



学 | 术 | 专 | 著

变电站物联网与 状态监测技术

胡志坤 邓鹏程 熊 晔 著

BIANDIANZHAN WULIANWANG
YU ZHUANGTAI JIANCE JISHU



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

014056871

TM63-39
05



Academic
Monograph

学 | 术 | 专 | 著

变电站物联网与 状态监测技术

胡志坤 邓鹏程 熊 晔 著

BIANDIANZHAN WULIANWANG
YU ZHUANGTAI JIANCE JISHU



中南大学出版社
www.csupress.com.cn



北航

C1741929

TM 63-39
05

158820510

图书在版编目(CIP)数据

变电站物联网与状态监测技术/胡志坤,邓鹏程,熊晔著.

—长沙:中南大学出版社,2014.7

ISBN 978-7-5487-1102-5

I. 变... II. ①胡...②邓...③熊... III. ①互联网-应用-
变电所②智能技术-应用-变电所③变电所-设备状态监测
IV. TM63-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第137833号

变电站物联网与状态监测技术

胡志坤 邓鹏程 熊 晔 著

☐责任编辑 刘颖维

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙印通印刷有限公司

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 15.75 ☐字数 390千字

☐版 次 2014年7月第1版 ☐2014年7月第1次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-1102-5

☐定 价 120.00元

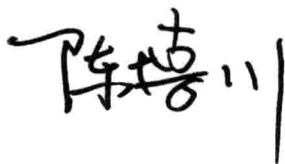
图书出现印装问题,请与经销商调换

序

在建设坚强电网,实现电网信息化和智能化的过程中,大型变电站的安全、稳定和可靠至关重要。中国经济的高速发展又要求电力系统往大容量、高电压等级方向发展,这增加了变电设备安全运行的危险性。物联网构造了一个万物互联的世界,其强大的感知能力、通信能力和数据分析能力,使其成为下一个万亿产业,正逐步渗透到各个行业。传感技术、通信技术和数据处理技术已经在智能电网中如火如荼地应用起来。以传感器为核心来构建强大的变电站物联网系统,为电网的安全稳定运行提供可靠支撑,已经完全具备条件。

该著作以变电站物联网系统底层感知节点为研究对象,设计开发传感器节点物理感知模型,以变压器的接触式、非接触式传感技术为基础,研究了接触式传感器、视频检测技术、红外传感技术,以及变压器的状态评价和故障诊断技术,形成完整的变电站物联网系统,并将其应用于生产实际,是电力系统在线监测与运行维护管理领域的一个重要的标志性成果,也是一本理论紧密结合实际、优秀且不可多得的电气类的参考用书。该著作者既包括了在高校多年从事电力系统在线监测与故障诊断技术的研究人员,又包括了具有丰富经验的、从事电力部门生产管理与技术研发工程技术人员,是一个成功的产学研结合实例。

我非常高兴为该著作作序,也衷心希望该著作能为从事电力系统在线监测、故障诊断及运行管理的科技工作者、高校教师和学生提供理论和实践方面的指导及参考。



(国网湖南省电力公司信息通信公司总经理)

2014.6

前 言

中国经济高速发展要求电力系统往大容量、高电压等级方向发展，这增加了电网设备安全稳定运行的不可靠性。因此，在建设坚强电网过程中，大型变电站的安全、稳定、可靠运行至关重要。物联网构造了一个万物互联的世界，其强大的信息感知能力、通信能力和数据分析能力，已成为下一个万亿产业，正逐步渗透到各个行业。传感技术、通信技术和数据处理技术已经在智能电网中如火如荼地应用，以变电站为研究对象，构建强大的电力物联网系统，为电网的安全稳定运行提供可靠技术支撑，已经完全具备条件。

