

电力系统电气工程中变压器状态监测与故障预警

李高善

广西兆泰送变电工程集团有限公司, 广西 柳州 545000

摘 要： 本文深入探讨了电力系统中变压器的基本原理、主要类型及其在电力系统中的重要作用。同时，详细介绍了变压器状态监测技术，包括油中溶解气体分析、局部放电检测、温度监测等，并分析了变压器常见的电气、油气、机械和热故障类型及其成因。此外，文章还讨论了变压器故障预警方法，包括人工智能技术、机器学习算法、支持向量机和神经网络的应用。文章强调了对变压器状态监测与故障预警技术的研究对于电力系统可靠性和智能电网发展的重要性，并指出未来需要进一步探索提高预警准确性、实时性和鲁棒性的方法。

关 键 词： 变压器；状态监测；故障预警；电力系统；人工智能；机器学习；深度学习

Transformer Condition Monitoring and Fault Warning in Electrical Engineering of Power Systems

Li Gaoshan

Guangxi Zhaotai Power Transmission and Transformation Engineering Group Co., Ltd. Liuzhou, Guangxi 545000

Abstract： This paper delves into the fundamental principles, main types, and critical roles of transformers in power systems. It also provides a detailed introduction to transformer condition monitoring techniques, including dissolved gas analysis in oil, partial discharge detection, and temperature monitoring. Additionally, the article analyzes common electrical, oil-gas, mechanical, and thermal fault types in transformers and their causes. Furthermore, it discusses transformer fault warning methods, incorporating the application of artificial intelligence technology, machine learning algorithms, support vector machines, and neural networks. The paper underscores the significance of research on transformer condition monitoring and fault warning technology for power system reliability and the advancement of smart grids. It also highlights the need for further exploration in enhancing the accuracy, real-time performance, and robustness of warning methods in the future.

Keywords： transformer; condition monitoring; fault warning; power system; artificial intelligence; machine learning; deep learning

引言

随着社会的快速发展，电力系统作为现代社会的重要基础设施，其稳定性和可靠性直接关系到国家的经济发展和人民的生活质量。在电力系统中，变压器作为能量转换和电压调节的核心设备，其运行状态的好坏直接影响到整个电网的安全与效率。因此，对变压器进行有效的状态监测和故障预警，以预防和减少潜在故障的发生，显得尤为重要。

一、电力系统变压器概述

电力系统中的变压器，作为能量转换的核心设备，其基本原理是电磁感应。本章将深入探讨变压器的工作机制，以揭示其如何在电网中实现电压和电流的调节。

（一）变压器的基本原理

变压器的工作原理基于法拉第电磁感应定律，通过两个或多个相互绝缘的线圈（绕组）实现电压和电流的转换。当一个交流电压施加到初级绕组时，会在铁芯中产生变化的磁通量，进而在

次级绕组中感应出电动势。根据变压器的匝数比，可以实现电压的升高（升压变压器）或降低（降压变压器）。此外，变压器还能隔离电路，确保系统的安全运行^[1]。

（二）变压器的主要类型

在电力系统中，根据不同的应用需求和运行环境，变压器的种类繁多。干式变压器采用空气或非磁性材料作为冷却介质，特别适用于对防火要求较高的场所，如数据中心和商业建筑。相对而言，油浸式变压器则以绝缘油作为冷却和绝缘介质，因其良好的散热性能和较高的可靠性，在电力系统中得到了广泛应用。此

外，组合变压器将变压器、开关设备、保护装置等集成于一体，适合于紧凑型变电站，以节省空间和提高集成度。而特种变压器，如整流变压器、隔离变压器、脉冲变压器等，则针对特定场合和特殊用途而设计，满足了电力系统的多样化需求。

