

电力变压器 运行与维修

Power Transformer

咸日常 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014059371

TM41
13

电力变压器 运行与维修

Power Transformer

咸日常 编著



TM41
13



北航

C1745779



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

173820110

内 容 提 要

电力变压器作为变电站的核心设备，具有联络电网、改变电压、分配电能的功能，其正确运行与维护是保证电力系统安全的重要措施。本书共分八章，系统介绍了电力变压器及其组部件的结构、原理和作用，电力变压器及其绝缘油的试验项目、试验目的、判断标准及试验方法，现场检修、安装工艺质量要求，电力变压器运行的基本要求、继电保护常识、现场运行巡视与维护内容，反事故技术措施，状态检修试验规定、状态评价和状态检修技术，并以案例形式对电力变压器选型、经济运行技术和常见故障的现场分析处理加以阐述。

本书内容丰富，叙述条理清晰，专业知识的阐述追求现场可操作性和实用性，既反映电力变压器运行维护的相关规程制度要求，又理论联系实际，以案例形式介绍运行与检修方法，突出现场实用价值。本书内容便于自学，可供从事电力变压器运行维护的工程技术人员、制造厂技术服务人员学习使用，也可作为电力变压器安装、运行维护和检修作业人员的培训教材和大专院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力变压器运行与维修/咸日常编著. —北京：中国电力出版社，2014.8

ISBN 978-7-5123-5959-8

I. ①电… II. ①咸… III. ①电力变压器-运行②电力变压器-维修 IV. ①TM41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 108574 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>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 509 千字

印数 0001—5000 册 定价 60.00 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

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



前 言

随着电网快速发展，系统容量不断增大，新技术、新材料、新工艺被广泛应用，供电可靠性的要求越来越高，同时，电网设备也暴露出一些新的安全隐患和风险。特别是近几年，电网设备运行维护策略在发生变化，传统的定期检修过渡到状态检修，而电力变压器作为变电站中的核心设备，体积庞大，结构复杂，资产价值高，其安全、可靠和经济运行至关重要，一旦故障造成设备损坏，引起对外供电中断，直接影响工农业生产和人民生活，甚至造成重大经济损失、人员伤亡和引发政治事件。但由于其在长期运行中，会受到诸如设备本身存在缺陷、检修运行维护不利、不可抗拒的自然灾害、外力破坏等的影响，再加上自身发热引起绝缘老化，组部件质量不良、运行电压高、过负载等都会恶化电力变压器运行的条件，引发事故或隐患，如何正确运行维护电力变压器，倍受业内人士的关注和重视。必须强化全过程管理，重视设计选型、安装试验、运行维护等各个环节，以保障电力变压器正常运行，同时，还需要快速准确分析各类异常和事故原因，采取妥善措施，最大限度地减小故障停电造成的经济损失和社会影响。

国内有关电力变压器运维检修方面的专业书籍和培训教材一般都注重理论和方法介绍，本书编写重视电力变压器相关规程制度的规定和要求，按照“运维一体化”的要求，重视电力变压器运维全过程管理，可有效指导生产人员开展状态检修、故障分析和实现安全经济运行。本书编写力求做到实用性和先进性相结合，立足现行规程制度和作者现场实践经验，引用大量规程制度和管理标准的相关内容，突出生产一线现场实践，系统介绍电力变压器运行维护管理有关规定和要求。

本书第一章介绍电力变压器基础知识，包括电力变压器的工作原理和用途、基本结构、各组部件的结构和作用、调压开关及其分类、参数及标志；第二章介绍电力变压器选型原则，通过安全经济比较，给出电力变压器选型的部分典型案例；第三章介绍电力变压器试验知识，包括电力变压器试验的目的与分类、试验项目和判断标准、变压器油的检验项目与质量标准；第四章介绍电力变压器现场、安装、投运、检修的技术和工艺措施要求，给出大型电力变压器现场干燥方案的分析实例；第五章介绍电力变压器运行的基本条件、继电保护、现场运行巡视与维护、经济运行技术，通过实例介绍电力变压器经济运行；第六章介绍电力变压器故障分类与常见故障的现场分析处理案例；第七章介绍电力变压器反事故技术措施，给出部分典型质量问题案例；第八章介绍电力变压器

状态检修相关知识，包括电力变压器状态检修试验的规定、状态评价技术和状态检修技术。

本书编写过程中得到了山东理工大学徐丙垠教授的关注和支持，得到了国网山东淄博供电公司各位同仁的鼎力相助，在此表示感谢。由于作者水平所限，书中难免有疏漏和不妥之处，望读者给予批评指正。

作者
2014年2月



目 录

前言	1
第一章 电力变压器基础知识	1
第一节 电力变压器工作原理和用途	1
第二节 电力变压器基本结构	2
第三节 电力变压器各组部件的结构和作用	8
第四节 电力变压器调压开关	19
第五节 电力变压器参数及标志	33
第二章 电力变压器选型及其案例分析	39
第一节 电力变压器的选型原则	39
第二节 变电站负载与电力变压器容量、台数选择的效益分析	46
第三节 用电区域负载与配电变压器的型式和容量选择	52
第四节 变电站用配电变压器容量选择的安全经济分析	56
第五节 大型电力变压器更换的效益论证分析	60
第六节 路灯用配电变压器不同配置方式的效益对比分析	63
第七节 配电变压器的发展趋势与应用情况介绍	66
第三章 电力变压器试验	74
第一节 电力变压器试验的目的与分类	74
第二节 电力变压器试验项目和判断标准	76
第三节 电力变压器油的性能、质量标准与检验	92
第四章 电力变压器现场安装、投运与检修	101
第一节 电力变压器现场安装	101
第二节 电力变压器投运	113
第三节 电力变压器现场检修	115
第四节 大型变压器现场干燥方案的实例分析	138
第五章 电力变压器运行	143
第一节 电力变压器运行的基本条件和要求	143
第二节 电力变压器的继电保护	156
第三节 电力变压器现场运行巡视与维护	160
第四节 电力变压器经济运行技术	174
第五节 电力变压器温升与冷却装置改造的经济技术分析	180

