

基于超声波法的变压器重症监护系统研制及应用

陆云才¹, 胡汉巧², 蔚超¹, 李建生¹, 吴鹏¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 变压器局部放电超声波检测技术作为一种有效的绝缘诊断技术, 目前已在超特高压变电站变压器故障诊断中广泛应用。借鉴重症监护医学领域技术, 研制了基于超声波法的变压器重症监护系统, 并应用于存在故障隐患或危急停运的变压器设备上。该系统以变压器局部放电超声波信号特征量为基础, 结合现有的在线或离线特征量, 如油色谱在线监测、数据采集与监视控制(SCADA)运行负荷等实时数据, 采用数据融合的方法综合分析, 实时检测并准确定位局部放电源。现场应用情况表明, 该系统能够有效检测变压器内部放电性故障, 为变压器状态诊断及检修策略的制定提供有效支撑。

关键词: 变压器; 局部放电; 超声波; 重症监护; 定位

中图分类号: TM407

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)02-0094-05

0 引言

近年来, 随着特高压交直流工程的建设及投运, 大容量、高电压等级变压器在超特高压变电站中应用越来越广泛, 大型变压器的安全问题已成为影响电网安全运行的重要因数。为预防变压器的绝缘故障, 对运行中的变压器进行局部放电检测显得极为重要^[1]。目前, 国内外广泛采用超声波法对变压器局部放电进行在线检测, 尤其对于含有微量乙炔的变压器, 进行实时、在线的超声局放跟踪则显得更为有意义^[2,3]。

借鉴重症监护专业技术, 研制了基于超声波法的变压器重症监护系统, 该系统是一种新型状态监测装备, 对存在疑似缺陷或危急停运的变压器, 综合运用多种先进状态监测技术, 实时、长期监测其缺陷发展过程, 可防范故障的发生。

1 局部放电超声波检测技术

1.1 局部放电超声波原理

变压器在局部放电过程中总是伴随着声、光、电、磁、热等现象, 其中声波信号则可由油纸绝缘材料大分子激烈撞击、油中烷烃气体产生、绝缘油流以及油纸绝缘材料裂解等产生。研究发现, 局部放电产生的超声波信号与局部放电的程度和类型有一定的对应关系。与其他检测方法相比, 局部放电超声波检测可对变压器进行实时和连续监测, 同时可利用声波在变压器绝缘油、箱体钢板等介质中的传播特性对局部放电源进行精确定位。

1.2 局部放电超声波信号典型特征

变压器局部放电超声波信号幅值和视在放电量是局部放电的2种表征形式, 两者之间存在一定的对应关系, 通常较强局部放电产生的超声波信号幅值较大且持续时间较长。超声波信号传播路径不同或传播介质差异, 导致各传感器收到的超声波信号幅值和时延存在差异。局部放电超声波信号与电信号一样, 符合交流励磁电压的周期特性和相位特性, 可结合电源周期特性和相位特性进行分析^[4,5]。当现场检测到超声波信号时, 应与变压器运行时振动、变压器内部结构件松动导致的异常声响、油箱外部结构件振动、分接开关动作、风扇和油泵运行时噪声、异常天气状况导致的油箱声响等进行区分。在变压器油纸绝缘中, 不同类型和位置放电产生的声波频谱是不同的, 频谱峰值通常在70~150 kHz范围(属于超声波频段), 而变压器各种振动噪声的频谱一般小于65 kHz。变压器局部放电超声信号典型波形及频谱如图1所示。

通过超声波传感器检测到的变压器内部放电产生的超声信号波形, 一般表现出开始幅值较大然后呈指数衰减的振荡波形。同一个局部放电源产生的超声波信号, 传播到变压器油箱不同的部位具有固定的时间, 因此安装在变压器油箱壁不同位置的超声波传感器所收到的同一放电源信号具有固定的时延关系。但是由于超声波信号的衰减、超声波传输路径的差别以及各种干扰信号的影响, 可能给准确识别超声波信号的起始时间带来困难^[6,7]。由于局部放电的周期特性, 局部放电超声波信号具有重复性。布置在变压器油箱壁上一定区域的多

