

小型火力发电厂 电气设备及运行

修 订 版

西 安 电 力 学 校

水利电力出版社

小型火力发电厂 电气设备及运行

修 订 版

西安电力学校

水利电力出版社

修 订 版 说 明

《小型火力发电厂锅炉设备及运行》、《小型火力发电厂汽轮机设备及运行》、《小型火力发电厂电气设备及运行》三本书主要供小型火力发电厂锅炉、汽轮机、电气运行人员学习之用，对从事这方面工作的其他同志也有参考价值。

《小型火力发电厂电气设备及运行》于1974年出版，1976年第二次印刷发行，颇受读者欢迎。为进一步满足广大读者的要求，我们应出版社的委托于1982年对本书进行修订。考虑到最近几年来，有关电工学基础方面的教材和参考书较多，因此，修订版中删去了第一版中的第一章至第四章；其余各章又适当地增加了单机容量为750kW及6000kW发电厂的内容。

参加本书第一版编写的同志有朱松健、陈正岳、曹广恩、樊炳南、晁文祥、张道纲。参加修订的同志有曹广恩（第一章至第四章）、樊炳南（第五章）、朱松健（第六章、第七章）、陈正岳（第八章、第十三章至第十五章）、张道纲（第九章至第十二章）。全书由张道纲同志统稿、定稿。

由于我们的业务水平和实践经验有限，修订版中仍可能有不妥或错误之处，诚恳地希望广大读者批评指正。

作 者

1984年9月

目 录

修订版说明

第一篇 电 机

第一章 变压器	1
第一节 概 述	1
第二节 变压器的基本原理和构造	2
第三节 变压器的空载运行、负载运行及短路试验	9
第四节 变压器的极性和三相变压器的接线组别	12
第五节 变压器的并列运行	16
第六节 变压器的运行和事故处理	18
第二章 直流发电机	22
第一节 直流发电机的原理及构造	23
第二节 直流发电机的电枢绕组	27
第三节 直流发电机的电枢反应及换向磁极的作用	31
第四节 直流发电机的特性及其电压的建立	33
第五节 直流发电机的运行维护及事故处理	36
第三章 同步发电机	38
第一节 概 述	38
第二节 同步发电机的原理及旋转磁场	39
第三节 同步发电机的构造	44
第四节 交流电机的定子绕组	47
第五节 同步发电机的电枢反应及特性	50
第六节 同步发电机的并列及负荷调节	54
第四章 异步电动机	60
第一节 异步电动机的构造	60
第二节 异步电动机的工作原理和特性	62
第三节 异步电动机的起动	66
第四节 异步电动机的运行与维护	70

第二篇 发电厂的一次部分及防雷

第五章 高低压电器	73
第一节 开关设备中电弧的产生和熄灭	73
第二节 低压开关及熔断器	75
第三节 高压开关及互感器	82
第六章 发电厂主电路和厂用电路	90
第一节 发电厂主电路	90

第二节 发电厂厂用电	95
第三节 发电厂主电路和厂用电电路实例	98
第七章 发电厂的防雷保护	101
第一节 防雷工作的重要性	101
第二节 防雷设备	103
第三节 发电厂、变电站的防雷保护	107

第三篇 发电厂的二次部分

第八章 电工仪表及其测量	111
第一节 常用电工仪表的标志符号	111
第二节 磁电式仪表及直流电流和电压的测量	111
第三节 动铁式仪表及交流电流和电压的测量	113
第四节 电动式仪表及功率的测量	116
第五节 电度表和电能的测量	120
第六节 功率因数表、频率表和同期指示表	123
第七节 小型火电厂电气仪表配置情况概述	126
第八节 万用表和兆欧表	127
第九章 继电保护装置	130
第一节 关于继电保护的基本知识	130
第二节 小接地电流电网的绝缘监察装置	134
第三节 输电线路的继电保护	137
第四节 汽轮发电机的继电保护	146
第五节 升压变压器的继电保护	163
第六节 厂用变压器的继电保护	171
第十章 操作电源	176
第一节 概 述	176
第二节 起动型铅蓄电池及其充电设备	177
第三节 合闸用整流设备	185
第四节 操作电源电路图及其工作方式	191
第五节 直流操作电网的供电电路	194
第十一章 操纵、信号、同期装置	197
第一节 二次接线图的基本概念	197
第二节 操纵电路和信号装置	206
第三节 发电厂的同期回路	218
第十二章 自动装置及发电机二次电路总图例	224
第一节 自动重合闸装置	224
第二节 继电强行励磁装置	229
第三节 自动调节励磁装置	232
第四节 发电机二次回路接线全图	235

第四篇 同步发电机运行及事故处理

第十三章 同步发电机的许可运行方式	244
第一节 铁芯和线圈的容许温度	244
第二节 冷却空气温度变动时的运行方式	245
第三节 电压变动时对运行的影响	246
第四节 频率变动时对运行的影响	247
第五节 功率因数变动时的运行方式	248
第六节 负荷不平衡的容许范围	249
第七节 负荷增长速度的规定	250
第八节 容许的过负荷范围	251
第九节 绝缘电阻的测量及容许值	251
第十四章 同步发电机的操作及运行维护	253
第一节 发电机起动前的准备工作	253
第二节 发电机的起动	254
第三节 发电机的升压、同步和并列	254
第四节 发电机接带负荷与调整负荷	256
第五节 发电机在运行中的监视	258
第六节 发电机的解列与停机	262
第十五章 同步发电机的事故分析及处理方法	263
第一节 发电机非同期并列	263
第二节 线圈和铁芯温度过高	265
第三节 发电机内部绝缘故障	266
第四节 发电机着火	267
第五节 发电机自动跳闸	268
第六节 发电机变为同步调相机运行	269
第七节 发电机失去励磁	270
第八节 励磁机逆励磁	271
第九节 发电机升不起电压	272
第十节 发电机非同期振荡	274
第十一节 频率超出容许范围	275
附 录	276
表 I 本书所用主要电工名词、计量单位及符号	276
表 II 电气接线图中常用设备图形符号	277
表 III 二次接线图中常用设备文字符号	283
表 IV 国产小型汽轮发电机的技术数据	285

