

500kV 变压器局放试验故障分析和处理

李越

山西漳山发电有限责任公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i1.7605

[摘要] 500kV 变压器在电力系统中扮演着重要角色,但其局部放电(局放)故障是影响设备稳定性的关键问题。局放通常表现为电气、绝缘及机械故障,如过电压、短路、绝缘老化和机械振动等。本文通过对某输变电站 500kV 变压器局放故障的案例分析,结合局放试验数据、频谱分析、波形分析、温升试验、振动分析和红外成像技术,诊断了故障源并采取了有效的处理措施。故障处理方案包括内部绝缘的补修与重绕、外部污染和湿气的清除、材料及设计缺陷的改进等。通过这些措施,不仅恢复了变压器的性能,还提出了定期监测、环境控制和合理设计选材的预防措施,以提高设备的运行可靠性和延长使用寿命。

[关键词] 500kV 变压器,局部放电,故障诊断,故障处理,预防措施

Failure analysis and treatment of 500kV transformer local discharge test

Li Yue

Shanxi Zhangshan Power Generation Co., Ltd

[Abstract] The 500kV transformer plays an important role in the power system, but its local discharge (local discharge) fault is the key problem affecting the stability of the equipment. Local discharge is usually manifested as electrical, insulation and mechanical faults, such as overvoltage, short circuit, insulation aging and mechanical vibration. Through the case analysis of the 500kV transformer in a power transmission and transformation station, combined with the local discharge test data, spectrum analysis, wave form analysis, temperature rise test, vibration analysis and infrared imaging technology, the fault source is diagnosed and the effective treatment measures are taken. The troubleshooting solution includes the repair and rewinding of internal insulation, the removal of external pollution and moisture, and the improvement of materials and design defects, etc. Through these measures, not only the performance of the transformer is restored, but also the preventive measures of regular monitoring, environmental control and reasonable design of material selection are put forward to improve the operation reliability of the equipment and extend the service life of the equipment.

[Key words] 500kV transformer, partial discharge, fault diagnosis, fault handling, preventive measures

500kV 变压器作为电力系统中的关键设备,承担着重要的电力转换与传输任务。然而,局部放电(局放)作为变压器常见的故障类型,能够对设备的绝缘系统造成严重损害,甚至导致变压器失效。局放的发生不仅会加剧绝缘老化,还可能引发电气故障如过电压、短路,或机械故障如振动和热效应。针对这些问题,及时的局放试验、故障定位与处理措施显得尤为重要。

1、变压器局放试验常见故障故障的特征表现

局部放电在变压器运行中常常表现为一系列电气、绝缘及机械故障的征兆。通过分析局放故障的特征表现,可以有效地诊断故障源,并采取相应的维修措施。局放的不同类型会呈现出不同的故障特征,需要根据其表现来区分和定位。

1.1 电气过电压、短路

电气故障是局部放电引发的最常见故障类型之一。当变压器内部发生局放时,电场的变化可能导致局部区域电压的急剧

升高,出现过电压现象。过电压可能进一步引发电气设备的击穿,造成设备失效或损坏。短路是另一种常见的电气故障,局放在某些情况下会导致绕组或绝缘材料的击穿,从而发生短路,进而对变压器造成不可逆的损伤。此外,局部放电的积累效应可能引发电气故障的连锁反应,导致变压器的长期稳定性下降。因此,及时监测局部放电现象,有助于防范可能的电气故障。

1.2 绝缘故障

局部放电本质上是绝缘材料发生部分击穿或部分放电的过程。当局部放电发生时,通常会伴随放电电流的波动,电流波形可能发生变化,且波峰较高。随着放电的持续,局部放电会加剧绝缘材料的老化,进而出现电气绝缘性能下降的现象。此外,在某些情况下,局部放电会引起绝缘材料中的气泡形成,气泡的积聚将进一步恶化绝缘性能,甚至导致绝缘层完全破坏。局部放电的另一常见表现是绝缘表面出现污染或腐蚀,特