第六节	变电站备用电源自投与安全经济运行分析	182
第七节	大型变压器温度控制策略与经济运行	186
第八节	电力变压器经济运行的实例分析	191
第六章	电力变压器常见故障的现场分析与处理	196
第一节	电力变压器故障的分类	196
第二节	电力变压器显性故障的特征与现场处理	199
第三节	电力变压器铁芯接地故障的综合判断与现场处理	202
第四节	电力变压器有载分接开关常见故障的综合判断与现场处理	206
第五节	电力变压器有载分接开关渗漏的判别与现场处理	212
第六节	电力变压器出口短路事故的危害与防范措施	215
第七节	电力变压器承受短路冲击后故障特征与现场修复	223
第八节	电力变压器高压绕组断股故障的分析处理	226
第九节	气相色谱法对电力变压器故障的综合分析	230
第十节	电力变压器运行中的一些温度异常现象与现场处理	236
第十一节	电力变压器中的油流带电现象及抑制对策	242
第七章	电力变压器反事故技术措施	246
第一节	预防电力变压器事故的一般措施	246
第二节	防止电力变压器损坏的重点反事故技术措施	254
第三节	电力变压器典型质量问题案例简述	269
第八章	电力变压器状态检修技术	282
第一节	电力变压器状态检修试验	282
第二节	电力变压器状态评价技术	305
第三节	电力变压器的状态检修技术应用	317
参考文献		322

第一章

电力变压器基础知识

本章介绍电力变压器工作原理和整体结构,电力变压器的铁芯、线圈、调压开关以及油箱等部件的结构和作用,介绍电力变压器标志和参数的含义,通过概念介绍、结构分析,熟悉电力变压器及其部件的原理、基本结构和作用。

第一节 电力变压器工作原理和用途

电力变压器是一种静止的电机设备,其高电压和大容量是常规电机不可比拟的显著特点,它把一种电压等级的交流电流转换成频率相同的另一种电压等级的交流电流。电力变压器在电力系统中联络电网和用户,是实现电能经济传输、灵活分配及合理使用的重要设备,在国民经济中获得了广泛应用。

电力变压器工作原理的基础是电磁感应定律;不论是单相变压器还是三相变压器,在其磁路构成的铁芯柱上,分别装有一次绕组和二次绕组,互相绝缘的绕组只有磁的耦合而没有电的联系;通常将接入电源侧的绕组称为一次绕组,将负载侧的绕组称为二次绕组。根据电磁感应定律,当变压器一次绕组接入电源时,交流电压就在一次绕组中产生一个励磁电流,励磁电流在铁芯中感应出变化的磁通,称为主磁通。主磁通以铁芯为闭合回路,既穿过一次绕组又穿过二次绕组,于是就在二次绕组中感应出交变的电动势。如果二次绕组输出端接入负载,就会在负载中流过交流电流,实现电能的转变与输出。

根据电磁感应定律,电力变压器一次绕组和二次绕组中产生的感应电动势分别为

$$E_1 = 4.44f_1N_1B_M S \times 10^{-4}$$

$$E_2 = 4.44f_2N_2B_M S \times 10^{-4}$$

式中 B_M ——铁芯中最大的磁通密度, T;

S ——铁芯截面积, cm^2 ;

f_1 、 f_2 ——电源频率, Hz (工频频率为 50Hz);

N_1 ——一次绕组匝数, 匝;

N_2 ——二次绕组匝数, 匝。

由上式相比得出 $E_1/E_2 = N_1/N_2$

由此可见,电力变压器一、二次电动势之比等于一、二次绕组的匝数比。由于电力变压器绕组本身有阻抗,即一次电压 U_1 略大于 E_1 ,而二次电压 U_2 略小于 E_2 ,如果忽略阻抗压降,则 $U_1/U_2 = E_1/E_2 = N_1/N_2$ 。这个关系式说明变压器一、二次电压之比近似等于一、二

次绕组的匝数之比，这个比值称为电力变压器的电压比，也称变比。

电力变压器通过电磁耦合关系，将一次侧的电能传输到二次侧，如果忽略漏磁因素、变压器本身的损耗，变压器的输入功率就等于变压器的负载输出功率，即

$$U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2 \text{ 或 } I_1 / I_2 = U_2 / U_1$$

所以

$$I_1 / I_2 = N_2 / N_1$$

即电力变压器的一、二次电流与一、二次绕组的匝数成反比。

由于铁芯电磁场和绕组电流及其电阻的存在，电力变压器实际运行中会产生空载损耗（铁损）和负载损耗（铜损），导致运行中的电力变压器产生热量。

从发电厂发出的电能，要经过输电线路传输到变电站，再经过降压变压器分配给用户使用，为减少输送过程中的电能损耗，需要采用高压、超高压或特高压输送，输送电压越高传输距离越远，输送过程中的电能损耗越低，而发电厂发出的电能由于受绝缘水平的限制，电压不能太高，这就需要电力变压器升高电压，将电能输送到电力网，这种用途的变压器统称为升压电力变压器；对用户而言，从使用安全和制造成本角度，各种用电设备所要求的工作电压也不能太高，也要经过变压器将电力系统的高电压变换成符合各类用户和用电设备所要求的电压等级，这种用途的变压器统称为降压电力变压器；另外，就电力系统本身而言，一个电力网由许多发电厂和用户连在一起，分成主系统和若干个分系统，各个分系统的电压并不一定相同，而主系统必须是统一的一种电压等级，需要各种规格和容量的电力变压器来连接各个分系统，电力变压器是电力系统建立和联络广大电力用户不可缺少的一种关键的电气设备。

