



DAXING DIANLI BIANYAQI DIANXING GUZHANG
ANLIFENXI YU CHULI

大型电力变压器典型故障 案例分析与处理

● 韩金华 张健壮 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



大型电力变压器典型故障 案例分析与处理

● 韩金华 张健壮 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为提高广大变压器运行、检修、试验人员的技术水平和分析、解决问题的能力,本书根据作者多年来分析、处理各种大型变压器故障的工作实践,从短路故障、本体故障、铁心故障、分接开关故障、套管故障、附件及其他故障六个方面选编了数十例大型变压器典型故障案例,详细介绍了不同案例的故障现象、分析及处理过程。希望这些具体的案例分析,能在实际工作中给广大电力专业工作者提供一定的帮助和参考。

本书可供从事变压器运行、检修、试验的人员及相关专业的管理、技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型电力变压器典型故障案例分析与处理/韩金华,张健壮编著. —北京:中国电力出版社,2012.4

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2866 - 2

I. ①大… II. ①韩… ②张… III. ①电力变压器 - 故障修复 IV. ①TM410.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 056466 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年9月第一版 2012年9月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 9.75印张 171千字

印数0001—3000册 定价25.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

变压器担负着电能转换和传输的重要作用，是电力系统中最重要设备之一。因此，变压器的正常运行是对电力系统安全、可靠运行的重要保证，必须最大限度地防止和减少变压器故障和事故的发生。引发变压器事故和故障的原因是多方面的，如外力的破坏和影响，不可抗拒的自然灾害，安装、检修、维护中存在的问题和制造过程中遗留的设备缺陷等。为吸取历史经验和教训，提高广大变压器运行、检修、试验人员的技术水平和分析、解决问题的能力，编者将自己近年来所分析处理的各种大型变压器典型故障案例进行了汇编。从短路故障、本体故障、铁心故障、分接开关故障、套管故障、附件及其他故障六个方面选编了数十例典型案例，详细介绍了不同案例的故障现象、分析及处理过程。希望这些具体实例的分析，能在实际工作中给广大电力专业工作者提供一定的参考。

由于编写水平和能力所限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者批评、指正。

编 者

前言

第一章	变压器的基本原理与结构简述	1
第二章	变压器故障分类概述	5
第一节	变压器短路故障	5
第二节	变压器本体故障	6
第三节	变压器铁心故障	9
第四节	变压器分接开关故障	9
第五节	变压器套管故障	10
第三章	变压器短路故障案例分析	11
第一节	典型案例分析	11
■ 案例一	电厂升压变压器低压侧短路	11
■ 案例二	变压器低压侧遭雷击引起相间短路	16
■ 案例三	变电站主变压器出口短路	18
■ 案例四	变电站主变压器低压侧线路连续短路	21
■ 案例五	变电站主变压器匝间短路	24
■ 案例六	变电站低压电缆出线短路	27
第二节	变压器短路防范措施	30
第三节	变压器绕组变形测试综述	31
第四章	本体故障案例分析	46
第一节	放电故障	46
■ 案例一	主变压器内部杂质引发局部放电	46
■ 案例二	裸金属悬浮放电	49
■ 案例三	变电站主变压器铁心放电	53
■ 案例四	高压引出线绝缘缺陷引起局放	57
第二节	过热故障	60

■ 案例一	线圈铜线焊接不良过热	60
■ 案例二	低压绕组股间短路	63
■ 案例三	线圈金属压环过热	67
第三节	线圈故障	69
■ 案例一	雷击过电压烧损线圈	69
■ 案例二	主变压器平衡线圈变形	71
■ 案例三	绕组绝缘受潮	77
第五章	铁心故障案例分析	80
■ 案例一	铁心和夹件间短路	80
■ 案例二	铁心和夹件存在杂质短路	82
■ 案例三	铁心松动位移	84
■ 案例四	铁心油道间短路	86
■ 案例五	铁心引出线过长短接铁心硅钢片	89
■ 案例六	铁心下部存在异物	91
第六章	分接开关故障案例分析	93
■ 案例一	有载分接开关接线错误	93
■ 案例二	有载分接开关切换开关动静触头接触不良	97
■ 案例三	无载分接开关动触头接线松动	101
■ 案例四	有载分接开关选择开关故障	104
■ 案例五	有载分接开关绝缘杆绝缘缺陷	106
■ 案例六	切换开关过渡电阻断线	108
第七章	套管故障案例分析	111
■ 案例一	套管导电头悬浮放电	111
■ 案例二	套管导电头内螺纹锈蚀	114
■ 案例三	套管末屏故障	116
■ 案例四	套管末屏引出线断线	122
■ 案例五	换流变压器套管进水受潮	125
第八章	附件及其他故障案例分析	128
■ 案例一	分接开关和油泵双重故障	128

