

电力变压器故障诊断技术研究与应用

马兆杰 李 迁

国网安徽省电力有限公司淮北供电公司 安徽淮北 235000

摘 要：电力变压器是电力系统的核心设备，其安全稳定运行直接关系到整个电网的可靠性。然而，在长期运行过程中，变压器受到电气、机械、热及环境因素的影响，可能发生各种故障，威胁电网安全。因此，故障诊断技术的研究与应用成为保障变压器安全运行的重要手段。本文对电力变压器常见故障类型进行分类分析，探讨了目前主流的故障诊断技术，包括油中溶解气体分析（DGA）、局部放电检测、频谱分析、红外热成像以及人工智能诊断技术等，并结合实际应用案例，分析各类技术的优缺点。研究表明，单一诊断方法难以满足变压器复杂故障的检测需求，而多种诊断技术的融合能够有效提高故障检测的准确性。未来，基于大数据、人工智能、物联网等新技术的综合故障诊断方法将成为研究热点，有望进一步提升变压器故障检测的智能化水平。

关键词：电力变压器；故障诊断；油中溶解气体分析；局部放电检测；人工智能

引言

电力变压器是输配电系统中的关键设备，广泛应用于发电、输电和配电环节，其运行状态对电网的安全性、稳定性和经济性具有直接影响。在长期运行过程中，变压器受电压波动、负载变化、环境温度以及内部老化等因素影响，可能产生多种故障，如绕组短路、绝缘老化、局部放电、过热等。这些故障若不能及时发现并处理，将导致变压器损坏甚至引发电网大范围事故。因此，研究高效、精准的故障诊断技术，对保障电网安全运行具有重要意义。

传统的故障诊断方法主要依赖人工巡检和常规检测手段，如绝缘电阻测试和局部放电检测，但这些方法存在检测周期长、故障预警能力弱等局限性。随着传感技术、信号处理技术和人工智能技术的发展，基于油中溶解气体分析（DGA）、红外热成像、超声波检测、振动分析等方法的智能诊断技术逐步应用于变压器状态监测，提高了故障检测的准确性和实时性。本文围绕电力变压器故障诊断技术，系统分析当前主流的诊断方法，探讨各类技术的适用性及发展趋势，并结合应用案例，研究其在实际工程中的应用效果，为提高变压器故障诊断水平提供参考。

一、电力变压器常见故障类型及特征

（一）绕组故障

绕组是变压器的核心部件，由绝缘导线按特定方式

绕制而成，在长期运行过程中可能因电流冲击、短路故障、绝缘老化、机械应力等因素导致绕组变形、匝间短路或断裂。绕组故障主要表现为匝间短路、层间短路和相间短路，其中匝间短路是最常见的一种。当绕组发生短路时，局部电流骤增，导致过热，使绝缘材料迅速劣化甚至分解，从而进一步加速绕组损坏。严重情况下，短路可能导致绝缘击穿，引发局部放电或整体故障，最终导致变压器运行异常甚至损毁。此外，绕组长期承受电磁应力，在运行过程中可能逐渐发生变形，使得绕组间的绝缘距离发生变化，进一步增加短路的风险。为了准确检测绕组故障，通常采用直流电阻测试、变压器频响分析（FRA）以及油中溶解气体分析（DGA）等技术。其中，直流电阻测试可以检测绕组断线、接触不良等问题，而频响分析能够识别绕组变形情况。油中溶解气体分析则能在早期发现由于绕组过热或放电导致的气体变化，从而提前预警可能的绕组故障。

（二）绝缘故障

绝缘系统是变压器长期稳定运行的重要保障，主要由绝缘油、固体绝缘材料和气体绝缘介质组成。绝缘性能的下降是影响变压器寿命的关键因素之一，绝缘老化、外部污染、受潮以及电场应力等因素均可能导致绝缘介质的劣化，从而引发一系列故障。绝缘材料长期处于高温、电场和湿度环境下，其分子结构可能受到破坏，使绝缘性能降低，导致局部放电现象频发。绝缘故障主要包括油质劣化、纸质绝缘老化、绝缘受潮以及局部放电