第二节 电力变压器基本结构

电力变压器是具有两个或多个绕组的静止设备，为了传输电能，在同一频率下，通过电磁感应将一个系统的交流电压和电流转换为另一个系统的交流电压和电流，通常这些电流和电压的值是不同的。应用最广泛的油浸式电力变压器一般由铁芯、线圈、引线、油箱及外围附件等组成。其中，油箱内部充满变压器油类的绝缘介质，起绝缘和散热作用，线圈和铁芯是电力变压器实现电磁转换的核芯部分，而油箱、引线及各种附件是保证油浸式电力变压器正常运行所必需的。

一、电力变压器的铁芯

1. 铁芯的作用

铁芯是电力变压器的基本部件。从工作原理方面讲，铁芯是变压器的导磁回路，它把两个独立的电路用磁场紧密联系起来，电能由一次绕组转换为磁场能后再经铁芯传递至二次绕组，在二次绕组中再转换为电能。从结构方面讲，铁芯又是一个支撑固定体，在铁芯上套装线圈，安装在铁芯上的夹件可以支撑引线，支撑有载调压开关，电力变压器内部几乎所有的部件都安装或固定在铁芯上。

2. 铁芯的结构

电力变压器铁芯的结构形式可分为壳式和芯式两大类，我国电力变压器制造厂普遍采用芯式结构。芯式铁芯又可分为单相双柱式、单相三柱式、三相三柱式、三相五柱式等。大多数电力变压器通常为三相一体形式，常常采用三相三柱式铁芯或三相五柱式铁芯，特大型变

压器因为体积大、重量大，为方便运输和安装，一般由三台单相变压器组成，其铁芯常采用单相三柱式；小型配电变压器还有卷铁芯、三角立体等结构。

电力变压器铁芯结构有多种形式，但其紧固结构和方法却大体相似，一般由夹件、铁芯绑扎带、拉紧螺杆（拉板）绝缘件、横梁、垫脚等将叠积的硅钢片绑扎固定成为一个牢固的整体，以作为电力变压器器身装配的骨架。电力变压器典型的铁芯结构如图 1-1 所示。

硅钢片是高导磁材料，它是铁芯的最重要部分。将含有一定比例硅元素的钢材轧制成片，两面涂敷绝缘层后即成硅钢片。硅钢片按制法可分为冷轧和热轧两类，按轧制后的晶粒排列规律又可分为取向硅钢片和无取向硅钢片。其中冷轧取向硅钢片因为具有磁饱和点高、损耗和励磁容量低的显著优点在电力变压器领域被广泛应用。冷轧取向硅钢片也有缺点，例如：其磁化特性的方向性强（沿轧制方向磁化特性好，损耗小；沿其轧制的正交方向不易磁化，损耗大），为了减少电力变压器内部损耗，设计时一般采用多级斜接缝，叠积难度相对较大，工艺要求高。又如，冷轧取向硅钢片抗机械冲击能力差，加工、运输甚至叠积过程中的磕碰、弯曲均会导致硅钢片性能劣化。常用的冷轧硅钢片按其厚度有 0.18、0.23、0.26、0.30、0.35mm 5 个规格等级，越薄的硅钢片损耗水平越低，但叠片系数（导磁面积与几何面积的比值）也低，工艺难度相对较大。除硅钢片外，非晶合金也是一种重要的铁芯材料。非晶带材的厚度仅为硅钢片的 1/10，其涡流损耗水平较普通硅钢片可降低约 80%，在倡导节能环保的大背景下，非晶合金在配电变压器制造领域的应用越来越多。

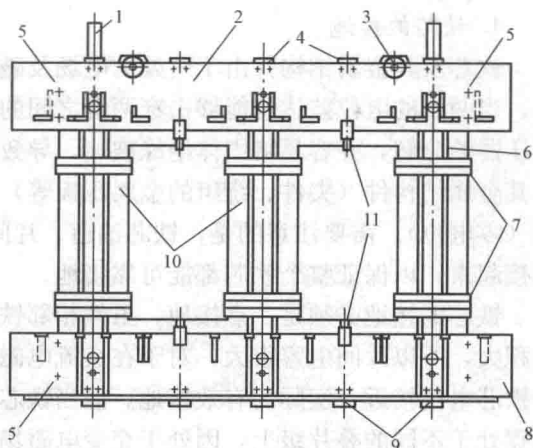


图 1-1 电力变压器铁芯典型结构示意图

- 1—上部定位件；2—上夹件；3—上夹件吊轴；4—横梁；
5—拉紧螺杆；6—拉板；7—环氧绑扎带；8—下夹件；9—
垫脚；10—铁芯叠片；11—拉带

大多数的铁芯由硅钢片叠积而成，也有部分小型电力变压器采用卷制工艺制作铁芯，相比而言，卷铁芯有损耗低、噪声较低的优点，但其制作工艺难度相对较高，大型电力变压器制造中难以采用。铁芯的截面大多为多级圆形，在旁轭、上轭、下轭等部位也有采用多级椭圆形、多级 D 形截面。

