

国家机械工业委员会统编

电机原理

(中级内外线、维修电工适用)

机械工人技术理论培训教材

JIXIE GONGREN JISHULILUN PEIXUN JIAOCAI



机械工业出版社

本书主要介绍变压器、直流电机、异步电动机、同步电机和常用特种电机的基本结构、工作原理及主要特性。本书可作为中级电工培训的教材，也可作为初级电工进一步学习变压器及电机原理基础理论知识的参考读物。

本书由南京市机械工业局陶来顺、江苏省机械工业厅陶桂英编写，由南京市电机电器工业公司闵大毅、南京金陵职业大学刘官臣审稿。

电机原理

(中级内外线、维修电工适用)

国家机械工业委员会统编

责任编辑：边 萌 责任校对：李广孚
封面设计：林胜利 方 芬 版式设计：张伟行

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·新华书店经销

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 6 · 字数 129 千字

1988年9月北京第一版·1988年9月北京第一次印刷

印数 00,001—30,500 · 定价：2.35 元

ISBN 7-111-00981-9/TM · 134

前 言

1981年,原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》,确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此,组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲(试行)》,编写了相应的教材,有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作,初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况,取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订,原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求,而且缺少高级部分;编写的教材,由于时间仓促、经验不足,在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此,原机械工业部根据新《标准》,重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级),于1987年3月由国家机械工业委员会颁发,并根据培训计划、大纲的要求,编写了配套教材148种。

这套新教材的编写,体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神,坚持了文化课为技术基础课服务,技术基础课为专业课服务,专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上,力求以

IV

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力的培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂、长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了200多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组

1987年11月

目 录

前言

第一章 变压器1

第一节 变压器的分类及基本结构1

第二节 变压器的工作原理与运行特性9

第三节 三相变压器19

第四节 特种变压器27

第五节 国产中、小型电力变压器简介36

复习题37

第二章 直流电机39

第一节 直流电机的分类、用途及型号39

第二节 直流电机的基本结构41

第三节 直流电机的工作原理44

第四节 直流电机的电枢绕组48

第五节 直流电机的磁场61

第六节 直流电机的换向68

第七节 直流发电机及其运行特性72

第八节 直流电动机及其机械特性81

第九节 直流电动机的起动、调速、制动和反转85

复习题93

第三章 异步电动机95

第一节 异步电动机的分类及基本结构95

第二节 异步电动机的工作原理100

第三节 交流电机的绕组和连接108

第四节 异步电动机的主要特性120

第五节 异步电动机的速度调节.....	123
第六节 单相异步电动机.....	126
复习题.....	133
第四章 同步电机	134
第一节 同步电机的分类及基本结构.....	134
第二节 同步电动机的工作原理.....	137
第三节 同步电动机的励磁系统.....	144
第四节 同步电动机的起动.....	148
第五节 同步发电机及其并联运行的条件.....	150
复习题	154
第五章 特种电机	156
第一节 测速发电机	156
第二节 伺服电动机	159
第三节 旋转变压器	162
第四节 自整角机	164
第五节 交轴磁场电机放大机	167
第六节 电磁调速异步电动机	170
第七节 步进电动机	175
第八节 力矩电动机	178
第九节 中频发电机	180
复习题	183

第一章 变 压 器

第一节 变压器的分类及基本结构

一、变压器的用途和分类

变压器是利用电磁感应的原理，将某一数值的交流电压转变成频率相同的另一种或一种以上不同数值的交流电压的电器设备。可分为电力变压器与特种变压器两类。

1. 电力变压器 电力变压器是电力系统中的关键设备之一。据统计，在电力系统中每 1 kW 发电机功率需配备 $5\sim 8\text{ kVA}$ 的变压器容量，因此其应用量很大。

