

# 基于GIS气体分解产物的故障诊断技术研究

白 林

内蒙古引绰济辽供水有限责任公司 内蒙古 兴安盟扎赉特旗 137600

**摘要:** 六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 气体因其优异的绝缘性能, 被广泛应用于电力设备, 尤其是在变压器的气体绝缘系统中。随着设备运行时间的增长, 变压器内部可能发生故障, 导致SF<sub>6</sub>气体分解, 产生一系列特征性气体产物。通过对这些分解产物的分析, 可以有效识别变压器内部的潜在故障。针对SF<sub>6</sub>气体分解产物在故障诊断中的应用进行研究, 揭示了不同故障模式下气体分解产物的变化规律。通过建立相应的诊断模型, 可以提高变压器故障检测的准确性和实时性, 确保电气设备的安全稳定运行。

**关键词:** 六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 气体分解产物; 变压器内部故障诊断; 电气设备故障诊断; SF<sub>6</sub>气体绝缘设备

## 引言

在现代电力系统中, 变压器作为重要的电气设备, 承载着电能转换和输送的关键作用。随着变压器使用年限的增加, 内部故障的风险逐渐增大。SF<sub>6</sub>气体因其出色的绝缘特性, 成为了许多变压器及电气设备的常用绝缘介质。然而, 变压器在运行过程中, 特别是在发生故障时, SF<sub>6</sub>气体会分解, 生成一系列特征性气体。不同的分解产物对应不同类型的故障, 其含量和种类的变化能够反映设备内部的健康状况。通过对这些气体分解产物的分析, 可以实现对变压器故障的及时诊断和准确预测, 保障电力设备的安全运行和稳定性。如何利用SF<sub>6</sub>气体分解产物进行变压器故障诊断, 已成为电力系统中重要的研究方向。

## 1 六氟化硫气体分解产物的生成机制

六氟化硫 (SF<sub>6</sub>) 气体在变压器等电气设备中作为绝缘介质广泛应用, 主要得益于其良好的电气绝缘性能和稳定性。然而, 在高电场强度和高温环境下, SF<sub>6</sub>气体的稳定性会受到影响, 导致分解反应的发生。SF<sub>6</sub>气体分解产物的生成机制是基于气体分子受到电场、温度或机械应力的作用, 发生化学反应或裂解<sup>[1]</sup>。首先, SF<sub>6</sub>分子在高电场条件下会被电子击中, 产生自由基, 这些自由基进一步引发连锁反应, 导致SF<sub>6</sub>分子断裂, 生成如六氟化硫氟化物、硫氟化物及其他相关气体产物。

在变压器内部故障条件下, 例如局部放电、过热或电弧等现象, SF<sub>6</sub>气体的分解过程尤为显著。不同的故障类型会影响分解产物的种类和数量。局部放电会导致SF<sub>6</sub>气体产生一些较为稳定的分解产物, 如HF、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>和SF<sub>4</sub>等, 这些气体具有较强的化学活性, 且在一定条件下容易进一步分解生成其他产物。电弧放电条件下, SF<sub>6</sub>的分解更为剧烈, 可能生成硫和氟的高价化合物, 如SF<sub>2</sub>、

SOF<sub>2</sub>和SF<sub>5</sub>等, 这些产物往往具有较高的稳定性和更强的腐蚀性。

SF<sub>6</sub>气体的分解产物与变压器内部的温度、压力以及电气负载状态密切相关。温度越高, 气体分解的速率越快, 生成的产物种类也更加丰富, 且浓度可能明显增加。不同温度下的气体分解产物具有明显的差异, 通过对这些产物的定量分析, 可以为故障类型的诊断提供有效的依据。通过气体分析技术, 可以检测到这些分解产物, 并根据其特征识别变压器内部故障的具体性质, 如过热、局部放电或电弧等现象。SF<sub>6</sub>气体分解产物的生成机制在故障诊断中具有重要意义。研究这些气体的生成规律, 不仅有助于深入了解变压器在运行过程中的工作状态, 还能为及时发现和处理潜在故障提供有力的支持。

