

变压器油色谱分析技术在故障诊断中的应用

赵家浩 刘成宇

徐州华润电力有限公司, 江苏 徐州 221142

摘要: 变压器属于电力系统中较为关键的设备之一, 它的运行状况会直接影响电网的安全性和稳定性。油中溶解气体分析是当前使用范围较广的一种在线诊断手段, 通过对变压器油里溶解气体的种类及其浓度变化进行检测, 可以较有效地判断变压器内部是否出现局部放电、过热、低能电弧等不同故障类型。本文从整体上说明变压器油色谱分析的基本原理以及特征气体的生成机理, 并且梳理以特征气体法、三比值法、Duval 三角形法为代表的传统诊断方法, 同时分析人工智能和数据驱动技术在故障诊断中的一些前沿应用, 讨论在线监测系统的发展方向与工程实践情况, 目的是为变压器状态检修与主动运维提供相应的理论和技术支撑。

关键词: 变压器; 油色谱分析; 溶解气体分析; 故障诊断; 三比值法; 在线监测

DOI: 10.64649/yh.shfzykjcx.issn3078-8994.202609036

1 绪论

1.1 研究背景与意义

电力变压器在整个输变电系统中处在较为关键的枢纽位置, 其能否保持稳定运行, 对电力供应的可靠性与安全性具有重要意义。随着电网规模不断扩大, 同时运行年限逐步增加, 许多变压器开始进入老化阶段, 内部绝缘性能下降以及潜在故障的风险也变得更加突出。变压器的内部故障多集中在油纸绝缘系统之中, 而这类故障在早期常常只是一些较弱的潜伏性变化, 传统的电气试验方法不太容易做到有效检测, 一旦故障发展到较为明显的程度, 通常已经引发设备损坏, 甚至出现停电事故, 从而造成较大的经济损失与社会影响。

油色谱分析技术主要是对变压器绝缘油里溶解的特征气体进行定性和定量检测, 在不停电、也不需要拆开设备的条件下, 能够较早发现设备绝缘性能变差以及局部故障的相关特征, 该技术的操作相对简便, 同时抗电磁干扰能力较强, 因此逐步发展为现场应用范围最广的一类变压器故障检测方式。对变压器油色谱分析技术在故障诊断中的应用开展研究, 有助于提高变压器的状态感知水平, 推动检修模式由“定期检修”向“状态检修”转变, 并对保障电网安全、稳定运行具有较为重要的工程价值和现实意义。

1.2 国内外研究综述

国外在变压器油色谱分析这一领域开展得较早, IEEE、IEC 等国际组织也已经形成了一套比较完整的 DGA 诊断标准体系, 其中包括 IEC 三比值法、Doernenburg 比值法、Rogers 比值法以及 Duval 三角形法等较为经典的方法。近年来, 国外研究更多把注意力放在人工智能与传统 DGA 方法的结合上, 有研究对 2014 至 2024 年间 124 篇相关文献进行了系统梳理, 调查结果显示, 在变压器故障分类研究里, 支持向量机 (32%)、人工神经网络 (17%) 和 K 近邻 (12%) 是使用最普遍的算法。

国内关于变压器油色谱分析已经做了不少研究, 在特征气体的识别、三比值法的使用以及智能诊断算法等方面都出现了比较明显的进展。一些研究把重点放在油色谱数据样本分布不均衡这一问题上, 并提出了相应的改进办法, 另外也有研究借助多源数据的融合, 再配合对深度置信网络的优化来提高诊断的准确度。不过, 总体来看, 现有研究还是存在一些不足, 比如诊断方法的适用场景偏窄、对数值波动较为敏感、数据孤岛现象比较突出等, 同时传统比值法的诊断准确率也还有不小的提升空间。

2 油色谱分析的基本原理与特征气体

2.1 油色谱分析的技术原理

变压器油色谱分析主要是依据气相色谱的分离与检测原理来进行。变压器在正常运行时, 油以及固体绝缘材料会随着时间逐步老化、变质, 并且会分解出很少量的气体, 这些气体一般包括氢气 (H_2)、甲烷 (CH_4)、乙烷 (C_2H_6)、乙烯 (C_2H_4)、乙炔 (C_2H_2)、一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO_2) 等, 当变压器内部出现过热或者放电这类故障时, 油分子和固体绝缘材料会发生裂解, 与之对应的特征气体种类和浓度往往会出现比较明显的变化。

气相色谱仪主要是借助各类气体组分在固定相和流动相之间分配系数不一样这一点, 根据沸点、极性、吸附、溶解等方面的差别来把混合气体分开, 然后再通过检测器来完成定性和定量分析。数字化气相色谱仪在数据处理上可以做自动比对, 也能进行故障的智能识别, 用来较快检测过热故障、放电等情况。