电力变压器是电力系统的核心装置，其安全稳定运行直接关系到电力系统的正常运行及生命财产安全，也极大地影响电力系统的运行成本。电气设备由绝缘材料、导电、导磁材料及结构材料构成，由于受到电、热、机械、环境等各种因素的作用，绝缘材料容易逐渐劣化，造成设备的渐变故障。变压器的电类参数很容易测量，但与变压器状态相关的往往是非电类参数，如变压器油中含水量、油中气体组分、绝缘参数等。只有对非电类参数实现在线检测和在线分析，才能获得变压器的运行状态，进而进行故障诊断，然而变压器主要由非线性元器件构成，建模非常复杂，很难进行有效的状态评估和故障诊断。本书以变电站物联网系统底层感知节点为研究对象，设计开发传感器节点物理感知模型，以变压器的接触式、非接触式传感技术为基础，以构筑变电站物联网为主题，研究了变电站物联网架构、电能质量监测、变压器状态监测与故障诊断，这对保障电力设备的安全运行、提高变电站设备的使用率和寿命、降低电力设备运行风险具有重要意义。

本书旨在对从事电力系统及设备的物联网模型、状态监测、故障诊断及运行管理的研究工作加以总结，重点阐述了变电站物联网模型的构建、电能质量监测以及变压器的在线监测、故障诊断和运行管理的相关技术及其应用。全书共分6章，第1章由中南大学胡志坤、国网湖南省电力公司邓鹏程执笔，第2章由国网湖南省电力公司邓鹏程、熊晔执笔，第3章、第4章、第6章由

胡志坤执笔，第5章由湖南省电力公司邓鹏程、熊晔执笔，由胡志坤、邓鹏程、熊晔统编全稿。本书要特别感谢国网湖南省电力公司信息通信公司的陈博川、黄志高、张敏、陈伟、李键、何文清等领导的大力支持。感谢“建新创新工作室”对本书的指导和支持，感谢河南省电力公司周口供电公司的刘守明、安庆、史宏伟，中南大学的丁家峰博士、王会海老师，以及谢嘉祥、王美铃、徐飞、林勇等。

本书的基础研究工作还得到了湖南省自然科学基金株洲联合基金“恶劣气候下的兆瓦级风力发电机组预测健康管理关键技术研究”(13JJ9038)以及深圳市科技计划基础研究项目“基于海量时序数据的变频器装置故障诊断方法研究”(JC200903180555A)等项目的支持。在此，对湖南省自然科学基金委员会、株洲市科技局和深圳市科技信息委员会表示深深的谢意。

由于水平有限、时间仓促，书中所述难免不妥和错误之处，恳请读者和同仁们多多批评指正。

著者
2014年6月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 选题背景	(1)
1.2 变压器在线监测技术现状	(1)
1.2.1 变压器 DGA 检测方法	(1)
1.2.2 变压器油中微量水分检测方法	(5)
1.2.3 容性设备检测方法	(6)
1.2.4 油中重金属检测方法	(8)
1.3 图像处理技术在变电设备状态检测中的研究和应用现状	(11)
1.3.1 国外研究现状	(11)
1.3.2 国内研究现状	(12)
1.4 变压器故障诊断与健康状态评估技术现状	(14)
1.4.1 变压器故障诊断	(14)
1.4.2 变压器状态评估	(19)
参考文献	(20)
第 2 章 变电站物联网通信协议与辅助控制	(26)
2.1 物联网技术	(26)
2.1.1 什么是物联网	(26)
2.1.2 物联网典型应用	(28)
2.2 变电站通信协议研究	(30)
2.2.1 IEC 系列协议	(30)
2.2.2 IEEE 1451 标准	(33)
2.2.3 系列通信规范	(38)
2.3 面向智能电网的物联网架构	(40)
2.3.1 智能电网概述	(40)
2.3.2 面向智能电网的物联网应用和网络架构	(42)
2.3.3 面向智能电网的物联网应用方案	(45)
2.4 变电站智能辅助控制系统	(48)
2.4.1 项目背景	(48)
2.4.2 总体架构	(48)

