

环保气体绝缘电压互感器振动性能研究

李 磊 郇正军 刘芳芳 袁 刚
山东泰开互感器有限公司 山东泰安 271000

摘 要: 气体绝缘开关设备因其运行可靠性高而得到广泛应用。为了保证其安全运行,有必要研究内部潜在故障的预测方法。目前检测放电故障的方法有很多,但在GIS的实际运行中,除了放电故障,机械故障也是造成事故的一大原因。GIS的异常振动对设备危害很大,会损坏绝缘子和绝缘柱,影响外壳接地点的牢固性。长期振动可能会使螺栓松动,引起气体泄漏、压降和绝缘事故等。因此,加强地理信息系统中机械故障的检测是保证地理信息系统安全运行的重要手段。针对这种情况,国外学者认为通过测量金属壳体上的振动来检测异常接触等机械故障是可行的。

关键词: GIS; 机械性故障; GVTS; GIS用电压互感器振动特性

Study on the vibration performance of environmental protection gas insulating voltage transformer

Lei Li, Zhengjun Huan, Fangfang Liu, Gang Yuan
Shandong Taikai transformer Co., Ltd. Shandong Tai'an 271000

Abstract: Gas insulated switchgear has been widely used because of its high operational reliability. To ensure its safe operation, it is necessary to study the prediction methods of internal potential failures. At present, there are many methods to detect discharge faults, but in the actual operation of GIS, in addition to discharge faults, mechanical faults are also a major cause of accidents. Abnormal vibration of GIS is very harmful to the equipment, which can damage the insulators and insulation columns and affect the firmness of the shell contact site. Long-term vibration may loosen the bolts, causing gas leakage, pressure drop, and insulation accidents. Therefore, strengthening the detection of mechanical faults in the geographic information system is an important means to ensure the safe operation of the geographic information system. Given this situation, foreign scholars believe that it is feasible to detect mechanical faults such as abnormal contact by measuring the vibration of the metal shell.

Keywords: GIS; mechanical failure; GVTS; Vibration characteristics of voltage transformer used in GIS

GIS具有优良的性能,被广泛应用于电力系统,在实际运行当中除了放电性故障所引起的事故外,也存在大量由机械故障所引起的事故,现行的检测手段多针对放电性故障,对机械性故障的检测与诊断较少。电压互感器(PV)是GIS设备中易于产生机械振动的设备,文中利用自行研制的GIS振动测试系统(GVTS),对某110kV变电站GIS的电压互感器处进行了检测,并对测量结果进行了对比分析。

一、概述

环保气体绝缘电容式电压互感器(GCVT)是一种全新结构的绿色、环保、无油化输变电设备。随着电力系统的发展,输变电技术不断进步,具有绿色、环保、难

燃、防爆等特征的无油化输变电设备成为电力系统需求发展的趋势。利用环保气体介质优良的电气绝缘性能和理化特性,开关、变压器、电流互感器等很多输变电一次设备已经实现了无油化的目标,而电容式电压互感器(CVT)虽然在电力系统应用已五十年,几乎全部还在采用油浸式绝缘结构。公司应用环保气体介质研制CVT的工作已进行了十多年,进行了大量的基础研究工作,技术难度主要在电容分压器的介质上,近年在耐压、局放和电容随电压变化方面有了技术突破。公司研制成功了110kV和220kV系列GCVT,整个CVT(包括电容分压器和电磁单元)采用环保气体作为主绝缘介质没有任何液体介质,同时具有难燃、防爆的特点,该两项新产品已

通过技术鉴定，其设计获得了国家实用新型专利。

二、环保气体绝缘电容式电压互感器 (GCVT) 关键技术问题

环保气体绝缘电容式电压互感器 (GCVT) 主要由电容分压器和电磁单元组成，电容分压器将一次电压分压，同时为电磁单元提供输入电压，产品内部采用环保气体作为主绝缘介质，符合电网绿色高质量发展对电力设备的使用需求，该结构类型电压互感器具有绿色、环保、绝缘强度高、不会与系统发生铁磁谐振的需求。在产品研发过程中，解决了影响产品性能的关键技术问题。

