

基于相对角差法的变压器套管绝缘在线监测方法

与基于相对角差法的变压器套管在线监测方法相比，本文研究的监测方法可以改善变压器套管在线监测的监测方法，在不动用变电站PT二次模拟电压信号的情况下同样实现变压器套管的在线监测。该装置在变电站进行了试点应用，效果良好，满足变电站对变压器套管在线监测想的要求，能够有效地实现对变压器套管设备的在线监测。

刘齐¹ 钟丹田^{1,2} 王茂军^{1,2} 张光明^{1,2} 原峰^{1,2} 高强^{1/1}. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 2. 辽宁东科电力有限公司



刘齐/工程师

关键词/Keywords

变压器套管·
在线监测·
相对角差法·

0 引言

在电力系统中，变压器是分配和传送电力的重要设备，而变压器套管作为变压器的重要部分，其绝缘性能的优劣直接决定了变压器的整体运行状况。在套管设备制造、运输、安装及运行的过程中会产生绝缘缺陷，尤其是经过长期运行，电气设备受到电场、热效应、机械应力、化学腐蚀以及环境条件等因素的影响，其绝缘品质将逐渐发生劣化。如果不采取措施进行维护，绝缘损伤会逐渐发展扩大，最终将设备绝缘层击穿，导致绝缘系统的破坏并引发重大事故。因此，变压器套管的绝缘状态对电力系统的安全运行是至关重要的^[1,2]。

传统的变压器套管在线监测是通过相角法对其介质损耗因数实现监测。但传统的相角法需要取用变电站内的PT（电压互感器）二次模拟电压信号，在变电站内存在安全隐患。且随着智能变电站的普及，在智能变电站中已经没有PT二次模拟电压信号，故如何在没有PT

二次模拟电压信号的情况下对变压器套管进行在线监测显得尤为重要^[3,4]。

1 传统变压器套管在线监测方法介绍

对于变压器套管来说，一般选取介质损耗因数（介质损耗正切值 $\tan\delta$ ）、电容量 C 和末屏泄漏电流 I 作为套管绝缘参数的监测量，尤其以介质损耗因数作为套管绝缘状态评价的重要参数。

传统的变压器套管在线监测是通过相角法获得其介质损耗因数量值，具有损耗的套管设备可用并联电阻、电容等值回路来简单代表。图1为介质损耗的等效模型电路图。图2为有损耗介损中电压电流矢量图。

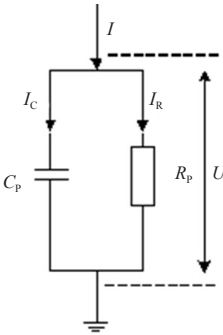


图1 介质损耗的等效模型电路

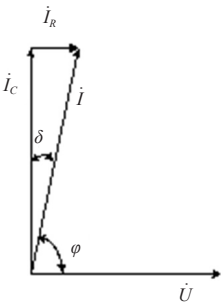


图2 有损耗介损中电压电流矢量

由图1和图2可得损耗公式:

$$P = UI \cos \varphi = UI_R = UI_C \tan \delta = U^2 \omega C_p \tan \delta \quad (1)$$

$$\tan \delta = I_R / I_C = (U / R_p) / U \omega C_p = 1 / \omega R_p C_p \quad (2)$$

从图2及式(1)中可看出:角反映介质损耗的大小,称为介质损耗角,它的正切值 $\tan \delta$ 是介质损耗因数。

良好材料和正常设备的介质损失都是很小的。处在高电压下,即无功分量很大,有功分量很小。通常变压器套管设备介质损失角都在 1° 以内,也即功率因数角在 89° 以上,此时如相角上稍有误差,可使介质损耗的误差达几倍甚至几十倍。这正是高压设备介质损耗测量的难点所在^[5]。

通过相角法进行变压器套管绝缘参数的在线监测需要将套管泄漏电流和PT二次模拟电压信号同时引入采集单元进行同步采样。在变电站中,PT二次模拟电压信号主要用于继电保护和计量装置,在线监测装置如处理不当容易造成继电保护跳闸事故,给电力系统的安全稳定运行造成隐患。随着国家电网公司智能变电站建设项目的大规模推广,智能变电站中电压互感器均为电子式互感器,已经没有模拟的PT信号用于变压器套管绝缘参数的测量。因此如何在没有PT二次模拟电压信号的情况下实现变压器套管绝缘参数的在线监测成为一个重要的课题。

2 基于相对角差法的变压器套管绝缘在线监测方法

相对角差法是在相角法的基础上提出的。本测量方法中,通过同步测量套管的泄漏电流信号,计算出套管的相对介质损耗角,并通过相对介质损耗角的变化趋势来判断套管的运行状态。因为在电力系统中,套管三相同时发生故障的可能性为小概率事件,因此假设B相为无故障相,以B相套管的泄漏电流信号为基准,规定B相套管的相对介质损耗角(即B相PT电压信号与泄漏电流信号的夹角)为 89.70° ,计算出三相套管电流信号的相对介质损耗角。