电力变压器有单相和三相之分，容量从几 kVA 到数十万 kVA 。按其作用可分为升压变压器、降压变压器和配电变压器等。

图 1-1 是输配电系统的示意图。电力从电厂的发电机 G 输出至 6.3 kV 的母线。经升压变压器 T_1 将电压升至 35 kV 进行输送，然后再经降压变压器 T_2 将电压从 35 kV 降至 $6\sim 10\text{ kV}$ 进入配电所，最后由配电变压器 T_3 将电压降至 $380/220\text{ V}$ 。

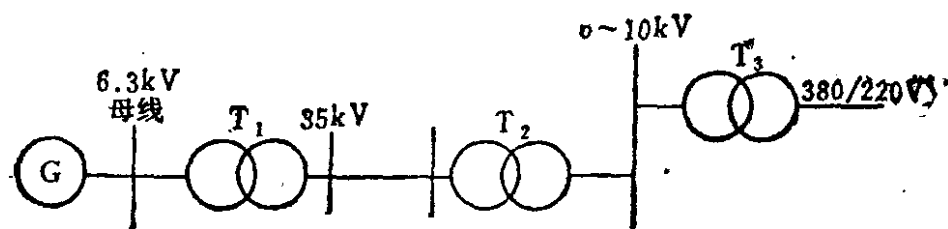


图1-1 输配电系统示意图

V 供用户使用。从图 1-1 可以看出变压器在电力系统中的重要作用。这种在电力系统中作输配电用的变压器统称为电力变压器。

将一种电压转变为另一种电压的变压器，每相有两个线圈，一为一次线圈（又称原绕组），另一为二次线圈（又称副绕组），这种变压器称为双绕组变压器。从一种电压转变为另外两种电压的变压器，每相有三个线圈，一为一次线圈，另两个为二次线圈，这种变压器称为三绕组变压器。还有一种把一次线圈和二次线圈合并成一个线圈的变压器，称为自耦变压器。

电力变压器的冷却方式有干式空气自冷，干式浇注绝缘，油浸自冷，油浸风冷，油浸水冷，强迫油循环风冷和强迫油循环水冷等。

2. 特种变压器 除电力系统应用的变压器以外，其它各种变压器统称为特种变压器。特种变压器的品种繁多，常见的有试验变压器、电炉变压器、电焊变压器、整流变压器、中频变压器、船用变压器、矿用变压器和大电流变压器等。

