

文章编号:1003-6199(2014)03-0031-04

变压器局部放电在线检测方法研究

陈 轩^{1†}, 黄心汉¹, 范盛荣², 彭 刚¹

(1. 华中科技大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074; 2. 恒能华工监测技术(北京)有限公司, 北京 100102)

摘要: 变压器绝缘系统是电力变压器的重要组成部分, 很大程度决定了变压器的可靠性与经济性。局部放电是变压器内绝缘劣化的重要原因, 也是变压器绝缘状况的重要特征, 本文分析局部放电现象产生的原因, 介绍几种变压器局部放电在线检测方法并进行比较, 采用一种优化的在线检测方法得到变压器局部放电三维图谱。

关键词: 局部放电; 绝缘系统; 在线检测

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Transformer Partial Discharge On-line Monitoring Method

CHEN Xuan^{1†}, HUANG Xin-han¹, FAN Sheng-rong², PENG Gang¹

(1. School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;
2. Econergy Hust Monitor(Beijing)CO. LTD, Beijing 100102, China)

Abstract: Transformer insulation system is an important part of power transformer. To a great extent, it defines the reliability and economy of transformer. Partial discharge is one important reason of insulation deterioration in transformer, which is also an important feature of transformer insulation condition. This article analyzes the reason of partial discharge phenomenon, introduces several kinds of transformer partial discharge on-line monitoring methods, and carries on the comparison to these methods. An optimization on-line monitoring method is used to get the three-dimensional map of transformer partial discharge.

Key words: partial discharge; insulation system; on-line monitoring system

1 引言

随着社会经济的发展, 电能与人民的生活和生产建设的关系越来越密切, 成为现代社会的主要能源。在超高压和特高压输变电技术迅速发展的同时, 电力设备容量及数量大幅增加, 电网的规模也越来越大。电力系统在保证供电质量的同时还需要保证稳定可靠的供电能力。变压器是电力系统的重要设备之一, 如果变压器发生故障而导致停电不仅带来巨大的直接经济损失, 其间接的损失也无法估计。据统计, 由电力变压器引发的事故中, 大多数是由于绝缘出现老化和损坏而造成的^[1]。从

某种意义上来说, 变压器运行的可靠性主要取决于其绝缘的可靠性, 绝缘的故障常起源于变压器内部的局部放电。因此加强对变压器局部放电的在线检测是保障电力系统安全稳定运行的重要手段^[2]。

2 变压器局部放电

局部放电是指在电场作用下, 绝缘物质局部区域被击穿的电气放电现象。绝缘体内部或者表面局部区域不均匀导致该区域电场发生畸变, 电场强度高于平均场强并首先发生放电, 形成局部放电, 而其他的区域仍然保持绝缘特性。

被气体包围的导体附近发生的局部放电, 称为

收稿日期: 2013-06-18

作者简介: 陈 轩(1990—), 男, 湖北汉川人, 硕士研究生, 研究方向: 智能控制与智能应用。

† 通讯联系人, E-mail: chenxuanhappy@sina.com

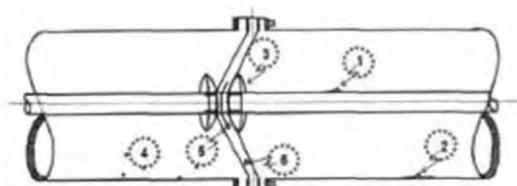
电晕;发生在绝缘体表面的局部放电,称为表面局部放电;发生在绝缘体内部的局部放电,称为内部局部放电。

电力变压器油纸组合绝缘产生局部放电的原因主要有以下两点^[3]:

1) 绝缘体内部或者表面存在易于放电的气泡,气体的介电常数总是小于液体或固体材料,在交变电场下,串联介质的电场强度的大小与介电常数成反比,所以气泡中的电场强度要比周围液体或固体介质的高。但是气泡的击穿场强在常规气压下总是比液体或者固体介质低很多,因此气泡在电场作用下易于产生放电。

2) 绝缘结构中如果有导电杂质存在,在导电杂质的边缘由于电场比较集中,就有可能产生局部放电。如果导体有毛刺或针尖状,则在针尖附近电场比较集中,也可能产生局部放电。在变压器中如果有某一金属部件没有电的连接而成为一个悬浮电位体,或是导体间连接点接触不好,都会在该处出现很高的电位差,从而产生局部放电。

