

电力变压器常见故障与诊断方法探析

宋志尚 张增祥 李守业 丰宇庭 王怡凡

摘要: 电力变压器是电力系统中至关重要的设备,负责将电压升高或降低,以适应电力传输和配电的需要。由于电力变压器长期处于高电压和大电流的工作环境中,极易受到各种外界因素的影响而产生故障。这些故障不仅会影响变压器的正常运行,还可能导致整个电力系统的瘫痪。因此,及时准确地诊断变压器故障,保障其安全稳定运行,具有重要的意义。本文将探讨电力变压器的常见故障及其诊断方法,以期为变压器的维护和管理提供参考。

关键词: 电力变压器; 常见故障; 诊断方法

引言

电力变压器是电力系统核心设备,运行的稳定性与安全性非常重要。但因其复杂的结构和多变的运行环境,变压器长时间运行难免发生绝缘老化,绕组损坏和油质劣化的各类故障。这些故障如不能及时发现并处理就会造成设备的损坏,供电的中断甚至造成电网大面积停电事故的发生。近年来随着电力系统的不断扩大,电力设备运行时间不断增加,变压器故障频发性受到人们的普遍关注。为了迎接这一挑战,中外学者及工程技术人员不断深入地研究变压器故障诊断技术,并发展出许多先进诊断方法,例如,气体色谱分析、局部放电检测、红外热成像。这些技术的使用大大提高了变压器故障诊断工作的准确性与及时性,对电力系统安全运行起到强有力的保障作用。

一、电力变压器基本原理与结构

1. 电力变压器的工作原理

电力变压器原理是以电磁感应定律为基础,核心是利用交变磁场来转换电压。交流电经过变压器一次绕组时

会在铁芯内形成交变磁通,该磁通既经过一次绕组又经过二次绕组。由法拉第电磁感应定律可知:交变磁通在二次绕组上感应电动势来进行电压变换。电压转换的比率是由一次和二次绕组的匝数比决定的,也就是说,一次侧电压与二次侧电压的比值等于一次侧匝数与二次侧匝数的比值。另外,变压器能够在维持频率恒定的前提下输送电能,通过阻抗变换、隔离等作用,保证电力系统平稳运行。电力变压器是电力系统不可缺少的关键设备,它的性能参数包括额定电压、额定电流、额定容量等等,都需要在设计、制造以及运行过程中进行严格的控制与监控。

2. 电力变压器的主要结构组成

电力变压器主结构严密、结构复杂,核心是铁芯和绕组巧妙组合。铁芯采用高导磁率硅钢片叠装而成,既形成低磁阻磁路,又因其特殊设计降低涡流及磁滞损耗而成为能量转换之重点。绕组是变压器电路中的一部分,它是用绝缘铜线或者铝线仔细缠绕而成,分原边和副边两部分,利用电磁感应来达到电压和电流之间转换,它的设计和绕制工艺,直接关系到变压器性能和稳定。另外,油箱、冷却系统、保护装置、绝缘系统、分接开关和套管等配件也各自发挥其应有的作用,一起维护变压器安全、高效地运行。(见下图1)

二、电力变压器的常见故障类型

1. 绝缘老化故障

绝缘老化故障作为电力变压器在运行中经常发生的一种严重故障,对变压器性能及寿命有着直接的影响。绝缘材料受长期电场,热场及环境应力等因素影响,产生物理及化学变化而使性能逐步劣化。这一老化过程一般表现在绝缘纸及绝缘油机械强度降低,电气性能变坏,局部放电加剧。绝缘材料老化不但使变压器耐压能力下降,而且使变压器在过电压或者过载运行情况下更易绝

作者简介:

1. 宋志尚(1998.09——)男,汉族,本科学历,助理工程师,主要从事柱上开关及柱上台区方面的研究工作。
2. 张增祥(1992.04——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事柱上开关及柱上台区方面的研究工作。
3. 李守业(1986.06——)男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事柱上开关及柱上台区方面的研究工作。
4. 丰宇庭(1995.12——)女,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事柱上开关及柱上台区方面的研究工作。
5. 王怡凡(2000.03——)女,汉族,本科学历,助理工程师,主要从事柱上开关及柱上台区方面的质量管理工作。