（三）变压器在电力系统中的重要作用

在电力系统中，根据不同的应用需求和运行环境，变压器的种类繁多。干式变压器采用空气或非磁性材料作为冷却介质，特别适用于对防火要求较高的场所，如数据中心和商业建筑。相对而言，油浸式变压器则以绝缘油作为冷却和绝缘介质，因其良好的散热性能和较高的可靠性，在电力系统中得到了广泛应用。此外，组合变压器将变压器、开关设备、保护装置等集成于一体，适合于紧凑型变电站，以节省空间和提高集成度。而特种变压器，如整流变压器、隔离变压器、脉冲变压器等，则针对特定场合和特殊用途而设计，满足了电力系统的多样化需求^[2]。

二、变压器状态监测技术

在电力系统中，变压器的可靠运行对电网稳定性至关重要。为了确保变压器的健康状态，状态监测技术成为一种有效的预防性维护手段。

（一）状态监测参数概述

状态监测参数构成了评估变压器运行状况的核心体系，它们是维护电力系统稳定性的重要工具。这些参数的范围广泛，涵盖了油中溶解气体分析、局部放电检测、温度监控、铁心接地电流测量、超声波探测以及红外热成像技术等多个方面。通过对这些关键指标的连续或定期监测，我们能够及时发现变压器内部的微小变化，从而揭示出潜在的故障迹象。在精密的监测手段支持下，能够更有效地维护变压器，延长其使用寿命，保障电力供应的稳定性。

（二）油中溶解气体分析（DGA）

油中溶解气体分析（DGA）是一种精确的技术手段，它通过细致检测变压器油中溶解的气体种类及其浓度，来深入评估变压器的绝缘状况。在变压器内部，诸如局部放电、过热等潜在故障，会引发特定的化学反应，产生一系列气体，包括氢气、甲烷、乙炔等^[3]。DGA技术如同一位细心的侦探，能够识别这些气体的蛛丝马迹，从而揭示故障的类型和严重程度。通过DGA的分析结果，维护人员可以更有针对性地进行维修或更换，确保变压器的可靠运行，防止由绝缘故障引起的更大规模事故，保障电力系统的整体稳定。

（三）局部放电检测

局部放电监测技术作为一种有效的变压器状态监测方法，通过对放电信号的感知、模式识别、严重程度评估、过电压和过电流检测、数据存储和分析、放电位置定位、绝缘状态评估、预警与控制、系统的自我检测与维护、试验和标定、数据传输与通信等多方面的技术环节进行全面考虑和设计，可以构建一个高效、可靠的变压器局部放电监测系统，持续跟踪变压器的各项运行参数，防患于未然，为变压器的安全稳定运行提供保障^[4]。目前，

常用的局部放电检测方法包括超声波检测法、电气检测法（例如脉冲电流法），以及化学分析法等。

（四）温度监测

变压器的温度变化，作为一个关键的运行指标，直观地反映了其内部的工况健康。轻微的温度波动可能预示着正常的能量转换过程，然而，过度的温升则是潜在的危机信号。过热现象不仅会加速绝缘材料的老化，还可能大幅缩短变压器的预期寿命，甚至引发突发故障。因此，对变压器温度的精准监测显得至关重要。

三、变压器故障类型及原因分析

变压器在长期运行过程中，不可避免地会遇到各种故障。了解这些故障的类型及其成因，对于预防和处理变压器问题至关重要。

（一）电气故障

电气故障，作为变压器中最常见的问题之一，往往与绕组系统紧密相关。这些问题涵盖了绕组短路、绕组断路、绝缘老化直至绝缘击穿等多个方面。这些故障的成因复杂，可能是由过电压事件、操作失误、材料本身的缺陷，或是外界环境因素所诱发。例如，雷电的冲击和系统的短路故障均可能导致电压急剧升高，这种过电压现象极有可能引发绝缘材料的击穿，从而造成变压器的电气故障。