等。变压器绝缘油在长期运行中会受到高温、电场和杂质的影响，逐渐氧化、碳化，导致油的击穿电压降低，进而降低变压器整体的绝缘水平。此外，纸质绝缘老化是不可逆的，绝缘纸纤维的降解会削弱其机械强度，增加短路故障的风险。受潮也是绝缘系统的一大隐患，水分的渗入会降低绝缘油的介电强度，增加击穿概率。局部放电是绝缘故障的早期表现，局放现象通常发生在绝缘缺陷或气隙处，若不加以控制，会导致绝缘系统进一步恶化，最终可能引发全面击穿故障。油中溶解气体分析和局部放电检测是识别绝缘故障的主要方法。其中，DGA可以通过检测变压器油中的气体成分变化，判断是否存在绝缘老化或局部放电问题，而局部放电检测能够直接识别绝缘薄弱区域，提供针对性的故障评估信息。

（三）散热系统故障

变压器在运行过程中会产生大量热量，主要来源于铁损、铜损及其他电磁损耗。若散热系统运行不畅，无法及时将热量传导至外部环境，则会导致变压器内部温度异常升高，引发过热故障。散热系统通常包括散热器、冷却风扇、油泵、散热管等部件，任何一个环节发生故障都可能影响变压器的散热性能。例如，冷却风扇损坏会导致空气循环受阻，使变压器外壳和内部温度升高。散热器堵塞则可能由于灰尘、油污或环境污染造成，导致热交换效率下降，使油温无法有效降低。油泵的故障可能导致油循环不畅，使得变压器内部的热量无法均匀分布，从而加速局部过热现象。此外，冷却油量不足或油质劣化也会影响散热效果，导致变压器温升超限。温度过高不仅会加速绝缘老化，还可能引发过热击穿或热膨胀损坏。为了及时发现散热系统异常，通常采用红外热成像检测技术，通过监测变压器表面温度分布，识别局部过热区域。此外，温度传感器可用于实时监测油温及关键部件温度，结合智能监测系统进行预警分析，以便及时采取维护措施，确保变压器运行安全稳定。

二、变压器故障诊断技术

（一）油中溶解气体分析（DGA）

DGA技术广泛用于变压器故障诊断，通过检测油中气体成分及其浓度变化，判断设备运行状态。变压器发生电弧放电、局部放电或过热故障时，绝缘油分解产生氢气（ H_2 ）、甲烷（ CH_4 ）、乙烯（ C_2H_4 ）等特征气体。DGA利用气体浓度及比值关系分析故障类型和严重程度。

常见分析方法包括键合比法、Roger比值法和三比值法。键合比法通过特定气体比例识别放电或热故障，

Roger比值法通过关键气体比值判断故障类型，三比值法利用数学模型提高分类准确性。这些方法通常结合使用，以增强诊断可靠性。

DGA技术灵敏度高，可在故障初期检测微量气体变化，提供预警，降低重大事故风险。但其准确性受采样质量、环境因素及数据模型影响，可能导致误判。此外，负载变化影响气体溶解速率，也可能引发误差。近年来，人工智能和大数据技术被引入DGA诊断，利用神经网络、支持向量机等优化数据处理，提高故障识别精度。结合DGA与其他检测手段，可提升变压器故障诊断的准确性，保障电网安全运行。

（二）局部放电检测

局部放电（PD）是变压器绝缘劣化的重要信号，通常发生在绕组缺陷、气隙、潮湿区域等部位。局放持续存在会加速绝缘老化，甚至导致绝缘击穿，造成设备损坏，因此局放检测是评估绝缘状态的关键技术，可提供早期预警，减少事故风险。

主要检测方法包括超声波检测、特高频（UHF）检测和脉冲电流法。超声波检测基于局放产生的高频声波信号，抗电磁干扰能力强，适用于复杂环境，但对低能量局放检测精度有限。UHF检测通过天线捕捉局放产生的特高频电磁波信号，灵敏度高，可有效降低外部噪声干扰，适用于在线监测。脉冲电流法则测量放电脉冲引起的瞬时电流变化，适用于实验室测试和在线监测，但易受环境噪声影响。

局部放电检测对变压器运行维护至关重要，但不同检测方法在适用性和精度上存在差异。为提高可靠性，通常采用UHF检测与超声波检测联合应用，以弥补单一方法的局限性，提升故障定位准确性。此外，人工智能与大数据分析技术的引入，使局放诊断更加精准，优化信号处理，提高检测效果。未来，通过优化局放检测技术，结合传感器网络和远程监测系统，可进一步提升变压器绝缘状态评估的智能化水平，提高电网运行的安全性和稳定性。