## 2 变压器内部故障与 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的关系

变压器内部的故障通常伴随着不同程度的SF<sub>6</sub>气体分解, 产生特定的气体分解产物。这些分解产物的种类和浓度变化, 能够为故障类型的识别提供重要线索。变压器内部故障的种类繁多, 包括局部放电、过热、电弧放电等, 每种故障模式都会对SF<sub>6</sub>气体的分解产物产生不同的影响。例如, 局部放电是引起变压器气体分解的一种常见故障模式, 通常会生成二氟化硫 (SF<sub>2</sub>)、四氟化硫 (SF<sub>4</sub>) 和二氧化硫 (SO<sub>2</sub>) 等气体。局部放电发生时, SF<sub>6</sub>气体受到强电场作用, 产生激发态分子和自由基, 这些活性分子进一步分解SF<sub>6</sub>分子, 形成上述气体。随着局部放电的持续, 分解产物的浓度也会逐步增加, 尤其是SO<sub>2</sub>, 这一气体的浓度与局部放电的严重程度密切相关, 因此通过SO<sub>2</sub>的浓度变化可以对故障进行早期预警。

在过热故障情况下, 变压器内部的温度升高会加速SF<sub>6</sub>气体的分解反应, 生成更多的硫氟化物, 如三氟化硫 (SF<sub>3</sub>) 和五氟化硫 (SF<sub>5</sub>)。过热条件下, 气体的分解

产物更加多样化,除了常见的SF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>等产物外,还可能产生一些高反应性的氟化物,如SOF<sub>2</sub>。特别是在过热较为严重时,可能形成硫化氟(SF<sub>6</sub>)等稳定的高价态化合物,这些产物对于变压器的安全性具有潜在威胁,其出现往往意味着设备处于较为危险的状态。

电弧放电则会在变压器内产生更为剧烈的气体分解,导致形成如六氟化硫氟化物、硫氟化物以及氟和硫的高价化合物,如SF<sub>5</sub>和SOF<sub>4</sub>等。电弧放电的高温和强电场使得SF<sub>6</sub>气体的分解速率大幅提升,生成的产物种类和浓度也相对复杂,尤其是其中的一些有害气体,会对变压器的绝缘性能造成直接影响。变压器故障与SF<sub>6</sub>气体分解产物之间的关系非常紧密,气体分析可以通过识别不同气体的特征浓度变化,准确反映故障的类型和严重程度。监测SF<sub>6</sub>气体分解产物的变化趋势,能够精准反映变压器的运行状态和故障隐患<sup>[2]</sup>。通过对气体浓度的实时分析,运维人员可以及时发现潜在问题并采取有效措施,从而避免设备因故障进一步损坏,确保设备的长期稳定运行和安全性。

### 3 SF<sub>6</sub> 气体分解产物分析方法及技术

SF<sub>6</sub>气体分解产物的分析方法和技术在变压器故障诊断中具有重要应用。通过对变压器内部气体成分的监测和分析,可以及时发现潜在故障,并采取相应的措施进行处理。常见的分析技术包括气相色谱法、电化学分析法和红外光谱分析法等,每种方法在检测精度、灵敏度以及适用性方面各有优势。

气相色谱法(GC)是目前最为常用的SF<sub>6</sub>气体分析技术之一,其能够高效、准确地分离并定量分析SF<sub>6</sub>分解产物。气相色谱法依赖于色谱柱对不同气体分子的分配行为进行分离,结合相应的检测器(如火焰离子化检测器FID或电子捕获检测器ECD)进行定量分析。通过对气体分解产物的种类和浓度进行测定,能够识别出变压器是否发生了局部放电、过热或电弧等故障模式<sup>[3]</sup>。气相色谱法具有较高的分离能力和灵敏度,尤其适合于复杂气体样品的分析,能检测到如SO<sub>2</sub>、HF、SF<sub>6</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>等多种分解产物。红外光谱法则利用分子吸收红外光的特性来进行气体分析。不同气体分子具有特定的吸收峰,红外光谱法可以通过检测气体样品在特定波长范围内的吸光度来推断其成分。该方法具有较高的灵敏度,并且不需要复杂的样品准备过程,适用于在线监测。对于SF<sub>6</sub>气体的分解产物,如SO<sub>2</sub>、SF<sub>4</sub>和HF,红外光谱法能够提供快速且准确的分析结果。