图 1 为 1000kV 交流特高压 HGIS 典型局部放电示意图^[4]。



1 导体上有突出物,2 外壳上有突出物,3 触头损伤,4SF6 中的漂浮物,5 屏障绝缘子中有气泡,6 屏蔽绝缘子上有空洞或金属微粒。

图 1 HGIS 中典型局部放电

3 变压器局部放电在线检测方法

变压器局部放电在线检测是通过传感器在线获得与变压器内部局部放电相关的信息,利用计算机及信号处理器技术对局部放电信号进行去噪、提取放电脉冲并对局部放电情况进行描述和分类,为进一步评估变压器内部绝缘运行状态提供参考信息。在提取局部放电信号的过程中存在着以窄带周期型干扰、周期型脉冲干扰、随机脉冲干扰和白噪声为主的四类电磁干扰。针对这些干扰,目前主要有快速傅氏变换 FFT 阈值法、自适应数字滤波系统、小波变换等方法等^[5]。

局部放电的过程除了伴随着电荷的转移和电能的损耗之外,还会产生辐射、超声波、发光、发热以及生成新的物质。根据局部放电的检测方法可

以分为非电测量法和电气测量法两大类。

3.1 非电测量法

非电测量法主要有超声波检测法、光检测法、化学检测法、红外检测法、温度检测法。

1) 超声波检测法

超声波检测法主要是根据局部放电过程中产生的超声波传播的方向和时间来确定放电位置,包括电—声定位和声—声定位。当发生局部放电时,由于超声波通过不同介质向外传播,到达油箱壁的时间不同。在变压器油箱的外壳安装多个超声波传感器,由于空间位置不同,检测到局部放电产生的超声波信号时间不同,通过测量超声波传播的延时时间可以确定局部放电源的空间位置^[6]。

2) 光检测法

光检测法的原理是将光电探测器接收的来自放电源的光脉冲信号转为电信号,再放大处理。不同类型局部放电产生的光波波长不同,小电晕光波长 $\leq 400\text{nm}$ 呈紫色,大部分为紫外线;强火花放电光波长介于 400nm 到 700nm 之间,呈桔红色,大部分为可见光。固体、介质表面放电光谱与放电区域的组成气体、固体材料的性质、表面状态及电极材料等有关。普遍采用的有两种光检测法。一种是荧光光学检测法,通过荧光光纤检测局部放电所产生的荧光来检测局部放电现象^[7]。另外的一种是超声—光学检测方法,通过提取局部放电超声信号传播到光纤上光纤的形变信号来检测局部放电^[8]。

3) 化学检测法

变压器局部放电可能会导致变压器中绝缘材料分解产生生成物,化学检测法就是通过检测生成物的成分和浓度来判断局部放电的状态。变压器因局部放电而产生的主要生成物包括 H_2 , CH_4 , CO_2 , C_2H_2 等。离线化学检验法通过实验室油色谱定期对油中的气体分析,但所获得的信息为长期异常现象产生气体的累加值,对于突发性故障预防较低。化学方法的在线检测技术正逐步推广,包括变压器油色在线检测、变压器油中氢气浓度在线检测、变压器油中乙炔在线检测等,它们可以反映不同气体的动态特性,从而提取出变压器内的局部放电信息^[9]。

4) 红外检测法

红外检测法是利用电力设备内部的局部放电产生的电热能量转换,检测局部放电区域的表面温度升高的变化。对于复杂的绝缘系统,红外检测法需要借助计算机进行辅助计算,可以得到一定的量化关系,但是红外检测法用于定量的研究还存在困难^[10]。

5) 温度检测法

变压器局部放电会导致变压器内部的温度发生异常,通过检测变压器内部的温度可以了解变压器内部的运行状况,为局部放电的检测提供参考^[11]。

3.2 电气测量法

电气测量法主要有脉冲电流法、超高频法。

1) 脉冲电流法

脉冲电流法是通过将阻抗接入到测量回路中来检测的^[12]。脉冲电流法是研究最早、应用最广泛的一种检测方法,IEC-60270是IEC于2000年正式公布的局部放电测量标准。脉冲电流法通常被用于变压器出厂时的型式试验以及其他离线测试中,其离线测量灵敏度高。脉冲电流法主要存在的问题是:抗干扰能力差,无法有效应用于现场的在线检测;对于变压器类具有绕组结构的设备在标定后产生很大的误差;由于检测阻抗和放大器对测量的灵敏度、准确度、分辨率以及动态范围等都有影响,因此当试样的电容量较大时,受耦合阻抗的限制,测试仪器的测量灵敏度受到一定限制;测量频率低、频带窄,包含的信息量少。

目前进行脉冲电流法检测时采用了由罗果夫斯基线圈制成的电流互感器来提取脉冲电流信号,使检测回路与被测变压器仅有磁耦合而没有电气连接,在一定程度上削弱了电气干扰^[13]。并且现在还出现了宽频带脉冲电流法的研究^[14],并且研制了基于甚宽带脉冲电流法检测系统^[15],这种系统在脉冲定量上与传统脉冲电流法相当的前提下,提高了宽频带脉冲电流法的灵敏度和抗干扰能力,并且能够在复杂的背景干扰下分离并识别放电信号和类型。