第一篇 电 机

第一章 变 压 器

第一节 概 述

变压器是一种静止的电力设备，它利用电磁感应原理，将某一数值的交流电压变成频率相同的一种或两种数值不同的交流电压，故称为变压器。经过变压器不仅可以改变交流电压的数值，同时也相应地改变了电流的数值，但是变压器不能把能量变大或变小。实际上，变压器在工作中本身有能量损耗，故它输出的能量略小于输入的能量。

由电工基础知识可知，三相电路的视在功率为

$$S = \sqrt{3} U_x I_x,$$

式中 U_x 和 I_x 为线电压和线电流。从式中可以看出，在输送相同功率的情况下，若升高电压 U_x ，则线路电流 I_x 成比例地减小。这样既可以节约导线材料，又可减少线路的能量损耗和电压降。但从用电方面来讲，为了用电安全和降低用电设备的造价，电压又不能太高，这就出现了高压输电与低压用电之间的矛盾。利用变压器就能够解决这个矛盾。

目前，我国高压输电的标称电压有 35、110、220、330、500kV 等，而发电机的标称电压因受绝缘材料和制造技术的限制，远达不到输电电压的等级，比如，对中小容量发电机来说，发电机的标称电压为 0.4、6.3、10.5kV，对大容量（ $\geq 200\text{MW}$ ）发电机来说，标称电压则为 13.8、15.75、18kV。所以，为了远距离输电必须用升压变压器把发电机电压升高，如图 1-1 所示。当电能输送到负荷中心时，还必须将高压输电电压降低为配电网电压（10kV 或 6kV），大用户直接以 6~10kV 电压级供电，分散的小用户则需用配电变压器降压为 380/220V 三相四线制供电。图 1-1 表示出在整个电能的生产、输送、分配和使用过程中，变压器是不可缺少的电力设备之一。

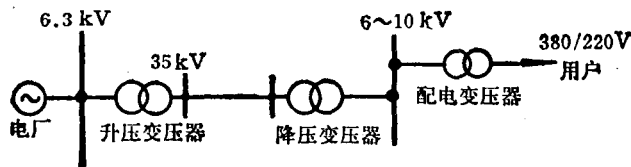


图 1-1 输配电系统的示意图

变压器的种类很多，用途也广，根据其用途和结构等特点分类如下：

（1）按用途分，有电力变压器（输电和配电用）、感应调压器（调整电压用）、仪用变压器（测量仪表用）、自耦变压器及特种变压器等。

（2）按相数分，有单相变压器、三相变压器和多相变压器。

（3）按线圈分，有单线圈（自耦变压器）、双线圈和三线圈变压器。用得最广的是双线圈变压器。目前小电厂也有采用三线圈变压器的，它的一次电压为 6.3kV 与发电机母

线相联，其二次有两种电压：一种为 $11\text{kV} \pm 5\%$ ，供本地区用电；另一种电压为 $38.5\text{kV} \pm 5\%$ ，与系统电网相联或送到较远的用户。

(4) 按冷却介质和冷却方式分，有油浸式和干式两种。油浸式变压器的冷却方式一般为自然冷却或强迫风冷（加风扇），此外还有水冷却或强迫油循环冷却等。

第二节 变压器的基本原理和构造

一、变压器的基本原理

三相变压器和单相变压器的原理是相同的，为了方便起见，我们以单相变压器为例来说明它的基本原理。

图 1-2 为变压器的原理图，在一个闭合的铁芯上分别绕有两个匝数不等的线圈（绕组），铁芯为磁的通路，线圈为电的通路。与电源相接的线圈称为原线圈或一次线圈，与负载相接的线圈称为副线圈或二次线圈。匝数多的称为高压线圈，匝数少的称为低压线圈。

若在一次线圈 A-X 端接入频率为 f 的交流电压 $\dot{U}_1$ ，则一次线圈中便通过交变电流 $\dot{I}_1$ ，该电流在铁芯中产生交变磁通 Φ ，称为主磁通，它同时穿过两个线圈。根据电磁感应定律，在一次和二次线圈中分别产生感应电势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 。由于穿过两个线圈的磁通相同，即磁通在两个线圈的每一匝中所产生的感应电势是相等的，所以， $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 的大小与各自线圈的匝数成正比。由此可见，选择匝数不同的两个线圈，可以得到不同的电压。

我们知道，加在变压器一次线圈上的电压 $\dot{U}_1$ 和电流 $\dot{I}_1$ ，以及产生的主磁通 Φ 和感应电势 $\dot{E}_1$ 及 $\dot{E}_2$ 的数值和方向，都随时间而变化，因此，它们的正方向是可以任意假定的。

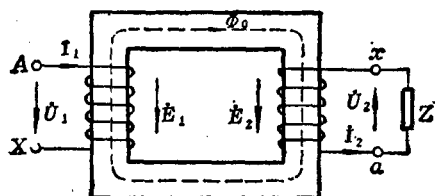


图 1-2 变压器的原理图

若假定的正方向不同，则在同一电磁过程的情况下所列出的方程式中的正、负号也就不同。为了正确地表明各物理量间的相互关系，规定的正方向应与电磁规律方程式相符合。通常我们都用电工惯例来规定正方向，称为习惯正方向。