具体方法是认定B相套管的相对介质损耗角为 89.70° ,根据三相电压相位相差 120° 的关系,由得到的三相套管泄漏电流的相位角值计算出A相与C相的相对介质损耗角。由得出的三相套管泄漏

电流和相对介质损耗角,并计算出介质损耗因数 $\tan \delta$ 。长期通过此方法测量各组套管的介质损耗因数,如A相或者C相套管单相的介质损耗因数波动较大,则认为A相或者C相套管存在缺陷;若A相与C相套管介质损耗因数同时波动较大,则认为B相套管存在缺陷。向量图如图3所示。

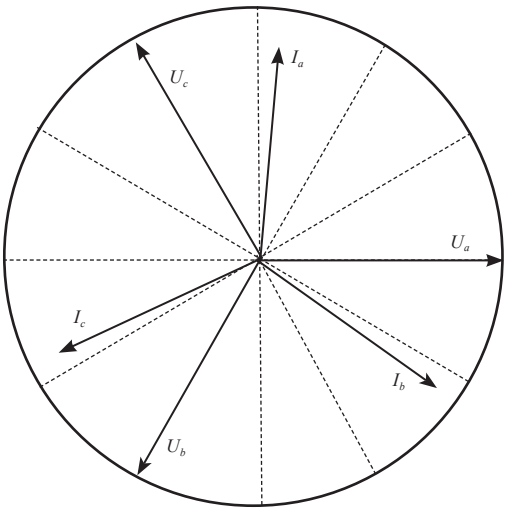


图3 电压、电流向量图

A、B、C三相相对介质损耗角度值依照以下公式计算:

$$\begin{aligned} \varphi_b &= 89.70^\circ \\ \varphi_a &= \angle I_a I_b - (120^\circ - \varphi_b) \\ \varphi_c &= 120^\circ + \varphi_b - \angle I_b I_c \end{aligned}$$

考虑到高电压等级的变电站中,现场环境的电磁干扰较大,特别是系统中的3次、5次和7次谐波的干扰,本监测方法选用谐波分析法进行信号的处理。在现场对套管的泄漏电流信号进行采样,再计算出电流信号的幅值和相位。

谐波分析法的主要思想是通过离散傅里叶变换的方法从离散采样信号中检出信号的基波成分,包括幅值和相角,同时利用三角函数的正交性,排除高次谐波和噪声的干扰,从而达到更高的准确度。

考虑信号中包含有高次谐波及噪声的情况,可将信号 $X(t)$ 表示为:

$$X(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} X_k \sin(n\omega t + \varphi_k) + N(t) \quad (3)$$

其中， $n=0$ 对应于信号的直流分量， $n=1$ 对应于信号的基波， $n=k$ 则对应于 k 次谐波。只要分别计算出电流、电压信号的相角 φ_i 、 φ_u ，即可计算出介损角：

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi = \frac{\pi}{2} - (\varphi_i - \varphi_u)$$

根据三角函数的正交性，得：

$$\begin{cases} A_k = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \sin \omega t dt = X_k \cos \varphi_k \\ B_k = \frac{2}{T} \int_0^T X(t) \cos \omega t dt = X_k \sin \varphi_k \end{cases} \quad (4)$$

由此可以计算信号各次谐波的幅值和相角：

$$\begin{cases} X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \\ \varphi_k = \arctan \frac{B}{A} \end{cases} \quad (5)$$

以上是针对时间连续信号，对于采样后的离散信号，可以将积分表示成离散形式：

$$\begin{cases} A_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \sin(\frac{2\pi}{N} kn) \\ B_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) \cos(\frac{2\pi}{N} kn) \end{cases} \quad (6)$$