绕组短路故障，通常是由于绕组间的绝缘介质受损，导致电流直接通过不应导通的路径流动，这种情况会迅速升温，加剧绝缘的损坏。绕组断路则可能是由机械损伤或焊接不良造成的，它会直接导致变压器的局部或整体失效。绝缘老化则是一个缓慢的过程，长期的高温、潮湿环境或是电应力的影响，都会加速绝缘材料的老化，最终可能导致绝缘性能下降^[5]。而绝缘击穿则是绝缘材料在电应力作用下突然失效，这通常伴随着剧烈的放电现象，对变压器的损害极为严重。

（二）油气故障

油气故障，作为变压器内部特有的问题，直接关联到其油和气体的状态。这些问题包括油质劣化、油位异常、气泡的产生，以及气体继电器的动作等。油质劣化，可能是由于变压器运行过程中温度过高，导致油中溶解气体数量增加，或是油品受到外界污染物的侵入。这种劣化不仅会降低油的绝缘性能，还可能影响其散热能力，进而对变压器的整体性能造成负面影响。

油位异常，可能是由于变压器密封不良导致的泄漏，或是由于温度变化引起的油体积膨胀和收缩。油位的异常波动，不仅会直接影响变压器的正常运行，还可能暴露出潜在的内部故障。气泡的产生，通常是由于油中气体溶解度降低而释放出来，这些气泡在变压器内部积聚，可能导致绝缘性能下降，甚至引发放电现象。

（三）机械故障

机械故障，触及变压器的实体结构部件，涵盖了紧固件的松动、异常振动，以及冷却系统的故障等多个方面。这些问题可能源自制造过程中的缺陷、运输途中的损伤，或是长期运行所累积

的磨损，抑或是维护操作的不当。冷却系统的风扇或油泵一旦发生故障，不仅会削弱变压器的散热效率，还可能导致其内部温度急剧上升，进而引发过热现象^[6]。

紧固件松动，可能是由于振动导致的螺丝松弛，或是安装时力矩控制不当。这种松动不仅会影响变压器的结构稳定性，还可能导致局部放电和噪声的增加。异常振动，可能是由于绕组或铁芯的平衡失调，这些振动若不及时处理，可能会加剧部件的磨损，甚至引发结构性损坏。冷却系统的故障，则可能是由于冷却装置的设计缺陷、部件老化或维护不足。冷却系统是维持变压器正常运行温度的关键，其故障不仅会导致变压器过热，还可能加速绝缘材料的老化，缩短变压器的使用寿命。

（四）热故障

热故障，作为一种常见的变压器故障类型，往往源于变压器内部或外部的温度管理失误。这些问题可能表现为热点形成、局部过热，或是冷却系统效率的降低。热点形成，可能是由于负载不平衡、绕组接触不良、油流不畅等因素引起的，这些热点成为变压器内部的温度异常区域。

局部过热，可能是由于变压器的某些部分承受了过度的电热应力，或是由于冷却系统的缺陷导致的热量无法有效散发。这种过热现象，若长期得不到妥善处理，将会加速绝缘材料的老化，进而缩短变压器的预期使用寿命。冷却系统效率下降，可能是由于冷却装置的部件磨损、堵塞或是设计不足。冷却系统的失效，会导致变压器内部温度持续升高，这不仅会影响变压器的正常运行，还可能引发一系列连锁反应，包括绝缘性能的下降和电气性能的恶化^[7]。

（五）典型故障案例分析

1. 案例一：某220kV变压器在运行中出现局部放电现象，经过油中溶解气体分析（DGA）发现乙炔含量异常。这表明变压器内部存在绝缘纸板缺陷，导致了局部放电现象。通过更换绝缘材料，故障得到有效解决，避免了进一步的损害和可能的更大范围故障。

2. 案例二：某110kV变压器油中气体含量持续上升，红外热成像检测发现一处明显热点。经诊断，确定是冷却系统故障导致的局部过热。对冷却系统进行维修后，变压器恢复正常运行，确保了电力系统的稳定性和安全性。