(1) 在同一支路内，电压降的正方向与电流的正方向一致；

(2) 磁通的正方向与电流的正方向之间的关系符合右手螺旋定则；

(3) 交变磁通感生的感应电势的正方向与产生该磁通的电流正方向一致，也就是说，感生电势的正方向与产生它的磁通正方向之间的关系，也符合右手螺旋定则。

图 1-2 中箭头所示的各物理量的正方向，都是根据上述原则确定的。一次线圈是电网的负载，吸收电能，设 A 端电位此时高， $\dot{U}_1$ 电压正方向为由 A 到 X，电流 $\dot{I}_1$ 的正方向应由 A 端流向 X 端。确定了电流的正方向以后，其它各物理量的正方向都可依电工学惯例来确定。

对于负载来说，变压器的二次线圈就是电源。电流 $\dot{I}_2$ 的正方向与电势 $\dot{E}_2$ 的正方向相

同。如果在二次线圈 $a-x$ 两端接入负载，则在二次线圈与负载构成的电路中便有电流 $\dot{I}$ 通过。这样，就把一次线圈所吸收的电能，经电磁相互作用，转变成二次线圈输出的电能。

二、变压器的构造

电力变压器根据其容量、电压、线圈数的不同，它的外形和附件虽不完全一样，但它的主要部件是相同的。一般小电厂的主变压器和厂用变压器的容量在 $180 \sim 7500 \text{kVA}$ 之间，电压在 $0.4 \sim 35 \text{kV}$ 之间。我们以图1-3所示的一台中等容量的变压器为例，来说明它的基本结构。

1. 铁芯

铁芯是变压器最基本的组成部件之一，是磁通的通路。铁芯分有铁柱和铁轭两部分，线圈套在铁柱上，铁轭将铁柱联成磁的通路。为了提高铁芯的导磁系数，减少铁芯内的磁滞和涡流损耗，铁芯常用厚度为 0.35mm 或 0.5mm 含硅量为 $2 \sim 5\%$ 的硅钢片，表面涂 $0.01 \sim 0.13 \text{mm}$ 厚的硅钢片绝缘漆，烘干后按一定规则叠装而成。铁芯形式分有芯式和壳式两种，芯式铁芯的叠装方法以及高压、低压线圈在铁芯上装配情况如图1-4所示。芯式铁芯结构比较简单，线圈装配和绝缘处理也较容易，是电力变压器铁芯普遍采用的结构。而壳式铁芯机械强度虽好，但用料多，制造复杂，只在一些小型变压器和特殊变压器（如收音机电源变压器和电炉变压器）中采用。

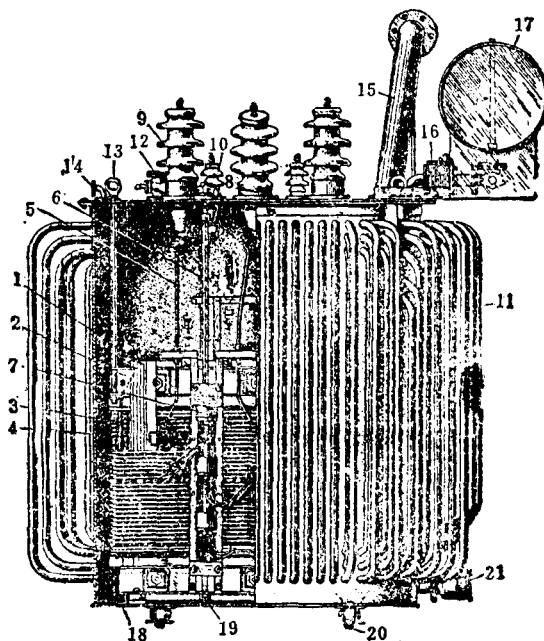


图 1-3 三相变压器的结构图

1—铁芯；2—铁芯夹件；3—低压线圈；4—高压线圈；5—高压引线；6—低压引线；7—调节高压线圈抽头的分接开关；8—分接开关的手柄；9—高压套管；10—低压套管；11—管式油箱；12—注油阀；13—器身吊环；14—真空泵接管；15—防爆管；16—瓦斯继电器；17—膨胀器；18—定位三角铁；19—拉紧上夹件与下夹件的双头螺杆；20—运输滚轮；21—放油阀

铁芯叠装质量好坏直接影响变压器的空载性能，片间接缝气隙愈小，空载激磁电流就小。另外高压、低压线圈采用绕制方便、受力均匀和机械强度好的圆形线圈，为了充分利用圆形空间，铁柱截面常作成阶梯形，截面直径大的阶梯级数多，如直径为 $80 \sim 150 \text{mm}$ 时，级数可达 $5 \sim 7$ 级。直径小于 380mm 的铁芯，铁芯中间一般不设油道。铁轭截面有矩形，T形和梯形的，为了减少空载电流和空载损耗，轭面一般较铁芯柱截面大 10% 。

由于系统容量不断发展，国产变压器除容量、电压等级都有所提高外，变压器结构、使用的材料和冷却方式，也都有所改进，例如采用铝线变压器；铝合金换位导线；导向油冷却；钟罩式油箱；纠结式线圈；渐开线式铁芯等新技术。新工艺、新材料的采用，对于

