

# 基于声电联合及振动的变压器类设备 局部放电现场综合诊断方法

王超<sup>1</sup>, 许本茂<sup>2</sup>, 冯藩<sup>3</sup>, 严敏超<sup>2</sup>, 李雨哲<sup>2</sup>, 张劲<sup>4</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网天府新区供电公司, 四川 成都 610041;  
3. 国网绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000; 4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 根据变压器和高压电抗器等设备结构及运行情况, 利用特高频法、超声波法和振动法开展现场局部放电带电检测。对基于声电联合及振动带电检测的变压器类设备局部放电现场诊断方法进行了研究。以某500 kV线路高压电抗器为例, 提出现场检测实施方法和信号分析、缺陷诊断方法。所提综合诊断方法有助于判断变压器和高压电抗器局部放电并诊断其缺陷类型及严重程度, 提升了设备局部放电缺陷特别是较为严重的悬浮电位放电缺陷的现场检测水平。

**关键词:** 局部放电; 变压器; 高压电抗器; 特高频; 超声波; 振动

中图分类号: TM835 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2020)04-0033-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.008

## On-site Comprehensive Diagnosis Method of Partial Discharge for Transformer Equipment Based on Ultrasonic Associated with Electromagnetic Wave and Vibration Test

Wang Chao<sup>1</sup>, Xu Benmao<sup>2</sup>, Feng Fan<sup>3</sup>, Yan Minchao<sup>2</sup>, Li Yuzhe<sup>2</sup>, Zhang Jing<sup>4</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Mianyang Electric Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichuan, China;

4. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** On-site diagnosis method of partial discharge for transformer equipment based on ultrasonic associated with electromagnetic wave and vibration test is studied. According to the structure and running condition of transformer and HV reactor, the on-site partial discharge detection based on ultra high frequency method, ultrasonic method and vibration test is carried out. Taking HV reactor in 500 kV line for example, the methods for on-site detection, signal analysis and fault diagnosis are proposed. The research is helpful in determining the partial discharge of transformer and HV reactor, diagnosing the fault type and its severity, and improving the on-site detection level of equipment partial discharge, especially serious suspension discharge.

**Key words:** partial discharge; transformer; reactor; ultra high frequency; ultrasonic; vibration

## 0 引言

作为电力系统的“心脏”, 变压器类设备安全运行对电网可靠性起着举足轻重的作用。变压器和高压电抗器等设备体积大、内部结构复杂, 承受着严苛的运行条件。大量运行经验表明, 随着运行年限的增加, 变压器和高压电抗器等设备因绝缘老化、劣化或铁芯、夹件松动可能引起局部放电。局部放电持

续发展会导致绝缘水平进一步下降, 甚至发生设备故障。因此, 及时掌握变压器类设备内部局部放电情况乃至进行诊断定位, 有助于及时发现设备潜伏性缺陷, 并指导消缺避免设备故障, 对变压器类设备安全运行有很大意义<sup>[1-4]</sup>。

变压器和高压电抗器的局部放电检测, 一直是科研院所、高校和企业研究的重点内容。但就目前而言, 能够有效监测其内部局部放电情况的变压器和高压电抗器, 均是在设备制造期间即在其内部安

装了特高频或超声波局部放电传感器。而对于未安装内置传感器的设备,只能通过油色谱在线监测装置开展在线监测、利用仪器开展带电检测。前者灵敏度有所欠缺且无法对内部缺陷进行精确定位;后者目前除高频法外尚未有成熟、系统的方法和相应的标准、规范进行指导,而高频法在实际应用中抗干扰性不足且无法进行缺陷定位,难以满足现场检测要求<sup>[5-8]</sup>。

电力系统中在运行的变压器和高压电抗器,绝大多数未安装内置特高频和超声波局部放电传感器,无法有效实施相应的局部放电在线监测<sup>[9-12]</sup>。为此,基于大量现场检测经验,整合现有的多种带电检测手段,研究基于声电联合及振动带电检测的变压器类设备局部放电诊断与定位方法,提升变压器类设备现场带电检测水平。