其中 N 是一个周期中的采样点数，奈奎斯特定律要求采样频率：

$$f_s = \frac{1}{T_s} > 2f_{\max}$$

$f_{\max}$ 为信号中最高的频率成分，在此即为最高的谐波频率^[6,7]。

3 系统硬件设计

基于相对角差法的变压器套管在线监测系统由监测主机和传感器组成。传感器安装在高压设备旁，用来取得测量的原始信号，传感器与主机中共同组成监测系统，如图4所示。

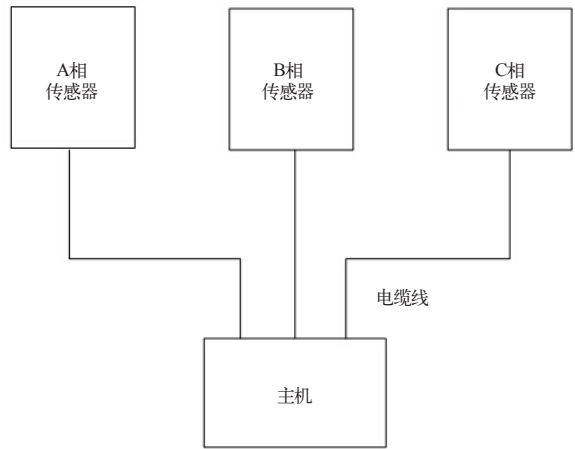


图4 传感器与监测主机布置

主机中的数据采集模块用来对信号进行调理并进行A-D转换，信号分析调度模块对数据进行初步的处理和计算，最后通过通信模块传输到后台进行显示和存储。系统原理框图如图5所示。

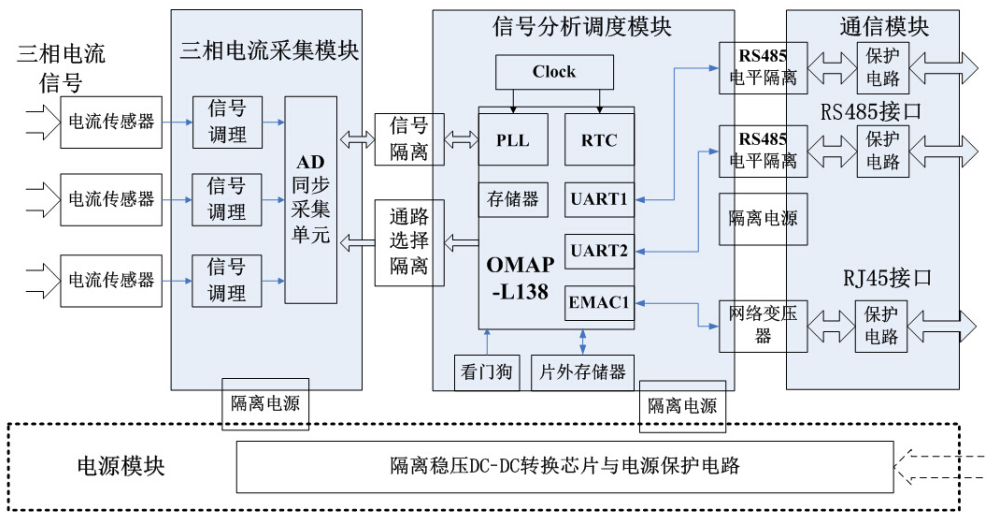


图5 系统原理框图

信号分析调度模块的核心选用TI公司OMAP-L138微处理器。OMAP-L138是TI公司推出的新一代采用C674x浮点DSP内核与ARM9内核的双核结构高速处理器，实现高达300 MHz的内核频率，性能卓越，价格低廉。片上的ARM9来处理非实时任务和外设管理，同时还可充分利用浮点DSP来支持高强度的实时处理计算。

本装置对套管设备的末屏泄漏电流信号采用电阻取样，即在末屏与地之间串联取样电阻 R_s 。为了防止电阻断线损坏或可能产生的过电压将电阻击穿而引起末屏开路，本系统采用了二三个大功率的电阻并联的方式。考虑到取样电阻上会承受过电压和过电流的冲击，采样装置对过电压及过电流采取了浪涌抑止和吸收装置等安全措施，通常浪涌保护系统由二级或三级组成，利用各种浪涌抑止器的特点，可以实现可靠保护。气体放电管一般放在线路输入端，作为一级浪涌保护器件，承受大的浪涌电流。二级保护器件采用TVS，在ps级时间范围内对浪涌电压产生响应，把瞬间过电压精确控制在一定的水平。

在监测系统没有投入运行的时候，取样电阻两端被刀开关短路接地运行。在测试系统要投入测试时，将被测试品测试回路接入测量系统后，将刀开关拉开即可进行测试工作。在测试系统安装调试或不工作的时候，合上短路接地刀开关即可将被测试品的测试回路退出运行。为确保设备、仪器和人身的安全，对电阻取样方式进行了相应的保护，具体如图6所示。

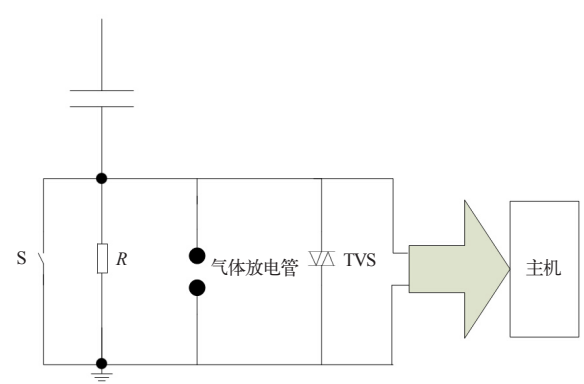


图6 电阻取样及保护原理

4 现场安装及数据分析

本装置的试点变电站选在了吉林省电力公司

某500 kV智能变电站。该变电站的变压器套管产自是沈阳传奇套管厂，末屏为自紧式接线，即末屏盖内通过一个弹簧压线端子将套管末屏与地连接，压下弹簧，末屏接线端子可以露出时，末屏与地即断开。整个末屏接地外部安装一个末屏罩盖，实现接线端子的防水防潮。