电化学分析法则通过电化学反应来检测气体的浓度。这种方法具有操作简便、成本低廉的特点,通常应

用于现场快速检测。电化学传感器对某些特定气体(如SO<sub>2</sub>、HF)具有较高的选择性和响应灵敏度,能够实时监测气体的变化并提供即时报警信息。该技术适用于变压器运行过程中实时监测SF<sub>6</sub>气体分解产物的变化,尤其在远程监控系统中应用广泛。近年来,随着传感技术的不断发展,结合多种分析技术的复合型气体监测系统逐渐成为一种趋势。这些综合系统结合了气体分析技术、传感器技术和智能算法的优势,能够实现对SF<sub>6</sub>气体分解产物的高效、精准检测。通过实时监测和动态分析气体成分变化,系统能够及时发现变压器内部的潜在故障,预测设备可能的故障发展趋势。这种精准的监测和预测能力大大提高了变压器的安全性和运行可靠性,减少了设备故障发生的概率,延长了设备的使用寿命。

### 4 基于 SF<sub>6</sub> 气体分解产物的变压器故障诊断模型

基于SF<sub>6</sub>气体分解产物的变压器故障诊断模型是一种重要的故障识别与预测手段。该模型通过分析变压器内部SF<sub>6</sub>气体的分解产物来推测设备的健康状态,并为故障的及时诊断提供依据。在变压器运行过程中,SF<sub>6</sub>气体的分解产物不仅能够反映出具体的故障类型,还能揭示出故障的严重程度和发展趋势,因此,建立基于SF<sub>6</sub>气体分解产物的诊断模型具有重要意义。在构建该模型时,首先需要对SF<sub>6</sub>气体分解产物的类型和浓度变化规律进行深入研究。不同的故障模式会导致气体分解产物的种类和浓度有所不同,局部放电通常会导致SO<sub>2</sub>、HF等气体的生成,过热则主要生成SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SF<sub>4</sub>等产物,而电弧放电则会生成SF<sub>5</sub>、SOF<sub>2</sub>等高反应性气体。通过对这些产物的实时监测,可以识别出故障发生的早期信号,进而推测出故障类型。

诊断模型的核心是将这些气体分解产物的浓度数据与变压器运行状态的变化进行关联。常见的方法包括数据驱动模型、物理模型和混合模型等。数据驱动模型如支持向量机(SVM)、神经网络(ANN)等,能够通过学习大量历史数据,自动从气体浓度的变化中提取出与故障类型相关的特征,并实现故障模式的分类和识别。物理模型则通过建立气体分解产物生成的数学模型,结合变压器内部的温度、电场强度等因素,推导出气体分解产物的生成机制,进而预测故障的发生。混合模型则将数据驱动模型与物理模型相结合,能够同时利用历史数据和物理规律,从而提高诊断的准确性和鲁棒性。

除了模型的建立,还需要考虑数据的实时性和准确性。利用传感器和在线监测设备,能够实时采集SF<sub>6</sub>气体分解产物的浓度数据,并将数据传输到诊断系统中。系统通过分析数据变化趋势,结合诊断模型,对变压器

的健康状态进行评估,提前预警潜在故障。随着人工智能技术的不断发展,基于深度学习的模型逐渐被应用于故障诊断中,这些模型能够处理更为复杂的气体分析数据,并具备更高的诊断精度。通过不断优化基于SF<sub>6</sub>气体分解产物的诊断模型,可以大大提高变压器故障的识别速度和准确性,减少突发故障的发生,延长设备的使用寿命,提高电力系统的安全性和稳定性。