电压互感器、电流互感器、调压器和电抗器等产品，因其基本原理和结构与变压器有相似之处，故也统称为变压器类产品。

二、变压器的基本结构

变压器的电磁感应部分包括电路和磁路两部分。电路又有一次电路与二次电路之分。

由于变压器的型式、容量、电压和线圈数的不同，它们的外形和附件也不完全一样，但其主要部件大体上是相似的。使用最广泛的是电力变压器。在电力变压器中，应用最多的

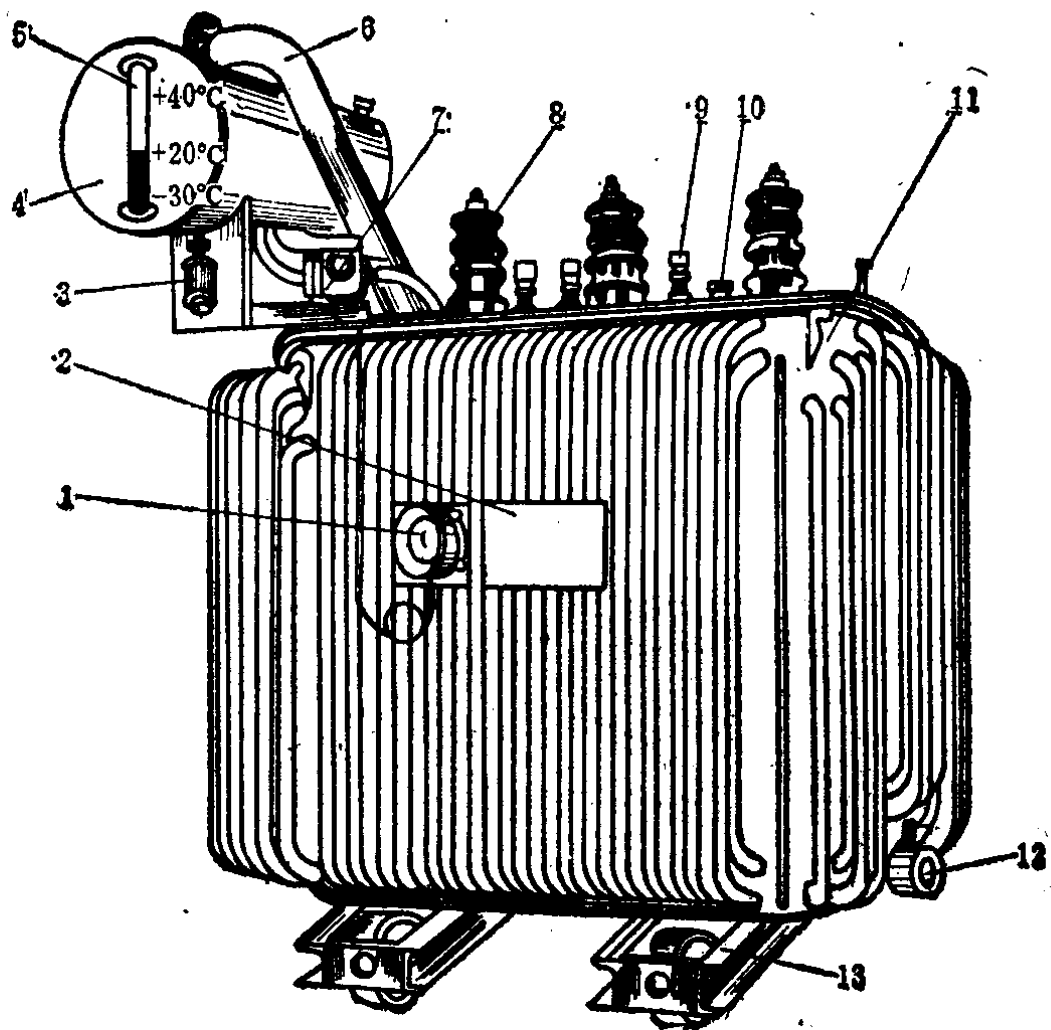


图1-2 三相油浸式电力变压器的外形图

- 1—信号温度计 2—铭牌 3—吸湿器 4—储油柜 5—油位计
6—安全气道 7—气体继电器 8—高压套管 9—低压套管
10—分接开关 11—油箱 12—放油阀 13—小车

是容量在 $100 \sim 6300 \text{ kVA}$ 之间、电压在 $0.4 \sim 35 \text{ kV}$ 之间的中、小容量的三相油浸式电力变压器。这类油浸式电力变压器，一般由器身、油箱、冷却装置、保护装置和出线等部分组成。器身是变压器的最主要部件，由铁心、线圈、引线及分接开关等部分组成。图 1-2 是一台中等容量的三相油浸式电力变压器的外形图。现将这类变压器的基本结构分述如下。

1. 铁心 铁心是磁通的通道，它构成磁通低磁阻的回

路。为了减少铁心内的能量损耗，铁心是用 $0.35\sim 0.5\text{mm}$ 厚的硅钢板冲剪成几种不同的尺寸，并在其两面涂以绝缘漆后，按一定规则叠装而成。

铁心既是变压器的磁路，也是器身的骨架。它由铁柱、铁轭和夹紧装置组成。套装线圈的部分叫铁柱。连接铁柱形成闭合磁路的部分叫铁轭。夹紧装置用来把铁柱和铁轭紧固成坚实的整体，以固定线圈、引线和分接开关。

