

# 电力设备介质损耗测量方法研究

曾 伟<sup>1</sup>, 李建国<sup>2</sup>

(1. 达州电业局, 四川 达州 635000; 2. 四川电力建设二公司, 四川 成都 610051)

**摘 要:**对电容型设备绝缘在线检测技术进行了综述,并对通过硬件和软件实现的几种检测方法进行了比较和分析,指出了各种方法的优缺点及适用范围。

**关键词:**绝缘在线检测;介质损耗;正切

**Abstract:** The different online insulation monitoring techniques of capacitive equipment are overviewed. And several monitoring methods realized by hardware and software technology are compared and analyzed. At the same time, the virtues and shortcomings of every method are given as well as the scope of its application.

**Key words:** online insulation monitoring; dielectric loss; tangent

**中图分类号:** TM855 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0062-03

电容型设备绝缘在线检测是电力系统中开展最早的项目之一,国外在这方面的研究始于 20 世纪 60 年代初,国内也于同时期展开了早期研究工作。电容型设备绝缘在线检测方法是由离线测试方法演变而来的,早期普遍采用的带电测量介质损耗因数的西林电桥法便采用了传统停电预防性试验中测量介质损耗因数的 QS-1 型高压西林电桥的测量原理。由于这种电桥法必须另配耐压性更高的高压标准电容器,并对原有电桥进行改进等原因,难以在现场推广。随着研究的进一步深入,电容型设备绝缘在线检测技术已发展到了一个新的水平。目前,电容型设备的介质损耗因数在线检测方法基本上采用数字化的测量方法,所不同的是如何获取数字化的测量信号以及采用何种信号处理方法。由于介质损耗角  $\delta$  就是流经试品的电流和运行电压的向量之间夹角的余角,如果能测量或计算出电流信号和电压信号之间的相位差,也就得到设备的介质损耗角正切,电流和电压两个参量都可以通过传感器在运行现场测得,因此目前电容型设备的在线检测都采用了这个原理。方框图见图 1。

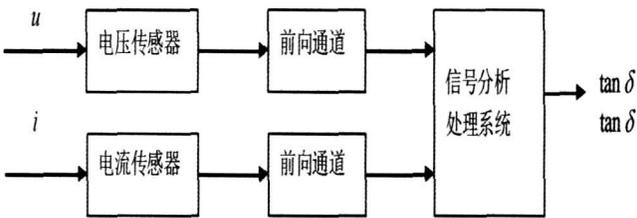


图 1  $\tan\delta$  在线监测原理图

由于对得到的数字信号进行处理和分析等方面

的不同形成了两大分支:主要靠“硬件”实现的检测方法和主要靠“软件”实现的检测方法。

## 1 靠“硬件”实现的检测方法

### 1.1 过零点时差比较法

过零点时差比较法是一种将相位测量变为时间测量的方法。在时域中,通过过零比较电路和脉冲计数技术来测量电流、电压这两个波形的由负变正过零点的时间差  $\Delta T$ ,再换算为电流超前电压的相位差  $\Phi$ ,进而得到介质损耗角  $\delta$ 。已知正弦波的周期  $T$ ,测得过零点时差  $\Delta T$ 后,得到

$$\begin{cases} \Phi = 2\pi(\Delta T/T) \\ \delta = \pi/2 - 2\pi(\Delta T/T) \end{cases}$$

这种方法具有测量分辨率高、线性好、易数学化的优点,但对过零点测量的要求较高,所以波形畸变对测量精度的影响很大。变电站中的各种干扰相当严重,并且在线检测大多数在露天现场进行,所以以百分之零点零几的误差稳定地检测过零点有很大的难度,限制了这种方法的可行性。

### 1.2 过零点电压比较法

过零点电压比较法是测量两个正弦波在过零点附近的电压差,并由电压差来计算相位差的方法。该方法在测量正弦波的相位差时,不用测量和计算两个正弦波过零点的时差,而采用在过零点附近测量两个正弦波电压差值的方法。该方法具有电路简单、对过