2.4.3 关键技术	(50)
2.4.4 功能设计与实现	(57)
2.4.5 综合集成展示	(61)
参考文献	(62)
第3章 变电站电能质量在线监测技术	(63)
3.1 电能质量参数的计算	(63)
3.1.1 电参量计算	(63)
3.1.2 谐波参数计算	(66)
3.1.3 功率参数计算	(71)
3.2 基于数学形态学的滤波器设计	(73)
3.2.1 数学形态学	(73)
3.2.2 基于二抽取的形态学低通滤波器	(74)
3.2.3 形态梯度故障检测	(80)
3.3 基于二维 DCT 的海量时序数据的压缩方法	(82)
3.3.1 离散余弦变换	(83)
3.3.2 数据压缩算法	(84)
3.3.3 数据重构	(87)
3.3.4 算法评估与仿真实例	(87)
3.4 三相不平衡和畸变条件下谐波与无功电流检测	(91)
3.4.1 $i_p - i_q$ 算法分析	(92)
3.4.2 基于电压变换的 $i_p - i_q$ 算法	(94)
3.4.3 数值仿真	(95)
3.5 电能质量分析平台	(100)
3.5.1 硬件设计	(100)
3.5.2 DSP 软件设计	(104)
3.5.3 单片机软件	(105)
3.5.4 硬件系统调试	(108)
3.5.5 电能质量分析软件界面	(112)
参考文献	(115)
第4章 电力变压器绝缘综合在线监测技术	(117)
4.1 概述	(117)
4.2 变压器油中气体在线检测	(118)
4.2.1 基本原理	(118)
4.2.2 系统设计	(122)
4.2.3 色谱柱和 SOFC 传感器双温度控制子系统	(129)
4.2.4 在线监测系统实现	(137)

4.2.5 实验数据分析	(141)
4.3 变压器油中微水在线监测系统	(142)
4.3.1 概述	(142)
4.3.2 变压器中微水含量测量原理	(143)
4.3.3 变压器油中微水在线监测系统的设计与实现	(146)
4.3.4 实验室测试	(147)
4.4 变压器油中重金属在线检测	(149)
4.4.1 检测原理	(149)
4.4.2 设计方案	(150)
4.4.3 实验结果与分析	(156)
4.5 变压器容性设备绝缘在线监测系统	(158)
4.5.1 概述	(158)
4.5.2 在线监测原理	(159)
4.5.3 系统设计	(161)
4.5.4 电流传感器设计	(163)
4.5.5 介质损耗因数监测结果分析	(165)
4.5.6 现场测试结果	(168)
4.6 变压器油在线监测系统软件设计及现场实施	(170)
4.6.1 变压器油在线监测系统软件功能概述	(170)
4.6.2 变压器油在线监测系统软件设计	(171)
4.6.3 现场施工及设备安装	(179)
4.6.4 测试及现场运行效果	(179)
参考文献	(182)
第5章 电力系统状态参数的非接触式监测	(184)
5.1 背景与意义	(184)
5.2 图像处理技术	(185)
5.3 基于非接触检测的状态监测系统设计方案	(188)
5.3.1 总体框架	(188)
5.3.2 图像超分辨率重建	(189)
5.3.3 红外与可见光图像配准	(191)
5.3.4 红外与可见光图像融合	(192)
5.4 主要应用	(193)
5.4.1 入侵/异物检测	(193)
5.4.2 输电线路覆冰检测	(195)
5.4.3 电力设备或设备部件健康状态检测和评估	(196)
5.4.4 电力设备健康状况分级研究	(198)
5.4.5 图像快速处理	(200)

5.5 功能展示	(201)
5.5.1 实现基于2D/3D GIS的设备健康状态分析数据展示	(201)
5.5.2 多源图像数据获取	(201)
第6章 电力变压器状态维护与故障诊断技术	(204)
6.1 概述	(204)
6.1.1 故障综述	(204)
6.1.2 故障原因	(205)
6.1.3 故障类型	(205)
6.2 电力变压器的建模与故障仿真	(206)
6.2.1 电力变压器的数学模型	(207)
6.2.2 三相变压器内部故障建模	(208)
6.2.3 数值仿真与结果分析	(213)
6.3 预防性维护模型	(215)
6.3.1 可靠性基本概念	(216)
6.3.2 策略描述	(219)
6.3.3 模型构建	(220)
6.3.4 算例分析	(222)
6.4 基于PCA的变压器故障检查方法	(223)
6.4.1 PCA统计过程监控模型	(224)
6.4.2 基于重构贡献的故障检测	(226)
6.4.3 仿真分析	(227)
6.5 基于混合知识表示的故障判断专家系统	(229)
6.5.1 专家系统总体结构	(230)
6.5.2 框架式知识表示	(231)
6.5.3 产生式规则的知识表示	(232)
6.5.4 推理机制	(232)
6.6 变压器状态综合评估	(234)
6.6.1 变压器状态量的确定	(234)
6.6.2 变压器状态分析与评分表	(234)
6.6.3 变压器状态评估模型	(235)
参考文献	(238)