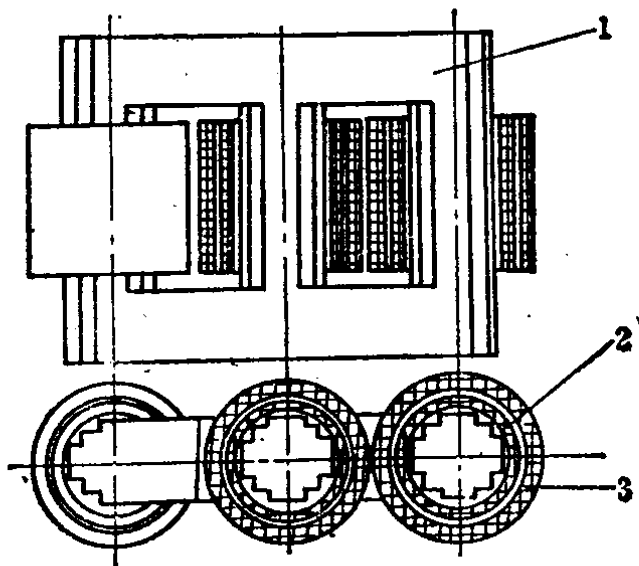


图1-3 三相心式变压器线圈的安放情况

1—铁心 2—低压线圈 3—高压线圈

变压器铁心有心式和壳式两类。线圈包着铁心的变压器叫心式变压器，铁心包着线圈的叫壳式变压器。电力变压器大多数采用三相心式铁心。图 1-3 表示三相线圈在三相心式铁心上的安放情况。

我国还生产一种渐开线铁心的电力变压器。其结构比较特殊，把若干张一定尺寸的硅钢片卷成渐开线形状的曲面，然后叠成圆柱形铁柱，另外用带状硅钢片卷成三角形的铁轭，三个铁柱按等边三角形布置，铁柱和上下铁轭用穿心螺杆固定在一起。图 1-4 是渐开线铁心的结构图。这种结构使三相磁路完全对称，缩小了尺寸，节约了材料，并且便于实现机械化生产。