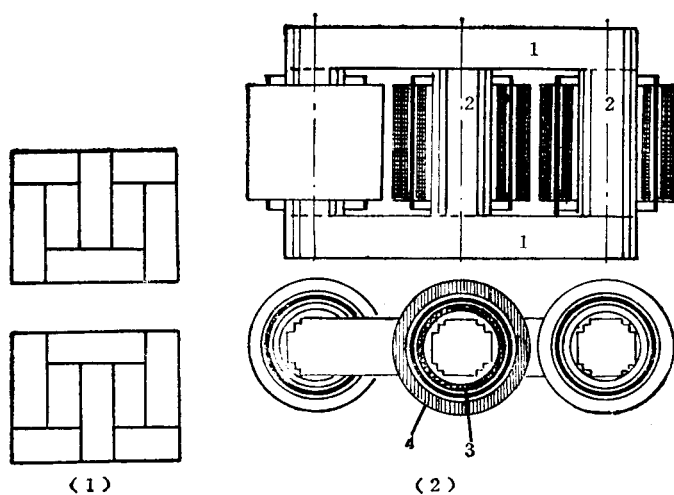


图 1-4 三相变压器的铁芯和线圈
(1) 芯式铁芯的叠装法; (2) 线圈在铁芯上的装置
1—铁轭; 2—铁柱; 3—低压线圈; 4—高压线圈

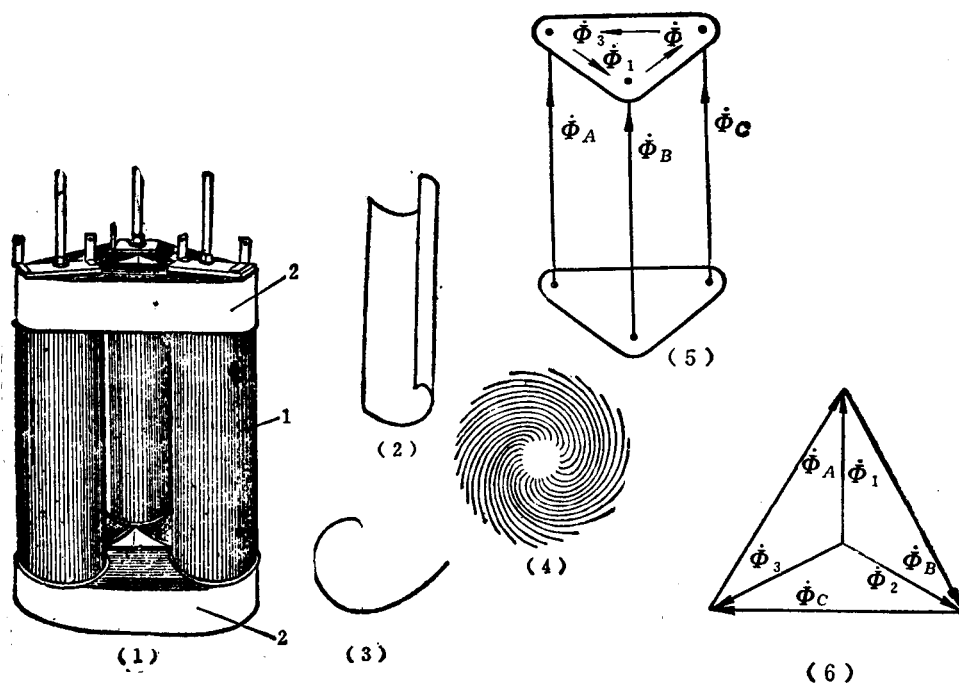


图 1-5 渐开线式变压器铁芯结构及磁通分布
(1) 渐开线铁芯结构; (2) 铁芯叠片; (3) 渐开线形状; (4) 铁芯柱断面; (5) 柱、轭中磁通分布图;
(6) 磁通矢量图
1—铁芯柱; 2—铁轭

缩小变压器的体积,减轻其重量,改进其冷却方式都取得了一定的效果。

如渐开线式铁芯,其材料系采用高导磁系数的有向冷轧硅钢片。该铁芯仍有铁柱和铁轭两部分:铁柱用一种规格经专用设备弯曲成渐开线形状的硅钢片,一片一片插装成圆柱形铁柱,外径和内径之比为4.5~6;铁轭用同一宽度的涂漆硅钢片卷成等边三角形。然后将三个铁柱以等边三角形安放在铁轭断面上,以对接形式组合,再用三个穿心螺杆夹紧成一体,见图1-5。为了防止柱面与轭面直接接触,造成铁芯短路,所以在接触面上垫有0.2毫米厚的环氧酚醛玻璃布板。由于铁轭具有环形闭合磁路及三铁柱对称排列,所以三相磁路对称,因此,三相空载电流也是对称的。又因三柱内磁通 Φ_A 、 Φ_B 、 Φ_C 和柱间轭内的三个磁通 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 在相位上各自彼此相差120度,见图1-5(5)和(6)所示,所以,

每一铁柱内磁通等于轭内相邻两个磁通的向量差,即轭内磁通为柱内磁通的 $\frac{1}{\sqrt{3}}=$

57.7%,因而铁轭截面可较芯式铁轭截面减小42%。根据上述可以明显地看出,渐开线式铁芯具有三相空载电流对称、省材料、铁损小、重量轻、铁芯尺寸规格少、便于成批生产等优点。对于受硅钢片标准尺寸的限制以及振动和噪音较大的缺点,尚待继续研究改进。目前渐开线式铁芯变压器最大容量为8000kVA。

1982年以来,我国许多变压器厂开始生产SL₇、SLZ₇系列低损耗电力变压器。上述系列产品是全国统一设计的,其铁芯部分采用了冷轧硅钢片卷料。和老产品JB1300-73性能标准相比,10kV级空载损耗降低41.5%,短路损耗降低13.97%。35kV级空载损耗降低38.33%,短路损耗降低16.22%。每kVA变压器容量年节电15度。

线圈是变压器的导电部分。缠绕线圈的导线通常采用纱包(或纸包)圆铜线或纸包扁铜线,亦有用高强度漆包线的。为了节约铜,铝线线圈变压器在我国已定型生产。

三相两线圈变压器每相都有一个低压线圈和一个高压线圈,三线圈变压器每相还有一个中压线圈。电力变压器的高、低压线圈常用圆筒形,为了减少漏磁通,高低压线圈套装在同一铁芯柱上。为了提高线圈和铁芯间的绝缘强度,装配时,通常使低压线圈靠近铁芯,高压线圈套在低压线圈外面,低压线圈和铁芯间以及和高压线圈间皆留有油道。按高、低压线圈排列方式分有同心式和交叠式,同心式线圈应用在心式铁芯上;交叠式线圈亦称并式线圈,多应用在壳式铁芯上。同心式线圈结构简单,绕制方便,国产电力变压器皆采用此种型式绕圈。

