

DAXING DIANLI BIANYAQI
GUZHANG ZHENDUAN JI ANLI

大型电力变压器 故障诊断及案例

中国南方电网超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAXING DIANLI BIANYAQI
GUZHANG ZHENDUAN JI ANLI

大型电力变压器 故障诊断及案例

中国南方电网超高压输电公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

电力变压器是电力系统的枢纽设备,正确诊断电力变压器尤其是大型油浸式电力变压器的潜伏性故障对提高电力系统的运行安全和可靠性具有重要的意义。

本书分为9章,第1章为概述,第2章介绍了大型电力变压器的故障模式及影响分析,第3章介绍了大型电力变压器故障特征参量分析,第4章介绍了大型电力变压器故障特征参量预处理及预测方法,第5章介绍了大型电力变压器故障特征参量数据融合方法,第6章介绍了基于油中溶解气体的变压器故障诊断方法,第7章介绍大型电力变压器过热故障诊断方法,第8章介绍了基于多特征参量的故障诊断方法,第9章介绍了典型故障诊断案例分析。

本书可作为电力企业高压专业技术人员进行变压器故障诊断的参考用书,也可作为科研院所和大专院校的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大型电力变压器故障诊断及案例 / 中国南方电网超高压输电公司组编.
—北京:中国电力出版社,2017.6
ISBN 978-7-5198-0350-6

I. ①大… II. ①中… III. ①电力变压器—故障诊断—案例 IV. ①TB4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第023412号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:岳璐(xiaolu5090@sina.com)

责任校对:马宁

装帧设计:张俊霞 赵姗姗

责任印制:邹树群

印 刷:三河市万龙印装有限公司

版 次:2017年6月第一版

印 次:2017年6月北京第一次印刷

开 本:710毫米×980毫米 16开本

印 张:14

字 数:235千字

印 数:0001—2000册

定 价:56.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

《大型电力变压器故障诊断及案例》

编写委员会

主 编 赵建宁

副主编 王 奇 张 晗 钱 海 吕金壮

编写组 常 安 邓 军 宋云海 周 淦

王时征 李妍红 王剑坤

前言

电力变压器是电力系统的枢纽设备,正确诊断电力变压器尤其是大型油浸式电力变压器的潜伏性故障对提高电力系统的运行安全和可靠性具有重要的意义。

油浸式电力变压器内部结构复杂,与其他电力设备相比其故障率相对较高。根据我国 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》规定,一般 1~3 年要停电进行一次绝缘预防性试验。由于预防性试验所加的试验电压比实际运行电压低很多,潜伏下来的故障在运行中会继续发展,同时经预防性试验后的变压器在运行中因各种外部和内部因素影响,又可能会出现新的故障。实际上,现有的预防性试验方法不能有效地发现变压器在运行条件下的内部潜伏性故障,而通过气体继电器又不能知道气体的组分及每种组分的含量,故也不能真正反映已经发生的故障。

因此,对大型电力变压器进行有效深入的故障诊断及案例分析,指导变压器的运行维护和状态检修,预防和降低故障的发生机率,具有重要的理论和实际意义。

基于此,我们于 2013 年 9 月开始筹备本书的写作,并于 2014 年初开始付诸行动,经过两年半的努力,终于完成本书的编写。本书分为九章:第 1 章,主要介绍了大型电力变压器的结构特点及可靠性、典型故障统计与分析、故障检测技术、故障诊断技术的现状及发展趋势;第 2 章,对大型电力变压器各组成部分所有可能的故障模式及故障后果进行分析,得出完整的变压器 FMEA 结果;第 3 章,介绍了大型电力变压器的故障特征参量提取、特征参量与故障的相关性分析;第 4 章,对变压器故障特征量的数据预处理进行了阐述,并介绍了多种大型电力变压器故障特征参量的常见预测方法;第 5 章,阐述了数据融合的主要方法,

