8。通过与 3.1 节中干扰图谱的对比分析可以看出, 试验测到的信号上叠加了变频电源干扰和电晕放电干扰。采取 3.2 节介绍的干扰抑制措施后, 干扰信号基本上被消除。干扰抑制后, 再对电流互感器进行局部放电检测, 预加电压 131 kV, 施加时间 >10 s, 测量电压 80 kV, 施加时间 >60 s, 测得视在放电量为 8 pC, 小于 10 pC, 满足电流互感器局部放电试验要求, 电流互感器局部放电图谱见图 9。 (下转第 561 页)



(a)550 kV 63 kA 整极



(b)800 kV 50 kA 1/2 极

图 11 550 kV 63 kA 整极、800 kV 50 kA 1/2 极 SF6 75% 的低压模拟图

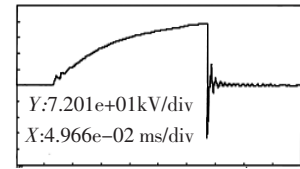
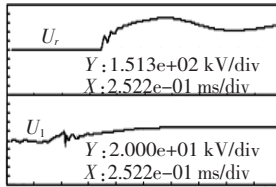
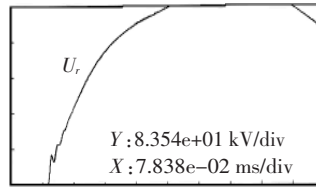


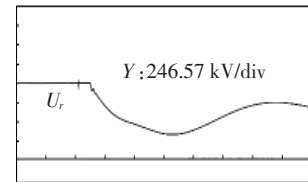
图 12 252 kV 50 kA SF6 90% 试品峰值击穿示波图



(a)550 kV 50 kA SF6 75%



(b)800 kV 50 kA SF6 90%



(c)1 100 kV 50 kA SF6 90%

图 13 550 kV 50 kA SF6 75%、800 kV 50 kA SF6 90%、1 100 kV 50 kA SF6 90% 正常开断 TRV 示波图

### 3 结语

人工链路的目的是模拟真实线路,它需要能够重现断路器与故障点间的输电线距离,并在断路器断口产生的 TRV 伏秒特性符合标准要求。而作为几种常规的人工链路中,人工数学链路具有与真实线路较好的等价性。主要有以下特点:

(1)数学链可用较少的链数(元件设备)即可获得满意的链路侧 TRV。

(2)开断电流的大部分电流流经电抗  $L_1$ ,流经其他支路的电流很小,因而使得除了  $L_1$  之外的电感线圈动稳定电流可设计相对小一些。

(3)数学链的三角波形线性度比较好,能够具有与真实线路较好的等价性,虽然 TRV 波形略有三次谐波,起始部分略有时延,但仍然不会影响起始 TRV 三角波的主要参数。

(4)数学链路的参数调节方便,调节细度小,更

能满足标准的要求。

(5)数学链路整体结构设计为可移动式,使其与试品接线灵活、方便,同时能够节约试验室的绝缘空间。

基于人工数学链路的特性及其优点使得人工数学链路能够更好的应用到超高压以及特高压的近区故障试验中。

### 参考文献:

- [1] 王仁甫. 阻尼的  $\pi$  型人工链路的特性及其应用 [J]. 高压电器, 1984, 20(1): 94.
- [2] 金立湘. 近区故障问题[J]. 高压电器, 1980, 16(5): 74.
- [3] 金立湘. 近区故障合成试验的一些问题[J]. 高压电器, 1983, 19(1): 88.
- [4] 曹荣江. 关于“近区故障”的计算方法[J]. 高压电器, 1979, 15(4): 64.
- [5] VAN DER LINDEN W A, VAN DER SLUIS L. A New Artificial Line for Testing High-voltage Circuit Breakers [J]. IEE PAS-102, 1983(4): 797-803.

(上接第 557 页)

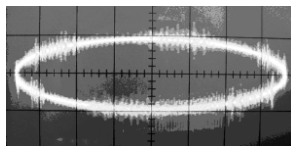


图 8 干扰抑制前的图谱

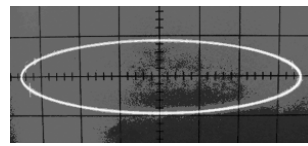


图 9 干扰抑制后电流互感器的图谱

### 4 结论

(1)通过对电流互感器局部放电的试验分析,得到了典型干扰的图谱,干扰图谱为试验人员进行局部放电试验干扰信号的识别与抑制,提供了有用的参考。

(2)通过电源干扰信号的抑制和隔离、试区内干扰源的消除和高压引线的加粗处理,可满足 110 kV 及以上电压等级电流互感器的出厂局部放电试验要求。

### 参考文献:

- [1] 肖登明. 电力设备在线监测与故障诊断[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005.
- [2] PATSCH R, BERTON F, JUNG J. The Use of PSA for Fault Detection and Characterization in Electrical Apparatus [C]// IEEE the 6th Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000: 294-299.
- [3] 郑益民. 两起 220 kV 电流互感器绝缘缺陷故障分析与防范措施[J]. 变压器, 1999, 36(9): 35-37.
- [4] 邱昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及其检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [5] SCHWARZ R, MUHR M, JAUFER S. Partial Discharge Impulse Behaviour in Different Insulating Media [C]// IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006: 306-309.
- [6] 王晓宁, 王凤学, 朱德恒, 等. 局部放电现场监测信号中干扰的分析与抑制[J]. 高电压技术, 2002, 28(1): 3-5.
- [7] GB 7354-1987. 局部放电测量[S].