第1章

绪论

1.1 选题背景

在建设坚强电网过程中,大型变电站的安全、稳定、可靠运行至关重要。物联网构造了一个万物互联的世界,其强大的信息感知能力、通信能力和数据分析能力,已成为下一个万亿产业,正逐步渗透到各个行业。传感技术、通信技术和数据处理技术已经在智能电网中如火如荼地应用,以变电站为研究对象,构建强大的电力物联网系统,为电网的安全稳定运行提供可靠技术支撑,已经完全具备条件。

电力变压器是电力系统的核心装置,其安全稳定运行直接关乎电力系统的正常运行及生命财产安全,也极大地影响电力系统的运行成本。电气设备由绝缘材料、导电、导磁材料及结构材料构成,由于受到电、热、机械、环境等各种因素的作用,绝缘材料容易逐渐劣化,造成设备的渐变性能故障。变压器的电类参数很容易测量,但与变压器状态相关的往往是非电类参数,如变压器油中含水量、油中气体组分、绝缘参数等。只有对非电类参数实现在线检测和在线分析,才能获得变压器的运行状态,进而进行故障诊断,然而变压器主要由非线性元器件构成,建模非常复杂,很难进行有效的状态评估和故障诊断。

本书以大型的电力变压器为研究对象,研究了电气设备的状态评价、预防性维护及故障检测的几个关键技术。该研究对保障装置的安全运行,提高装置的使用率、寿命和降低装置运行风险都具有重要意义。

1.2 变压器在线监测技术现状

1.2.1 变压器 DGA 检测方法

20 世纪 60 年代发展起来的溶解气体分析法^[1](dissolved gas analysis, DGA)可对变压器油的实时运行状态进行分析和评估,已经经过多年的深入研究^[2]。油中溶解气体分析采用色谱法,对充油电力设备进行运行状况的检测。特别是当对油中气体的种类、含量及变化趋势进行检测时,具有油气分离效率高、气体检测速度快、灵敏度高以及进样量少等特点。该法通过分析油中 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 和 CO_2 7 种气体的组

分含量和变化趋势来判断并分析设备内部故障及监视设备的运行状态^[3]。国际电工委员会油中溶解气体分析的导则 IEC599 和 IEC567 的出台, 国家标准 GB7252 和 DL/T722 的制定, 以及 2004 年国家修订并颁布执行的《电力设备预防性试验规程》把 DGA 法排在第 1 位, 可见国内外电力部门对该方法的重视程度^[4]。

变压器中的固体绝缘纸板和绝缘纸的主要成分是纤维素。变压器在正常运行中, 由于电场、温度、油中水分及氧气、油中金属等的氧化催化作用, 内部的绝缘油、固体绝缘纸板和绝缘纸随着运行时间会发生速度缓慢的老化和分解, 产生少量的 H_2 , 烃类气体 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 和 CO 、 CO_2 等。而在变压器油的炼制、运输及出厂前调试的过程中也会产生杂质气体。因此正常情况下, 杂质气体会溶解于变压器油中, 但其含量很少。当变压器内部产生故障时, 这些特征的浓度及产气速率会急剧上升, 形成气体, 通过对流及扩散作用溶解于变压器油中。故障发生点附近的固体绝缘材料和油在热性应力或电性应力的作用下分解产生气体, 由于故障生成的气体的种类和含量由故障类型、故障能量级别以及与故障有关的固体绝缘材料所决定。对变压器状态监测和故障诊断有价值的气体有 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO_2 和 O_2 等。因此, 采用变压器油中溶解气体的种类、含量及其变化趋势来进行变压器状态监测和故障诊断具有实际指导意义^[5]。

变压器运行过程中发生故障时, 油中会溶解多种特征气体, 采用 DGA 方法时需先进行油气分离, 再对分离出来的混合气体进行逐次分离及检测。现阶段变压器 DGA 在线监测方法按照检测原理可分为以下几类。