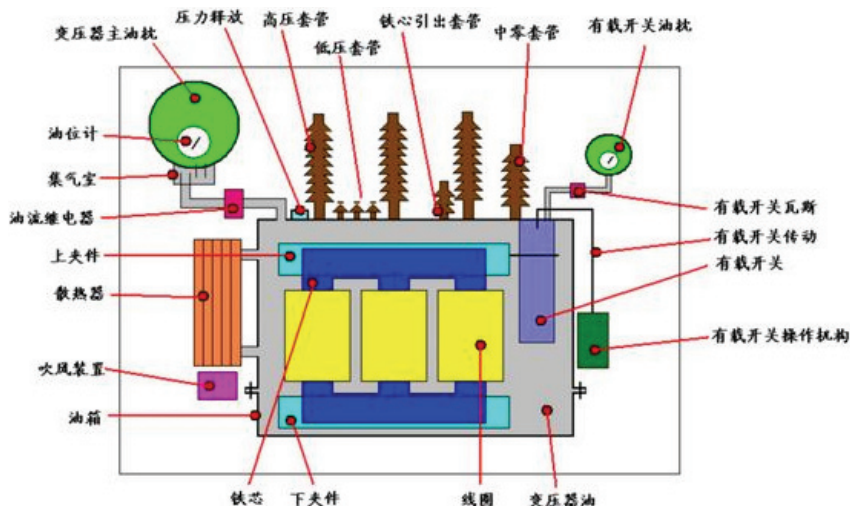


图1 变压器主要器件示意图

缘击穿。尤其当温度高、湿度大或者污染环境时，绝缘老化速度会增加，变压器故障率也会明显增加。绝缘老化引起的故障大多表现出慢性累积性特征，在早期不易被觉察，但是当发展至一定阶段时，常可诱发突发的短路或者绕组烧损等电气故障。防止与诊断绝缘老化故障需定期开展油质分析，绝缘电阻测量及局部放电检测等工作，以便对绝缘系统健康状态作出评价并及时采取适当维护措施，延长了变压器使用寿命，确保了电力系统安全运行。

2. 绕组故障

绕组故障作为电力变压器常见而又危害性较大的故障类型之一，对变压器正常工作及安全性造成了直接的影响。绕组采用多层铜或者铝线圈，一般要经受高电压、大电流的作用，任何异常情况均会造成严重的后果。绕组故障的常见表现形式有绕组变形，短路，过热。绕组变形一般是由电动力或者机械冲击等因素造成的，会造成匝间短路或者绕组破裂，从而进一步诱发变压器发生严重故障。短路故障往往产生于绕组内，因绝缘材料老化或者电气应力超出设计承受限度而使绕组线圈间短路，继而诱发电流冲击而产生严重电气损伤。过热故障通常由局部过负荷或冷却系统失效引起，绕组温度一旦超过设计限值（如105℃或更高），绝缘材料将加速老化，甚至发生击穿，导致短路或火灾。绕组故障不但会影响变压器平稳运行，而且会造成大范围电力系统事故。为了避免绕组出现故障，建议定期执行频率响应分析（FRA）、直流电阻测试以及油中溶解气体分析（DGA）等检测手段，这些方法能有效地识别绕组故障的早期迹象，协助技术人员及时采取措施进行检修或者更换，确保电力系统的安全稳定运行。

3. 油质劣化故障

油质劣化故障在电力变压器的运行中普遍存在并产生深远影响，它与设备绝缘性能、散热能力等有着直接的联系。变压器油以冷却、绝缘为主，它的好坏关系到变压器能否可靠地运行。长期运行或者在高温、高压作用下，变压器油化学成分发生改变，产生酸性物质、水分及可燃气体等劣化产物，不但使油绝缘强度下降，而且还会加快内部绝缘纸老化。酸性物质增多对金属部件有腐蚀作用，使绕组表面发生氧化而使变压器绝缘性能下降。水进入变压器油中会显著降低其介电强度、增大局部放电风险、诱发绝缘击穿。像氢气和一氧化碳这样的可燃气体积累，往往是由于绝缘材料的分解导致的，这意味着变压器内部可能存在热故障或电气问题。油质劣化既影响变压器正常工作，又会造成电力突然中断或者设备损坏。因此，周期性地对油中的溶解气体进行分析（DGA）、测定酸值以及进行介电强度的检测，这些都是对变压器健康状态进行监控的关键方法，可及早发现问题并采取必要措施对其进行检修或替换，以延长变压器使用寿命，保证电力系统运行可靠安全。

三、电力变压器的常用故障诊断方法

1. 气体色谱分析法

气体色谱分析法（DGA）是诊断电力变压器内部故障的关键技术，通过检测和分析变压器油中溶解的气体成分和浓度，能够早期识别绝缘老化、过热、放电等故障类型。变压器油在运行过程中，受热、电应力等作用，可能产生氢气（H₂）、甲烷（CH₄）、乙炔（C₂H₂）、乙烯（C₂H₄）、二氧化碳（CO₂）和一氧化碳（CO）等气体。不同的故障类型会产生不同的气体组合和浓度水平。例