经过与套管生产厂家的沟通后，本项目自行研制了适应变电站套管的末屏罩盖，并在现场确定了安装形式。

传感器与变压器套管末屏采用2根电缆线连接，电缆线为4 mm²单芯多股铜线。2根电缆线分别连接套管末屏和地线。安装方式如下：

地线与变压器套管末屏处接地点通过螺丝和压线端子进行连接。末屏线电缆顶端在铜线裸线端用焊锡做挂锡处理，使铜线具有一定强度。将处理的铜线顶端插在末屏端的接线孔内，以顶开末屏的短路连接部分。由于末屏的短路连接部分内部具有弹簧，弹性很大，可以压住铜线，连接十分可靠，现场测试效果良好。末屏电缆线连接后，用自制的特殊末屏罩盖重新盖住末屏点并引出电缆线。罩盖低端通过防水胶垫达到密封，罩盖顶端用一个金属制防水旋钮引出电缆线，并密封。

经测试，现场接线效果和密封性均良好，符合现场使用要求。

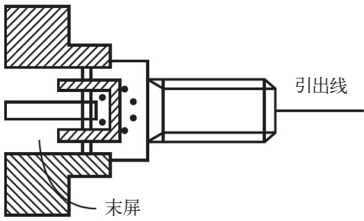


图7 末屏引出装置示意图

图8~图10均为现场安装的示意图。



图8 现场末屏安装实物



图9 现场未屏安装后的实物



图10 装置机箱实物

根据历史数据情况，监测装置选取了变电站1#主变中压套管进行安装，该组套管设备运行稳定，具备安装和对比条件。在线监测装置在现场安装后，一直运行稳定。以2013年9月17日~9月25日一周的数据为例，其中每半小时采样一次，绘制C相套管介质损耗数据曲线图如图11所示。

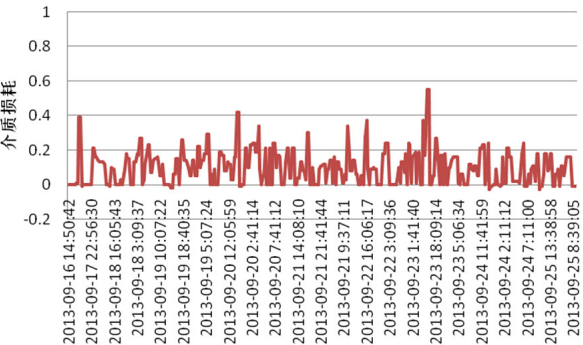


图11 C相套管介质损耗现场实测数据

由于采用了相对角差法，认定B相的相对介质损耗角为 89.70° ，故B相套管的介质损耗因数固定为0.52%。A相和C相套管在较小的范围内波动并没有升高的趋势，可以认定套管设备运行稳定，与套管的实际运行情况相符合。

5 结束语

本文设计了基于相对角差法的变压器套管在线监测方法及装置，并在智能变电站中进行了安装和试点应用。通过现场对套管数据的测量，比对套管的运行情况，可以说明本文设计的方法及装置原理正确，功能符合设计要求，现场运行稳定，满足变电站对变压器套管在线监测的要求，在不取用变电站PT二次模拟电压信号的条件下能够有效地实现对变压器套管设备的在线监测。

参考文献

[1] 李波.电容型高压电气设备绝缘在线监测的关键技术[J].电气开关,2012(5):4-7.

[2] 陈石桢.变压器套管在线监测方法探讨[J].电工电气,2013(6):1-6.

[3] 方先存.电容型设备绝缘在线监测系统的开发与应用[J].高电压技术,2008(5):1306-1309.

[4] 王卓.变压器套管介质损耗在线监测装置[J].广东电力,2013(4):72-76.

[5] 柴旭峥.tan δ 高准确度测量的加权插值FFT算法[J].高电压技术,2003(29):32-33.

[6] 杨晓东.电容型设备改进型介损数字化测量方法的研究[J].电力系统自动化,2006(30): 51-54.

[7] 王世阁.变压器套管故障状况及其分析[J].变压器,2002(39):35-40.

作者简介

刘齐（1983-），男，硕士研究生，工程师，电力设备在线监测与故障诊断。

（收稿日期：2015-12-10） EA
（编辑：朱历）