2. 线圈 线圈由绝缘铜线或铝线绕制而成，有同心式

和交叠式两种。同心式线圈是将高、低压线圈套在同一铁柱的内外层，如图 1-5 a 所示。交叠式线圈的高低压线圈是沿轴向交叠放置的，如图 1-5 b 所示。

大多数电力变压器都采用同心式线圈，常见的有圆筒式、连续式和螺旋式等。

(1) 圆筒式：圆筒式线圈是沿轴向依次逐层绕制的，有单层、双层和多层三种，如图 1-6 所示。

(2) 连续式：连续式线圈是由扁线沿轴向绕制的一些饼式线段组成的。图 1-7 是线

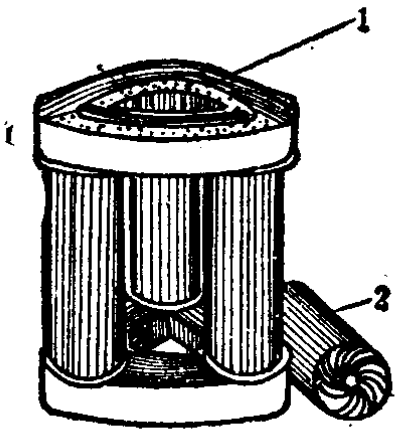


图1-4 渐开线铁心的结构图
1—铁轭 2—铁柱

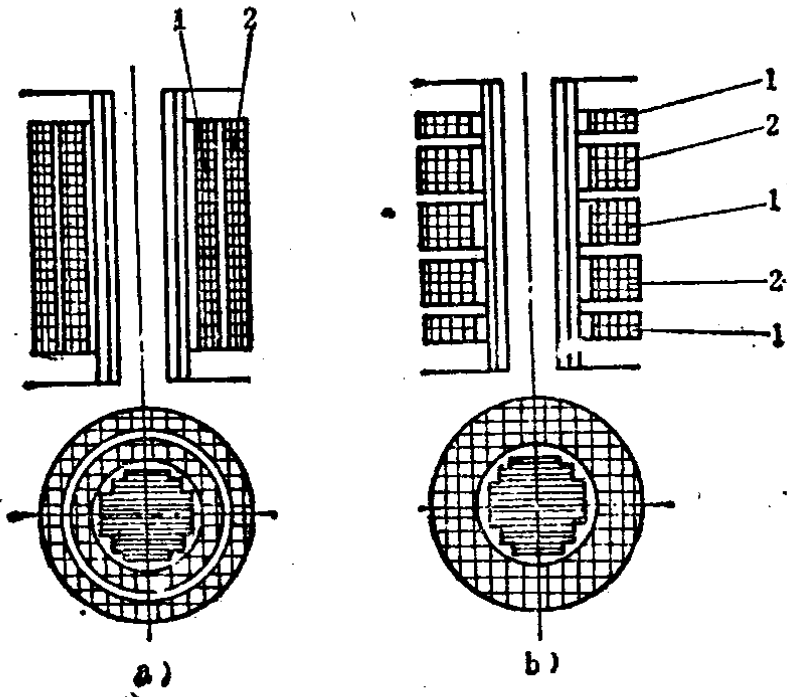


图1-5 同心式线圈和交叠式线圈
a) 同心式线圈 b) 交叠式线圈
1—低压线圈 2—高压线圈

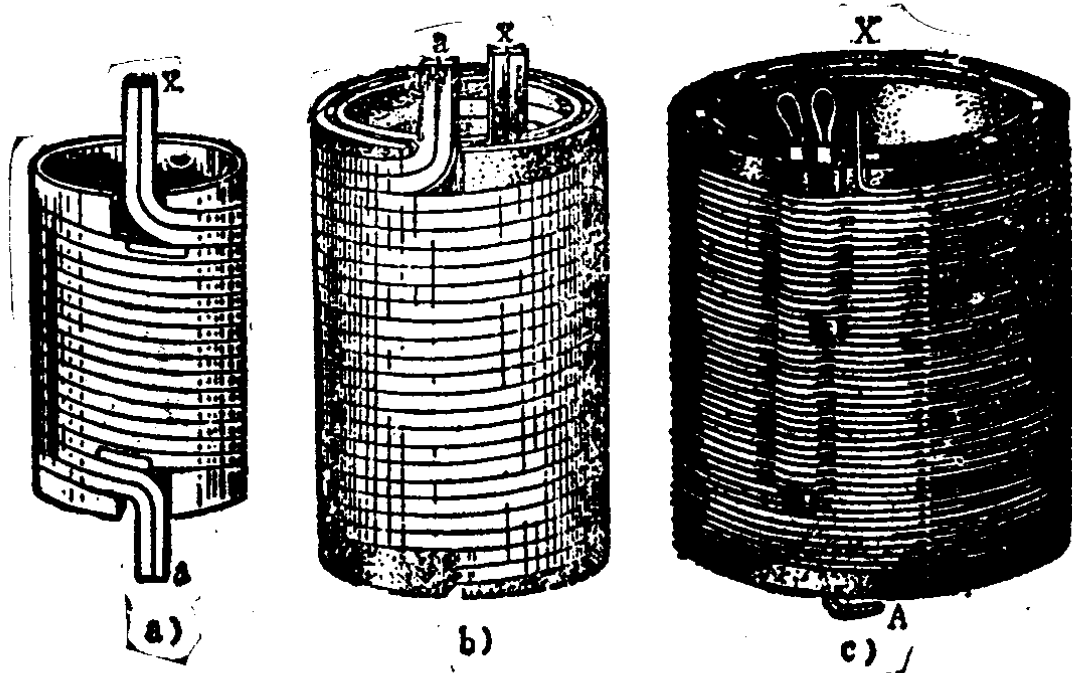


图1-6 圆筒式线圈

a) 单层圆筒式线圈 b) 双层圆筒式线圈 c) 多层圆筒式线圈

段数为 24 的 35kV 级的连续式线圈。

连续式线圈多用于高压，也常带有调压分接头。分接头的位置通常放在中部。

(3) 螺旋式：螺旋式线圈是由若干沿轴向并联的导体沿轴向绕制而成，线匝为螺旋状，有单螺旋、双螺旋及四螺旋等。每一螺旋线是线圈的一个分支，每个分支由若干根并联的平绕扁线组成。线匝之间和并联分支路之间为油道。图 1-8 所示为 1000kVA 的低压单螺旋式线圈。