### 5 SF<sub>6</sub> 气体分解产物诊断技术的应用与发展趋势

SF<sub>6</sub>气体分解产物诊断技术已经广泛应用于电力系统中的变压器故障检测与预警。通过对变压器内部SF<sub>6</sub>气体的分解产物进行分析,可以有效识别变压器的运行状态和故障类型。近年来,随着传感技术和数据处理技术的发展,SF<sub>6</sub>气体分解产物诊断技术逐步走向更加精准、实时和智能化的方向。在实际应用中,SF<sub>6</sub>气体分析技术已经成为变压器状态监测的重要组成部分,能够帮助运维人员及时了解变压器的健康状况,提前识别故障风险,避免设备的重大损坏<sup>[5]</sup>。当前,SF<sub>6</sub>气体分解产物的诊断技术主要依赖于气体分析仪器和在线监测系统。气相色谱法和红外光谱法等技术广泛应用于气体采样和成分分析,通过对不同分解产物(如SO<sub>2</sub>、HF、SF<sub>6</sub>、SOF<sub>2</sub>等)的定量分析,能够判断变压器是否存在局部放电、过热或电弧放电等故障。随着传感器技术的进步,便携式气体分析仪器和在线监测设备越来越普及,能够实现对SF<sub>6</sub>气体的实时监测,为变压器的运行管理提供了更高效的工具。

随着大数据和人工智能技术的不断发展,SF<sub>6</sub>气体分解产物的诊断技术正在向智能化方向发展。基于机器学习和深度学习的诊断模型能够从大量历史数据中学习出气体分解产物的变化规律,并根据实时数据进行故障模式识别与预测。这些智能诊断系统不仅能够提高故障检测的准确性,还能够根据气体变化趋势实现故障的早期预警,减少人工干预和故障诊断的时间延迟。通过对气体分解产物数据的持续监控和智能分析,变压器的状态监测可以实现从传统的定期检查向实时在线监测转变,大大提高了变压器的运行安全性。

在未来,SF<sub>6</sub>气体分解产物诊断技术的应用将更加广泛,特别是在智能电网和分布式能源系统中,SF<sub>6</sub>气体监测将成为电气设备智能化管理的重要手段。随着物联网技术的融合,变压器及其他SF<sub>6</sub>气体绝缘设备的在线监测将更加智能化和自动化<sup>[4]</sup>。通过多传感器数据融合和云计算技术,变压器的健康管理将实现更加精准和全面的诊断,为电力系统的高效、稳定运行提供强有力的技术支持。同时,随着环保法规的日益严格,未来SF<sub>6</sub>气体的回收和处理技术也将与分解产物诊断技术相结合,实现对SF<sub>6</sub>气体的全面管理与控制,减少其对环境的潜在影响。

### 结语

基于SF<sub>6</sub>气体分解产物的变压器故障诊断技术在电力系统中发挥着越来越重要的作用。通过对气体分解产物的精准分析,可以有效识别变压器的故障类型与运行状态,及时预警潜在问题,保障设备的安全运行。随着分析技术的不断发展,尤其是智能化诊断模型和实时监测系统的应用,SF<sub>6</sub>气体分解产物诊断技术将更加高效、准确,为变压器及电力设备的健康管理提供强有力的支持。未来,这一技术将在电力行业中得到更广泛的应用和深化发展。

### 参考文献

- [1]王建军,张涛,刘伟.六氟化硫气体分解产物在变压器故障诊断中的应用研究[J].电力系统自动化,2018,42(9):45-52.
- [2]李红波,陈欣,王鹏.基于SF<sub>6</sub>气体分析的变压器故障诊断技术综述[J].高电压技术,2020,46(6):1618-1627.
- [3]徐宁,刘凯,赵红宇.SF<sub>6</sub>气体分解产物的生成机理及其在电力设备故障诊断中的应用[J].电力设备,2019,35(11):22-27.
- [4]李国华,吴杰,张丽.基于气体分析的SF<sub>6</sub>气体绝缘设备故障诊断研究进展[J].电力工程技术,2021,40(8):34-39.
- [5]杨帆,孙学伟,王蕾.SF<sub>6</sub>气体分解产物分析方法及其在变压器健康监测中的应用[J].电气与能源,2022,49(4):56-61.