零点的定位要求不高的特点,有较强的抗干扰能力。但该方法也存在一些不足,如很难保持两个被测信号的幅值相等,波形畸变对测量有较大的影响等。

## 2 靠“软件”实现的检测方法

### 2.1 正弦波参数法

正弦波参数法是假设被测量的电压电流信号都是理想的工频正弦信号,因而采样得到的若干信号点必定符合三角函数关系,进而可以建立方程来推导出介质损耗角正切来。但是在现场测得的信号中,除了工频基波分量还包含有许多高频谐波分量,并不符合该方法的基本假设,因而该方法在实际应用中可能会受到一定的限制。

### 2.2 谐波分析法

在介质损耗因数的实际测量中,现场有各种干扰,其中电网运行中的高次谐波分量对介质损耗因数的测量影响较大。谐波分析法就是利用离散傅立叶变换对试品的电压电流信号进行谐波分析,得出基波,再求出介质损耗因数。该方法利用了三角函数的正交性,使得傅立叶变换求解电压电流的基波参数时可以有效地克服各种干扰,尤其是谐波的干扰和零漂、温漂等,因此可以达到比较高的稳定性和测量精度。但该方法容易受到频率波动的影响,并对 A/D 转换器的分辨率有较高的要求;而且,如果不能满足整周期采样,不同次谐波之间的正交性无法满足,同时离散谱线也不能对应实际各次谐波频率,将出现频谱泄漏。

### 2.3 相关法

依据两个同频信号的互相关函数是两个信号的幅值和相位差的函数,通过计算信号幅值和互相关函数就可求得相位差。当信号持续时间比较长,采样点较多时,如果电压与电流信号中包含随机噪声,那么由于可以认为电压中的噪声与电流中的噪声、噪声与信号之间是不相关的,因此可抑制噪声。但事实上,信号持续时间和采样点数并不能满足上述条件,而且自相关函数丝毫不能抑制噪声,因此相关法对噪声的抑制能力是很有限的。此外,相关法对滤波器的特性要求很高,且也受频率波动的影响。

### 2.4 正弦拟合法

用一个由各次谐波叠加而成的函数,依据均方最小原则来拟合实际信号,从而求得幅值、频率、初始相

位等未知参数,再求取相位差。该方法基本不受频率波动、谐波、直流漂移的影响,但运算量大,受随机干扰的影响也较大。

## 3 应用简介

用硬件法对电容型设备绝缘的介质损耗因数进行在线检测时,易受外界干扰的影响,会降低整个测试系统的稳定性和测量精度;而要使测量的性能有所提高,又将增加硬件电路设计的难度和复杂性。鉴于硬件法的这些缺点,介质损耗因数在线检测方法逐渐向着软件化的方向发展。软件法简化了硬件电路,而且还可解决一些硬件电路所不能实现的功能,如高性能的数字滤波器的设计等。另外,软件法还具有很大程度上的灵活性,算法只需修改程序即可,因此,基于软件法的在线检测方法有着较好的应用前景。软件法的典型代表是谐波分析法。谐波分析法充分应用数字化测量方法,克服了传统模拟测量方法抗干扰能力差的缺点,提高了测量精度及测量结果的稳定性。

国外目前对电容型设备介质损耗因数在线检测技术的研究主要集中在对检测方法的改善上。如澳大利亚研制的用于电流互感器及变压器套管介质损耗角在线检测装置,是利用脉冲计数法进行测试的。该装置采用了高速计数器对被测信号与标准正弦信号之间的相位差进行测量,并实时显示数字化测量结果,测量分辨率达到了  $0.1 \text{ mrad}$  已得到实际应用;南非的研究人员采用比较的方法,以介质损耗角很小的高压电容器上的电压作为标准电压,将被试品上的电流转换成电压后与此“标准”电压信号进行相位比较,从而得出电力设备的介质损耗因数。如果用作标准电压信号的高压电容器本身具有一定的介质损耗角,则测到的设备的介质损耗因数是相对于此标准电容器的“相对”值。当采用介质损耗角近似为零的高压气体电容器充当标准电容时,则如同停电预防性试验时用的西林电桥法一样,可认为测得的是设备介质损耗角正切值的“绝对”值。所研制的这套系统也已被用于测试套管和电流互感器的介质损耗因数相对值。日本用相位比较法对电力电缆在线检测的方法,从原理上同样也可以适用于电容型试品的在线检测。