个超声波传感器检测到重复的、时延关系一致的超声波信号,是判定设备可能存在局部放电的重要依据。

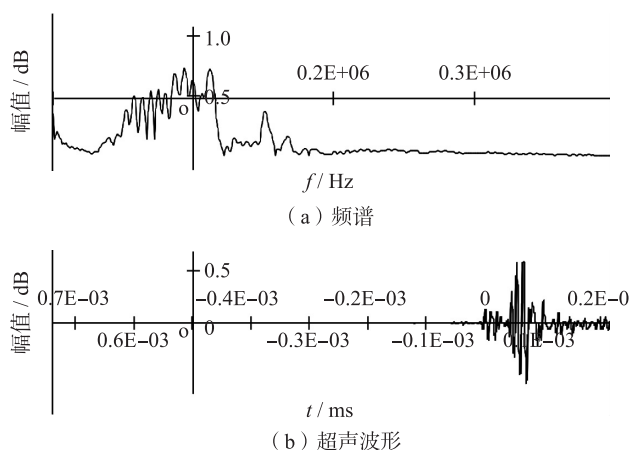


图1 局部放电超声波信号的典型波形及频谱

Fig.1 Typical waveform and spectrum of acoustic emissions from partial discharges

1.3 局部放电声源定位

通常变压器局部放电声源定位的方法分为电-声定位法和声-声定位法。当同时测量到局部放电的电信号和声信号时,可采用电-声定位法和声-声定位法进行定位^[8]。在局部放电电信号受到强烈干扰或难以获取时,可采用声-声定位法。采用电-声定位法时,需要至少3个超声波传感器均检测到局部放电产生的超声波信号,且局部放电信号可分辨,检测到的超声波信号与电信号的绝对时延采用球面定位算法进行定位。采用声-声定位法时,需至少4个超声波传感器检测到局部放电产生的超声波信号,超声波信号之间的相对时延采用球面或双曲面定位算法进行定位。

在变压器内部发生局部放电的同时,伴随有相应频率特征和波形特征的超声波信号,超声波信号由故障点传播到油箱外侧^[9]。将超声波传感器贴于变压器油箱外侧,接收放电产生的超声波信号,并由检测系统对超声信号进行记录。超声波传感器布置一般以检测到超声波信号的油箱区域附近显著的结构点如外箱沿、加强筋等作为参考原点,建立三维坐标模型,如图2所示。测量各传感器通道的绝对时延或相对时延,将绝对时延或相对时延代入一系列满足放电点和传感器几何位置的方程,求取非线性方程解,就可得到放电点的位置。

然而,变压器局部放电检测及声源定位受现场测试条件、间隙性放电以及信号在变压器内部传递途径复杂等多因素的影响,现场往往比较难以准确检测及定位^[10,11],因此需研制一套具有全天候工

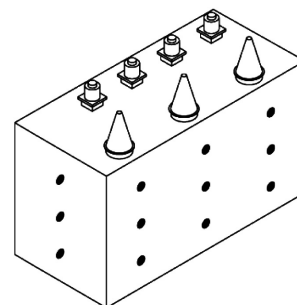


图2 局部放电检测超声波传感器布置

Fig.2 Ultrasonic sensor placement in partial discharge detection

作、远程诊断、综合其他诊断方法的变压器重症监护系统,可实时收集变压器运行数据,判定变压器是否存在突发性或缓慢性放电性故障,并确定放电类型及部位。

2 基于超声波法变压器重症监护系统研制

2.1 重症监护系统设计

借鉴重症监护医学领域技术,研制基于超声波法的变压器重症监护系统,应用于存在故障隐患却无法立即停运的变压器设备上^[12,13];也可用于变压器疑似缺陷、非紧急缺陷的跟踪监测,实时跟踪缺陷发展情况,为变压器状态评估及制定检修决策提供重要依据。

与传统的在线监测系统不同的是,该系统无需依附于被监护的变压器本体,可根据需要随时进行安装或拆卸,具有综合、灵活及便捷等突出特点。同时,该系统还可将监测数据通过4G无线网络传输至输变电状态监测中心,实现被监护变压器运行状态的实时、远程监测。