■ 案例二	磁屏蔽短路过热	131
■ 案例三	气体继电器误动	135
■ 案例四	油箱电焊造成色谱异常	138
■ 案例五	油枕呼吸器堵塞	141
■ 案例六	潜油泵故障	142
■ 案例七	充氮灭火装置故障	145
参考文献		147

变压器的基本原理与结构简述

电力变压器是根据电磁感应原理制造出来的电气设备，主要由铁心、绕组、绝缘、外壳和必要的组件等组成。由于电压等级、设备容量存在差异，电力变压器的铁心、绕组、绝缘、外壳和组件的结构形式是存在个性化差异的。

一、铁心

变压器通过铁心内磁通随时间的变化，在不同匝数的绕组内感应出不同的电压。变压器的基本工作原理如图 1-1 所示。

设铁心内正弦变化的磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，根据电磁感应原理，绕组每匝中的感应电动势为

$$e_1 = d\Phi/dt = \Phi_m \cos \omega t$$

在正弦交流电压下，通常电压以有效值表示，于是每匝电压为

$$e_1 = 4.44f\Phi_m = 4.44fB_m S$$

式中 e_1 ——每匝电压，V；

Φ_m ——铁心中磁通最大值，Wb；

B_m ——铁心中磁通密度最大值，T；

f ——交流电压的频率，Hz；

S ——铁心的有效截面积， m^2 。

由于铁磁材料具有高的磁导率，目前在变压器制造企业，生产电力变压器

时均使用各种不同牌号的晶粒取向磁性硅钢片作为铁心材料，以降低空载损耗。

二、绕组

绕组是变压器变换电压的基本部件，由于不同绕组的每匝电压不同，因此，需要使绕组有不同的匝数，以获得不同的电压。变压器工作时，绕组中通过电流，在绕组导体中产生电阻损耗，会引起发热和变压器效率的降低。为此绕组使用电导率高的金属制造，常用的导体是铜和铝，对于电力变压器来讲，目前绕组普遍采用的材料是铜。

绕组的结构与绕组的容量有关，因此，绕组中通过的电流随额定电压的不

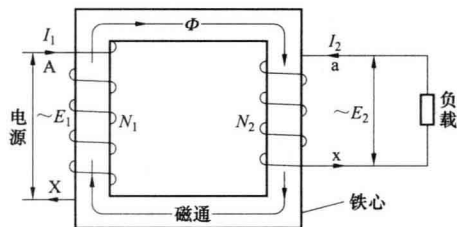


图 1-1 变压器基本工作原理图

同而不同。电力变压器中常用的绕组结构有圆筒式、连续式、纠结式、插入电容内屏蔽式、螺旋式、箔式、交错饼式（壳式变压器）。绕组采用不同的结构是为了适应不同的绕组电压、电流和加工制造。

三、油箱

油浸式变压器油箱是保证器身浸入在油中的容器，为保证变压器长期运行，油箱不能漏油，也不允许外界的空气、水分进入油箱内。变压器油箱作为变压器油的容器，要保证变压器器身的绝缘强度和规定的寿命，要保持油不渗漏，并有一定的机械强度。此外，变压器的各种工作和保护用的附件也都安装在变压器油箱上。变压器油箱上装有变压器用的套管、测量和保护元件、运输用的结构件等。