1. 局部放电性能

局部放电性能影响产品的寿命，是绝缘结构设计的主要依据。我们首先设计了GCVT用电容分压器的试验模型，进行了试验研究。研究的结果表明GCVT的局部放电强度除与工作电场强度选取有关外，还与许多因素有关，其中与气体压力选取、电场分布设计关系最为紧密。对电容分压器来讲，局部放电可以发生在电容元件极间绝缘层中，即均匀电场部分所包含的气隙中，这是由于气体介质的介电常数小于极间固体介质的介电常数；也可以发生在极板的边缘及附近处，这是由于极板边缘形成的是极不均匀电场。当电容元件用绝缘紧固件组成器身时，紧固件的沿面和若干元件迭装形成的纵向沿面均为非常复杂的不均匀电场。这些不同位置的不同的电场分布，在选取设计值时应协调考虑，可以靠电场取值的大小来协调，也可用选择不同介电常数的绝缘材料来协调，合理的电场设计最好是根据具体的绝缘结构通过计算和试验的方法来确定。气体压力的大小与前述各处电场变化的关系成正比，即气压增加时各处的局部放电的起始电压和熄灭电压随之提高，反之，当气压降低时起始电压和熄灭电压也随之降低，试验结果表明，根据不同的需要，在工作环境温度范围内，气体的压力在0.3—0.6MPa范围选取对产品的性能保证和运行维护都是合理的。试验结果还表明，在电容分压器心子、器身结构上采取均压措施和对电极端部电场采取改善措施后，能改善电容分压器的电场分布，提高局部放电的起始和熄灭电压。对于电磁单元来讲，可以直接采用气体绝缘电磁式电压互感器的技术来保证局部放电性能，但气体的压力选取最好与电容分压器保持一致，以便GCVT整体绝缘系统的协调一致，同时也为产品制造和运行维护带来了方便。为了满足电力系统对降低CVT产品二次感应过电压方面的要求，可在中压变压器二次绕组结构上增设接地屏蔽。

2. 电容值的稳定性

CVT在电力系统中用于电压测量、保护、通信等方面，在电力系统一次侧和二次侧之间承担变送器的作用，这就要求它的电压变比或者称为传递函数具有很高的稳定性，电容分压器的分压比是传递关系的主要组成部分。电容分压器的分压比又是由电容值决定的，因此电容值的稳定性至关重要。电容值的稳定性取决于介质性能的稳定性和绝缘结构的稳定性，在传统油浸式CVT中，对温度影响电容值和频率影响容抗值的特性研究已取得了满意的结果，依此在设计和制造中采取的措施证明是有效的。但是，在此前研制气体绝缘电容器的工作中发现，电容器的电容值随着施加电压的不同在变化，电容值在施加电压时变大，随电压变化也有变化，变化规律为电压高时电容值变大。如前面所述，这种电容器是不能用于电容分压器的，故对此进行了深入研究。研究的结果发现，引起这种电容值不稳定的原因是由于其绝缘结构的机械性能不稳定所致，在电场的作用下，电容分压器极间的几何尺寸随电场在变化，显而易见，其电容量就随电场在变化。解决的办法是保证绝缘结构的稳定性。

三、电压互感器振动分析

由于电压互感器 (PT) 的电磁单元中含有中间变压器，其内部存在一定的漏磁场，在正常运行时，通有交变电流的绕组线圈将因受到电磁力的作用而产生振动，将绕组线圈的轴向结构简化为质量—弹簧数学模型，见图1。在该模型中，绕组上下压板被认为是刚体，每层线饼可等效为质量模块；而绕组线饼间的绝缘垫块则可认为是弹性元件。

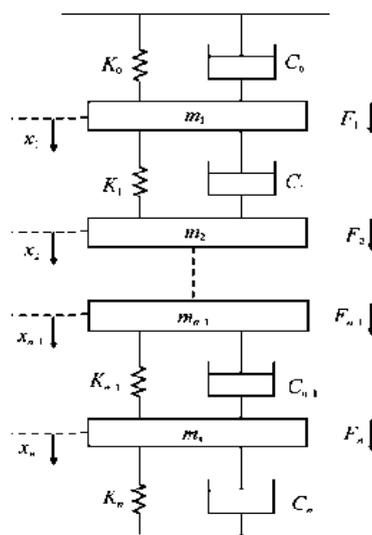


图1 绕组模型

在图1中： m_i 为第*i*层线饼质量； F_i 为第*i*层线饼所受电磁力； x_i 第*i*层线饼位移； K_i 为弹性系数； C_i 为阻尼系数，通过该模型建立并求解运动微分方程组。假设电

流为 $I=I_m \cos(\omega t + \phi_0)$ ，则电磁力为：

$$F = p I_m^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\phi_0) \right]$$