基于超声波法的变压器重症监护系统设计,以变压器局部放电超声波信号特征量为基础,结合现有的在线或离线特征量,如油色谱在线监测、数据采集与监视控制(SCADA)运行数据(温度、负荷等)、历史检修试验等,采用数据融合方法对各类信息数据进行综合分析,实现变压器内部绝缘状态的在线监测及远程诊断^[14,15]。系统功能及架构设计如图3、图4所示。

该系统具有全天候工作的远程诊断能力,可实时收集变压器运行数据,判定变压器是否存在突发性或缓慢性放电性故障,并确定放电类型及部位。系统集成局放超声波法、高频电流、油色谱等检测技术手段,辅助外参数输入SCADA运行数据(温度、负荷等)、历史检修试验,实现放电类型识别、绝缘状态评估、缺陷危险程度判断、故障电源定位等功能,具有数据远传、远程控制等信息化技术,满

足快速化检测要求。

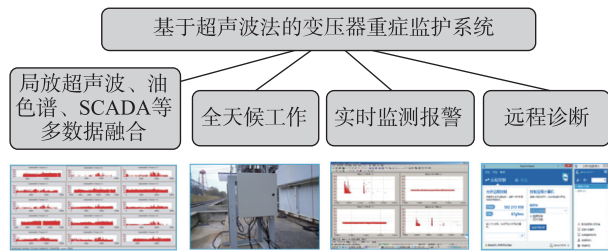


图3 变压器重症监护系统功能

Fig.3 Function of transformer intensive care system

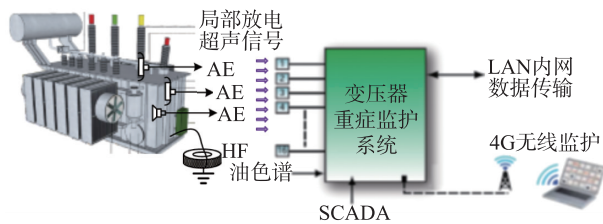


图4 变压器重症监护系统架构

Fig.4 Structure of transformer intensive care system

2.2 重症监护系统装置研制

变压器重症监护系统以 PAC 公司 SHII-SRM 超声局放检测为主机, Calisto 9 作为油色谱在线监测装置。系统采用分布式结构设计,集成 16 个超声通道、16 个外参数通道、1 路油中溶解气体分析 (DGA) 色谱数据。数据采集前端配置 16 个超声波传感器、16 个低频外接传感器通道、1 个高频电流传感器,配置独立时钟协调各通道同步信号,每个通道可连续数据采集,数据采集间隔时间可调,原始数据最高采样率 20 M/s。主机箱内配置数据处理服务器、无线 4G 网络、Teamviewer 远程控制软件、SHII-MISTRAS 局放分析软件,采用数据融合方法对各类信息数据进行综合处理分析。同时远程诊断提供了丰富的图形化展示界面及实时监测报警功能,部分分析结果可传输至输变电设备状态监测中心,通过中心进行进一步处理或共享给其他应用。

3 局部放电现场检测实例

某 500 kV 变压器在例行油色谱检测中发现 0.5 $\mu\text{L/L}$ 微量乙炔,且呈持续增长趋势。针对此类变压器色谱异常情况,立即对该变压器现场安装了重症监护系统装置,如图 5 所示。利用该装置,对局部放电超声信号及油色谱在线监测数据进行了持续跟踪,系统监测如图 6 所示,分析超声信号变化与油色谱数据之间的关联关系。同时接入该变压器 SCADA 系统电压、电流数据,建立超声信号、油色谱信号与电压、电流变化间的关系,最终确定该变压器存在磁回路缺陷,非电回路缺陷。根据缺陷类