四、主要组件

1. 套管

将变压器绕组的引线引出与电网可靠相连接的组件，变压器一般采用油浸纸绝缘电容式套管，也有少部分采用的是干式套管或采用与 GIS 连接的油气绝缘套管。

2. 分接开关

用于切换绕组分接连接位置的装置，分为有载分接开关和无载分接开关，有载分接开关可以在变压器励磁或负载状态下进行操作。

3. 冷却器

通过油流循环将变压器内部热量散出的设备，变压器冷却方式一般分为油浸自冷（ONAN）、油浸风冷（ONAF）、强迫油循环风冷（OFAF）和强迫导向油循环风冷（ODAF）等方式。

4. 储油柜

储油柜是一种变压器油保护装置，在变压器油体积随温度变化时，防止油和空气直接接触，降低油受潮和氧化程度，其容积一般为变压器油总容积的 10% 左右。变压器一般常用的有胶囊式储油柜、隔膜式储油柜和金属波纹式储油柜。

五、结构分类

电力变压器按结构型式主要分为心式变压器和壳式变压器两种。

从结构上看，心式变压器的绕组是圆筒形的，铁心的心柱有近似圆柱形的截面，变压器的高压绕组和低压绕组是同心排列的，器身（铁心连同绕组）是垂直布置的，绕组可以是圆筒式、螺旋式、连续式、层式、纠结式、内屏蔽式等不同结构形式，取决于绕组的电压和电流。但铁心的心柱都是多级近似圆柱形截面，

铁轭在不同的设计中可以有不同的形状。心式变压器结构如图 1-2 所示。

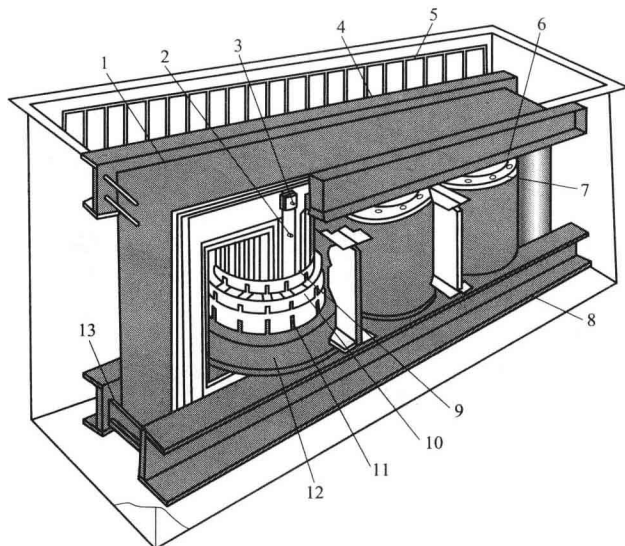


图 1-2 心式变压器结构图

- 1—铁心；2、3—铁心拉板；4—上夹件；5—油箱屏蔽；6—绕组压钉；7—绕组连接片；
8—下夹件；9—绝缘筒；10—低压绕组；11—垫块；12—高压绕组；13—夹件螺栓

壳式变压器的绕组是扁平矩形的，高压和低压绕组的线饼是垂直布置、交错排列的，铁心水平布置。壳式变压器结构如图 1-3 所示。

在结构上，壳式变压器和心式变压器主要有以下不同点：壳式变压器的绕组被铁心包围，而心式变压器的绕组包围铁心。壳式变压器的铁心是水平放置的，铁心柱的截面形状是矩形的，铁心片的宽度只有一种，便于铁心片的剪切；而心式变压器的铁心是垂直放置的，铁心柱的截面是近似圆形的，因此，铁心柱的铁心片不得分成很多级，硅钢片的剪切工作量大。壳式变压器的绕组是矩形的，单饼或双饼绕制，然后将高压和低压线饼组装成相绕组，一个相绕组中不同电压的绕组是交错排列的；心式变压器的绕组均是圆筒形的，一般是一次绕制一个线圈，一相的高压和低压绕组是同心布置的。壳式变压器绕组的线饼数较少，每饼匝数较多，线饼的面积较大，饼间电容大，对地电容小。壳式变压器绕组有大的串联电容，冲击分布比较均匀。壳式变压器绕组在轴向由铁心和油箱撑住，幅向每个线饼的导线由胶粘结在一起，承受短路电动力的能力高。