1. 传感器阵列法

传感器阵列法流程如图 1-1 所示。气体在线辨识系统采用信息融合技术, 利用支持向量机、人工神经网络、模糊算法和灰色理论等先进的模式识别算法, 选择多个具有交叉敏感性的气体传感器组成传感器阵列, 以达到气体在线监测的目的。

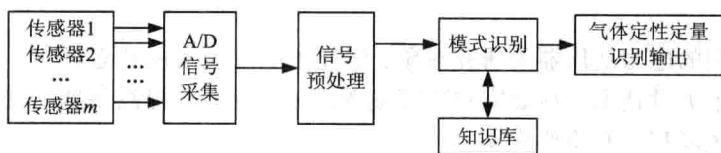


图 1-1 传感器阵列法流程图

文献[6]介绍了一种气体在线辨识系统, 该系统的传感器阵列集成了采用 SnO_2 金属氧化物制成的半导体气体传感器。文献[7]设计了一种基于 CO 传感器和 H_2 传感器的传感器阵列变压器在线监测装置, 该装置能实时分析 CO 和 H_2 的含量, 具有很高的精度。文献[8]利用 6 个半导体气体传感器组成传感器阵列, 运用 BP 神经网络对系统进行模式识别, 有效地提高了 6 种气体的检测精度和灵敏度。文献[9]利用基于气体传感器的变压器 DGA 在线系统, 结合数字技术实现了变压器油中气体在线监测。

当该法用于进行油中气体的精确定性和定量分析时, 存在气体检测灵敏度与精度不足以及数据冗余重复等问题; 同时还需解决交叉感染、气体传感器使用寿命不长的

问题。

2. 傅立叶变换红外光谱法

根据光的干涉原理,迈克尔逊干涉光路中的动镜不断地移动导致置于光路中的背景与气体池中的样品的干涉波的强度不断变化,该变化被波探测器采集,通过傅立叶变换得到干涉波的红外光谱图,结合图谱分析法即可检测油中气体的种类与组分含量。红外光谱法检测气体的原理流程如图1-2所示。

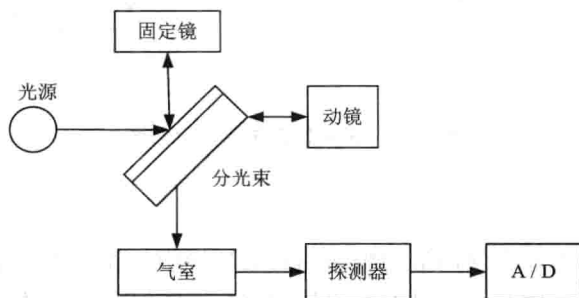


图1-2 红外光谱法原理流程图

文献[10]介绍了FTIR技术在变压器DGA在线监测仪中的应用,给出了油气分离单元和气体检测单元集成的方案。文献[11]分析了傅立叶红外光谱法检测气体的机理,阐述了将该法用于DGA在线监测的优点。文献[12]提出了“流动气体法”,并设计了实验装置,用傅立叶红外光谱仪采集了 C_2H_2 的吸收谱,探讨了气体特征峰以及浓度范围的选取对定量检测准确度的影响。

传统色谱法不仅需要载气、色谱柱等价格较高且易损耗的物品,而且其气路的控制回路复杂。傅立叶红外光谱法无须载气和色谱柱,气路较简单,检测灵敏度高,但不能检测 H_2 的缺陷。

3. 光声光谱法(PAS)

发生光声效应时,在光声室内,待检测的气体分子由于吸收电磁辐射,会产生压力波,而气体浓度与压力波温度存在一定的比例关系,通过检测压力波得到的压力波温度,便可检测气体浓度。

文献[13]探讨了变压器DGA在线监测中采用光声光谱法进行气体检测的机理,研究了采用光激发的声波速度检测 H_2 组分的实现方法,并与色谱法在线监测、傅立叶红外光谱法在线监测进行了对比。文献[14]构建了用于变压器DGA的基于光声光谱法的检测平台,给出了主要故障特征气体的特征频谱,通过定性和定量分析,将结果与气相色谱仪测量值相比较,验证了其有效性。文献[15]采用光声光谱法技术开发了一系列用于检测变压器油中故障气体的产品,实验证明采用该技术的气体监测设备性能与传统气相色谱仪相当。