三、新兴智能诊断技术

（一）红外热成像技术

红外热成像技术基于红外辐射原理，可对变压器外部温度分布进行实时监测，识别散热异常、局部过热等问题。利用红外热像仪捕捉设备表面温度变化，并通过热图分析判断散热系统是否正常运行。当冷却风扇损坏、散热器堵塞或油循环受阻时，该技术可快速发现异常温

升,为运维提供预警信息。

其优势在于非接触式检测和在线监测能力,无需停电即可进行温度巡检,提高了安全性和效率,且适应不同环境。然而,该技术仅能反映设备表面温度变化,难以直接探测内部故障,如局部放电或绝缘老化,需结合DGA、局部放电检测等方法,提高诊断全面性。未来,通过提升热像仪分辨率和数据处理能力,可增强诊断精度,为变压器状态监测提供更可靠的技术支持。

(二) 人工智能与大数据分析

人工智能在变压器故障诊断领域应用广泛,依托机器学习、神经网络和大数据分析构建智能诊断模型,提升预测和识别精度。传统监测方法依赖人工经验,而人工智能可自动分析海量历史数据,提取故障特征,提高诊断效率。

机器学习算法,如神经网络、支持向量机(SVM)、决策树、随机森林等,被用于故障分类与模式识别。深度学习技术,如卷积神经网络(CNN)和长短时记忆网络(LSTM),可分析时间序列数据,预测故障趋势,实现预防性维护,提高变压器运行可靠性。

大数据分析对变压器健康管理具有重要作用。通过分析历史运行数据、环境因素、负载变化等信息,构建健康指数模型,实现精准评估。智能诊断系统可实时监测设备状态,并结合趋势预测,提供维护建议,避免突发故障。未来,人工智能将推动变压器故障诊断从被动检修向主动维护转变,提升电网安全性和稳定性。

(三) 多传感器融合技术

单一检测手段难以全面掌握变压器状态,多传感器融合技术通过集成DGA、局部放电、红外热成像、振动分析等数据,提高故障诊断精度。

各传感器采集信号相互补充,弥补单一方法局限。例如,DGA用于检测油中溶解气体,判断绝缘老化或过热故障,局部放电检测识别绝缘缺陷,红外热成像反映散热系统状态,而振动传感器监测绕组松动、铁芯异常振动等机械故障。

未来,多传感器融合将结合云计算和物联网,实现远程智能监测。云计算可实时处理海量数据,提高诊断效率,物联网实现远程在线监测,降低人工巡检成本,提升智能化管理水平。综合应用多传感器数据融合,变

压器故障诊断系统将更全面地评估设备健康状况,增强电网安全性,推动电力系统向智能化发展。

四、变压器故障诊断技术的工程应用

(一) 在线监测系统的构建

电力企业逐步推广智能在线监测系统,通过远程数据采集实现实时监测,结合大数据分析提高变压器状态评估的准确性。

(二) 智能维护策略的优化

基于诊断数据,实施预测性维护策略,避免传统的定期检修模式,提高检修效率,降低维护成本。

结语

电力变压器故障诊断技术的研究与应用是保障电网安全运行的关键。传统的检测方法在实践中发挥了重要作用,但仍存在一定局限。新兴技术,如人工智能、大数据分析、传感器融合等,为变压器智能监测提供了更先进的解决方案。未来,随着智能电网的发展,变压器故障诊断技术将向智能化、自动化方向演进,提高故障预测和预警能力,进一步提升电网的安全性和稳定性。

参考文献

- [1]田德恒.基于电力电子的电力变压器故障诊断与维护[J].中国新技术新产品,2024(22):62-64.DOI:10.13612/j.cnki.cntp.2024.22.002.
- [2]李浩,魏繁荣,王浩,李旭东.基于振动信号与深度学习的电力变压器故障诊断方法[J].电工电能新技术,2024,43(10):1-12.
- [3]陈自振,崔庆炜,李惠勇,罗荣秋.考虑DGA数据不平衡性的电力变压器IACGAN故障诊断方法[J].自动化与仪器仪表,2023(06):248-253.DOI:10.14016/j.cnki.1001-9227.2023.06.248.
- [4]李刚,孟坤,贺帅,刘云鹏,杨宁.考虑特征耦合的Bi-LSTM变压器故障诊断方法[J].中国电力,2023,56(03):100-108+117.
- [5]李云溟,咸日常,张海强,赵飞龙,李嘉洋,王玮,李增悦.基于改进灰狼算法与最小二乘支持向量机耦合的电力变压器故障诊断方法[J].电网技术,2023,47(04):1470-1478.DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2197.