并重点介绍了基于 D-S 证据理论的故障特征参量的数据融合方法；第 6 章，首先阐述了大型电力变压器内部故障与油中特征气体的关系，然后详细介绍了三比值法、案例推理和 BPNN 三种基于油中溶解气体的故障诊断方法；第 7 章，首先阐述了大型电力变压器内部发热过程及机理分析，然后介绍了 IEEE 推荐的过热性故障诊断方法以及改进的方法；第 8 章，介绍了基于预防性试验、基于聚类与 SVM 相结合和基于粒子群优化最小二乘支持向量机的故障诊断方法；第 9 章，首先对比较普遍和常见的变压器故障进行描述，然后对某电网公司近几年常见的交流变压器与换流变压器故障案例进行了分析。

虽然我们每位编写人员尽了自己最大的努力，对自己所编写部分文责自负，但由于编写经验欠缺，水平有限，错误在所难免。如果有任何批评意见，请及时来信至 epwangqi@qq.com 提出您的宝贵建议，谢谢！

编 者

2016 年 9 月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 大型电力变压器的结构特点及可靠性分析	1
1.2 大型电力变压器典型故障统计与分析	5
1.3 大型电力变压器故障检测技术	10
1.4 大电力变压器故障诊断技术的现状及发展趋势	12
第 2 章 大型电力变压器的故障模式及影响分析	14
2.1 概述	14
2.2 基本原理	14
2.3 大型电力变压器的 FMEA	19
第 3 章 大型电力变压器故障特征参量分析	30
3.1 概述	30
3.2 大型电力变压器的故障特征参量提取	31
3.3 大型电力变压器特征参量与故障的相关性分析	34
第 4 章 大型电力变压器故障特征参量预处理及预测方法	49
4.1 概述	49
4.2 大型电力变压器故障相关特征量预处理方法	50
4.3 大型电力变压器故障特征参量的常见预测方法	55
第 5 章 大型电力变压器故障特征参量数据融合方法	72
5.1 概述	72
5.2 信息融合的基本原理	73
5.3 信息融合的主要方法	75
5.4 基于 D-S 证据理论的故障特征参量的数据融合	81

第 6 章	基于油中溶解气体的变压器故障诊断方法	88
6.1	大型电力变压器内部故障与油中特征气体的关系	88
6.2	基于三比值的大型电力变压器故障诊断方法	93
6.3	基于案例推理的大型变压器故障诊断方法	96
6.4	基于 BPNN 的故障诊断方法	101
第 7 章	大型电力变压器过热故障诊断方法	112
7.1	概述	112
7.2	大型电力变压器内部发热过程及机理分析	112
7.3	IEEE 推荐的变压器过热故障诊断方法	116
7.4	变压器过热故障诊断改进方法	127
第 8 章	基于多特征参量的故障诊断方法	134
8.1	概述	134
8.2	基于预防性试验结果的快速诊断方法	142
8.3	基于多特征参量的故障诊断方法	145
第 9 章	典型故障诊断案例分析	164
9.1	变压器典型故障案例分析	164
9.2	交流变压器典型故障分析	166
9.3	换流变压器典型故障分析	187
参考文献		201

概 述

1.1 大型电力变压器的结构特点及可靠性分析

1.1.1 电力变压器的结构特点

电力变压器是电力系统中重要的输变电设备之一，在电力系统中处于枢纽地位，其运行的安全可靠直接关系电力系统的安全。随着电网的迅速发展，单台高电压、大容量的大型电力变压器作为电力系统的枢纽设备越来越多地投入电网运行，然而，由于制造、运输、安装和维修质量等因素造成的电力变压器故障不仅影响电力系统的输电能力，还可能造成电力系统的大规模停电，给电力系统和国民经济带来巨大损失。因此，及时准确地掌握变压器的故障发生情况对于变压器状态检修及提高电力变压器的运行可靠性，保障整个电网的安全可靠运行具有十分重要的意义。