上式中， p 为电磁力系数，一般取常数，从式中可得，作用在绕组上的电动力由一个常量和一个正弦量组成。将其代入绕组轴向振动力学方程组：

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = F + Mg$$

上式中： M 为绕组质量矩阵； C 为阻尼系数矩阵； K 为弹性系数矩阵； F 为电磁力矩阵； x 为线饼位移矩阵。可得：

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = \frac{1}{2} p I_m^2 \cos(2\omega t + 2\phi_0) + (Mg + \frac{1}{2} p I_m^2)$$

忽略弹性系数 K 和阻尼系数 C 的非线性，则上式可简化为具有常系数的非其次的二阶微分方程，求解后可得简化的绕组振动加速度为：

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega_a^2 A e^{-\frac{C}{2M}t} \sin(\omega_a t + \alpha) - p I_m^2 D \sin(2\omega t + 2\phi_0 + \beta)$$

上式中： $\omega_a = \sqrt{\frac{K}{M}}$ ； A 、 D 、 α 、 β 均为同初始条件以及电压互感器自身参数相关的常数。根据上式可知，PT 绕组振动加速度由一个频率为 2 倍电源频率的稳态量和一个衰减量组成。因此，实际稳态运行的 PT 振动信号中仅包含稳态分量，即 PT 绕组振动信号以电源频率的 2 倍为振动基频。而实际运行过程当中，出线诸如接触不良、机械束缚不足等问题时，将在基频振动的基础上伴随其他振动分量，该研究的目的就在于希望通过测量分析这些特殊振动分量，进而诊断设备的状况。

四、现场测量及分析测量基准

1. 测量系统介绍

GVTDS (GIS 振动测试与诊断系统) 基于数据采集处理原理，配合上位机软件及 PC 机，对实时采集到的数据进行处理分析，人工自主选择检测点进行测量，上位机软件处理采集信息后处理，实时反应出包括振动波形、频谱等振动信息，系统主要由传感器、信号处理单元、信号采集单元及上位机软件等组成，分辨率 16bit，采样率 250kHz；输入阻抗 >100MΩ；精度优于 0.02% (满量程)，满足振动测试的要求。

2. 变电站接线及背景振动情况

某 110kV 变电站设备 GIS 主母为三相母线，现场选

取了 PT 及其与相关设备的连接处进行了测量，并在 PT 上中下部分别拾取测量点，为确保测得数据排除外界的干扰，测量前选取了 GIS 基座的振动情况作为背景对比基准，将探头空置在基座上进行测量，背景环境中也存在着一定幅度的振动：时域波形振幅在 0.17V 左右，主频 100、200、300Hz，结合之前实验室及现场数据分析，此振动主要是由电动力所引起，主要是由于周围环境的影响以及各电气设备的运行产生，同时伴有微弱的接触不良，但整体机械紧固情况相对较好。

3. PT 振动情况

PT 自身振动情况要强于与其他设备的连接处：就 PT 的自身而言，中部位置的振动最为强烈，上下相对轻微但均高于连接处；各连接处中，与避雷器的连接处振动最强烈，主频为 100Hz，幅值比较低，约为背景的 2.5 倍，无明显高频分量。对于 PT 的自身的振动情况，是由于机械制造时 PT 设备的核心部件位于整个装置的中部，上、下部的振动均为中部传导所致，所以中部的振动是最为强烈，高于上下部；PT 下部高频分量的产生考虑是由于该部位与避雷器相连，受到了避雷器振动的影响；各连接处中，与避雷器的连接处振动最强烈，由技术分析知，此振动可能主要是由于机械紧固不良所致，由于幅值并未特别强烈，所以紧固问题并不严重，现场排查并未发现有明显的松动螺丝等情况，也印证了推断。

五、结束语

总之，通过对实测数据的分析可以发现，PT 中部振动情况要强于上、下部，考虑是由于机械制造时 PT 设备的核心部件位于整个装置的中部，上、下部的振动均为中部传导，所以中部的振动是最为强烈；高频分量的产生考虑是由于该部位与其他有振动的电气设备相连，受到了其他电气设备振动的影响。由于此次测量中未发现明显振动畸变，推断 GIS 目前没有明显的机械性故障，但也发现了高频分量的产生，存在潜在性隐患，从安全运行的角度来看，建议对隐患部位进行连续观测，并在断电拆机时注意相应部位的初始状况，以便对推论进行印证，便于后续研究分析。

参考文献：

- [1] 张小红. GIS 局部放电在线检测技术分析. 2019.
- [2] 李林敏. 浅谈环保气体绝缘电压互感器性能研究. 2020.
- [3] 孙建伟. GIS 外壳异常振动危害和解决方法探讨. 2019.