目前，我国和国外绝大多数变压器厂均生产心式变压器，只有很少的变压

器厂生产壳式变压器。

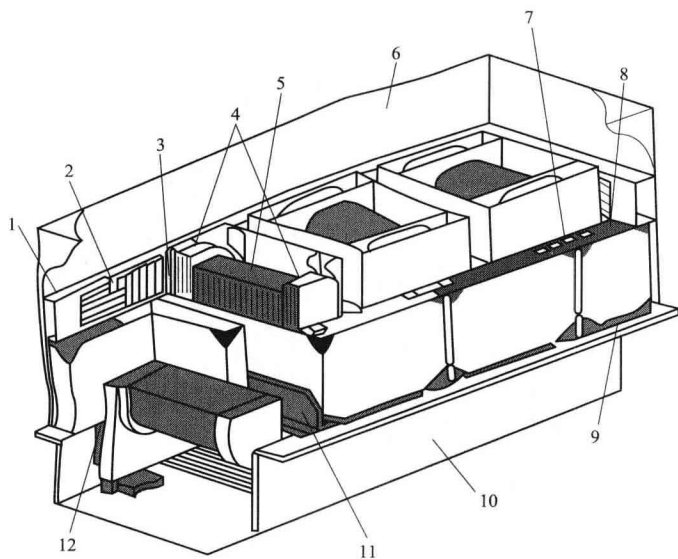


图 1-3 壳式变压器结构图

- 1—铁心夹件；2—油箱屏蔽；3—上部木楔；4—低压绕组；5—高压绕组；6—上节油箱；7—楔形屏蔽；8—上部垫块；9—下部垫块；10—下节油箱；11—支撑梁；12—下部木楔

变压器故障分类概述

电力变压器的故障通常划分为内部故障和外部故障。内部故障为变压器油箱内发生的各种故障，主要类型有线圈故障、铁心故障、分接开关故障、绝缘油故障等。外部故障为变压器油箱外部绝缘套管及部分附件上发生的各种故障，主要类型有绝缘套管故障、冷却系统故障、保护装置故障等。

变压器故障有多种分类方法，如从性质上分主要分为过热性故障和放电性故障两大类。过热性故障按其严重程度可分为轻度过热（一般低于 150°C ）、低温过热（ $150 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ）、中温过热（ $300 \sim 700^{\circ}\text{C}$ ）和高温过热（一般高于 700°C ）四种故障情况；放电性故障根据放电的能量密度不同可分为局部放电、火花放电和高能电弧放电三种故障类型。变压器故障如从回路划分主要分为电路故障、磁路故障、油路故障和附件故障，而目前发生几率较高、对变压器本身影响最严重的则是变压器出口短路故障。本书中将变压器故障按短路故障、本体故障、铁心故障、分接开关故障、套管故障、附件及其他故障六个方面进行分类，按各自故障的现象、分析判断方法和故障处理措施等分别进行描述。

第一节 变压器短路故障

根据运行经验，变压器外部短路故障是对变压器安全运行威胁最大的一类故障。近年来，大型电力变压器在改进绕组结构设计和完善制造工艺等方面采取了大量的措施，变压器承受短路的能力已经有了较大的提高。但随着电力系统容量的日益增大，系统短路容量亦随之增大，变压器因外部短路造成变压器绕组变形甚至损坏，依然是变压器运行过程中的多发性故障。

当变压器绕组内流过短路电流时，变压器绕组中的电流与漏磁场相互作用，在绕组的各导线上产生电磁力，其大小由漏磁场的磁通密度与电流的乘积所决定。由于电流增大时漏磁场也成正比地增强，因此电磁力与电流的平方成正比。当变压器在额定负载下运行时，作用在绕组上的电磁力很小；但当电力系统发生短路故障时，变压器绕组内流过的最大短路电流就有可能达到其额定电流的