电力变压器由铁芯、绕组、油箱、附件等几部分组成。其中，铁芯和绕组装在一起构成的整体称为器身。在当今市场中，运用高端技术造就的复杂结构的变压器具有容量大，电压高，重量受到严格限制等，这是设计师在数年成功制造电力变压器积累了丰富的经验的基础上，对那些不合理的、落后的结构进行了改进的同时采用新型技术的结晶，使得现在的变压器在结构上更加趋于合理、经济、耐用。现就组成电力变压器的各部分结构进行详细论述。

1. 铁芯

铁芯是电力变压器的磁路部分，由铁芯柱（柱上套装绕组）、铁轭（连接铁芯以形成闭合磁路）组成。为了减小涡流和磁滞损耗，提高磁路的导磁性，铁芯采用 0.35~0.5mm 厚的硅钢片涂绝缘漆后交错叠成。小型变压器铁芯截面为矩形或方形，大型变压器铁芯截面为阶梯形（为了充分利用空间）。为缩短绝缘距离、降低局部放电量，在铁芯外面设置一层由金属膜复合纸条黏制而成的金属围屏。金属膜本身厚度很薄，宽度也仅有 50mm 而已，一方面不会在自身中形成较大的涡

流，另一方面对铁芯的尖角产生了较好的屏蔽作用。与此同时，在铁芯的旁轭内侧也设置有金属膜围屏，用以保护高压线圈。夹件则多采用大板式腹板和鱼刺状支板结构，在很大程度上降低了金属构件垂直线圈顶部的漏磁面积；再配上纸板结构，将大大降低杂散损耗。线圈引线的引出结构也在不断被简化，不仅省去了夹件加强板，还方便中、低压引线的排布，从而可将强油导向循环的导油管和下夹件连为一体。这也促进了杂散损耗值的降低，对大型电力变压器来讲意义重大。因为杂散损耗在变压器总损耗中所占比例会随着容量的增大而增大。因此，有效提高了线圈的电流密度，减轻了电力变压器的重量。上铁轭下部用楔形绝缘撑紧，进一步加强器身短路的机械强度；下铁轭垫块分块制造、分块安装，在器身装配完成以后，仍能方便地固定在铁轭上均匀分布的夹紧钢带螺栓上。铁芯油道共四层，为提高散热效率，使用 6mm 厚纸板直接黏在铁芯片上，并在铁芯每隔 100mm 处放置一层 0.5mm 厚的纸板，防止铁芯片的相对滑动。

2. 绕组

绕组是电力变压器的电路部分，采用铜线或铝线绕制而成，一次、二次绕组同心套在铁芯柱上。为便于绝缘，一般低压绕组在里，高压绕组在外，但大容量的低压大电流变压器，考虑到引出线工艺困难，往往把低压绕组套在高压绕组的外面。线圈及匝绝缘高压绕组使用高密度的电缆纸包导线，中压绕组和低压绕组分别采用绝缘强度较好的高密度电缆纸包换位导线、丹尼森纸包换位导线。线圈配置了内、外导向隔板，目的是提升油的冷却效率。高压绕组的两端及中压绕组的首端都安装了 30mm 厚的馒头状均压环，极大地改善了端部的电场分布。所有的绕组端部出头和第 2 饼之间都垫有扇形绝缘块，加强出线端部的绝缘效果。

3. 油箱

油箱是装器身和变压器油的，为了便于散热，有的箱壁上焊有散热管。变压器油的作用是绝缘和冷却。为了减轻油箱重量、节省钢材和变压器油，在保证符合绝缘距离的条件下，上节油箱采用梯形，下节为梯形适形油箱。

4. 附件

对于电力变压器，除了变压器正常工作中实行电压变换的元件以外，变压器中同样存在一些附件用于调节变压器的性能，保证变压器的正常工作。对于一般的电力变压器，其包含的附件主要如下：储油柜（油枕）、呼吸器、防爆管（压力释放装置）、散热器、绝缘套管、分接开关、气体继电器、温度计、净油器等。这些变压器附件各有作用，这里不做详细介绍。