## 1 变压器类设备局部放电带电检测方法

### 1.1 特高频法

变压器内部存在局部放电,单次放电持续时间非常短暂,往往不超过100 ns,而放电脉冲上升时间则为纳秒级,由此产生宽频带电磁波,频率可达数百兆赫兹甚至更高。在实验室研究中,局部放电产生的电磁波向设备壳体以外传播,可以被特高频传感器检测到。根据检测到的信号幅值、相位分布特征有助于分析放电类型及严重程度。而利用不同位置的多个特高频传感器采集的信号,将其脉冲信号第一个波峰出现时间作为到达时间,可计算出放电源到达各传感器的时间差,从而经过计算定位放电源。

### 1.2 超声波法

变压器内部存在局部放电,除了伴随电荷转移外,还会产生以球面波方式各向传播的超声波。在绝缘油中,局部放电产生的超声波信号频率通常可达80 kHz以上,将相应检测频带的超声波传感器紧贴于设备壳体外表面,即可进行超声波信号检测。根据检测到的信号幅值、相位分布特征有助于分析放电类型及严重程度。同样利用不同位置的多个超声波传感器采集的信号,根据脉冲信号第一个波峰出现的到达时间,计算出放电源到达各传感器的时间差,从而可进行放电源定位。

### 1.3 振动检测法

变压器和高压电抗器因铁芯、夹件松动引起的悬浮放电,往往会伴随异常的振动。利用振动传感器在设备壳体外表面进行检测,比对相同运行状态

下同类设备、同一设备不同相、同一设备不同位置的振动加速度、信号波形畸变比和奇偶谐波能量比等参数,可以发现变压器和高压电抗器异常振动。结合声电联合局部放电带电检测手段综合分析,有助于诊断并定位设备内部局部放电缺陷。

## 2 变压器类设备现场检测方法

立足特高频法、超声波法和时频振动法等成熟带电检测手段,结合变压器和高压电抗器设备结构特点和运行工况,特别是运行年限较长、负荷较大的设备铁芯夹件松动、内部存在局部放电和壳体法兰接缝距离较大等现象较为突出的情况,研究基于声电联合及振动带电检测的变压器类设备诊断方法及其现场应用。下面以500 kV高压电抗器为例,介绍声、电、振动等手段结合的现场联合检测及诊断方法。

1) 如图1所示,在500 kV高压电抗器开展特高频局部放电检测,至少配备2个特高频传感器,1个作为背景信号测点检测空气中背景噪声信号,1个沿着设备壳体法兰接缝处进行异常信号检测。对于检测到的异常信号,若壳体法兰接缝处存在50 Hz或100 Hz频率相关性信号,同时背景噪声信号无异常,则可判定信号来自设备内部。若仅背景噪声和壳体法兰接缝处均存在50 Hz或100 Hz频率相关性信号,而壳体法兰接缝处信号无异常,则可判定信号来自外部干扰。若背景噪声和壳体法兰接缝处均存在50 Hz或100 Hz频率相关信号,则通过信号幅



图1 变压器类设备特高频检测传感器布置  
值大小和信号到达时间判断信号是否来自设备内部。以图1所示500 kV某线路C相高压电抗器现场实测信号(见图2)为例,图2中1通道为壳体法兰接缝处特高频检波信号;2通道为背景噪声特高频检波信号,可见,仅壳体法兰接缝处存在100 Hz