几倍甚至几十倍，由于电磁力与电流的平方成正比，所以短路时变压器绕组所受的最大电磁力有可能激增到额定负载运行时的几十甚至几百倍，有可能造成变压器烧损、绕组变形、机械强度下降。

变压器发生短路故障时，如果变压器绕组未流过短路电流（例如降压变压器高压侧出现短路），则变压器绕组就不会受到短路电动力的冲击。在变压器绕组流过短路电流情况下，短路电流又主要受短路位置处系统短路容量大小、短路阻抗大小的影响，如果系统短路容量小、短路阻抗较大，则变压器绕组中通过的短路电流和受到的短路电动力就不大，变压器所受影响较小。如果变压器绕组流过较大的短路电流时继电保护装置能快速、正确动作切除故障，就可以将变压器绕组遭受的影响降至最低程度。如果变压器绕组流过的短路电流较大，而继电保护装置又动作缓慢甚至拒动，则变压器绕组所受的影响将是严重的，变压器绕组将承受巨大的轴向和径向电动力的作用，如果变压器绕组某部位机械强度不够，严重情况下会直接造成变压器烧损，有时则会造成绕组的扭曲、鼓包或移位等变形现象，此时绕组机械性能已经下降，一旦变压器再次遭受雷电过电压或者短路冲击时，累积效应就有可能造成变压器烧损。

第二节 变压器本体故障

变压器本体故障主要包含放电性故障和过热性故障两大类。放电性故障，根据其放电的能量密度的大小，通常分为局部放电故障、火花放电故障和高能量放电故障三种类型。放电对绝缘有两种破坏作用：一种是由于放电质点直接轰击绝缘，使局部绝缘受到破坏并逐步扩大，使绝缘击穿；另一种是放电产生的热、臭氧、氧化氮等活性气体的化学作用，使局部绝缘受到腐蚀，介质损耗增大，最后导致热击穿。过热性故障通常可以分为电路过热故障、磁路过热故障以及附件过热故障。常规的过热性故障发展较为缓慢，一般可以通过色谱分析来及时发现。

一、放电性故障

局部放电故障刚开始时是一种低能量的放电。变压器内部出现这种放电时，情况比较复杂。局部放电根据绝缘介质的不同，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。发生局部放电时，由于放电能量不同其产生的故障气体会有所不同。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%；当放电能量密度继续增加时，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通常不到2%。这是局部放电区别于其他放电现象的主要标志。

发生火花放电故障时放电能量密度一般大于 10^{-6} C的数量级。有可能因悬浮电位或油中杂质引发火花放电。变压器中某些金属部件有时会产生悬浮电位，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异常。悬浮电位引发的火花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；如有载分接开关转换极性时的短暂电位悬浮，套管均压球和无载分接开关拨钗等产生的电位悬浮，处于地电位的部件，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，导致悬浮电位从而引发火花放电。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。

变压器发生火花放电故障的另一主要原因是油中杂质的影响。杂质由水分、纤维质（主要是受潮的纤维）等构成。水的介电常数约为变压器油的40倍，在电场中，杂质首先极化，被吸引向电场强度最强的地方，即电极附近，并按电力线方向排列会畸变油中的电场。因为纤维的介电常数大，使纤维端部油中的电场加强，于是放电首先从这部分油中开始发生和发展，油在高场强下游离而分解出气体，使气泡增大，游离又增强。而后逐渐发展，使整个油间隙在气体通道中发生火花放电。所以，火花放电可能在较低的电压下发生。一般来说，火花放电不致很快引起绝缘击穿，主要反映在油色谱分析异常、局部放电量增加或轻瓦斯保护动作，比较容易被发现和处理，但对其发展程度应引起足够的认识和注意。

变压器电弧放电是高能量放电，常导致绕组匝层间绝缘击穿为多见，其次为造成引线断裂或对地闪络和分接开关飞弧等故障。电弧放电故障由于放电能量密度大，产气急剧，能使绝缘纸穿孔、烧焦或炭化，使金属材料变形或熔化烧毁，严重时会造成设备烧损，甚至发生爆炸事故。这种事故一般事先难以预测，也无明显预兆，常以突发的形式暴露出来。出现电弧放电故障后，气体继电器中的 H_2 和 C_2H_2 等组分常高达几千 $\mu L/L$ ，变压器油亦被炭化而变黑。油中特征气体的主要成分是 H_2 和 C_2H_2 ，其次 C_2H_6 和 CH_4 。当放电故障涉及固体绝缘时，除了产生上述气体外，还会产生CO和 CO_2 。