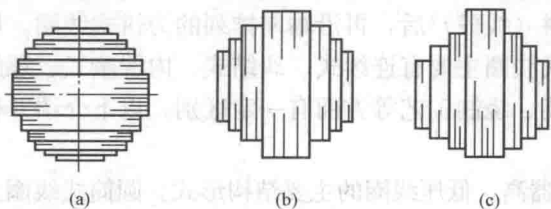


图 1-2 铁芯截面

- (a) 多级圆形；(b) 多级椭圆形；(c) 多级 D 形

电力变压器运行过程中，铁芯中有交变的磁场，该磁场在铁芯中会产生磁滞损耗、涡流损耗及附加铁损（空载损耗的主要部分），大型电力变压器的铁芯发热量较大，为防止铁芯过热，可在铁芯叠片中设置冷却油道，用以提高散热效率，防止过热现象，一般情况下冷却油道由绝缘材料制成。

3. 铁芯的绝缘

铁芯的绝缘包括铁芯的片间绝缘和铁芯片与结构件之间的绝缘。硅钢片两面涂有极薄的

绝缘膜（无机磷酸盐膜），即铁芯的片间绝缘，它把硅钢片彼此绝缘开来，以避免铁芯片间形成大的短路环流而发热。在大型电力变压器中，为避免铁芯叠片中因感应电位累加而放电，在铁芯叠片中每隔一定厚度应放置 0.5~1mm 厚的绝缘纸板，把铁芯分隔为几个部分。此外，铁芯片与结构件的短路可以造成多点接地，可能产生短路回路电流而致热，烧毁接地片甚至铁芯，因此铁芯片与夹件、侧梁、垫脚、拉板等结构件之间必须有良好的绝缘。

4. 铁芯的接地

铁芯及其金属结构件由于所处的电场及磁场位置不同，产生的电位和感应电动势也就不同。当两点的电位差达到能够击穿两者之间的绝缘时，相互之间就产生放电，放电的结果使变压器油分解，并容易将固体绝缘破坏，导致事故的发生。为了避免上述情况的出现，铁芯及其金属结构件（夹件、绕组的金属压板等）必须与油箱连接，然后接地，使它们处于等电位（零电位）。需要注意的是，铁芯油道、片间绝缘纸板等两侧的铁芯片必须用金属接线片短接起来，以保证整个铁芯都能可靠接地。

铁芯的接地必须是一点接地。虽然相邻铁芯片间绝缘电阻较大，但因绝缘膜极薄、正对面积大，所以片间电容很大，对于在交流电磁场中工作的铁芯来说通过片间电容的耦合，整个铁芯电位接近，实际为有效接地。但当铁芯两点（或多点）接地时，若两个（或多个）接地点处于不同的叠片级上，因处于交变电磁场中，两个接地点之间的铁芯片将有一定的感应电动势，并经大地形成回路产生一定的电流，这个电流将导致铁芯的局部过热，严重时烧毁接地片甚至整个铁芯，波及线圈绝缘，影响电力变压器的安全运行。

二、电力变压器的线圈

1. 线圈的作用

线圈是电力变压器的最主要构成部件之一，线圈与引线装配在一起称为绕组，是电力变压器的导电部分。电力变压器的一次绕组通过铁芯将电能转换为磁场能，二次绕组通过铁芯将磁场能还原为电能并输出。

2. 常见线圈的结构

电力变压器的线圈可分为层式线圈和饼式线圈两大类。线圈的线匝沿其轴向按层依次排列的为层式线圈；线圈的线匝在辐向形成线饼（线段）后，再沿轴向排列的为饼式线圈。层式线圈主要有圆筒式和箔绕式两种结构，饼式线圈主要有连续式、纠结式、内屏蔽式、螺旋式等结构。各种线圈在结构、电气和机械性能、绕制工艺等方面有一定区别，以下介绍 6 种常见的线圈结构及其特点。

（1）圆筒式线圈。圆筒式线圈是配电变压器高、低压线圈的主要结构形式。圆筒式线圈又可分为单层圆筒式、双层（四层）圆筒式、多层圆筒式、分段圆筒式等。其共同的结构特点是线圈一般沿其辐向有多层，每层内线匝沿其轴向呈螺旋状绕制（如图 1-3 和图 1-4 所示）。圆筒

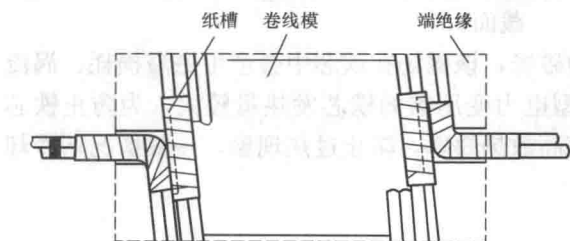


图 1-3 单层圆筒式线圈的结构

式线圈层间有油道作为绝缘，垂直布置的层间油道的冷却效果优于水平油道。同时，圆筒式绕组层间紧密接触，层间电容大，在冲击电压下，有良好的冲击分布。因此，多层圆筒式绕组也可应用于高电压产品上，但是圆筒式线圈的抗短路能力相对较差，在大容量电力变压器上鲜见应用。

(2) 箔式线圈。箔式线圈由铜箔或铝箔代替导线绕制而成。将绝缘材料和导电材料一起放在专用的箔式绕线机上连续绕制，一般每一层为一匝，每层铜箔或铝箔之间用绝缘材料隔开。一般绝缘的宽度大于铜箔或铝箔的宽度，两侧所差的尺寸，用与导电箔材厚度相同的绝缘带同时卷入形成端绝缘。箔式线圈的安匝分布均匀，辐向漏磁少，轴向电动力小，机械稳定性较好。也由于其层间绕制紧密，层间电容远大于对地电容，在冲击电压下电压梯度分布相对均匀。箔式线圈目前主要用于电力变压器的低压线圈，也有厂家采用分段箔式结构增加匝数将箔式线圈用于高压绕组。