根据电力变压器的不同结构，依据不同的分类准则，有不同的分类方法。按照电力变压器中冷却与绝缘介质的不同，分为以下三类：

（1）油浸式电力变压器：采用矿物油作为冷却和绝缘介质。

(2) 气体绝缘电力变压器：采用人工合成的气体 SF_6 作为冷却和绝缘介质。

(3) 干式电力变压器：采用空气作为冷却和绝缘介质。

按照电力变压器的结构又可分为以下几类：

(1) 密封式电力变压器：变压器内部介质与外部大气相隔绝，与之对应的是非密封性变压器。

(2) 双绕组电力变压器：只包括高、低压两个绕组的变压器，结构上比较简单。

(3) 多绕组电力变压器：每相有两个以上绕组，分别连接到电压等级不同的线路上，常见的为三绕组变压器，即高压、中压和低压三组绕组。

(4) 有载调压电力变压器：装有载调压分接开关，能在运行中带负荷进行调压的变压器。

(5) 自耦电力变压器：至少有两个绕组具有公共部分的变压器，其绕组之间除了磁耦合外，还有电路上的直接连接，因此与同容量的双绕组变压器相比，结构尺寸比较小。

按照电力变压器的使用条件分类：

(1) 发电机用变压器：低压侧与发电机母线相连，高压侧与输电线路相连的升压变压器，是发电厂的主变压器。

(2) 联络变压器：变电站或发电厂用于连接两个不同电压的输电线路，并可以按照电力潮流的变化，每侧都可以作为一次或二次侧使用的变压器。

(3) 升（降）压变压器：是指将一种电压等级升（降）到另一种电压等级的变压器。

(4) 厂用变压器：是发电厂内作为动力或照明等电源用的变压器。

对于电力变压器，在使用过程中必须根据当地电网的使用情况选择不同的电力变压器，注意防止各种变压器的乱用与错用。

现在的电力系统向着高电压、大容量、高自动化集成方向发展，电力设备也慢慢朝着大型化、连续化和自动化发展。对于电力系统中的电力设备的可靠性提出了新的、更高的要求，要使电力设备因故障而停工的损失达到最小，同时维修经费不能有大幅度的上升，还要降低一些大型设备发生故障而导致的重大事故发生的概率。因此，电力单位或研究机构在电力事故与减少运行损失的基础上，对于现有的电力变压器进行各种故障分析，判断故障的部位和产生的原因及严重程度，并及早采取有效的措施，保证大型电力变压器具有良好的可靠性。

1.1.2 电力变压器的可靠性分析

根据 GB 3187《可靠性名词术语及定义》，将比较常用的可靠性指标，如可靠度 $R(t)$ 、不可靠度 $F(t)$ 、失效率 $\lambda(t)$ 等，介绍如下。

1. 可靠度 $R(t)$ 与不可靠度 $F(t)$

假设在时间 $t=0$ 时开始用 n_0 个样品试验, 在一定时间 t 后, 仍有 n_s 个样品保持完好, 而 $n_f(n_0 - n_s)$ 个样品已经失效, 那么有

$$R(t) = \frac{n_0 - n_f}{n_0} = \frac{n_s}{n_0} \quad (1-1)$$

$$F(t) = \frac{n_f}{n_0} \quad (1-2)$$

可以看到, 在给定时间内, 不可靠度 $F(t)$ 与系统在同一时间内的可靠度 $R(t)$ 之和为 1, 于是有

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1-3)$$

2. 失效率 $\lambda(t)$

失效率是指产品在 t 时刻前没有失效的条件下, 在 t 时刻后单位时间内发生失效的概率, 即某一时刻 t 之后紧接着一个单位时间内的失效数与时刻 t 残存的产品数之比, 表示为

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n}{(n_0 - n_f)\Delta t} = \frac{\Delta n}{n_s \Delta t} \quad (1-4)$$

式中 Δn ——产品在 t 到 $(t + \Delta t)$ 时间间隔内失效的产品数。

失效率是可靠性工程中常用到的衡量产品可靠性水平高低的一个重要指标。通常用故障率曲线来反映产品总体在整个寿命期故障率的情况。图 1-1 是故障率曲线的典型情况, 被形象地称为“浴盆曲线”。故障率随时间变化可分为三段时间:

早期故障期、偶然故障期、耗损故障期。

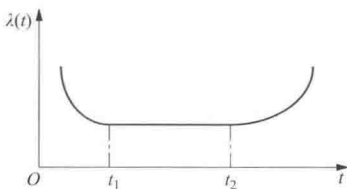


图 1-1 浴盆曲线

对设备进行可靠性评估, 不仅要对它的一些可靠性指标, 如平均寿命、失效率等做出评估, 更重要的是要找出提高其可靠性的途径。为此要对设备的故障机理、故障原因等做出具体分析, 找出影响失效和寿命的主要因素及反映失效过程的理论参数, 从而确定提高该设备可靠性的对策, 包括运行

条件和制造两个方面宜采取的措施。

据统计 1999~2003 年间, 国家电力公司系统内 110~500kV 电压等级变压器事故率为 0.317 台/(百台·年), 障碍率为 0.702 台/(百台·年)。由于制造方面的原因造成设备损坏的占 72%, 由于运行单位生产管理方面的原因造成设备损坏的占 12%。影响 220kV 及以上大型变压器运行可靠性指标的第一位责任原因仍是制造质量不良引起的非计划停运事件, 3 年中平均占 80% 以上。2005 年有 10 台运行不足 10 年的变压器发生事故, 因制造方面问题所引起的变压器损坏事故台次占

总损坏事故台次的 83.3%，事故容量占总损坏事故容量的 90.3%。依据 1975~2005 年中国电力科学研究院对 110（66）kV 及以上电压等级变压器缺陷情况统计结果做归纳分析可知，抗短路强度不够、制造工艺及材质控制不严、分接开关和套管质量差等制造问题是造成事故、缺陷的根本原因。针对上述情况，许多专家、制造厂家进行了大量的分析试验，并取得了一定的进展。

在变压器可靠性定量分析方面，通常使用故障树分析法对电力变压器可靠性进行分析，将变压器划分为磁路、电路、绝缘等七大系统。根据 1985 年以来，全国变压器行业几次质量检查和湖南大学、清华大学在湖南、四川、华东、东北地区对运行中变压器故障的调查，找出了如铁芯局部短路、多点接地、匝间短路、相间击穿、绝缘受潮等 39 个影响中小型电力变压器可靠性运行的主要故障模式，并将故障率 $\lambda(t)$ 、平均无故障工作时间（MTBF）、可用系数（AF）作为考核中小型电力变压器可靠性的建议指标；建立了包括载流系统、铁芯、绝缘油、油箱、套管、有载分接、冷却系统、保护测试在内的八个子树，涵盖 249 个事件的变压器故障树。通过定性分析其最小割集，得到运行中变压器故障 54.9% 属于制造原因，23.7% 属于维护原因，16.2% 属于环境原因。通过定量分析底事件重要度，得到外部短路、绝缘受潮、分接开关触头接触不良的概率重要度较高。

对于现在的大型变压器故障，可以把其明显分为两类：①变压器的故障明显且严重，对于经济造成巨大损失的；②变压器存在细微的故障，不处理该故障，变压器仍可以独立运行一段时间。因此，对于变压器的可靠性分析就要从这两种类型来进行分析。对于我国的实际情况，发生故障的变压器不仅与变压器本身的品质有关，还与变压器的运输、保管、安装、运行与维护相关，对于变压器的可靠性分析，很难把其分开分析每一部分对于变压器的可靠性产生的影响。因此，很难从理论上用演绎法或通过加速寿命试验的方法来获得变压器的可靠性参数。而要准确地定义变压器的可靠性数据，必须对变压器的运行失效加以明确的确定。因此，在分析变压器故障时，可以把变压器运行时遇到的事故与故障分为以下两类失效：

（1）凡是在变压器运行过程中由于自发或人为必须停止变压器，而导致变压器退出运行，并且要求打开变压器上的节油箱进行某些事故的部件更换与维修的情况。正常检测时发现的变压器绕组等明显损坏的潜在性故障也算在内。