2) 超高频法

超高频检测法通过超高频传感器接收局部放电辐射的超高频电磁波,实现局部放电的检测,通过检测变压器内部局部放电所产生的超高频(300~3000MHz)电磁波信号,实现局部放电的检测和定位,并实现抗干扰。超高频法具有测量频率高、检测频带可调、抗干扰性强、灵敏度高等优点,可以较全面地研究变压器绝缘系统中局部放电的本征特征^[16]。

超高频检测法的原理是:每一次局部放电都发生正负电荷中和,伴随有一个陡的电流脉冲,并且向周围辐射电磁波。局部放电所辐射的电磁波的频谱特性与局部放电源的几何形状以及放电间隙的绝缘强度有关^[17]。当放电间隙比较小或放电间隙的绝缘强度比较高时,放电过程的时间比较短,

电流脉冲的陡度比较大,辐射高频电磁波的能力比较强。变压器油——隔板结构一般能辐射出达到几GHz的电磁波,而一般现场干扰的频率不高于400MHz,可以看出,超高频检测法能够有效避免各种电磁干扰。这种电磁波遵循麦克斯韦电磁场基本方程,引入动态向量 \vec{A} 和动态标量 φ ,这时麦克斯韦基本方程组转化为动态位方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{\delta}_c + \nabla \mu \epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \varphi + \nabla \cdot \frac{\vec{A}}{\nabla t} = -\frac{\rho}{\epsilon} \end{array} \right. \quad (1)$$

式(1)表示动态位与激励源 ρ 和电流密度 $\vec{\delta}_c$ 之间的关系,该动态位的达朗贝尔方程,在时变场无源区域(ρ 和 $\vec{\delta}_c$ 均为 0),考虑体积 V 中所有的电荷作用,其解为:

$$\varphi(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho(x^*, y^*, z^*, t - \frac{r}{v})}{r} dV \quad (2)$$

$$\vec{A}(x, y, z, t) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{\delta}_c(x^*, y^*, z^*, t - \frac{r}{v})}{r} dV \quad (3)$$

上式说明局部放电产生的电磁波是以速度 v 沿着 r 方向分布,即沿电磁波传播方向流动^[18]。因此,通过耦合这种以 TEM 波形式传输的电磁信号可以检测到变压器内部的局部放电,并用于诊断绝缘状态。

局部放电超高频测量中心频率通常在数百MHz、带宽为几十 MHz。通常在超高频范围内(300~3000MHz)测量局部放电电磁信号,不会受到外部电晕等脉冲干扰(一般小于 150MHz)的影响,因而能有效提高测量系统信噪比。局部放电超高频检测的关键技术之一是高灵敏度传感器的设计,在实际应用中普遍采用超高频天线来进行局部放电超高频检测。

4 不同检测方法比较

超声波检测法、光检测法、化学检测法、红外检测法、温度检测法为非电测量法,但由于超声波检测法以外的方法实现起来都比较困难,因此没有得到大范围的应用。超声波检测法是目前应用比较

广泛的方法之一,具有受电气干扰少,实现容易的优点,而且能够方便的进行带电检测,不会对变压器造成不可逆的伤害,但是超声波检测法的局部放电定位精度有所欠缺。

脉冲电流法和超高频法是电气测量法。脉冲电流法是目前国际上唯一有统一标准的局部放电检测方法,而且能够直接测量视在放电量。但是脉冲电流法存在检测带宽不足的缺点。超高频法是近些年发展的方法,具有抗干扰能力强的优点,相比于脉冲电流法,超高频法接收频带宽,能够比较全面地收集局部放电本征信息。

综合超高频法和脉冲电流法获取变压器局部放电的信号,可以有效抑制外部干扰。通过分布式的监测系统实现信号调理和采集,能够获得变压器真实的局部放电信号及特征参数。不同检测方法的特点如表 1 所示。

表 1 不同检测方法特征表

检测方法	特点
非电测量法	受电气干扰少,实现容易,方便带电检测;定位精度欠缺。
光检测法	实现较困难
化学检测法	实现较困难
红外检测法	实现较困难
温度检测法	实现较困难
电气测量法	有统一标准,能直接测量视在放电量;检测带宽不足。
超高频法	抗干扰能力强,接收频带宽。
综合脉冲电流法和超高频法的方法	能直接测量视在放电量,抗干扰能力强。