同心式线圈按绕制特点分类有:圆筒式,螺旋式,连续式,纠结式等型式,如图1-6所示。

圆筒式线圈有单层、双层、多层及铝箔筒式等型式,通常高压线圈用圆铜线绕成多层,低压线圈用单根或几根并联沿高度连续绕成。这种型式的线圈一般用于10~630 kVA三相变压器。

螺旋式线圈是用多股绝缘扁线沿径向绕成,每个线饼为一匝,轴向饼间垫有垫块形成油道。并联股数太多时,并联导线沿轴向分成两排,故有单螺旋、双螺旋等。由于每匝并联导线内外层长度不等,所处的磁场位置亦不相同,为了使每根导线阻抗相等,线内电流分布均匀,减少附加铜损耗,并联导线绕制时需要进行换位。这种线圈一般用于800 kVA

以上、电压为35kV以下的低压线圈。

连续式线圈是用单根或不超过四根并联扁导线，连续绕成若干个串联线饼。为了使出线在最外层引出，在绕制过程中线圈需要进行翻饼，单数线饼为“反饼”，偶数线饼为“正饼”，线饼间也垫有绝缘垫块形成径向油道。这种线圈绕制麻烦，但机械强度高，散热好，饼间无焊头，一般用于三相容量为630kVA以上、电压为3~110kV的高压线圈和10000kVA的中压和低压线圈。

纠结式线圈外形和连续式线圈相似，若线圈是由一根导线组成的，应先用两根扁线并

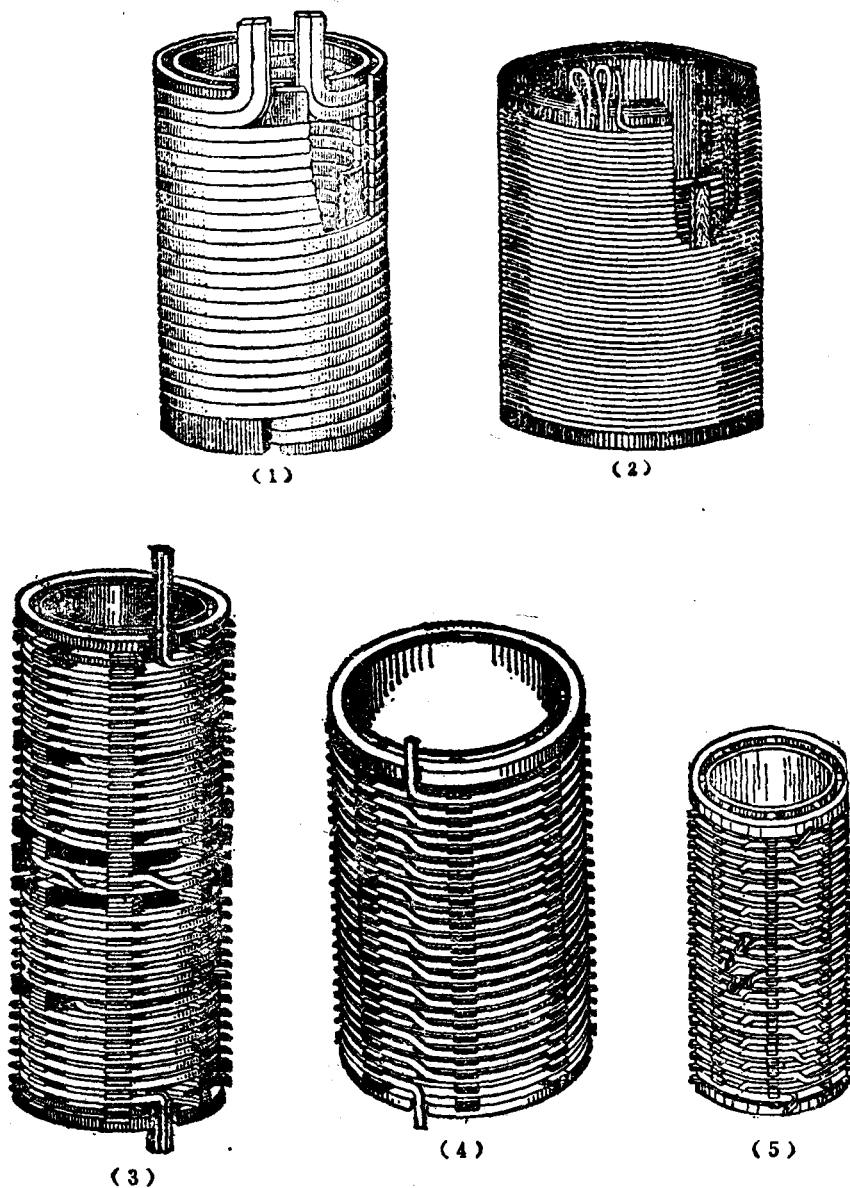


图 1-6 常用的几种线圈型式

(1)双层圆筒式；(2)多层圆筒式；(3)螺旋式；(4)连续式；(5)纠结式

绕若干匝，每两个线饼为一组，然后再交叉串联成一路，这样一个线饼内的线匝是交替排列的，故焊头较多。但相邻两匝间电位差为连续式线圈的数倍，两线饼间的等效电容以及匝间电容，都比连续式线圈大许多倍。过电压时，起始电压就能比较均匀地分布在各线饼及线匝间，显著地改善了冲击电压的分布，提高了变压器的防雷性能。近年来，我国制造的三相容量为6300kVA及大容量变压器，电压为110~330kV的高压线圈已广泛采用纠结式线圈。