由于反射、散射光对测量的干扰小,通过光声光谱法测量待测气体吸收光能的大小,提高了对微量气体的检测精度^[16]。而容积只有2~3 mL的光声室,提高了油气分离

效率。但是由于对现场环境的严格要求,检测过程的复杂性以及实际的性价比低,导致光声光谱技术难以推广。光声光谱法原理流程如图 1-3 所示。

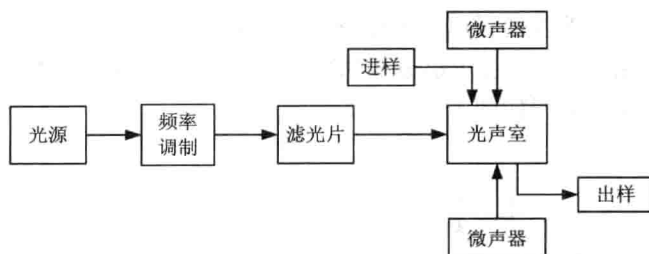


图 1-3 光声光谱法原理流程图

4. 气相色谱法

气相色谱法是目前业界使用最频繁的和有效的油中气体分离与检测方法,该法用于检测变压器油中溶解气体组分时具有分离效率高、气体检测速度快、检测精度高和样品用量少等优点^[17, 18]。

表 1-1 为上述油中多组分气体在线监测方法的综合比较。

表 1-1 油中多组分气体在线监测方法的综合比较

性能	通用性	灵敏度	气路	样气量	维护量	扩展量	价格
气相色谱法	很好	好	复杂	很小	较大	很好	一般
传感器阵列法	特定气体如可燃性	一般	简单	小	一般	差	一般
红外光谱法	H ₂ 无吸收	较好	一般	较多	较小	一般	高
光声光谱法	好	好	一般	小	较小	一般	高

加拿大 Syppotec 公司的 HYDRAN 201R/201i 油中溶解气体早期故障监测仪是基于选择性气体渗透膜和燃料电池技术,以检测 H₂ 为主、CO 为辅,几乎检测不出其他烃类气体的在线检测装置。随着技术的发展和电力行业对电力设备安全运行的高度重视,只能检测出一种或几种气体的在线监测方法已经不能满足企业用户的要求。由三菱、日立公司在行业内首推的在线监测装置能检测 H₂、CO、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂ 6 种气体。美国 Serveron 公司的 TRUEGAS 全组分变压器油中溶解气体在线监测系统已在全球多个国家和地区运行多年,能在线、实时、连续地监测和显示 8 种气体的浓度,并自动进行油色谱分析,可网络下载分析结果,但价格偏高。由澳大利亚红相公司研制的 DRMMC 变压器多组件在线监测系统,具有实时、不停机地全方位监测变压器各类运行数据及工作状态的功能。

我国研究在线监测系统和装置已有 20 余年时间,通过不断地深入摸索和实验室及现场运行实践,积累了丰富的经验,相关系统和产品已逐步商业化。重庆大学研制出以

复合传感器加气体分离柱检测6种气体的BSZJⅢ型监测器。东北电科院等单位研制的大型电力变压器DGA色谱在线监测装置,主要在线监测油中 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等烃类气体,检测周期仅1h,检测限达 $0.5\mu\text{L/L}$ (检测精度为10%)。但采用氢火焰离子检测器,造成系统庞大,由于需要点火,很难应用于现场,可靠性和稳定性都得不到保证。重庆大学等开发的采用多传感气敏元件,结合数据融合技术的变压器DGA在线监测系统,可同时检测油中 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 6种溶解气体,其对 C_2H_2 的检测精度可达 $1\mu\text{L/L}$,其余5种气体的检测精度为 $10\mu\text{L/L}$ 。

随着气体检测技术的提高、各种新型传感器的出现、色谱技术的不断完善以及智能的故障检测和诊断技术的发展^[19],国内变压器在线监测水平已经得到了很大的提高,而以可靠性为中心的变压器状态监测的发展表明:切实提高变电设备运行状态的安全性,降低设备维护及检修成本,必须大力发展变压器在线监测技术。