## 4 结 语

在线检测技术发展到现在,已经在很多方面弥补

了定期预防性试验的不足,但是同时也还存在一些问题;如谐波分析法的软件处理误差问题。对设备绝缘进行在线检测的最终目的是为了及时、准确地掌握电力系统运行中设备的绝缘状况,因此仅仅通过在线检测获得设备的绝缘参数的结果是远远不够的,还要对这些结果进行综合性的分析与诊断。但是,目前的在线检测方法仍往往局限于将设备的绝缘参数与单一、静态标准进行比较,没有使在线检测的优势得到充分发挥。对于对比分析同一设备高压下在线测量值与低压下停电预防性测量值的差距及影响在线检测值的因素及程度也是目前研究工作中一大问题。另外,应用于介质损耗因数分析的谐波分析法因现场各种原因而存在频谱泄漏的问题,那么如何在软件上进行改进,提高电流传感器稳定性和测量精度,采用数字信号传输,提高抗干扰能力,从而消除由于频谱泄漏

而带来的误差也是目前思考解决的课题之一。

### 参考文献

- [1] 朱德恒. 严璋高压绝缘 [M]. 北京:清华大学出版社, 1992.
- [2] 严璋. 电气绝缘在线检测技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [3] 王乃庆. 绝缘在线监测技术的实用性、经济性和可靠性 [J]. 电网技术, 1995, 19(11): 54—56, 60.
- [4] 成永红. 电力设备绝缘检测与诊断 [M]. 中国电力出版社. 2001: 65—79.
- [5] 蔡国雄. 介质损耗测量的过零点电压比较法 [J]. 电网技术, 1995, 19(10): 1—5.

(收稿日期: 2009—04—27)

(上接第 15 页)

通过前面的理论分析以及仿真验证,可以得到以下结论。

(1) 分析了换流母线电压对换相失败的影响。换流母线电压变化是导致换相失败的主要原因,它主要从两方面影响换相过程:电压幅值和电压过零点相位移,得到了换相失败发生时的临界电压降。当换相电压降低的程度超过这个值就会引发换相失败。

(2) 推导得出了换流母线电压间相互影响的表达式。并以此为基础推导得到了换相失败时的临界电气距离,它与系统自身的强度、故障大小以及与其它系统间的电气联系强度等均均有关系。

(3) 最后,通过仿真验证了根据换流母线电压相互影响关系式计算所得的换流母线电压与实际电压误差是较小的,且故障越小,非故障系统离故障系统电气距离越远计算精度越高。在工程上具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 林凌霄,张尧,钟庆,宗秀红. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40—46.
- [2] 王晶芳,王智冬,李新年,胡涛,蒋卫平,王明新,向孟奇,李焕明. 含特高压直流的多馈入交直流系统动态特性仿真 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 97—102.
- [3] 林伟芳,汤涌,卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7—12.
- [4] 杨卫东,徐政,韩祯祥. 多馈入交直流电力系统研究中的

相关问题 [J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13—17.

- [5] 凌晓波,刘蓓,王冲. 高压直流输电系统多落点及研究现状 [J]. 上海电力, 2008, (1): 72—74.
- [6] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京:科学出版社, 1998.
- [7] 浙江大学直流输电教研组. 直流输电 [M]. 北京:电力工业出版社, 1982.
- [8] Lidong Zhang, Lars Dofnas. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems [C]. Proceedings Power Conference 2002, 1, 51—56.
- [9] 孙志媛,梁小冰,孙艳. 基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统仿真研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(10): 259—298.
- [10] Changchun Zhou, Zheng Xu. Study on commutation failure of multi—infed HVDC system [C]. International Conference on Power System Technology, 2002, 2462—2466.
- [11] 诸骏伟. 电力系统分析 [M]. 北京:水利电力出版社, 1995.

### 作者简介:

肖俊 (1983—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

李兴源 (1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作;

杨小兵 (1981—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009—05—10)