型,结合变压器内部结构,经过变压器重症监护系统现场长达 2 个月的远程诊断,及时检测到持续稳定的局部放电信号,并精确定位。

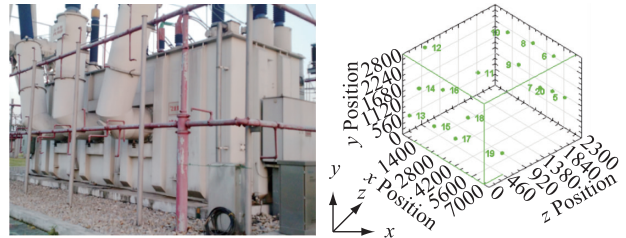


图5 变压器重症监护装置现场安装及三维坐标

Fig.5 Installation of transformer intensive care device and three-dimensional indication

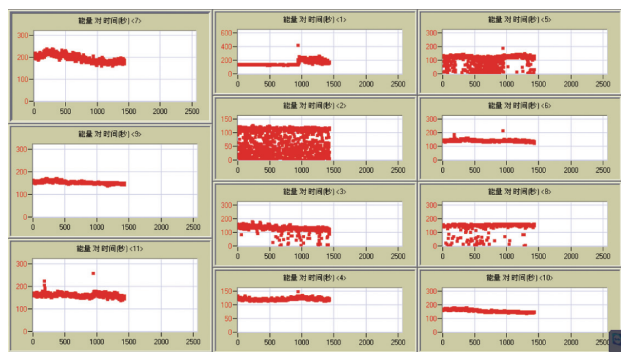


图6 变压器重症监护系统监测

Fig.6 Monitoring chart of transformer intensive care system

停电内检发现,高压侧 2 块磁屏蔽接地线螺栓松动、悬浮放电是导致该变压器产生微量乙炔的直接原因,如图 7、图 8 所示。经查阅资料发现,该变压器在制造过程中曾重新设计加装了磁分路和斜面磁屏蔽控制漏磁,磁屏蔽接地螺栓采用较为普通的弹簧垫圈紧固防松,在箱体长期振动及磁屏蔽接地片振动作用力下存在松动的可能性^[16,17]。另外,部分磁屏蔽接地线螺栓在安装过程中存在紧固力不足、螺栓垫片顺序错误及螺栓规格不一致等普遍问题。