（2）除去（1）以外的其他变压器不能长时间工作的情况。

以上两种情况可以很好地运用到变压器的可靠性分析理论中，结合其他的变压器故障检测手段可以保证对变压器的运行可靠性进行准确的预测。

1.2 大型电力变压器典型故障统计与分析

对于电力变压器的故障，其分类方法存在很多种，从变压器发生的故障性质

上来说，一般可以分为热故障与电故障；从变压器中的各种回路来看，变压器可以分为电路故障、磁路故障、油路故障三种。从变压器的主体结构来说，区分的故障种类就比较多种多样，包括绕组故障、铁芯故障、冷却油故障和变压器附件故障。一般用短路故障、放电故障与绝缘故障三类来区分变压器的故障类型。

1.2.1 短路故障

变压器短路故障主要指变压器出口短路、内部引线或绕组间对地短路及相与相之间发生的短路而导致的故障。变压器正常运行中由于受出口短路故障的影响，遭受损坏的情况较为严重。据有关资料统计，近年来，一些地区 110kV 及以上电压等级的变压器遭受短路故障电流冲击直接导致损坏的事故，占全部事故的 50% 以上，与前几年统计相比呈大幅度上升的趋势。这类故障的案例很多，特别是变压器低压出口短路时形成的故障，该故障一般要更换绕组，严重时可能要更换全部绕组，从而造成十分严重的后果和损失，因此应引起足够的重视。

出口短路对变压器的影响，主要包括以下两个方面：

1. 短路电流引起绝缘过热故障

变压器突发短路时，其高、低压绕组可能同时通过为额定值数十倍的短路电流，它将产生很大的热量，使变压器严重发热。当变压器承受短路电流的能力不够且热稳定性差时，会使变压器绝缘材料严重受损，形成变压器击穿及损毁事故。

2. 短路电流引起绕组变形故障

变压器受短路冲击时，如果短路电流小，继电保护正确动作，绕组变形将是轻微的；如果短路电流大，继电保护延时动作甚至拒动，变形将会很严重，甚至造成绕组损坏。对于轻微的变形，如果不及时检修，恢复垫块位置，紧固绕组的压钉及铁轭的拉板、拉杆，加强引线的夹紧力，在多次短路冲击后，由于累积效应也会使变压器损坏。因此，诊断绕组变形程度、制定合理的变压器检修周期是提高变压器抗短路能力的一项重要措施。

1.2.2 放电故障

1. 变压器局部放电故障

局部放电刚开始时是一种低能量的放电。在电压的作用下，绝缘结构内部的气隙、油膜或导体的边缘发生非贯穿性的放电称为局部放电。变压器内部出现这种放电时，情况比较复杂，根据绝缘介质的不同，可将局部放电分为气泡局部放电和油中局部放电；根据绝缘部位来分，有固体绝缘中空穴、电极尖端、油角间隙、油与绝缘纸板中的油隙和油中沿固体绝缘表面等处的局部放电。

(1) 局部放电的原因。

1) 当油中存在气泡或固体绝缘材料中存在空穴或空腔时，由于气体的介电常数小，在交流电压下所承受的场强高，但其耐压强度却低于油和纸绝缘材料，在

气隙中容易首先引起放电。

2) 外界环境条件的影响。例如,油处理不彻底使油中析出气泡等,都会引起放电。

3) 制造质量不良。例如,某些部位有尖角而出现放电;带进气泡、杂物和水分,或因外界气温、漆瘤等,它们承受的电场强度较高。

4) 金属部件或导体之间接触不良而引起的放电。局部放电的能量密度虽不大,但若进一步发展将会形成放电的恶性循环,最终导致设备的击穿或损坏,引起严重的事故。

(2) 放电产生气体的特征。放电产生的气体,由于放电能量不同而有所不同。例如,放电能量密度在 $10^{-9}C$ 以下时,一般总烃不高,主要成分是氢气,其次是甲烷,氢气占氢烃总量的 80%~90%;当放电能量密度为 $10^{-8}\sim 10^{-7}C$ 时,则氢气相应降低,而出现乙炔,但乙炔这时在总烃中所占的比例常不到 2%,是局部放电区别于其他放电现象的主要标志。