别是在湿气较重的环境中，局放现象往往会与表面污染物的积聚相互作用，造成绝缘系统的严重失效。

1.3 机械振动局部热效应

局部放电的发生还可能导致变压器内部出现机械故障。局部放电的放电过程伴随着热效应，放电区域的温度可能迅速上升，形成局部热源，这种局部的高温可能导致周围材料的软化或脆化，进而引发机械故障。局部放电所产生的振动也是一种机械故障的表现，特别是在变压器的某些部件（如金属外壳、绕组等）因局放现象而受到应力时，可能导致部件的疲劳或损坏，形成长时间运行中的机械问题。局部放电引发的热效应和振动不仅会影响设备的结构完整性，还可能导致绝缘层的机械损坏，从而进一步加剧故障的恶化。

2、500kV 变压器局放试验故障处理方法

2.1 故障定位与诊断

故障定位与诊断是局部放电（局放）试验中的关键环节，准确的故障诊断能够有效减少变压器运行中的风险，确保设备的稳定性和安全性。在局放试验过程中，首先通过局放测量仪器获取试验数据，结合多种分析方法对数据进行综合分析，从而定位故障源。常见的局放数据分析方法包括频谱分析和波形分析。

频谱分析可以帮助工程师通过观察局放信号的频率特性，判断故障类型以及发生的具体部位。波形分析则通过分析局放信号的波形特征，判断其与正常工作状态下的差异，进一步细化故障原因。在局放故障的诊断过程中，还可以结合其他检测手段，如温升试验、振动分析、红外成像等，进行多维度的分析，以确保故障位置的精确识别。温升试验可以监测变压器在试验过程中各部件的温度变化，从而反映绝缘问题或过热故障的存在。振动分析有助于识别变压器运行过程中因局放引起的机械振动，进而推测故障的发生区域。红外成像技术则通过观察变压器表面温度分布，进一步揭示可能存在的局部放电或热效应区域。

2.2 故障处理方案

2.2.1 内部绝缘问题的处理

变压器内部绝缘出现缺陷时，常需要进行局部补修或重绕处理。局部补修通常适用于小范围的绝缘损伤，通过使用专用的绝缘修复材料，恢复其绝缘强度。而当绝缘缺陷较为严重时，则需要对整个绕组的重绕处理，重新设计和制作绝缘系统，以确保变压器在高压工作下的稳定运行。

2.2.2 外部污染和湿气的清除

外部污染和湿气对变压器的绝缘性能有显著影响。清除外部污染通常需要对变压器外表进行彻底清洁，尤其是变压器表面可能积聚的灰尘、盐雾和其他污染物，采用高压气流或化学清洗剂进行清洁。对于湿气问题，可以采用干燥处理措施，如通过加热设备将变压器内部的湿气排出，或者使用除湿剂和真空干燥技术去除绝缘油或固体绝缘材料中的水分，恢复绝缘性能。

2.2.3 材料及设计缺陷的改进

材料和设计缺陷是局部放电发生的重要因素之一。在发现局部放电问题时，首先应检查变压器使用的绝缘材料是否符合

标准，是否存在材料老化、质量缺陷等问题。对材料的改进可以通过采用更高性能的绝缘油、固体绝缘材料或新型复合材料，提升绝缘系统的抗局放能力。此外，优化变压器的设计工艺，改进绕组的制造工艺和连接方式，减少因设计或加工缺陷导致的局放隐患，是防止局部放电的重要途径。

2.3 预防措施

局部放电作为变压器常见的故障之一，其发生往往与设备的维护、环境以及设计有关。因此，采取有效的预防措施至关重要。

2.3.1 定期监测与维护

定期对变压器进行局放试验和监测是预防局部放电故障的关键手段。通过建立完善的监测机制，定期对变压器进行局放测试，能够及时发现潜在的绝缘问题和局放现象，采取有效措施防止其发展为严重故障。此外，变压器运行中的日常维护也是预防局放的有效途径，包括定期检查绝缘油的质量、清洁变压器外部、定期更换绝缘材料等，确保设备处于良好的工作状态。