2. 油箱和散热器

电力变压器多为油浸式，因为油具有绝缘和传热作用。油箱有桶式和钟罩式两种。为了扩大散热面积，在油箱上装有圆管形或扁管形散热器，管子排数一般为1~3排，容量为3000~10000kVA的变压器，散热管数较多，常制成散热器，装在油箱上，称为散热器油箱。在油箱上部还装有油枕（又称膨胀器），它的作用除保证变压器在运行时油箱内有足够的油量和有一定的膨胀空间外，油枕上方还接有呼吸器（吸湿器），它里面装有氧化钙或硅胶干燥剂，使外面带水分的空气必须经过吸湿器才能进入油枕，这样可以减少油的氧化和水分进入，保持了油的绝缘性能。油枕侧面还装有油位指示表，标有最高和最低油位线。

3. 绝缘套管

变压器线圈的引出线穿过绝缘套管引出油箱之外。根据电压不同，绝缘套管分简单的瓷质套管和充油式或电容式的瓷质套管。图1-7为35kV简单的瓷质绝缘套管。

4. 分接开关

当电源电压变动时，可利用分接开关来调节变压器的二次电压。分接开关的调节手柄装在变压器的箱盖上。

5. 瓦斯继电器

瓦斯继电器又称气体继电器，它装在油箱与油枕的联通管上，见图1-8(1)。根据制造厂及规程规定，装于户内的容量为320kVA及以上的变压器和装于户外的容量为1000kVA及以上的变压器才装设瓦斯继电器，它的作用是用来反映油箱内部故障及油位降低。图1-8(2)为FJ3-80型瓦斯继电器的结构图，其动作原理如下：正常时继电器内充满油，当变压器油箱内部发生轻微的故障或漏油时，少量的瓦斯聚集在继电器顶部，使继电器内油面下降，于是上开口油杯1下降，永久磁铁3就接近固定式干簧接点5，于是干簧接点5接通发出信号（轻瓦斯信号）。当油箱内发生严重的故障时，瓦斯伴随着油流冲动挡板7，使下开口油杯2下降，永久磁铁4接近固定式干簧接点6，干簧接点6接通后使变压器各侧断路器跳闸（重瓦斯跳闸）。当变压器严重漏油时，由于油杯2下降，也将作用于跳闸。为保证瓦斯继电器可靠、灵敏地工作，在制造变压器时，联通管对油箱有1.5~2%的坡度，同时，在安装变压器时，将有油枕的一端稍微垫高，再形成1~1.5%的坡度，如

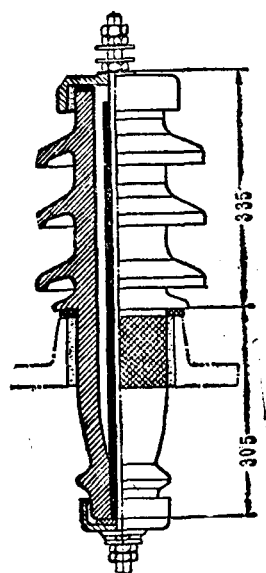


图 1-7 35kV瓷质绝缘套管

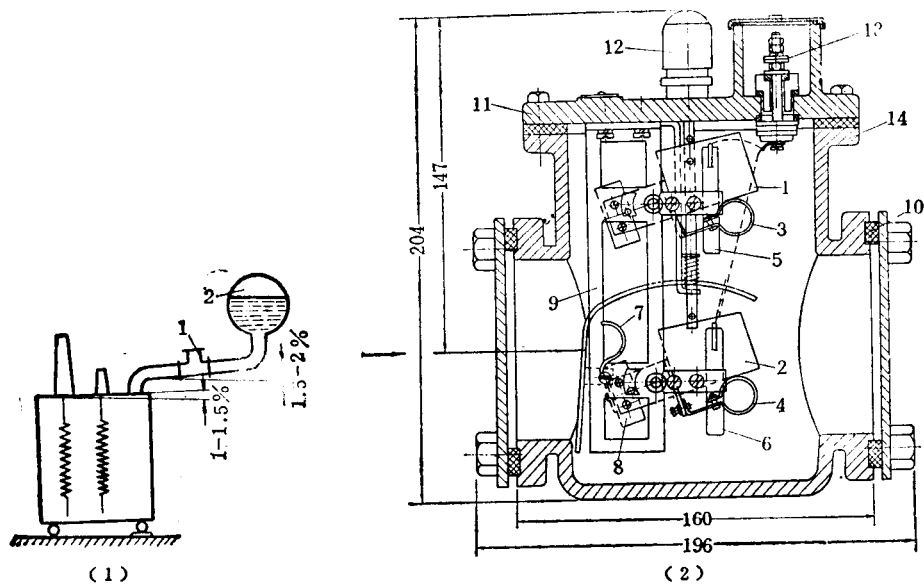


图 1-8 瓦斯继电器

(1) 瓦斯继电器的安装位置 1—瓦斯继电器；2—油枕
(2) FJ3-80型瓦斯继电器 1、2—上下油杯；3、4—永久磁铁；5、6—固定干簧接点；7—挡板；8—平衡锤；9—支架；10—密封垫圈；11—盖；12—集汽门；13—接线端子；14—外壳

图1-8(1)所示。

三、国产变压器型号

国产变压器标准过去不统一，现在我国已制订出新的“电力变压器国家标准”，使我国变压器生产系列化，对各种系列变压器的容量等级、电压等级、型号等都有规定，其技术数据可查有关手册。现将国家标准规定的型号含义列于表1-1。

表 1-1 变 压 器 型 号 含 义

分 类 项 目	代 表 符 号		分 类 项 目	代 表 符 号	
	新	旧		新	旧
单相变压器	D	D	强迫油导向循环	D	不表示
三相变压器	S	S	双线圈变压器	不表示	不表示
油浸式	不表示	J	三线圈变压器	S	S
空气自冷式	不表示	不表示	自耦变压器	O	O
风冷式	F	F	无激磁调压	不表示	不表示
水冷式	W	S	有载调压	Z	Z
油自然循环	不表示	不表示	铝线变压器	不表示	L
强迫油循环	P	P			