综上所述，三种放电的形式既有区别又有一定的联系，区别是指放电能级和产气组分，联系是指局部放电是其他两种放电的前兆，而后者又是前者发展

后的一种必然结果。由于变压器内出现的故障，常处于逐步发展的状态，同时大多不是单一类型的故障，往往是一种类型伴随着另一种类型，或几种类型同时出现，因此，更需要认真分析，具体对待。

二、过热性故障

变压器的过热性故障通常有磁路过热、电路过热和附件过热。过热性故障一般有一个逐步发展的过程，通常不会立即引发变压器的绝缘事故。在变压器运行时，其表面的过热性故障，如套管端部、油箱表面等部位的过热性故障往往能利用红外测温的手段及时发现，而其内部的过热性故障，如铁心过热、绕组过热等往往只能用色谱分析的手段及早发现。

变压器常见的磁路过热故障主要有铁心片间短路、铁心和夹件短路、铁心多点接地、磁屏蔽短路等，常见的电路过热故障主要有绕组和分接开关或套管引线等电气接头接触不良、绕组内部焊接不良、绕组股间短路、分接开关动静触头接触不良等，常见的附件过热故障主要有套管端部接触不良、潜油泵烧损等。

变压器的过热性故障，按其严重程度可分为轻度过热（一般低于 150°C ）、低温过热（ $150 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ）、中温过热（ $300 \sim 700^{\circ}\text{C}$ ）和高温过热（一般高于 700°C ）四种。过热性故障通常可以利用色谱分析的手段来发现，特别是对于高温过热性故障，通常油色谱有以下特征：总烃含量超过注意值（ $150\mu\text{L/L}$ ），其中乙烯和甲烷所占比重较大，乙炔含量较低或没有变化；色谱三比值通常为“0、2、2”，呈现高温过热的特征。对故障点的温度通常采用如下的推荐经验公式进行估算

$$T = 322 \lg(C_2H_4/C_2H_6) + 525 (^{\circ}\text{C})$$

通常认为，当变压器出现电路过热故障时，其故障点温度往往较高，其色谱通常有以下特征：总烃含量超过注意值（ $150\mu\text{L/L}$ ），其中乙烯和甲烷所占比重较大； C_2H_4/C_2H_6 的比值通常可以到达6以上，即利用经验公式估算的故障点温度较高；色谱中伴随有 C_2H_2 含量的小幅增加；色谱组分含量增长速度和变压器带负载运行电流的大小有一定关系，负载电流大时色谱组分含量增长快而负载电流小时色谱组分含量增长速度慢。

通常认为，当变压器出现磁路过热故障时，其故障点温度相对电路过热故障时的温度稍低，其色谱通常有以下特征：总烃含量超过注意值（ $150\mu\text{L/L}$ ），其中乙烯和甲烷所占比重较大； C_2H_4/C_2H_6 的比值通常在3~6之间，即利用经验公式估算的故障点温度相对较低；色谱中 C_2H_2 含量一般不会发生变化；色谱组分含量增长速度基本保持稳定，即使变压器空载运行也会持续增长。

第三节 变压器铁心故障

电力变压器正常运行时，铁心必须有一点可靠接地。若没有接地，则铁心对地会有悬浮电位，有可能造成铁心对地断续性击穿放电。铁心一点接地后消除了铁心悬浮电位的可能。但当铁心出现两点以上接地时，铁心间的不均匀电位就会在接地点之间形成环流，并造成铁心多点接地发热的故障。变压器的铁心接地故障会造成铁心局部过热，严重时，过热产生的气体会造成轻瓦斯保护动作，甚至会造成重瓦斯保护动作而跳闸的事故。烧熔的局部铁心形成铁心片间的短路故障，使变压器铁损变大，严重影响变压器的性能和正常工作，以至于必须更换铁心硅钢片加以修复。大型电力变压器铁心故障主要是铁心片间短路、铁心多点接地、铁心和夹件间短路、铁心间歇性放电等。