频率相关性信号,同时背景噪声无异常,表明异常信号来自高压电抗器内部。100 Hz 频率相关信号的存在表明设备内部可能存在固体绝缘放电或悬浮电位放电。

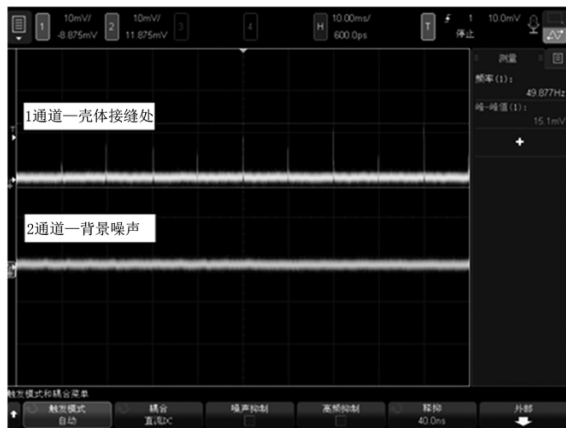


图2 500 kV 某线路 C 相高压电抗器双通道特高频检波信号

2) 对运行中的 500 kV 高压电抗器开展超声波局部放电检测,在保证足够安全距离情况下,围绕壳体一周布置超声波局部放电测点,传感器布置如图 3 所示。逐一进行检测并记录信号幅值及波形特征,用于分析设备内部放电情况。测得的 50 Hz 或 100 Hz 频率相关性的异常信号,一方面与同一运行工况下同类设备、同一设备不同相进行对比,结合信号特征分析对应的缺陷类型;另一方面通过幅值比较法确定设备壳体表面异常超声波信号最大的位置。

以图 3 所示 500 kV 某线路 C 相高压电抗器现场实测信号为例,根据多点检测结果,均存在如图 4 所示的具有 100 Hz 频率相关性的异常超声波信号。作为比对,对 B 相高压电抗器壳体表面进行超声波局部放电带电检测,未测得异常超声波信号。对图 4 所示的 C 相高压电抗器壳体表面测得的异常超声波信号进行分析,该振荡脉冲持续时间长,每个脉冲幅值都是先振荡上升然后振荡减小,其包络线近似为正弦波形,具有异常振动的信号特征。在图 3 所示的测点 2 和测点 3 进行超声波局部放电带电检测,测得如图 5 所示的夹杂冲击脉冲的异常超声波信号。该冲击脉冲信号分析为设备内部放电产生的放电信号。