1.2.2 变压器油中微量水分检测方法

油中水分含量是影响变压器油的老化速度和绝缘性能的一项重要指标。当油中水分含量在0.003%以下时,几乎不会影响油的绝缘性能;而当水分含量达到0.005%及以上时,油的绝缘强度会受较大影响。油的击穿电压在水分含量高达0.03%时,下降25%。变压器油的溶解能力受温度影响,在20℃时溶解水分含量为 $40\mu\text{L/L}$ 左右。油中水分的增多会加剧生成有机酸,腐蚀变压器本体的金属材料,油的介质损耗因素也会因为产生的皂化物而恶化,增加油的吸潮性,使油氧化作用加强,降低油的使用寿命。一般认为,受潮的油会成倍地加速油的老化。因此,变压器中的水分含量对变压器油的绝缘性能和绝缘纸的老化有很大的影响,变压器油中微水含量对评估变压器绝缘状况有着十分重要的意义。

目前用于油中微水检测的方法主要有非在线检测方法以及在线检测方法。

1. 蒸馏法

蒸馏法是分离液态混合物的一种常用方法,属于非在线检测方法。蒸馏法检测利用混合物的沸点不同,加热液态混合物来实现分离。虽然该方法原理简单,但由于加热与冷凝的过程时间比较长而导致用该方法检测水含量的效率不高。

2. 卡尔·费休法

1935年由卡尔·费休(Karl Fischer)提出的测定水分的分析检测方法属于非在线检测方法。卡尔·费休法是专门测定水分且最权威的方法。该方法适用面广,可以用来快速测量液体、固体和气体中的水含量。虽然该方法具有很高的准确性,但是试验的过程比较复杂,试验时不仅需要非常好的仪器与环境也需要试验人员的仔细操作来减少滴定过程中各种对测量结果有影响的误操作。

3. 色谱法

色谱法是非在线监测方法。该方法利用不同的物质在两相(固定相、流动相)时具有不同的溶解度,当流动相和固定相做相对运动时,利用各组分存在的微小差异,将待分离物质在两相中进行反复的多次分配,从而产生很大的分离效果,最后各组分完全分离。使用此法进行油中微量水分检测时,流动相为气化试样后的混合气体,在载气的推

动下进入固定相中,分离完成后测定微水含量。该法检测灵敏度高、结果准确可靠、抗干扰性强、所需时间短。该项试验属于精密试验,需要专门的试验人员进行操作才能得到准确性高的结果。

4. 重量法

重量法是非在线监测方法。该方法原理简单,先测量油水混合物的重量,根据水和变压器油的重量差异,计算出水在油水混合物中所占的比重。虽然该方法原理简单而且操作方便,但是油中微水含量一般都在 $\text{ppm}(10^{-6})$ 级,使用重量法来测量油中水分产生的误差比较大。

5. 射频法

射频法是在线监测方法。该方法用来检测油水混合物时,利用变压器油 and 水的介电常数不同(变压器油 2.2, 水 83),水在油水混合物所占的比例不同就会导致其输出的信号改变,达到测量水分含量的目的。

射频法与重量法一样对微量的水分检测不敏感,因为微量的水分对变压器油的介电常数改变不大,所以利用该方法来进行微水含量的检测存在误差比较大的缺点。

6. 红外光谱法

红外光谱法是在线检测方法,是将红外检测与色谱相结合的一种新型的油中微水在线监测方法。该方法先利用色谱法将水从变压器油中分离出来并且将其变成水蒸气,使用氮气作为载气将水蒸气装载到红外检测仪器室来进行测量。由兰伯特·比尔定律“透射的光强度与混合气体中的水分含量成反比”,所以测定透射光强度的大小就可计算得出水分含量。

该方法检测精度高、成本适中、检测速度快同时对环境友好。不过该方法所涉及仪器在使用时会逐渐产生偏差,为了降低误差需要定期对红外检测仪器进行校准。

7. 介电常数法

介电常数法是在线监测方法。通过将传感器放置在被测样品中,传感器通过吸收油中的水分而改变其电容值。改变的电容值和被测样品中水含量的高低有关,可以通过测量传感器的电容值来计算出相应的微水含量。