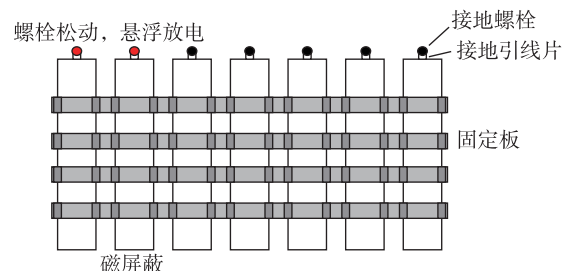


图7 高压侧油箱磁屏蔽示意图

Fig.7 Magnetic shielding on the high voltage side

实践证明,通过安装变压器重症监护系统,可在不停电的情况下实时监测变压器内部放电并可精确定位出局放位置,有效减少变压器故障带来的

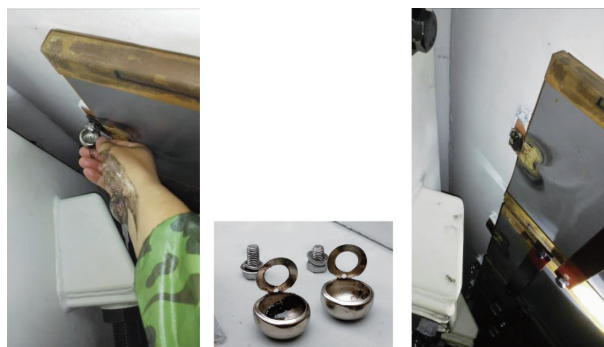


图8 磁屏蔽接地线螺栓放电痕迹

Fig.8 Discharge traces on magnetically shielded ground studs

非计划停运,防止故障发生,提升电网运行的可靠水平。目前该系统已在苏州特高压换流站、常州政平换流站等现场工作中,多次发挥重要作用,避免了超特高压设备故障。

4 结语

本文研制了一套基于超声波法的变压器重症监护系统,可实时检测并准确定位局部放电源。该系统无需依附于被监护的设备,可根据需要随时进行安装或拆卸,具有综合性、灵活性及便捷性等突出特点。同时,还可将监测数据通过4G无线网络实时传输至监控中心,实现被监护变压器运行状态的实时、远程监测,大幅提升了监测系统的应用便捷性。变压器重症监护系统彻底解决了“以跟踪检测方式应对变压器疑似缺陷”的传统检修模式所存在的工作量大、操作复杂、时效性差的不足,进一步提高了检修效率,保障了变压器运行安全。同时也为变压器在线监测及带电检测技术发展提出了新的思路。

参考文献:

- [1] 华德峰,卞超,甘强,等.一起220 kV变压器绕组变形故障分析[J].江苏电机工程,2015,34(2):15-17.
HUA Defeng, BIAN Chao, GAN Qiang, et al. Analysis of 220 kV transformer winding deformation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(2): 15-17.
- [2] 李燕青.超声波法检测电力变压器局部放电的研究[D].保定:华北电力大学,2004.
LI Yanqing. Study on ultrasonic-based method to detect partial discharge in transformer[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2004.
- [3] 葛为民.变压器局部放电超声定位的现场应用[J].高压电器,2006,41(5):351-353.
GE Weimin. Transformer partial discharge ultrasonic location of the field application[J]. High-voltage Electrical Appliances, 2006, 41(5): 351-353.
- [4] 朱瑞华,席保锋,徐阳,等.变压器局部放电超声法检测

- 中超声传感器的应用[J].绝缘材料,2007,40(4):62-64.
ZHU Ruihua, XI Baofeng, XU Yang, et al. Application of ultrasonic sensors in ultrasonic detection of transformer partial discharge[J]. Insulation Materials, 2007, 40(4): 62-64.
- [5] 程述一,李燕青,律方成,等.基于改进FastDOA算法的变压器局部放电超声阵列信号测向[J].电力自动化设备,2012,32(6):9-13.
CHENG Shuyi, LI Yanqing, LYU Fangcheng, et al. Direction finding of partial discharge ultrasonic array signals in transformer based on improved fast DOA algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 9-13.
- [6] 白保东,兰云鹏.变压器局部放电射频和超声联合检测[J].沈阳工业大学学报,2009,31(1):11-15.
BAI Baodong, LAN Yunpeng. Combined detection of partial discharge radio frequency and ultrasonic in transformer[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2009, 31(1): 11-15.
- [7] 律方成,程述一,李燕青,等.超声法在电力变压器局部放电检测中的应用与展望[J].变压器,2012,49(8):45-49.
LYU Fangcheng, CHENG Shuyi, LI Yanqing, et al. Application and prospect of ultrasonic method in partial discharge detection of power transformer[J]. Transformer, 2012, 49(8): 45-49.
- [8] 周力行,何蕾,李卫国.变压器局部放电超声信号特性及放电源定位[J].高压技术,2003,29(5):11-13.
ZHOU Lixing, HE Lei, LI Weigu. Characteristics of partial discharge ultrasonic signal and location of discharge source in transformer[J]. High Voltage Technology, 2003, 29(5): 11-13.
- [9] 张凤英,王宇光.电力变压器局部放电超声定位测量[J].变压器,2000,37(2):29-33.
ZHANG Fengying, WANG Yuguang. Ultrasonic location measurement of partial discharge in power transformers[J]. Transformers, 2000, 37(2): 29-33.
- [10] 王庆.变压器局部放电超声信号传播规律及定位方法的研究[D].保定:华北电力大学,2003.
WANG Qing. Transformer partial discharge ultrasonic signal propagation law and positioning method[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2003.
- [11] 李军浩,司文荣,王颂,等.电力变压器局部放电定位方法的现状及发展[J].变压器,2007,44(6):40-44.
LI Junhao, SI Wenrong, WANG Song, et al. Status and development of partial discharge location methods for power transformers[J]. Transformers, 2007, 44(6): 40-44.
- [12] 高智益,刘青,肖传强,等.利用局放重症监护技术发现110 kV电缆线路接头局放缺陷的案例分析[J].中国电力(技术版),2016(1):12-15.
GAO Zhiyi, LIU Qing, XIAO Chuanqiang, et al. Study on the case of partial discharge defect in 110 kV cable line joint using PD technology[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2016(1): 12-15.
- [13] 郭基伟,蔡桂龙.电气设备状态监测及故障诊断系统的开发[J].江苏电机工程,2002,21(1):19-21.