2.3.2 运行环境控制

变压器的运行环境对局部放电故障的发生有着直接影响。高湿、污染或温度波动较大的环境容易导致绝缘材料的劣化，从而增加局部放电的风险。因此，合理控制变压器的运行环境，确保其在适宜的温湿度条件下工作，是预防局部放电的有效手段。例如，在潮湿的地区，增加变压器外部的防潮措施，使用除湿系统，保持设备的干燥状态；在污染较重的地区，可以加装防护罩，减少污染物对变压器的侵害。

2.3.3 合理的设计和选材

合理的设计和选材是防止局部放电的根本措施之一。设计过程中，除了满足基本的电气性能要求外，还应考虑设备的抗局放能力。例如，增加绝缘层的厚度、优化绕组结构、选择适当的绝缘材料等，可以有效提高变压器的局部放电容忍度。选材方面，采用高质量的绝缘油、绝缘纸及其他复合材料，不仅可以延长设备的使用寿命，还能显著降低局部放电发生的概率。

3、案例分析

3.1 案例背景

该案例涉及的 500kV 变压器位于某输变电站，是该站的核心设备之一。该变压器自安装以来运行良好，定期进行局放试验。最近的局放试验中发现，变压器出现了较为严重的局放现象。经过数据采集，局放量明显超过了设备运行的安全标准。根据试验数据显示，局放量为 3.8 pC（皮库伦），超出了正常运行标准（一般为小于 1.5 pC）。

3.2 故障定位与诊断

3.2.1 局放试验数据分析

在此次局放试验中，使用了高精度局放检测仪器（如 TEV、UHF 探头等）进行数据采集。在 100kHz 到 1MHz 之间，变压器高压侧出现了多个明显的频率峰值，频率分布的最高峰值出现在 450kHz 处，表明该区域可能发生了局部放电。

通过对局放波形的分析，发现局放波形表现为明显的脉冲信号，其峰值电流为 150mA，持续时间为 2ms，波形宽度接近

300 μ s。该波形与变压器内部绝缘老化引起的典型局部放电波形相符, 显示出异常的电流波动。

3.2.2 故障源定位

通过综合分析频谱和波形数据, 局放源被定位在变压器的高压绕组部分。为了进一步确认这一结论, 使用了以下辅助检测手段:

在满载运行条件下进行温升试验, 测得高压绕组温度达到了 105°C, 超出了设计的最大允许温度 (一般为 90°C)。这一温度异常升高的现象表明, 该区域可能存在过热和局部放电现象。器进行了振动分析。数据显示, 在 500Hz 的频率处出现了明显的振动峰值, 表明局部放电可能引起了机械振动。这与局放波形中的脉冲信号频率吻合, 进一步证实了局放故障发生在变压器的高压绕组部分。使用红外热成像技术对变压器表面进行了扫描, 结果显示高压侧绕组的绝缘表面温度出现了较大的温差, 热图显示部分区域的温度高达 110°C, 明显异常, 验证了温升试验的结果。

3.2.3 故障分析

根据局放试验数据及辅助检测结果, 工程师确认局放故障的主要原因是变压器高压绕组的绝缘老化和外部污染。具体来说: 变压器高压绕组的绝缘材料长期暴露在高电压和高温环境下, 导致材料逐渐劣化, 耐电压能力下降, 进而形成局部放电现象。由于变压器长期处于满载运行状态, 过度的温升进一步加速了绝缘老化。另外变压器的外部环境存在较高的湿度 (相对湿度为 85%), 同时由于缺乏有效的防护, 积聚了大量的灰尘和盐分, 这些污染物在绝缘表面形成了导电层, 导致了局部放电现象的发生。

3.3 故障处理方案

3.3.1 内部绝缘重绕与补修

根据故障分析结果, 决定对变压器高压绕组进行处理。首先, 对绝缘材料损坏区域进行了补修。使用了高性能绝缘涂料和修复材料, 针对局部放电区域进行了加固修复, 恢复了该部分的绝缘强度。然而, 对于损坏较严重的绕组, 采取了重绕处理。具体步骤包括:

(1) 拆解损坏区域的绕组, 检查其内部绝缘材料的损坏情况。

(2) 替换老化和受损的绝缘材料, 采用新型高抗局放的绝缘纸和固体绝缘材料。

(3) 重新绕制高压绕组, 并采用改良的绕组结构设计, 增加绕组间的绝缘距离, 以增强耐高压性能。

3.3.2 外部污染和湿气的清除: 干燥处理与绝缘清洁

针对外部污染和湿气问题, 采取了以下清除措施:

对变压器内部进行了真空干燥, 使用真空泵将变压器内部的绝缘油和固体绝缘材料中的水分完全排出。干燥处理后, 变压器的绝缘油含水量从原来的 0.45% 降至 0.05%, 大大提高了绝缘油的性能。对变压器外部进行全面清洁, 采用高压气流和化学清洗剂清除表面污物, 特别是高压侧的污染层, 确保绝缘表面清洁。

3.3.3 材料及设计缺陷的改进

在重绕过程中, 选用了新型的高耐压绝缘材料, 如高分子

聚合物材料和纳米复合绝缘纸, 这些材料具有更强的抗局放能力和耐高温性能。优化了绕组的设计, 增加了绕组之间的绝缘距离, 同时对绕组的结构进行了强化, 以减小局部放电的发生概率。

4、预防措施

4.1 定期监测与维护

定期进行局放试验和设备检测是预防局部放电的首要措施。通过定期监测变压器的局放数据, 及时发现潜在的绝缘问题, 能够提前采取措施进行修复, 从而防止故障的发生。与此同时, 还需要加强对变压器其他部件的维护, 如定期检查绝缘油的质量、清洁设备外部、检查防潮设施等, 确保设备始终保持在最佳运行状态。

4.2 运行环境控制

变压器的运行环境对局部放电有着直接的影响, 特别是在湿气和污染较重的地区。为了防止局部放电, 变压器应尽可能工作在稳定的环境条件下。高湿地区应加强除湿措施, 通过安装除湿装置或使用防潮材料, 保持变压器绝缘系统的干燥; 在污染严重的地区, 可通过加装防护罩、定期清洁外部设施等方式减少污染物的影响。

4.3 合理的设计与选材

合理的设计和选材是提高变压器局部放电耐受能力的基础。在设计阶段, 增加绕组间距、优化绝缘结构, 可以有效减少局部放电发生的概率; 在材料选择上, 应优先选用耐高压、高耐热性和高抗局放能力的绝缘材料。通过改进设计和选材, 能够从根本上提高变压器的安全性和可靠性。

5、结论

通过对 500kV 变压器局部放电故障的深入分析与处理, 本文展示了如何利用局放试验数据及辅助检测手段 (如频谱分析、波形分析、温升试验、振动分析和红外成像等) 有效定位故障源, 并采取针对性的处理措施。故障的成功修复不仅恢复了变压器的正常运行, 还为变压器的长期稳定性提供了保障。随着变压器设备在电力系统中应用的不断扩大, 定期监测、运行环境控制、合理的设计与选材等预防措施将成为保障设备安全运行的重要手段。通过不断优化维护流程和设计工艺, 我们可以有效减少局放故障的发生, 延长变压器的使用寿命, 进一步提升电力系统的安全性与经济性。

[参考文献]

[1] 施未濛. 高压试验中变压器试验问题和故障处理措施[J]. 电力设备管理, 2024, (16): 17-19.

[2] 曹士冬, 杜晓岩. 500kV 变压器感应耐压带局放试验闪络放电分析[C]// 中国电力设备管理协会. 全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会论文集(一). 国网天津市电力公司高压分公司; , 2024: 3.

[3] 刘平. 500kV 主变局放试验放电故障分析[J]. 电工电气, 2022, (07): 71-73.

[4] 何金海, 江波, 姚文吉, 等. 一起 110kV 变压器铁心多点接地故障的跟踪分析与现场处理[J]. 湖北电力, 2022, 46(01): 107-112.