发生铁心接地故障的变压器油色谱通常有以下特征：总烃含量超过注意值（ $150\mu\text{L/L}$ ），其中乙烯和甲烷所占比重较大，乙炔含量较低或没有变化；色谱三比值通常为“0、2、2”或“0、2、1”，呈现高温过热或中温过热的特征。

发生铁心多点接地的变压器接地电流将明显增大，可以利用钳形电流表测量铁心接地引下线的接地电流来及早发现。通常变压器铁心接地电流很小，仅为 mA 级，当存在多点接地情况时，该电流值往往会达到数安或数十安。对变压器铁心不稳定的多点接地，如杂质或油污造成的多点接地故障，由于其发热点温度低，接地电流小，其色谱三比值往往为“0、2、1”呈现中温过热的特征。此时可以在变压器外部利用电容冲击法对故障进行处理，往往能收到较好的效果。

第四节 变压器分接开关故障

变压器的分接开关分为有载分接开关和无载分接开关两大类。无载分接开关的故障通常有动静触头接触不良、触头锈蚀、引出线焊接不良、开关弹簧压力不足、分接档位接错等。对无载分接开关的故障，通常可以通过直流电阻测试、色谱分析等测试手段及早发现和预防。

有载分接开关的故障通常有触头接触不良或烧损、小油箱渗漏油、传动轴扭断、触头锈蚀、引出线焊接不良、分接档位接错、过渡电阻烧断或脱落等。对有载分接开关的故障，除可用直流电阻测试、色谱分析等方法发现外，有载分接开关动作特性测试也是早期发现故障的一个有效手段。

有载分接开关是在带负载的情况下变换分接位置的，所以它必须满足两个基本条件：在变换分接过程中，要保证负荷电流的连续，也就是不能开路；在变换分接过程中，要保证分接间不能短路。因此，在有载分接开关切换分接的过程中必然要在某一瞬间同时桥接两个分接以保证负荷电流的连续性；而在桥接的两个分接间，必须串入电阻以限制循环电流，保证不发生分接间短路。这样，有载分接开关就可以由一个分接过渡到下一个分接。实现这一功能的电路称为过渡电路，对应的机构为切换开关。切换开关根据过渡电阻数可分为单电阻、双电阻和四电阻等类型，其中常见的是双电阻的切换开关。有载分接开关切换档位时，先由分接选择器选中要变换到的档位，然后由切换开关迅速动作，实现由当前档位向目标档位的切换。测试有载分接开关的切换波形，就是检测切换开关的这一动作瞬时过程是否正确。

由切换开关的动作原理可知，切换开关在切换过程中，串入回路的电阻值在随时间有规律地改变，将这一变化以图形记录下来，并与标准波形进行比较，就可以判断出切换开关的动作是否正确，进而判断有载分接开关是否存在电动机机构动作异常、绝缘筒变形、触头烧损、传动轴断裂等故障。

第五节 变压器套管故障

套管是变压器的重要部件之一，其主要作用是将变压器内部的高、低压引线引至油箱外部，以便和外部设备进行连接，同时还是载流元件之一，运行中长期通过负荷电流。变压器上采用的套管通常是油纸电容型套管。

油纸电容型套管是由电容芯、上瓷套、下瓷套、中间安装法兰、储油柜、上部均压罩、下部均压球及其他固定附件组成。电容芯是在零屏导电管的外面，用绝缘纸和铝箔等交替卷制而成的以导电管为中心的多层圆柱体电容屏。零屏导电管处于最高电位，最外侧铝箔为末屏，以小套管引出接地。

套管常见的故障主要有：端部密封不良，进水受潮引发绝缘故障；端部导电头部位接触不良，引发高温过热；末屏接地不良，引发末屏烧损；穿缆导线安装不当，引发悬浮放电或局部过热；套管底部密封不良，套管油渗漏至变压器本体等。