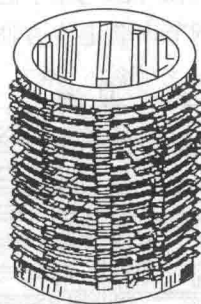
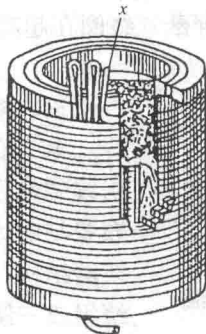
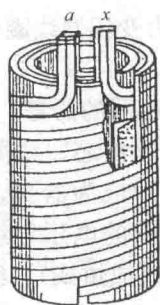


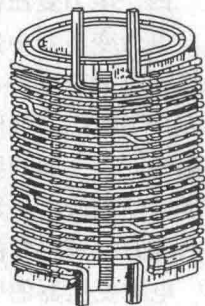
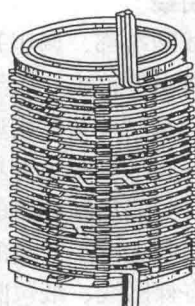
图 1-4 双层圆筒式和多层圆筒式线圈的结构

图 1-5 连续式线圈的结构

(3) 连续式线圈。连续式线圈是最常见的饼式线圈之一。饼式线圈的主要特点是把导线沿线圈的辐向排列成圆饼状，而后把各个圆饼状的线饼用不同的方式串联起来构成不同型式的线圈，各个线饼之间放置作为饼间绝缘和构成饼间冷却油道的绝缘件。饼式线圈的机械强度要好于圆筒式，因而在大中型电力变压器中被广泛采用。

连续式线圈是典型的饼式线圈，一般用扁导线绕制，线段数为 30~100 段，采用特殊的工艺方法（倒饼）连续绕成，饼间没有焊接头，所以称为连续式线圈，其结构如图 1-5 所示。连续式结构在大型电力变压器中应用较多，可用于低压绕组，也可全部或部分用于高压绕组中。

(4) 螺旋式线圈。螺旋式线圈就好似一支弹簧，其匝数一般为 10~150 匝。虽然螺旋式线圈本质上应看作是多根导线叠、并绕的单层圆筒式线圈，但由于其匝间有辐向油道而形成了线饼，所以仍将其结构归为饼式，如图 1-6 所示。一匝为一个线饼的称为单螺旋式线圈，一匝为两个线饼的称为双螺旋式线圈，一匝为四个线饼的称为四螺旋式线圈。螺旋式线圈匝数少、并绕导线多，一般用于低电压、大电流的电力变压器的低压线圈。



(a)

(b)

图 1-6 螺旋式线圈的外形图

(a) 单螺旋式；(b) 双螺旋式

(5) 纠结式线圈。从外形上看纠结式线圈与连续式线圈基本相同，区别仅在于相邻线饼之间导线的连接方法不同。纠结式线圈的线匝是在相邻数字线匝间插入不相邻数字的线匝。原连续式线圈段间线匝须借助于纠结换位，交错纠缠形成纠结线段，从而形成纠结线圈。纠结式线圈常以两段组成“纠结单元”，称为双段纠结。双段纠结中按每段匝数

的奇、偶数的不同，分为双—双纠结、单—单纠结、双—单纠结和单—双纠结。此外，还有四段纠结和部分纠结等。纠结线圈绕制过程中不可避免要焊接导线，对制作工艺水平要求较高。但纠结式线圈的匝间电容和饼间电容大于连续式线圈，在冲击电压作用下的电压分布比连续式要好。因此，其在大型电力变压器的高压线圈中经常使用。

(6) 内屏蔽式线圈。内屏蔽式线圈也称插入电容连续式线圈。它是通过增大线段的串联电容来达到改善冲击电压分布的目的，其结构特点是将厚度较小的导线作为附加电容（屏蔽）线匝，直接绕于连续式线段内部，并将端头包好绝缘悬空，所以电容不参与电力变压器的正常运行，只在冲击电压下起作用。内屏蔽式线圈在超高压电力变压器线圈中，采用分区补偿时，由于调节串联电容方便而被采用。

三、电力变压器的器身

电力变压器的铁芯、线圈、绝缘件和引线装配在一起即成为器身。器身绝缘的布置与电力变压器的电压等级有关，并随线圈结构（圆筒式或饼式）、线圈个数（双绕组或三绕组）、出线方式（端部或中部出线）、压紧方式（拉螺杆或压板）、调压方式（无励磁或有载）的不同而不同。110kV 电压等级分级绝缘端部出线的电力变压器器身绝缘结构如图 1-7 所示。

可以看到，低压线圈和高压线圈同芯套装在铁芯上，线圈的下部有水平托板作为支撑，上部有压板和压钉压紧，整个器身被紧固成一个机械上相对稳定的整体。铁芯、低压线圈、高压线圈三者之间用撑条纸板间隔填充成为绝缘，线圈上、下端部用角环、端圈做绝缘，引线由线圈端部引出并用皱纹纸包裹，各带电部分之间、带电部分与接地部分间必须保持足够的绝缘距离。