5 测试实验

实验采用的是综合超高频法和脉冲电流法的变压器局部放电在线监测方法。其中脉冲电流法的测量频带为 50kHz~5MHz,超高频法的测量频带为 0.3GHz~3GHz。采用差动平衡法结合超高频法实现外部干扰的鉴别,同时采用小波和 IIR 滤波器、开窗法实现了对白噪、周期性、脉冲性干扰的抑制和消除。设变压器局部放电的视在放电量为 q ,放电相位为 φ ,放电时间为 t ,如图 2 所示为综合超高频局部放电检测技术和脉冲电流法局部放电检测技术采集到的变压器局部放电三维图谱 $q-\varphi-t$ 。

图中蓝色直方柱表示检测到的局部放电信号,黄色直方柱表示检测到的背景噪声或者干扰。从图 2 中可以看到,在相位为 0°、90°、300°附近变压器局部放电比较严重,极有可能是变压器油里面有气泡造成的。

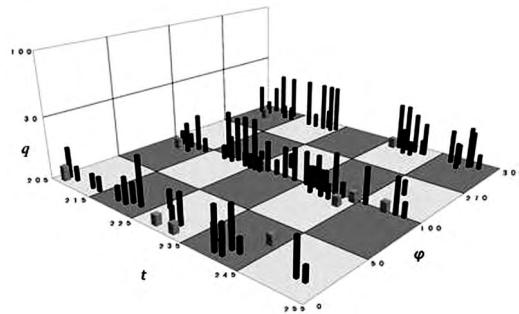


图 2 变压器局部放电三维图谱 $q-\varphi-t$

6 结论

电气测量法的灵敏度高,可以完成定量检测;非电气测量法灵敏度较低,受到传感器技术发展的限制很难做到定量测量,所以在实际应用中以采用电气测量法为主,非电测法为辅的测量方法。随着对电力变压器局部放电脉冲所辐射的电磁波的认识的深入,综合局部放电超高频检测法和脉冲电流法将成为会成为变压器局部放电在线检测的主要方向。

参考文献

- [1] 邱晓丹,周启龙,王世成,等,李万里.变压器局部放电在线监测技术的研究[J].自动化应用,2010(3): 52—53.
- [2] 马晓华.电力设备绝缘监测综合式应用软件的研究[D].北京:华北电力大学硕士论文,2003.
- [3] 金卓睿.变压器局部放电超高频监测分形天线与最优小波去噪及信号识别研究[D].重庆:重庆大学博士论文,2008.
- [4] 周广,刘勇,金正洪,等.在线特高频技术在 1000kV HGIS 局放监测中的应用[J].华中电力,2011, 24(5): 57—62.
- [5] 戴玲,文远芳.变压器局放检测的信号处理器技术[J].变压器,2000, 37(12): 6—8.
- [6] 刘佳陵.变压器局部放电在线监测技术[J].中国新技术新产品,2012(14): 13.
- [7] 魏念荣,张旭东,曹海翔,等.用荧光光纤技术监测局部放电信号传感器的研究[J].2002, 42(3): 329—332.
- [8] 徐阳,喻明,曹晓珑,等.局部放电光脉冲测量法与电测法的比较[J].高电压技术,2001, 27(4): 3—5.
- [9] 崔敏霞,武维清,苏宏刚.变压器局部放电在线监测研究综述[J].中国电子商务,2012(10): 81.
- [10] 张言苍,张毅刚,徐大可.变压器局部放电在线监测的现状及发展[J].继电器,2004, 32(22): 70—73.
- [11] 鲍棋铭,高乃奎,马小芹,等.大型发电机主绝缘老化的热分析研究[J].中国电机工程学报,2003, 23(7): 99—100.
- [12] 戴伟.电力变压器局部放电监测方法[J].内蒙古石油化工,2009(4): 60—61.
- [13] 梁钊,杨晔闻,叶彦杰.电力变压器局部放电监测方法[J].南方电网技术,2011, 5(1): 85—88.
- [14] 阮羚,高胜友,郑重,等.宽带脉冲电流法局部放电监测中的脉冲定量[J].高压电器,2009, 45(5): 80—82.
- [15] 阮羚,高胜友,郑重.基于甚宽带脉冲电流法的局部放电监测系统[J].电工电能新技术,2009, 28(3): 54—57.
- [16] 赵晓辉,路秀丽,杨景刚,等.超高频方法在变压器局部放电监测中的应用[J].2007, 33(8): 111—113.
- [17] 王国利,郝艳捧,李彦明.电力变压器局部放电监测技术的现状和发展[J].2001, 20(2): 52—57.
- [18] JUDD M D, FARISH O, PERSON J S. UHF couplers for gas-insulated substations: a calibration technique, Science Measurement and Technology[J]. IEE Proceedings, 1997, 144(3): 117—122.