2.2 特征气体的生成机理

在不同的故障类型下, 变压器油和绝缘材料发生裂解时形成的特征气体差别比较明显。首先, 低温过热 ($150\sim 300^\circ C$) 时主要生成 CH_4 , 中温过热 ($300\sim 700^\circ C$) 情况下, H_2 在氢烃总量中所占比例低于 27%, 到了高温过热

(700℃以上), 特征气体多以 C_2H_4 和 CH_4 为主, 这两者合计在总烃中的比例一般超过 80%。其次, 如果故障牵涉到固体绝缘材料, 往往会产生 CO 和 CO_2 , 而局部放电主要生成 H_2 , 电弧放电则会出现较为明显数量的 C_2H_2 。与此同时, 产气速率和故障严重程度的关系也较为紧密, 产气越快通常说明故障发展也更快一些, 随着温度升高, 产气率最大的气体依次表现为 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 , 这也从侧面说明故障温度与溶解气体含量之间存在一定的对应关系。综合特征气体的浓度、组分比例以及产气速率来分析, 一般可以对变压器是否存在故障以及故障的大致性质作出初步判断。

2.3 油色谱分析的技术优势与局限

油色谱分析技术的主要优势在于: 能够在设备不停运的情况下开展检测, 不需要停电和拆解; 对早期潜伏性故障较为敏感, 可以在故障还没有发展成严重事故之前给出预警; 检测结果具有量化与可追溯的特点, 便于进行较长时间的趋势分析。不过, 该技术也有一定局限: 由于气体生成机理较为复杂, 又会受到温度、负载以及环境等多方面因素的影响, 使得对早期潜伏性故障的准确判断仍然存在困难; 传统比值法对数值波动较敏感, 因此诊断结论可能出现不确定; 同时离线检测的周期偏长, 因而不容易做到连续的实时监测。

3 故障诊断的常用方法

3.1 特征气体法与含量注意值判断

特征气体法属于较基础的诊断方式, 主要是把油中溶解的各类特征气体含量与标准注意值作对比, 从而先行判断变压器是否可能出现异常, 特征气体一般包括总烃 (C_1+C_2)、 C_2H_2 、 H_2 、 CO 、 CO_2 等, 当其中某一种或几种气体的浓度高于注意值时, 通常可以认为设备可能存在故障, 还需要再开展进一步分析, 这一方法的操作过程相对简单, 判断也比较直观, 较适合用于日常巡检和初步筛查, 但它难以精确锁定故障的具体类型, 因此仍要与其他方法

结合起来进行综合判断。

3.2 比值诊断法

比值诊断法主要是通过计算不同特征气体之间的比值, 再按照这些比值所处的范围来判断故障类型, 可以说是 DGA 诊断中比较核心的一种方法, 常用的比值法包括:

IEC 三比值法主要是用 C_2H_2/C_2H_4 、 CH_4/H_2 、 C_2H_4/C_2H_6 这三组比值来判断故障类型, 可以用来诊断局部放电、低能放电、高能放电以及低温过热、中温过热、高温过热等情况。Rogers 比值法在诊断各种过热故障时一般更准确, 也更细致。Doernenburg 比值法对局部放电这类故障的诊断效果最好, 能够较准确地区分过热故障与放电故障, 但对于故障类型还不能再进一步细分。Duval 三角形法则是把 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 三种组分的相对比例当作坐标, 通过三角形不同区域的划分来判断故障类型, 这一方法由 Michel Duval 在 1974 年提出, 因为操作较简单并且诊断效果较好, 所以后来被较广泛地接受。

三种比值法各有其重点, 也能相互补足。近些年, 研究者提出了若干对比值进行改进的综合做法, 通过把多种比值法的结果加以融合, 能够在一定程度上提升诊断的鲁棒性与准确性。

3.3 人工智能与数据驱动诊断方法

随着人工智能技术不断推进, 基于机器学习的 DGA 故障诊断方法越来越受到重视, 神经网络算法可以对油色谱中 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等特征气体的检测数据进行建模, 从而实现对故障类型的自动识别。针对油色谱数据样本分布不均衡这一问题, 研究者提出了结合混合采样与优化算法的诊断思路。基于多源数据融合并配合优化深度置信网络的方法, 通过将油色谱数据等多种来源信息进行融合, 可以在一定程度上提高诊断精度。总体来看, 数据驱动方法通过更充分地挖掘油色谱数据中的故障特征信息, 能够较好地弥补传统比值法在诊断精度不高、可解释性不足等方面的不足。

表1 变压器油色谱故障诊断常用方法对比

诊断方法	基本原理	主要优点	主要局限
特征气体法	特征气体含量与注意值比较	操作简单、判断直观	无法精确定位故障类型
IEC 三比值法	C_2H_2/C_2H_4 、 CH_4/H_2 、 C_2H_4/C_2H_6 三组比值	国际标准、体系成熟	对数值变化敏感
Rogers 比值法	多组气体比值组合判断	过热故障诊断详细	放电故障诊断能力较弱
Doernenburg 比值法	特征气体比值阈值判断	区分过热与放电效果好	无法进一步细分故障类型
Duval 三角形法	CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 三组分相对比例	图形化、直观	诊断覆盖面有限
机器学习方法	基于油色谱数据训练的智能模型	准确率高、自动识别	依赖数据质量、可解释性不足