随着变压器故障诊断技术的发展,人们越来越认识到,局部放电是变压器诸多有机绝缘材料故障和事故的根源,因而该技术得到了迅速发展,出现了多种测量方法和试验装置,也有离线测量的。

(3) 测量局部放电的方法。

1) 电测法。电测法利用示波器、局部放电仪或无线电干扰仪,查找放电的波形或无线电干扰程度。电测法的灵敏度较高,测到的是视在放电量,分辨率可达几皮库。

2) 超声测法。超声测法利用检测放电中出现的超声波,将声波变换为电信号,录在磁带上进行分析。超声测法的灵敏度较低,大约几千皮库,优点是抗干扰性能好,且可“定位”。有的利用电信号和声信号的传递时间差异,可以估计探测点到放电点的距离。

3) 化学测法。化学测法检测溶解油内各种气体的含量及增减变化规律。此法在运行监测上十分适用,简称色谱分析。化学测法对局部过热或电弧放电很灵敏,但对局部放电灵敏度不高。而且重要的是观察其趋势,例如,几天测一次,就可发现油中含气的组成、比例及数量的变化,从而判定有无局部放电或局部过热。

2. 变压器火花放电故障

发生火花放电时放电能量密度大于 10^{-6} 的数量级。

(1) 悬浮电位引起火花放电。高压电力设备中某金属部件,由于结构上的原因或运输过程和运行中造成接触不良而断开,处于高压与低压电极间,并按其阻抗形成分压,而在这一金属部件上产生的对地电位称为悬浮电位。具有悬浮电位的物体附近的场强较集中,往往会逐渐烧坏周围固体介质或使之炭化,也会使绝

缘油在悬浮电位作用下分解出大量特征气体，从而使绝缘油色谱分析结果超标。悬浮放电可能发生于变压器内处于高电位的金属部件，如调压绕组，当有载分接开关转换极性时出现悬浮电位；套管均压球和无励磁分接开关拨叉等出现悬浮电位。处于低电位的部件，如硅钢片磁屏蔽和各种紧固用金属螺栓等，与地的连接松动脱落，导致悬浮电位放电。变压器高压套管端部接触不良，也会形成悬浮电位而引起火花放电。

(2) 油中杂质引起火花放电。变压器发生火花放电故障的主要原因是油中杂质的影响。油中杂质由水分、纤维质（主要是受潮的纤维）等构成。

(3) 火花放电的影响。一般来说，火花放电不致很快引起绝缘击穿，主要表现为油色谱分析异常、局部放电量增加或轻瓦斯动作，比较容易被发现和处理，但对其发展程度应引起足够的注意。

3. 变压器电弧放电故障

电弧放电是高能量放电，以绕组匝层间绝缘击穿故障较为多见，其次为引线断裂或对地闪络和分接开关飞弧等故障。

1.2.3 绝缘故障

目前应用最广泛的电力变压器是油浸变压器和干式树脂变压器两种，电力变压器的绝缘是变压器绝缘材料组成的绝缘系统。它是变压器正常工作和运行的基本条件，变压器的使用寿命是由绝缘材料（即油纸或树脂等）的寿命所决定的。实践证明，大多变压器的损坏和故障都是因绝缘系统的损坏而造成的。据统计，因各种类型的绝缘故障形成的事故占全部变压器事故的 85% 以上。对正常运行及注意进行维修管理的变压器，其绝缘材料具有很长的使用寿命。国外根据理论计算及实验研究证明，当小型油浸配电变压器的实际温度维持在 95°C 时，理论寿命可达 400 年。设计和现场运行的经验表明，维护得好的变压器，实际寿命能达到 50~70 年；而按制造厂的设计要求和技术指标，一般把变压器的预期寿命定为 20~40 年。因此，保护变压器的正常运行和加强对绝缘系统的合理维护，很大程度上可以保证变压器具有相对较长的使用寿命，而预防性和预知性维护是提高变压器使用寿命和提高供电可靠性的关键。