- GUO Jiwei, CAI Guilong. Development of electrical equipment condition monitoring and fault diagnosis system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2002, 21(1): 19-21.
- [14] 金逸, 刘伟, 查显光, 等. 智能变电站状态监测技术及应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 12-15.
- JIN Yi, LIU Wei, CHA Xianguang, et al. Status monitoring technology and application of intelligent substation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(2): 12-15.
- [15] 吴晨曦. 扬州智能电网输变电状态监测系统应用研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 31(6): 43-46.
- WU Chenxi. Application of yangzhou smart grid transmission and transformation status monitoring system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 31(6): 43-46.
- [16] 井永腾, 李岩. 高压自耦变压器的涡流损耗计算与屏蔽措施[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1988-1994.
- YING Yongteng, LI Yan. Calculation of eddy current loss and shielding measures of high voltage autotransformer[J]. High Voltage Technology, 2012, 38(8): 1988-1994.
- [17] 赵志刚, 程志光, 刘福贵, 等. 基于漏磁补偿的变压器结构件损耗与磁通分布研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1666-1674.
- ZHAO Zhigang, CHENG Zhiguang, LIU Fugui, et al. Study on loss and flux distribution of transformer structures based on magnetic flux leakage compensation[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(6): 1666-1674.

作者简介:



陆云才

陆云才(1982—),男,江苏如皋人,高级工程师,从事电力设备状态评估技术研究工作;

胡汉巧(1980—),男,江苏常州人,工程师,从事电网运维管理、工程验收管理等工作;

蔚超(1985—),男,山东莱芜人,工程师,从事电力设备状态评估技术研究工作;

李建生(1987—),男,山东潍坊人,工程师,从事电力设备状态评估技术研究工作;

吴鹏(1984—),男,河南洛河人,高级工程师,从事电力设备状态评估技术研究工作。

Development and Application of Transformer Intensive Care System Based on Ultrasonic Method

LU Yuncai¹, HU Hanqiao², WEI Chao¹, LI Jiansheng¹, WU Peng¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211102, China)

Abstract: Ultrasonic testing technology for transformer partial discharge as an effective insulation diagnosis technology, has been widely used in UHV substation. By reference to intensive care technology, the transformer intensive monitoring system based on ultrasonic method is developed and applied in the transformer equipment with hidden trouble or emergency shutdown. Based on the characteristic data of partial discharge ultrasonic signal, this system combines real-time data of on-line or off-line characteristic data, such as DGA and SCADA operation load. Data fusion method is adopted to detect and locate the partial discharge source in real time. The field application shows that the system can detect the internal discharge fault of the transformer, providing effective support for the diagnosis and maintenance strategy of transformers.

Key words: transformer; partial discharge; ultrasonic; intensive care; location

(编辑 刘晓燕)

(上接第42页)

Analysis of PROFIBUS DP Alarm in Xizhe HVDC Project

ZENG Lili

(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: In Xizhe HVDC project the PROFIBUS DP communication false alarm occurs frequently, which is triggered by the detection of the heartbeat signal. It is found that the PROFIBUS DP communication system is a multi-link asynchronous system. The time window of the heartbeat signal is changed by the data transfer in the multi-link asynchronous system, and the continuous multi-frame has the same heartbeat signal, which causes the false alarm of PROFIBUS DP. In this paper, the characteristics of heartbeat signal transmission in multi-link asynchronous system are analyzed in detail. The research method can be applied to similar structure communication systems.

Key words: HVDC; PROFIBUS DP; multi-link asynchronous system; heartbeat signal

(编辑 徐林菊)