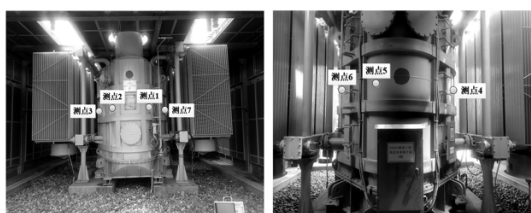


图3 变压器类设备超声波及振动检测传感器布置  
3) 在对 500 kV 高压电抗器开展振动检测时,同

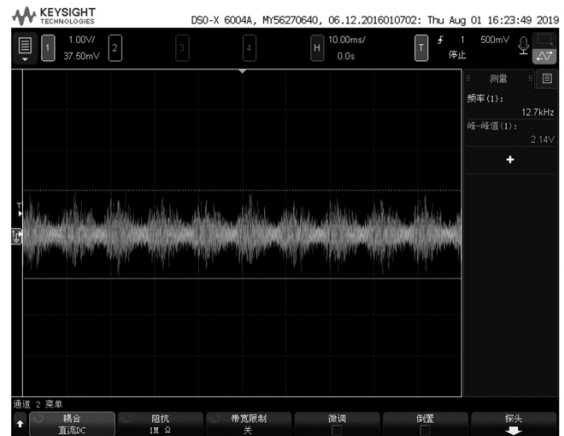


图4 500 kV 某线路 C 相高压电抗器异常超声波信号

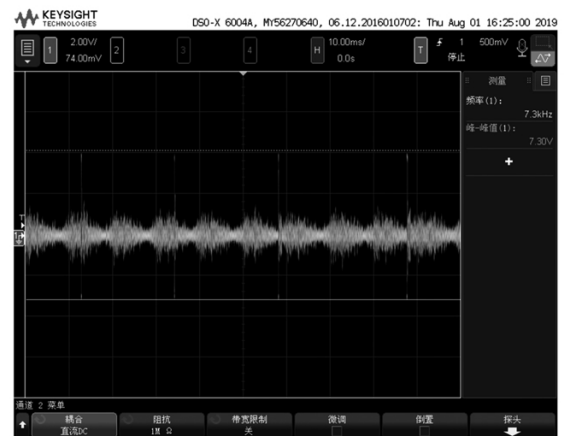


图5 500 kV 某线路 C 相高压电抗器夹杂冲击脉冲的异常超声波信号

样对运行中的变压器和高压电抗器,在保证足够安全距离情况下,围绕壳体一周布置振动测点,测点布置方式和超声波测点布置方式基本一致。逐一进行检测并记录信号用于分析设备振动情况。对于变压器和高压电抗器异常振动分析而言,除了对振动数据进行分析外,对同一运行工况下同类设备、对同一设备不同相进行比较是非常必要的。

以图 3 所示 500 kV 某线路 C 相高压电抗器现场实测信号为例,同时在该线路 A、B 相高压电抗器相同位置进行振动检测对比分析。如图 6 所示,三相高压电抗器 7 个测点的加速度分布在  $4.5 \sim 15 \text{ m/s}^2$  之间, B 相高压电抗器 7 个测点的振动加速度相比 A 相和 C 相均较小; C 相高压电抗器在测点 3 和测点 6 处的振动加速度最大,超过了  $12 \text{ m/s}^2$ ; 此外, A 相高压电抗器在测点 6 处的振动加速度也较大,超过了  $12 \text{ m/s}^2$ 。

如图 7 所示,三相高压电抗器振动信号波形畸变比测试数据显示,在 C 相高压电抗器测点 3、测点 4 和测点 5 的区域,振动信号波形畸变比最大;其次是 A 相高压电抗器,而 B 相高压电抗器振动信号波

形畸变比最小。进一步分析,发现 B 相高压电抗器振动信号主频率分布在 100 Hz; A 相高压电抗器振动信号主频率除了 100 Hz 以外,在 200 Hz 处也有较大分量;而与 A 相高压电抗器相比,C 相高压电抗器在 200 Hz 处的分量更大。

如图 8 所示,从三相高压电抗器振动信号奇偶谐波能量比测试数据看,C 相高压电抗器 7 个测点的振动信号奇偶谐波能量比整体大于 A 相和 B 相高压电抗器,其中 B 相高压电抗器振动信号奇偶谐波能量比最低。据此侧面印证综合分析,三相高压电抗器中,B 相高压电抗器的铁芯运行状态最好,无异常振动情况;A 相和 C 相高压电抗器均存在异常振动情况,其中 C 相高压电抗器异常振动情况最为严重,根据振动信号主频率和奇偶谐波能量比等参数分析,存在因夹件松动导致铁芯异常振动的缺陷。