油浸变压器中，主要的绝缘材料是绝缘油及固体绝缘材料，如绝缘纸、纸板和木块等。变压器绝缘的老化是指这些材料受环境因素的影响发生分解，降低或丧失了绝缘强度。

1. 固体纸绝缘故障

固体纸绝缘是油浸变压器绝缘的主要部分之一，包括绝缘纸、绝缘板、绝缘垫、绝缘卷、绝缘绑扎带等，其主要成分是纤维素，化学表达式为 $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_6)_n$ ，式中 n 为聚合度。一般新纸的聚合度为 1300 左右，当下降至 250 左右时，其机械

强度已下降了一半以上，极度老化致使寿命终止的聚合度为 150~200。绝缘纸老化后，聚合度和抗张强度将逐渐降低，并生成水、CO、CO₂ 和糠醛（呋喃甲醛）。这些老化产物大都对电气设备有害，会使绝缘纸的击穿电压和体积电阻率降低、介损增大、抗拉强度下降，甚至腐蚀设备中的金属材料。固体绝缘具有不可逆转的老化特性，其机械和电气强度的老化都是不能恢复的。变压器的寿命主要取决于绝缘材料的寿命，因此油浸变压器固体绝缘材料，应不但具有良好的电绝缘性能和机械特性，而且长年累月的运行后，其性能下降较慢，即老化特性好。

（1）纸纤维材料的性能。绝缘纸纤维材料是油浸变压器中最主要的绝缘组件材料，纸纤维是植物的基本固体组织成分，组成物质分子的原子中有带正电的原子核和围绕原子核运行的、带负电的电子，与金属导体不同的是绝缘材料中几乎没有自由电子，绝缘体中极小的电导电流主要来自离子电导。纤维素由碳、氢和氧组成，这样由于纤维素分子结构中存在氢氧根，便存在形成水的潜在可能，使纸纤维有含水的特性。此外，这些氢氧根可认为是被各种极性分子（如酸和水）包围着的中心，它们以氢键相结合，使得纤维易受破坏；同时纤维中往往含有一定比例（约 7%）的杂质，这些杂质中包括一定量的水分，因纤维呈胶体性质，使这些水分尚不能完全除去。这样也就影响了纸纤维的性能。

极性的纤维不但易于吸潮（水分是强极性介质），而且当纸纤维吸水时，使氢氧根之间的相互作用力变弱，在纤维结构不稳定的条件下机械强度急剧变坏，因此，纸绝缘部件一般要经过干燥或真空干燥处理和浸油或绝缘漆后才能使用，浸漆的目的是使纤维保持润湿，保证其有较高的绝缘和化学稳定性及较高的机械强度。同时，纸被漆密封后，可减少纸对水分的吸收，阻止材料氧化，还可填充空隙，以减小可能影响绝缘性能、造成局部放电和电击穿的气泡。但也有的认为浸漆后再浸油，可能有些漆会慢慢溶入油内，影响油的性能，对这类油漆的应用应予以充分注意。

当然，不同成分纤维材料的性质及相同成分纤维材料的品质不同，其影响大小及性能也不同，如棉花中纤维成分最高，大麻中纤维最结实，某些进口绝缘纸板由于处理加工质量较高，使性能其明显优于国产某些材质的纸板等。变压器大多绝缘材料都是用各种形式的纸（如纸带、纸板、纸的压力成型件等）做绝缘的。因此在变压器制造和检修中选择好纤维原料的绝缘纸材料是非常重要的。纤维纸的特殊优点是实用性强、价格低、使用加工方便，在温度不高时成型和处理简单灵活，且重量轻，强度适中，易吸收浸渍材料（如绝缘漆、变压器油等）。

（2）纸绝缘材料的机械强度。油浸变压器选择纸绝缘材料最重要的因素除纸的纤维成分、密度、渗透性和均匀性以外，还包括机械强度的要求，包括耐张强度、冲压强度、撕裂强度和坚韧性。