3. 案例三：某35kV变压器在雷雨季节后出现绝缘击穿，分析认为是雷电过电压引发的电气故障。加强防雷措施后，类似的故障未再发生，有效提高了变压器的抗雷击能力，保障了电力系统的稳定运行。

四、变压器故障预警方法

预防胜于治疗，在变压器维护领域，故障预警方法的研发与应用正日益成为保障电力系统可靠性的关键。

（一）人工智能技术在故障预警中的应用

人工智能技术在变压器故障预警中的应用，主要体现在数据处理、特征提取和模式识别等方面。通过分析大量的监测数据，

人工智能能够识别出故障的早期迹象，从而提前发出预警，为维护决策提供科学依据。

（二）机器学习算法概述

机器学习算法是人工智能的核心，它使计算机能够从数据中学习规律和模式。在变压器故障预警中，常用的机器学习算法包括监督学习、非监督学习、半监督学习和强化学习等。这些算法能够从历史故障数据和正常运行数据中学习，建立故障预警模型^[8]。

（三）支持向量机（SVM）故障预警

支持向量机是一种有效的监督学习算法，适用于分类和回归问题。在变压器故障预警中，SVM通过找到最优的超平面，将正常状态和故障状态的数据分开。SVM具有较强的泛化能力，能够在小样本情况下表现出良好的预测性能^[9]。

（四）神经网络故障预警

神经网络是一种模仿人脑神经元连接方式的计算模型，具有强大的自适应和学习能力。在变压器故障预警中，神经网络可以通过训练学习到复杂的非线性关系，从而对变压器的运行状态进行准确预测。常见的神经网络结构包括前馈神经网络、递归神经网络等^[10]。

五、结束语

在电力系统这个庞大而复杂的体系中，变压器的稳定运行无疑扮演着至关重要的角色。通过对变压器状态监测与故障预警技术的深入研究，不仅为电力系统的可靠性和安全性提供了有力保障，也为智能电网的发展奠定了坚实基础。然而，也应认识到，尽管技术在进步，但变压器故障预警仍然面临诸多挑战。如何进一步提高预警的准确性、实时性和鲁棒性，如何将理论成果更好地转化为实际应用，这些都是我们需要继续探索和努力的方向。

参考文献

- [1] 马寅兴. 发电机励磁变压器状态监测系统研究 [D]. 西安理工大学, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000999.
- [2] 赵伟杰. 基于多源信息融合的变压器状态评估方法研究 [D]. 沈阳工业大学, 2023. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2023.001382.
- [3] 马颖. 针对多源数据的变压器状态评估方法研究 [D]. 山东大学, 2023. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2023.003341.
- [4] 时春林. 变电站变压器状态监测与故障诊断技术研究 [J]. 光源与照明, 2023, (10): 165–167.
- [5] 王毛, 李雨轩, 郑城市, 等. 电力变压器的在线状态监测技术分析 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(05): 206–207. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2023.05.092.
- [6] 朱俊敏. 基于信息融合的车载牵引变压器智能故障诊断方法研究 [D]. 兰州交通大学, 2023. DOI: 10.27205/d.cnki.gltcc.2023.000002.
- [7] 胡洋. 基于数字孪生技术的变压器状态监测研究与探索 [J]. 电气化铁道, 2023, 34(01): 38–43. DOI: 10.19587/j.cnki.1007-936x.2023.01.007.
- [8] 周健. 基于神经网络和支持向量机的变压器故障诊断和状态评估 [D]. 昆明理工大学, 2022. DOI: 10.27200/d.cnki.gkmlu.2022.002258.
- [9] 刘正阳, 石悠旖, 王文瑞, 等. 基于边缘计算的变压器光声光谱故障诊断系统研究 [J]. 电子器件, 2022, 45(04): 872–877.
- [10] 陈城, 闫永昶. 变电站变压器异常状态监测数据可视化方法 [J]. 制造业自动化, 2022, 44(06): 204–207.