对一台变压器的表示方法，表内符号顺序写出，后加一短横，再写变压器额定容量(kVA)/高压线圈电压等级(kV)。如：三相油浸双线圈铝线500kVA10kV电力变压器，用新型号表示，应写为S-500/10；用旧型号表示，则写为SJL-500/10。再如，三相强迫油循环风冷式双线圈铝线63000kVA110kV电力变压器，用新型号表示为SFP-63000/110；

用旧型号表示为SFPL-63000/110。

四、变压器的额定值

变压器正常运行时，应在额定值范围内运行才可保证变压器长期可靠的工作。变压器的额定值通常都标示在变压器的铭牌上，其主要内容有：

额定容量 S_N 是指变压器的额定输出视在功率，单位是VA或kVA，对三相变压器，额定容量是指三相容量之和。

额定电压 U_{N1} 和 U_{N2} 是指接在一次端点的电压和二次空载、一次为额定电压时的二次端电压，单位以伏或千伏表示。对三相变压器，额定电压是指线电压。

额定电流 I_{N1} 和 I_{N2} 是根据额定容量和额定电压得到的，因变压器效率很高，可以将一次容量和二次容量看成是相等的，对三相变压器是线电流，单位以A表示。

额定频率 f_N ，单位是赫兹，我国规定工频为50赫兹(Hz)。

此外，额定运行时的效率，温升等数据也为额定值。除额定值外，铭牌上还标有变压器的相数，接线图，短路电压标幺值，运行方式，冷却方式。还有总重、油重、器重和外形尺寸等。

第三节 变压器的空载运行、负载运行及短路试验

一、变压器的空载运行及变比

当变压器的一次线圈接入额定频率的正弦交流额定电压 U_{N1} ，二次线圈开路（即二次电流为零）时，这种状态称为空载运行。

图1-9为变压器空载运行时的示意图。在电压 U_{N1} 的作用下，一次线圈内通过交变的空载电流 I_0 ，它的数值约为一次额定电流的2~10%。 I_0 在铁芯中产生交变磁通，该磁通绝大部分经过铁芯形成闭合回路，称为主磁通，用 Φ_m 表示。此外，还有一小部分磁通经过铁芯外介质形成回路，称为漏磁通，用 Φ_l 表示。交变的主磁通 Φ_m 在一次和二次线圈中分别产生频率相同的感应电势 e_1 和 e_2 ，其有效值 E_1 和 E_2 分别与电源频率 f 、主磁通 Φ_m 的幅值 Φ_m 及各自的匝数 W_1 或 W_2 的乘积成正比，即

$$E_1 = C f W_1 \Phi_m = 4.44 f W_1 \Phi_m \quad (1-1)$$

$$E_2 = C f W_2 \Phi_m = 4.44 f W_2 \Phi_m \quad (1-2)$$

式中， C 为比例常数， $C = 4.44$ 。

在空载情况下，由于 I_0 数值很小，它在一次线圈内产生的电压降很小，可以忽略不计。所以，一次线圈电势 E_1 近似等于外加电压 U_{N1} ；同时，二次线圈开路，则二次线圈端电压 U_{20} 就等于二次电势 E_2 ，即

$$\left. \begin{aligned} E_1 &\approx U_{N1} \\ E_2 &= U_{20} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

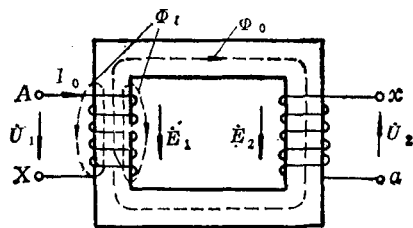


图 1-9 变压器空载运行示意图

U_{20} 为二次空载端电压。根据公式(1-3)，并将公式(1-1)除以(1-2)，得

$$\frac{U_{e1}}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{CfW_1\Phi_m}{CfW_2\Phi_m} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (1-4)$$

变压器不同线圈之间额定电压的比值，称为变压比（简称变比），用字母 K 表示。根据公式(1-4)，单相变压器的变压比近似等于一、二次线圈的匝数比，即

$$K = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (1-5)$$

在三相变压器中，变压比是指不同线圈之间线电压的比值。由于三相变压器线圈的连接方式不同，变压器的线电压与相电势可能不相等（例如 γ 连接时，线电压等于相电势的 $\sqrt{3}$ 倍）。因此，三相变压器的变压比与一、二次侧线圈的匝数比，应区别开来。例如SJ-1800/35型变压器，容量为1800kVA，变比为 $38.5 \pm 5\%/6.3\text{kV}$ ，接线为 γ/Δ -11型，其高、低压线圈的匝数比为 $\frac{38.5}{\sqrt{3}}/6.3$ 。

二、变压器的负载情况及调压

变压器的负载情况是指：一次线圈接在电压和频率为额定值的电网上，二次线圈接入负载阻抗 Z ，如图1-10所示（图中 Φ_{11} 和 Φ_{21} 分别为一次和二次线圈的漏磁通）。二次侧接通负载后，二次线圈就是电源，在电势 E_2 的作用下产生负载电流 $\dot{I}_2$ ，其正方向与 $\dot{E}_2$ 的正方向相同。 $\dot{I}_2$ 在铁芯内产生磁通，企图改变铁芯内原有的主磁通 Φ_0 。但由于一次电压 $\dot{U}_1$ 不变，而 $U_1 \approx E_1 \propto \Phi_m$ ，故主磁通的幅值 Φ_m 应保持不变，即 Φ_0 保持不变。于是，在一次线圈内，除原有的 $\dot{I}_0$ 以外，还必须从电网吸取一个电流分量 $\dot{I}'_1$ ，以 $\dot{I}'_1$ 所产生的磁通来平衡 $\dot{I}_2$ 所产生的磁通，从而保持 Φ_0 不变。由此可知，一次电流 I_1 为两个电流分量的向量和，其中， I_0 称为空载电流分量， I'_1 称为负载电流分量。当外加电压 $\dot{U}_1$ 不变时，空载电流分量 $\dot{I}_0$ 也不变，而负载电流分量 $\dot{I}'_1$ 则随负载电流 I_2 成正比变化。因此， $\dot{I}_2$ 改变时， $\dot{I}'_1$ 的大小和相角 φ_1 也相应地改变。