由两根以上并联导线绕制的线圈，要在导线之间进行换位，以保持每根导线具有相同的展开长度和相似的漏磁情况。

3. 油箱 大多数中、小型油浸式电力变压器的油箱是平顶的，如图 1-9 所示。油箱既是变压器的外壳，也是变压

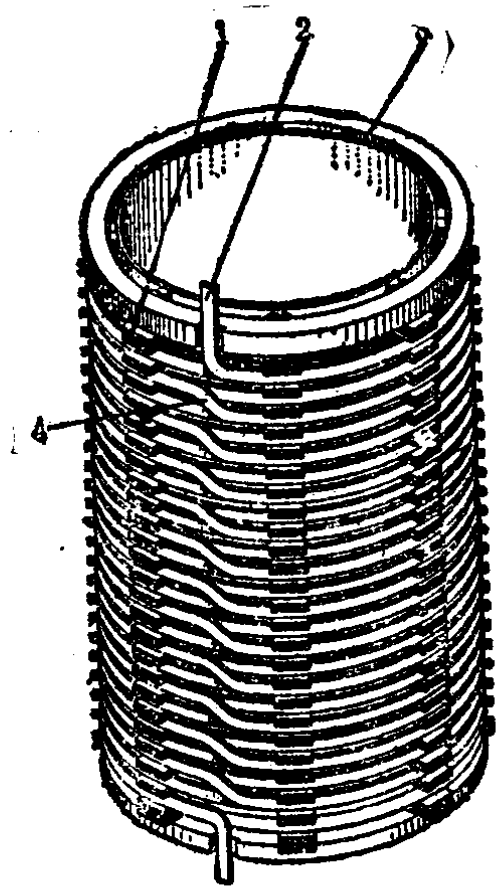


图1-7 连续式线圈
1—油道垫块 2—线圈出头
3—绝缘筒 4—过渡线

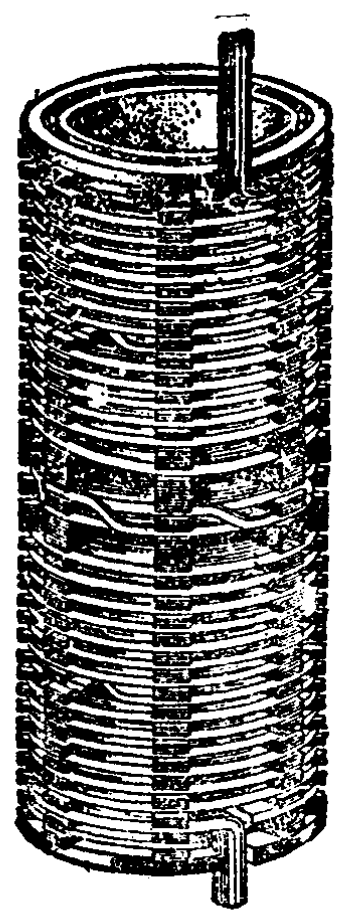


图1-8 低压单螺旋式线圈

器油的容器。中、小型变压器的油箱又是冷却装置。

4. 检查和保护装置

为了监视变压器的运行情况，防止和限制事故，一般电力变压器均装有必不可少的检查和保护装置，如油位计、温度计、储油柜、气体继电器及安全气道等。

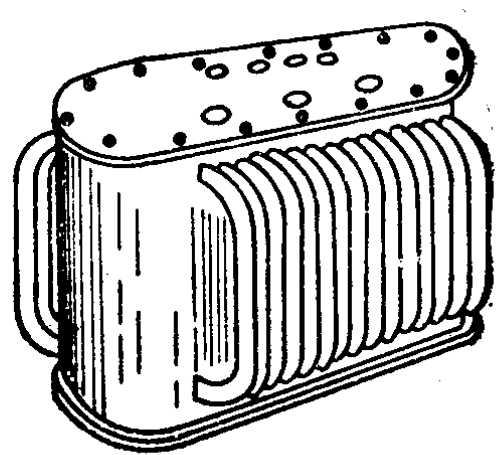


图1-9 平顶变压器油箱

三、变压器的铭牌数据

电力变压器的铭牌上应标明以下内容：

1. 型号 表示变压器的结构特点、额定容量和高压侧电压等级。它由汉语拼音字母组成基本代号，其后以短横线隔开，短横线后有两组数字，前一组表示额定容量，后一组表示高压侧电压等级。

例如：SL-1000/10 表示为三相油浸自冷铝线变压器，额定容量为 1000kVA，高压侧电压等级为 10kV。

2. 额定数据 变压器的额定数据包括以下各项：

(1) 额定容量 S_N ：额定容量是输出视在功率的保证值。三相变压器的额定容量是三相容量的总和，单位为 kVA 或 VA。

(2) 额定电压 U_{1N}/U_{2N} ：一次额定电压 U_{1N} 是指加到一次线圈上的电源线电压额定值。二次额定电压 U_{2N} 是指当一次线圈所接电压为额定值、分接开关位于额定分接头上、变压器空载时，二次线圈的线电压，单位为 kV 或 V。