注: 不同方法各有侧重, 实际应用时往往会把多种方法结合起来, 用来综合判断

4 在线监测与智能诊断的发展趋势

4.1 在线监测系统的发展与应用

传统的离线变压器油色谱检测往往周期较长,也不容易做到连续监测,因此在现代电网需要对设备状态进行实时感知的背景下,已经较难完全满足相关需求。变压器油色谱在线监测系统以“油样循环—气体分离—浓度检测”为基本流程,主要是依靠装置内部的采样泵抽取绝缘油,随后通过渗透膜完成油气分离,再采用气相色谱法对特征气体进行定性与定量分析。系统能够实时跟踪变压器油中乙炔、氢气、一氧化碳、甲烷等多种特征气体成分的变化情况。在线监测装置可实现24小时连续的数据采集,并将检测误差控制在3%以内。国网江西电力已完成229座变电站623台油色谱在线监测装置数据的集中接入与统一管理,从而使变压器运维逐步实现由“定期检修”向“状态检修+智能预警”的转变。

4.2 多技术融合与智能诊断平台

单一的监测方式通常很难把变压器的绝缘状态评估得比较完整,目前的趋势是把油色谱分析与频域介电谱、局部放电检测、铁芯接地电流监测等多源数据融合起来,通过建立综合监测与智能诊断平台,把杜瓦尔三角/五角模型、三比值法、立方图示法等多种诊断方法集成在一起,从而对变压器运行状态做较为全面的评估。部分系统已经引入动态贝叶斯网络模型,同时接入调度系统、辅助系统等多源数据,用来实现关键参数的实时监测与智能分析。智能化变压器油气相色谱仪作为电力设备状态监测与故障诊断的核心工具,也在朝着更高精度、更强智能化以及更广集成化的方向不断演进。

4.3 面临的挑战与未来方向

尽管油色谱分析技术在变压器故障诊断中成效显著,实际应用仍面临三方面挑战:一是故障样本尤其是罕见类型样本稀缺,影响模型训练效果;二是多源数据融合方法尚不完善,不同监测手段在格式、时标、精度上不统一;三是智能诊断模型可解释性不足,难以满足运维追溯需求。

未来发展方向包括:构建基于深度学习的油色谱时间序列预测模型,实现故障超前预警;面向不平衡样本开展数据扩充与特征优化研究;融合文本案例与数值数据的综合诊断方法;以及推进智能诊断系统的标准化与平台化建设。随着技术持续成熟,油色谱分析将在变压器全生命周期健康管理中发挥更为关键的作用。

5 结论

本文系统梳理了变压器油色谱分析技术在故障诊断中的应用路径,明确了油中溶解气体的成分、比值与故障类型之间的内在关联,建立了以特征气体识别、比值诊断和机器学习为核心的技术体系。研究表明,油色谱分析能够有效捕捉变压器内部早期潜伏性故障特征,为从“定期检修”向“状态检修”模式转变提供了可靠的数据支撑。IEC三比值法、Duval三角法等传统方法在工程应用中各有所长,而人工智能与多源数据融合技术则显著提升了诊断精度与鲁棒性。构建的“在线监测—智能诊断—主动预警”一体化体系架构科学可行,对提升变压器全生命周期管理水平、降低非计划停运风险具有重要的理论价值与工程实践意义。

参考文献:

- [1] 张贵,王超,刘健,等.变压器油色谱诊断中多种改进比值的综合方法[J].电力信息与通信技术,2025,23(7):38-45.
- [2] 尹琦琳,宋媛,王帅,等.基于绝缘油色谱试验的110kV变压器异常状态分析[J].变压器,2024,61(5):71-74.DOI:10.19487/j.cnki.1001-8425.2024.05.004.
- [3] 张晓晴,胡雅洁,潘旭新,等.基于BP神经网络的变压器油色谱分析[J].电气开关,2024,62(3):8-11.
- [4] 刘佳佳,李春雨,杨春飞.变压器油色谱在线装置故障诊断与预测分析[J].集成电路应用,2024,41(5):396-397.DOI:10.19339/j.issn.1674-2583.2024.05.181.
- [5] 于秀颖.变压器油色谱异常数据分析在故障预警中的应用研究[C]//中国智慧工程研究会.2025工程新技术与新方法经验交流会论文集.2025:31-32.DOI:10.26914/c.cnkihy.2025.061349.

作者简介:刘成宇(1999.06—),男,汉族,江苏徐州人,本科,初级工程师,研究方向:电气系统及其自动化。

赵家浩(2000.02—),男,汉族,江苏徐州人,本科,初级工程师,研究方向:高压设备状态监测与故障诊断。