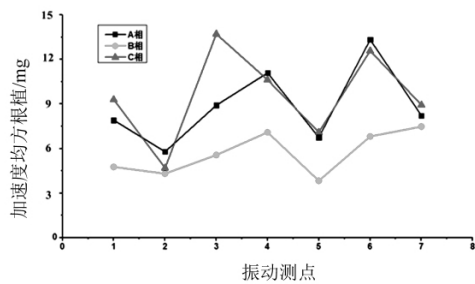


图 6 500 kV 某线路三相高压电抗器振动加速度

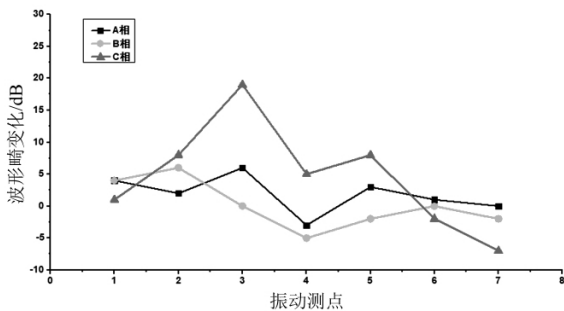


图 7 500 kV 某线路三相高压电抗器振动信号波形畸变比

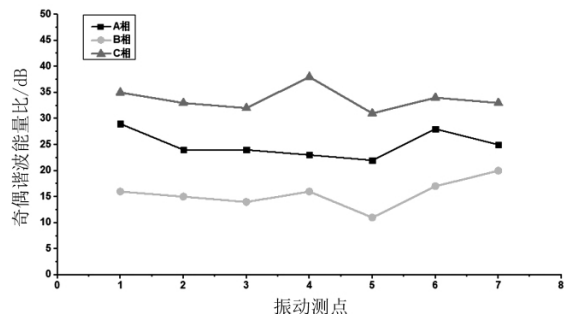


图 8 500 kV 某线路三相高压电抗器振动信号奇偶谐波能量比

### 3 基于声、电、振动检测的设备缺陷诊断

通过声电方法实现变压器或高压电抗器内部缺

陷定位后,根据缺陷所在部位的设备结构,结合振动检测结果进行综合诊断。若存在铁芯、夹件松动引发的悬浮电位放电,可激发出幅值较大的特高频异常信号和超声波异常信号。通常设备振动信号也会呈现异常,结合缺陷定位结果和油色谱数据,可诊断缺陷类型、缺陷位置及严重程度。油纸绝缘存在局部放电,往往超声波信号和振动信号不会呈现异常,特高频信号幅值也相对较低甚至无法传播到壳体表面被检测到,在此基础上可结合油色谱数据诊断缺陷类型、缺陷位置及严重程度。

对图 1 和图 3 所示 500 kV 某线路 C 相高压电抗器异常声、电、振动等异常信号进行综合诊断。异常特高频信号间歇性出现、幅值较小且具有 100 Hz 相关性的悬浮放电特征,仅在如图 1 所示的测点能测得该信号,无法进行精确定位,可据此分析缺陷靠近图 1 所示测点位置。该高压电抗器混合振动信号和放电信号的异常超声波信号幅值最大位置在如图 3 所示测点 2 和测点 3 部位,据此分析缺陷靠近这两个测点。该高压电抗器异常振动信号幅值最大位置在如图 3 所示测点 3 部位,据此分析缺陷靠近该位置。根据运行维护单位提供的油色谱检测数据,局部放电带电检测期间该高压电抗器 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 含量为 1.17 μL/L,总烃含量为 38.48 μL/L。综合特高频/超声波局部放电检测、振动检测和油色谱检测结果,500 kV 某线路 C 相高压电抗器由于设备振动过大,导致设备内部夹件松动,造成间歇性悬浮放电发生,放电缺陷位置靠近如图 3 所示测点 2 和测点 3 位置。

根据设备情况和历史运行数据,该高压电抗器自投运以来均存在较大的异常振动情况且运行期间油中长期存在不同程度的 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>。目前运行维护单位根据检测及诊断结果得出的建议是,综合该高压电抗器长期运行情况对其监视运行,2 周一次开展离线油色谱监测,一旦 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 含量超过 2.0 μL/L,即进行停电处理消除缺陷。

### 4 结 语

1) 上面对基于声电联合及振动带电检测的变压器类设备局部放电现场诊断方法进行了研究,验证了特高频法在壳体法兰接缝处、超声波法和振动法在壳体外表面能够测得局部放电信号用于缺陷诊断。

2) 通过某 500 kV 高压电抗器现场带电检测案例,对特高频法、超声波法和振动法对应信号特征进行了研究,现场可根据声电信号时域包络特征、频率相关性和振动信号加速度、波形畸变比和奇偶谐波

能量比进行缺陷类型判断。

3) 总结了基于声、电、振动检测变压器类设备缺陷诊断方法,通过精确定位结合设备结构,综合分析各类信号特征和油色谱数据,实现设备缺陷的可靠诊断。

参考文献

[1] 宋永华,孙棉鑫. 电力系统设备状态监测的概念及现状[J]. 电网技术, 2000, 24(11): 12-17.