如，乙炔（ C_2H_2 ）的高浓度往往表明变压器内部可能发生了高温电弧放电，而氢气（ H_2 ）和甲烷（ CH_4 ）的增加可能与局部过热相关。通过色谱分析仪对这些气体进行定量分析，技术人员可以通过气体浓度的绝对值及其相对变化，结合故障气体比例法（如Rogers比值法）进行判断，识别出变压器内部的故障类型和严重程度。对于初期的潜在故障，如局部放电或低温过热，气体色谱分析能够在故障进一步恶化之前提供预警信号。DGA法的高灵敏度和准确性，使其成为电力行业广泛应用的重要工具，尤其适用于对关键变压器的在线监测，有效防止突发性故障引发的大范围停电或设备损坏，为电力系统的安全运行提供可靠保障。

2. 局部放电检测法

局部放电检测法作为电力变压器故障诊断的重要技术手段，被应用于绝缘系统局部放电的检测与评价，而这些细微的电气放电会预示着更为严重的故障发生。局部放电一般产生于绝缘材料内部气隙、裂纹或者杂质等部位，电场强度大于某一临界值后绝缘材料内部薄弱部位产生放电，但是并不足以穿透绝缘系统。利用局部放电检测可捕捉这些放电活动脉冲信号并对它们的幅度，相位及频率特征进行分析，进而对放电源位置及轻重程度做出判断。

局部放电的检测手段主要涵盖了电容耦合法、超声波检测技术以及超高频（UHF）检测方法等几种。电容耦合技术是通过安装在变压器上的耦合电容器来捕获放电的脉冲，这种方法特别适合于监控放电的强度和频率。超声波检测法是利用放电所发出的声波信号并由传感器检测出这些信号源，特别适合于固体绝缘放电现象的检测。超高频检测方法是通过对监测UHF范围内的电磁波信号来识别局部放电活动的，它具有很高的灵敏度和抗干扰能力，适合用于在线监测。

早期检测并准确定位局部放电对预防严重故障具有重要意义。通过对放电重复率、放电量（pC）、相位位置等局部放电特征参数进行监测，技术人员能够辨识出绝缘系统薄弱部位，以及当放电现象进一步演变为严重故障之前，所采取的必要维修措施。

3. 红外热成像技术

红外热成像技术作为一种非接触式诊断手段，在电力变压器故障检测方面具有广泛的应用前景，尤其善于辨识过热问题。变压器运行时因绕组、铁芯或者连接点不正常而出现局部温度上升。红外热成像技术是通过对物体表面辐射的红外辐射进行捕获并转换成可视热图像来实现对变压器各处温度分布的直观展示和温度异常区域的确定。

这项技术因其高度的灵敏性，能够探测到细微的温度变化，这些变化通常在 $0.1^{\circ}C$ 左右，这对于早期发现和定位可能的故障位置是非常关键的。热成像图中，温度升高区域通常以颜色的形式突出显示，例如红色或白色区域代表较高温度，而蓝色或绿色区域代表较低温度。通过分析这些热图像，相关技术人员能够很快地判断哪些区域可能会出现接触不良，绕组局部温度过高或者铁芯磁路不均。

另外，红外热成像技术可实现在线监测而无需停机运行，以免影响正常生产。这一特性使得它尤其适合定期巡检使用，技术人员可通过对不同时段热成像数据进行比较来评价设备老化程度及故障发展趋势，以便在问题出现之前就做好预防措施。红外热成像技术对于提高电力变压器工作的安全性、稳定性，延长设备使用寿命等都起到了举足轻重的作用。

结束语

电力变压器是电力系统的核心设备之一，它的运行状况直接影响着电网安全稳定运行。常见的故障有绝缘老化，绕组损坏，油质劣化等等，这些故障是关系到变压器能否正常工作的关键性问题。利用气体色谱技术、局部放电检测技术以及红外热成像等众多前沿的检测手段，我们能够准确地检测和定位这些故障，并为其提供及时的维修和修复建议。这些技术在增强变压器运行可靠性的同时，也增加了设备使用寿命、减少停电风险、减少维护成本。在电力系统日益发展的今天，诊断技术不断地进步，对变压器故障进行早期预警与预防性维护是强有力的保证。

参考文献

- [1] 蔡兆磊, 于海军. 电力变压器的故障诊断与维修策略——评《电力变压器运行与维修》[J]. 现代雷达, 2022(4): 101-101.
- [2] 韩松涛. 基于声学特征和深度学习的电力变压器绕组短路故障诊断方法[D]. 兰州理工大学, 2023.
- [3] 杨国仓, 赵国栋, 马祥. 关于电力变压器状态检修及故障诊断方法探研[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2024(002): 000.
- [4] 王飞, 张念春, 宋怡臻. 论变压器在电力系统中的常见故障和诊断技术[J]. 水电水利, 2023, 7(4): 40-42.
- [5] 刘礼芳. 电力变压器的故障诊断及检修策略[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2022(4): 3.