该法响应时间短,准确度高,长期运行时稳定性好。但对制作检测电容的材料要求高,如果材料的敏感性不达标则无法保证检测结果的准确性。

1.2.3 容性设备检测方法

对电气设备的绝缘状态在线监测是从 20 世纪 70 年代开始的,标志性的结果就是在电气设备带电的同时对其绝缘状态进行测量。不过由于当时的技术条件限制,能够直接测量的电气参数不多,主要围绕在观察其电流是否畸变等相对简单的检测内容上。进入 80 年代后,传感器技术的进步使得在线监测的参数形成多样化趋势,使得通过测量非电气参数指标来间接地评估电气绝缘性能成为可能。同时由于微电子技术 with 计算机技术的发展,在线监测由传统的模拟测量变成了数字测量。到 20 世纪末期,因为互联网和无线通信网络的发展,在线监测系统开始向着分布集中式的方向发展,同时全自动的绝缘在线监测系统也在不断地开发。

变压器容性设备性能的好坏对变压器的安全运行有着重要的影响。高压容性设备的性能变化是一个渐进的过程,所以对其进行在线监测可以用来估计变压器的使用寿命。介质损耗因数 $\tan\delta$ 是一个可以反映高压绝缘介质损耗大小的特征量,通常跟材料有关与外在尺寸或者形状没有关系,所以介质损耗可以用来反映设备整体绝缘状况。对设备的介质损耗监测的研究也是现在国内外的热点之一。目前广泛使用的方法包括模拟测量方法和数字测量方法^[20]。

1. 模拟测量方法

传统的模拟测量方法是通过西林电桥法(schering bridge)直接监测容性设备介质损耗 $\tan\delta$ 。原理简单且测量结果比较稳定。但由于是离线方法,因此不能用于在线监测系统上^[21]。

2. 数字测量方法

可以通过测量容性设备的末屏电流信号来分析和评估设备的绝缘状况。测量该漏电电流信号的方式通常有两种:直接耦合方式和电磁耦合方式。

直接耦合方式需要将精密电阻或者电容串联进电路中,通过测量电阻或电容两端的电压。通过计算测量电容 C_x 的电压与施加在容性设备上的电压之间的相位差来得到容性设备的介质损耗。测量电容 C_x 上的电压具有不突变的特性,所以能够有效地降低外界的干扰,测量的结果具有较高的稳定性。但是采用直接耦合的方式改变了容性设备的接地线路,给容性设备的运行带来潜在危害。从安全性角度来看,直接耦合存在两个问题:一是如果串联电容出现故障可能会导致容性设备接地出现开路,危及设备安全。二是由于是直接耦合,一次线路、二次线路间没有隔离,如果一次线路上出现了过电压,而放电管和压敏电阻不能立即起作用,将会对后面的电子测量线路以及计算机系统造成损害。

电磁耦合方式是指在末屏接地电路中串联进电流互感器,以接地线路为一次绕组,测量回路为二次绕组,通过电磁耦合来测量电流的方法^[22]。该方法不需要改变接地线路结构,利用电磁耦合实现了设备一次线路与测量回路的隔离,能够有效地保护测量系统和计算机系统。电流互感器可按照是否需要额外电源来进行划分。无源互感器具有结构简单、可靠性高和维护容易等优点。但是由于是无源器件,铁芯容易受到输入电流和环境的影响。有源互感器比起无源互感器的抗干扰性更强,所以其在测量时精度更高,不过由于使用外部能源的辅助电路使得互感器运行时的稳定性有所降低。

容性设备的介质损耗 $\tan\delta$ 一般很小,所以对传感器的准确性要求很高。数字测量介质损耗的方法比较多,其中较为经典的就是过零点检测法^[23]和过零点电压比较法^[24]。过零点电压比较法做一次检查只需要检查一次过零点,它比过零点检查法所需要的检测次数大幅降低。谐波分析法^[25],对从传感器上采集到的电压与电流波形进行傅立叶变换,然后通过滤波器得到其电压与电流基波波形,根据基波波形求得二者相位差与介质损耗因数。