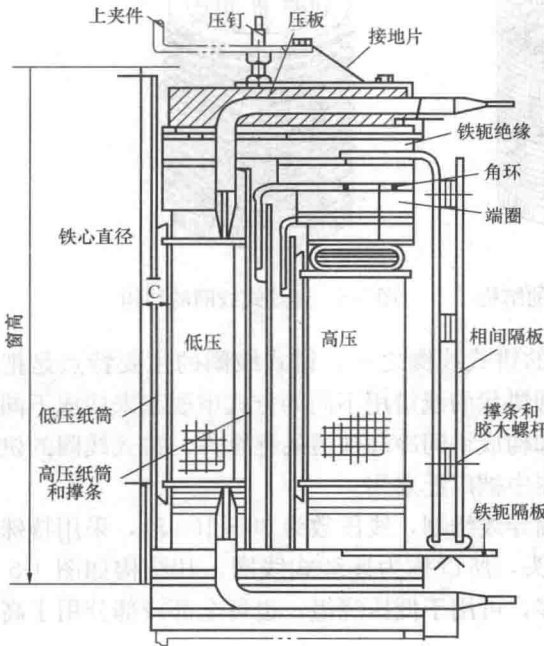


图 1-7 110kV 电压等级分级绝缘端部出线的电力变压器器身绝缘结构示意图

四、电力变压器的引线

电力变压器中连接线圈端部、调压开关、套管等部件的导线称为引线，它将外部电源电能输入电力变压器，又将电能输出。引线一般有线圈线端与套管连接的引出线、线圈端头间的连接引线以及线圈分接与调压开关相连的分接引线三类。对引线有电气性能、机械强度和耐温升三个方面的要求。在尽量减小器身尺寸的前提下，引线应保证足够的电气强度；为承受运输的颠簸、长期运行的振动和短路电力的冲击，引线应具有足够的机械强度；长期运行的温升、短路时的温升和大电流引线的局部温升，不应超过规定的相应温升限值。

电力变压器的引线有裸圆线、纸包圆线、裸铜排、电缆和铜管等多种型式。一般而言，纸包铜缆（棒）曲率半径较大，绝缘较好，多用于高压绕组引线；铜排、铜管截面大，载流能力强，机械强度高，多用作低压绕组引线。

电力变压器引线必须用支架可靠固定，支架材料一般选用色木、水曲柳、层压木或层压

纸板。其中层压纸板材料电气性能好，机械强度也满足要求，一般用于电压等级高的电力变压器中。引线支架一般固定在铁芯夹件或下节油箱上。

电力变压器引线与其他部件之间必须可靠绝缘，引线绝缘主要取决于所连接绕组的电压等级和试验电压的种类、大小和分布状况。电压较低的引线可以是裸露（或覆盖绝缘漆）的铜排，电压较高的引线一般采用多层皱纹纸迭包的厚绝缘。因引线电场情况比较复杂，引线绝缘的厚度和绝缘距离一般根据实验数据来确定。

五、电力变压器的油箱

1. 油箱的作用

电力变压器的油箱是保护变压器器身的外壳和盛装变压器油的容器，又是配电变压器外部结构件的骨架，同时通过变压器油将器身损耗产生的热量以对流和辐射的方式散至周围大气中。

2. 油箱的基本要求

作为装盛变压器油的容器，油箱的第一个要求就是要密封而无渗漏，所有钢板和焊线不得渗漏，这决定于钢板的材质、焊接技术工艺水平和焊接结构的合理设计。同时机械连接的密封处不漏油，这决定于密封材料的性能和合理的密封结构。第二个要求是具备必要的机械强度，作为保护外壳、支撑外部结构件的骨架，具备安装各外部构件所需要的一些必备的零部件。

对油箱机械强度的要求，主要来自五个方面：一是承受电力变压器器身和油的重量及总体的起吊重量；二是承载电力变压器的所有附件（如套管、储油柜、散热器或冷却器等）；三是在运输途中和就位过程中承受冲击加速度的作用及运行条件下地震力或风力载荷的作用；四是对于大型电力变压器而言，器身在油箱内要真空注油或在现场修理时要利用油箱对器身干燥处理，要求油箱能够承受抽真空时大气压力的作用；五是除承受内部油压的作用外，还应保证在电力变压器内部事故时，油箱不爆裂。对于安装各外部件所需的必备零部件的要求，是指根据产品的规格和容量，一台完整的油箱必须具备的部分或全部零部件。

3. 电力变压器油箱的结构

电力变压器油箱按其结构形式一般可分为桶式和钟罩式两种。

桶式油箱的特点是下部是长方形或椭圆形（单相小容量电力变压器也有用圆形）的油桶结构，箱沿设在油箱的顶部，顶盖与箱沿用螺栓相联，顶部为平顶箱盖。桶式油箱的电力变压器大修时需要吊芯检修，对大型电力变压器而言工作难度较大，主要在中小型电力变压器及配电变压器上应用。随着的电力变压器制造质量的提升和定期检修概念的淡化，电力企业推行状态检修和工厂化检修，不再现场吊罩维修，大型电力变压器也越来越多地开始采用桶式结构的油箱。

钟罩式油箱纵剖面的形状如图 1-8 所示。

其中，图 1-8 (a) 所示为钟罩式油箱的典型结构。为了适应运输高度和外形尺寸的限制要求，顶部做成顶盖、高压侧盖、低压侧盖结构。下节油箱较小，只包含一部分下轭，除去钟罩后线圈部分可完全外露。当采用强油循环导向油冷却结构时，常利用箱底轴方向的加强槽钢兼做导油通道。

图 1-8 (b) 所示的油箱为无下节油箱，钟罩直接与箱底用螺栓联结密封。其优点是当吊开钟罩后，器身完全暴露。缺点是降低了箱底的结构钢性，另外当拆除上罩后，残存的变压