[2] 熊汉武,张书琦,赵志刚,等. 电力变压器绕组幅向弯曲应力分析方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 931-938.

[3] 刘道生,刘宁,叶敬,等. 换流变压器在多参数下的油流带电现象及其对击穿强度影响[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 122-127.

[4] 彭晶,刘光琪,丁薇,等. 高压开关柜暂态地电压局部放电检测方法研究[J]. 云南电力技术, 2013, 44(4): 26-29.

[5] 丁登伟,唐诚,高文胜,等. GIS 中典型局部放电的频谱特征及其传播特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3243-3251.

[6] 潘志城,邓军,谢志成,等. 换流变压器和交流变压器振动信号特征的比较分析[J]. 变压器, 2020, 57(3): 35-40.

[7] 罗艳,周秀,唐长应,等. 基于声电联合定位法在换流

变局部放电检测中的应用[J]. 变压器, 2020, 57(1): 73-78.

[8] R. J. Van Brunt. Physics and Chemistry of Partial Discharge and Corona - recent Advances and Future Challenges [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 11(5): 761-783.

[9] 马啟潇,刘书第,何宇航,等. 基于时频检测的 GIS 设备异常振动分析[J]. 四川电力技术, 2017, 40(6): 64-67.

[10] Boggs S. A., Stone G. C. Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge [J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 1982, 17(2): 143-150.

[11] 司文荣,李军浩,黎大健,等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 21-25.

[12] L. E. Lundgaard. Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1992, 8(5): 34-43.

作者简介:

王超(1976), 硕士、高级工程师,长期从事电网设备专业管理工作;

许本茂(1990) 硕士,主要从事高压电气试验技术工作。

(收稿日期: 2020-04-21)

(上接第 8 页)

还是共同提高水、火电机组死区,都可以达到抑制超低频振荡的目的,但相应却可能减少系统的调频能力;由于水、火电机组对超低频振荡的影响存在差异,可以通过提高水电机组死区、降低火电机组死区的方法,达到抑制振荡和保持调频能力的平衡。合理配置调速器死区,实现不同调频手段的优化控制,是利用死区设置抑制超低频振荡的有效手段。

参考文献

[1] 陈刚,丁理杰,李旻,等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.

[2] 陈锦洲,段荣华,陈磊,等. 电力系统调频控制相关的频率振荡问题[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 82-87.

[3] 路晓敏,陈磊,陈亦平,等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64-70.

[4] 黄伟,段荣华,江崇熙,等. 多机系统超低频振荡稳定分析与调速器参数优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 185-193.

[5] 周鑫,和鹏,何鑫. 水轮发电机组抑制超低频振荡的阻

尼控制参数优化研究[J]. 云南电力技术, 2019, 47(6): 107-113.

[6] 胡立锦,杨永全,常喜强,等. 一次调频对电网频率特性影响及频率相关稳控措施研究[J]. 四川电力技术, 2013, 36(4): 10-14.

[7] 王渝红,陈阳,曾琦,等. 一种抑制超低频振荡的水电机组调速器参数协调优化方法研究[J]. 四川电力技术, 2019, 42(2): 10-14.

[8] 史华勃,陈刚,丁理杰,等. 兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器 PID 参数优化[J]. 电网技术, 2018, 43(1): 221-226.

[9] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序 7. X 版动态元件模型用户手册[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2020.

[10] 周靖皓,江崇熙,甘德强,等. 基于集值法对云南电网超低频振荡的稳定分析[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3147-3152.

[11] 陈磊,路晓敏,陈亦平,等. 多机系统超低频振荡分析与等值方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 10-15.

作者简介:

范成围(1989), 博士,工程师,从事电力系统频率稳定性研究工作。

(收稿日期: 2020-03-02)