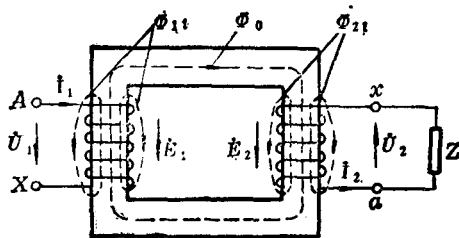


图 1-10 变压器带负载时的示意图

如果忽略变压器在能量转换过程中的本身损耗，则一次线圈吸收的电功率与二次线圈输出的电功率相等，即

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$\text{或写成} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{W_2}{W_1}. \quad (1-6)$$

公式(1-6)表明，变压器一、二次线圈内的电流与其线圈的匝数成反比。升压变压器的一次线圈匝数少，二次线圈匝数多；降压变压器与此相反。

变压器在负载情况下运行时，其二次电压随负荷的变化和一次网络电压的变化而变化，若电压变动值超过允许范围将影响到用电设备的正常运行。因此，供电部门必须对用户保证电压质量，即电压应在规定范围 $\pm 5\%$ 内变动。为了达到上述目的，常在变压器一

次侧星形接线的每相线圈靠中点处抽出一定数量的分接头，利用分接开关改变一次线圈匝数来实现电压调整，这是通常使用的主要方法之一。

由于高压线圈内电流小，同时在结构上高压线圈在低压线圈的外面，所以通常分接头都留在高压线圈一侧。一般小容量（低压为 380/220 伏）变压器，在高压线圈的尾端有三个抽头[如图 1-11(2)]，中间一个抽头为额定电压，称为主抽头，其余两个抽头偏离额定电压 $\pm 5\%$ 。大中容量变压器，通常将每相高压线圈分成两段，共有六个抽头[如图 1-11(2)]，图中只划出 A 相]。 A_2 、 A_7 连接或 A_4 、 A_6 连接时，为额定电压 U_{e1} ； A_2 、 A_3 连接或 A_6 、 A_7 连接时，分别为 $U_{e1}(1 \pm 5\%)$ ； A_3 、 A_4 连接或 A_5 、 A_6 连接时，分别为 $U_{e1}(1 \pm 2.5\%)$ 。线圈抽头都接在分接开关上，分接开关的操作柄伸到油箱外面，这种分接开关不能带负荷进行切换，必须在断开变压器电源之后才允许进行操作。此外，还有一种能带负荷调压的分接开关（用电动操作），在小型发电厂中使用很少，这里不予叙述。

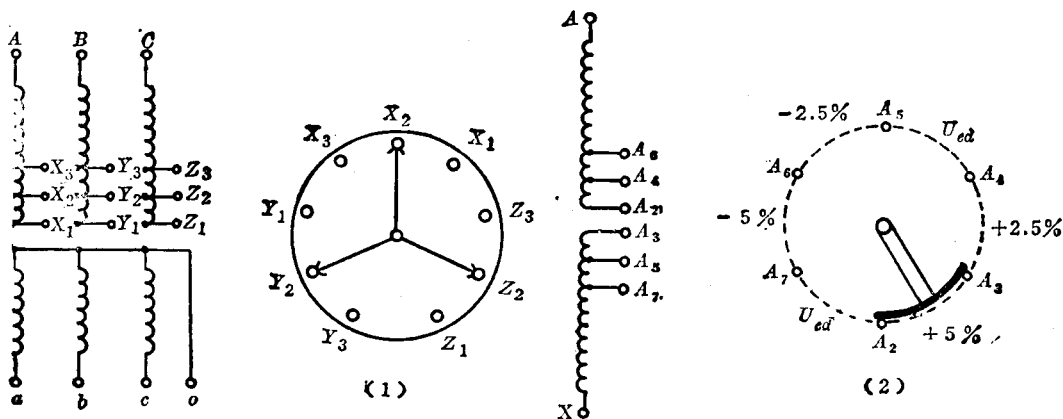


图 1-11 变压器的线圈抽头和分接开关

(1)小容量变压器的线圈抽头和分接开关；(2)大中容量变压器的线圈抽头和分接开关

三、变压器的短路试验及阻抗电压

变压器短路试验是为了测定变压器的短路电压和短路时的损耗（铜损）。变压器的短路试验一般是将低压线圈两端直接短路，利用自耦变压器使高压线圈两端所加电压由零逐渐增大，直到使高、低压线圈中的电流达到额定值。此种情况下变压器所消耗的功率称为短路损耗，高压线圈所加电压称为短路电压（伏特值），用 U_d 表示。短路电压通常以额定电压 U_{e1} 的百分数表示，即

$$U_d\% = \frac{U_d}{U_{e1}} \times 100 \quad (1-7)$$

变压器短路试验时，其内部物理现象与变压器满载（额定负载）运行时相似。但由于变压器低压线圈是短路的，其两端电压为零，所以短路电压 U_d 就是在额定电流时变压器一次和二次阻抗上的总压降，故短路电压又称为阻抗电压。不同容量和不同电压等级的变压器，其阻抗电压不同，国产三相两线圈电力变压器的 $U_d\%$ 值如表 1-2 所列。从表中可以