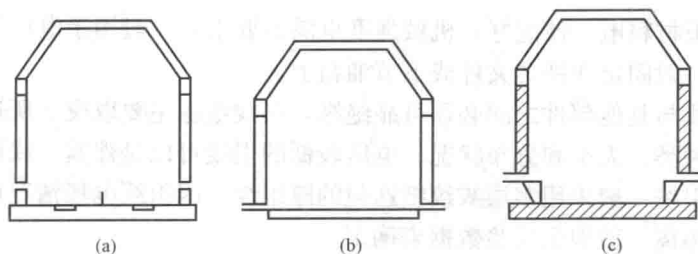


图 1-8 电力变压器油箱纵剖面形状示意图

(a) 钟罩式油箱；(b) 无下节油箱；(c) “槽形箱底”的钟罩式油箱

器油会从箱底四周溢出，造成油的损失且污染周围环境。

图 1-8 (c) 所示是“槽形箱底”的钟罩式油箱，可利用槽形箱底的侧壁紧固下轭。铁芯完成后先装入槽形箱底再套装绕组，绕组就坐落在槽形箱底的平板上。这种结构紧凑，可省掉一些结构件，减少变压器油的用量，从而降低电力变压器的总重量。但是绕组端部坐落在大面积的钢板上，会增加结构性损耗，并且在冲击电压下，绕组端部钢板“充磁”。

六、变压器油

1. 变压器油的作用

变压器油在电力变压器中的主要作用是绝缘和散热，以保证电力变压器在高电压、大电流下控制在允许的温度下安全运行，有载分接的切换开关油室中的变压器油还起到灭弧作用。

2. 变压器油的技术要求

(1) 良好的热传导性和流动性。变压器油应具有良好的热传导性和流动性，即散热效率高，以确保电力变压器运行中的发热得到有效冷却。

(2) 良好的绝缘性。变压器油是设备中的绝缘介质，通常以击穿电压和介质损耗因数来表示变压器油的绝缘性能。其应具有高的击穿电压，以防止在高电压作用下电极之间的放电，同时，介质损耗因数低的变压器油可以大幅度降低交流电改变极性时引起的能量损失，从而也降低电力变压器的运行损耗。

(3) 良好的氧化安定性。变压器油应具有良好的氧化安定性，从而可以减少储存和设备运行期间油品中酸性物质或沉淀物的出现，以保证电力变压器安全运行，延长油品使用寿命和降低运行维护成本。

第三节 电力变压器各组部件的结构和作用

电力变压器的组部件是其发挥正常功能的重要组成部分，通过介绍各类组部件的原理结构和相应作用，便于全面掌握电力变压器的结构特点，有针对性地开展运维管理工作。

一、电力变压器各组部件的种类

电力变压器组部件是变压器类产品的重要组成部分，是电力变压器安全可靠运行的一个重要保证。按照其在电力变压器运行中的作用，可分为以下 6 类：

(1) 保护类装置。包括油位计、气体继电器、压力释放阀、多功能保护装置等。

(2) 测温装置。主要指各类温度计及测温元件。

- (3) 油保护装置。主要有储油柜、吸湿器、净油器等。
- (4) 冷却装置。如散热器、风冷却器、水冷却器等。
- (5) 各类套管。分为电容型和干式套管。
- (6) 调压装置。分为无载调压开关和有载调压开关。

二、电力变压器各组部件的结构和作用

1. 保护类装置

(1) 油位计的结构和作用。油位计也称油表(标),用来监视电力变压器的油位变化,主要分为板式、管式和表盘式3种形式。板式油位计结构简单,由法兰盘、反光镜、玻璃板、密封垫圈、衬垫及外罩组成,一般用于小容量的电力变压器和电容式套管的储油柜上。

管式油位计有两种:一种是普通的管式油位计,其上、下与储油柜连接管连接,中间为一根透明玻璃管;另一种是带浮子式管式油位计,即在玻璃管中带一个醒目的红色浮球,方便查看。管式油位计结构,如图1-9所示。

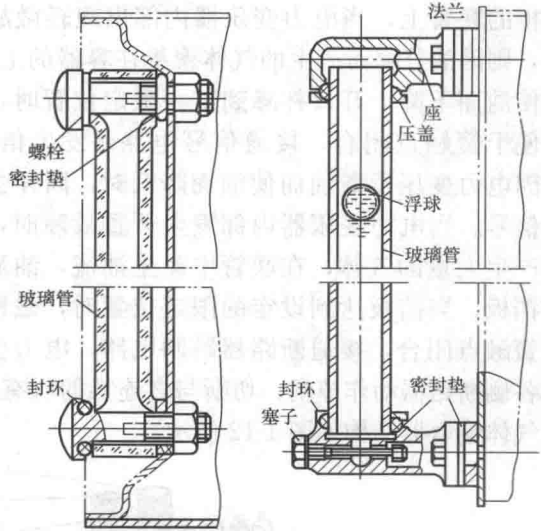


图 1-9 管式油位计结构示意图

表盘式油位计分为浮球式(磁铁式)和铁磁式两种。

1) 磁铁式油位计结构,如图1-10所示。

永久磁铁A通过轴(9)与指针(10)相连,永久磁铁B通过轴(15)与连杆(14)相接,连杆的两端分别装有浮子和平衡锤。

当电力变压器的油温变化而使储油柜油面升降时,浮子也随着升降,通过连杆使永久磁铁B转动,并驱动永久磁铁A转动,从而带动指针转动,指针在表盘上指出的刻度,即是储油柜中油的位置。表盘上刻有温度线并标上温度值。

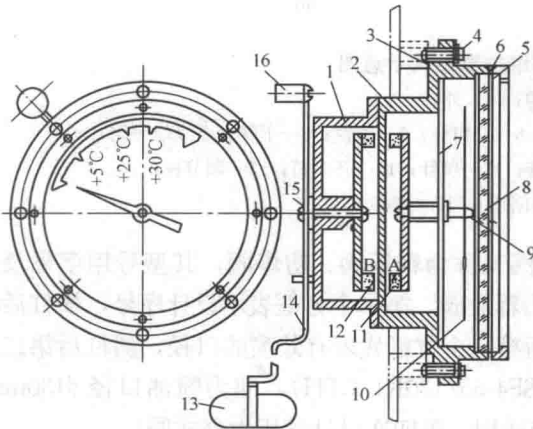


图 1-10 磁铁式油位计结构示意图

- 1—端盖; 2—表座; 3—密封垫圈; 4—螺栓; 5—表盖;
- 6—密封垫圈; 7—表盘; 8—玻璃板; 9—轴;
- 10—指针; 11、12—永久磁铁; 13—玻璃或紫铜浮子; 14—连杆; 15—轴; 16—平衡锤

2) 铁磁式油位计结构,如图1-11所示。其以全密封储油柜中的密封隔膜为感受元件。通过连杆与隔膜上稳定板的纹链相连,连杆随隔膜做垂直升降运动,连杆的另一端连接表体传动机构,把油面的上下线位移变成连杆绕固定轴的角位移,再通过齿轮、磁偶等传动机构使指针转动,从而间接地显示出油位。

(2) 气体继电器的结构和作用。气体继电器用于800kVA及以上的电力变压器中,它可以在电力变压器内部发生故障时产

生气体或在油面过度降低时发出报警信号，严重时将电力变压器电源切断。目前常用的是 QJ（挡板）型气体继电器。

QJ 型气体继电器安装于连接电力变压器与储油柜的联管上，当电力变压器内部出现轻微故障时，则因油分解而产生的气体聚集在容器的上部，迫使油面下降，开口杯降到某一限定位置时，磁铁使干簧触点闭合，接通信号电路，发出信号，若因电力变压器漏油而使油面降低时，同样会发出信号。当电力变压器内部发生严重故障时，将会产生大量的气体，在联管中产生油流，油流冲动挡板，当挡板达到设定的限定位置时，磁铁使干簧触点闭合，接通断路器跳闸电路，电力变压器各侧断路器动作掉闸，切断与之连接的所有电源，从而起到保护电力变压器的作用。QJ 型气体继电器结构如图 1-12 所示。

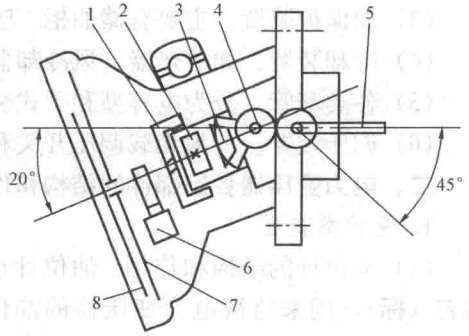


图 1-11 铁磁式油位计结构示意图
1—从动磁铁；2—主动磁铁；3—伞齿轮副；
4—正齿轮副；5—连杆；6—报警机构；
7—刻度盘；8—指针

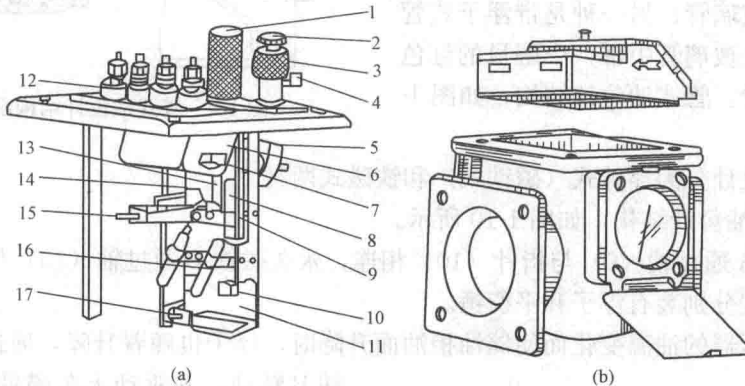


图 1-12 QJ 型气体继电器结构示意图

(a) 内部结构；(b) 外壳

- 1—罩；2—顶针；3—气塞；4—气嘴；5—重锤；6—开口杯；7—磁铁；8—干簧触点（信号用）；
9—弹簧；10—磁铁；11—挡板；12—套管；13—探针；14—开口销；15—调节杆；
16—干簧触点（跳闸用）；17—螺杆

(3) 压力释放阀的结构和作用。压力释放阀又称为释压阀、防爆阀，其型号用字母及数字表示为 YSF□-□/□□。其中，YSF 代表压力释放阀，第一个方框表示设计序号，横杠后的第一个方框表示压力释放阀的开启压力，斜杠后第一个方框代表有效喷油口径，斜杠后第二个方框表示报警信号方式及环境条件。例如：YSF4-55/130KJ（TH），即为喷油口径 $\phi 130\text{mm}$ ，开启压力 55kPa，带机械电气报警信号，湿热带适用，第四次设计的压力释放阀。

压力释放阀结构如图 1-13 (a) 所示，图中 (7) 为用金属材料压制而成的膜盘，在膜盘上面压着控制弹簧 (10)，弹簧的上部在护盖 (9) 的下面，护盖则通过螺杆 (15) 固定在底座 (1) 上。膜盘通过密封用胶圈 (8)，弹簧的压力压在底座上，底座由密封圈 (2) 密封后，被固定在电力变压器的箱顶上。所以电力变压器内部的油全部充满至膜底下面。调整护