(3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N} ：根据额定容量和额定电压计算出的电流值，单位以 A 表示。

(4) 空载电流 I_0 ：当变压器的一次侧接通频率和有效值均为额定值的正弦交流电压 U_{1N} 、二次侧开路时，一次侧的线电流称为空载电流。通常用它与额定电流 I_{1N} 的百分比来表示。

(5) 空载损耗 P_0 ：当变压器在额定频率和额定电压 U_{1N} 下空载运行时，本身所消耗的有功功率称为空载损耗。

(6) 负载损耗 P_k ：是指当变压器的二次侧短接、并在一次侧通过额定频率的额定电流时，变压器所吸取的有功功率。负载损耗主要是一、二次绕组的铜耗。

(7) 阻抗电压 U_k : 在第 (6) 项所述的条件下, 一次侧上所施加的电压称阻抗电压。通常用阻抗电压与额定电压 U_{IN} 的百分比来表示。

3. 其它说明 铭牌上除标明上述内容以外, 还要标明油重、器身重、总重、绝缘材料的耐热等级、联结组标号及各部分允许温升等。

第二节 变压器的工作原理与运行特性

一、变压器的工作原理

1. 变压器的空载运行 将变压器的一次绕组接交流电源, 二次绕组开路, 这种运行方式称空载运行。

图 1-10 是单相变压器空载运行的原理图。 N_1 和 N_2 分别为一次和二次线圈的匝数。当一次线圈接上交流电压 $\dot{U}_1$

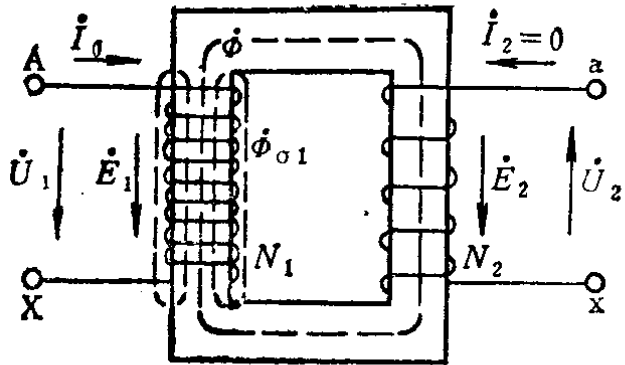


图1-10 单相变压器空载运行原理图

时, 其中就流过交流电流 i_0 。由于二次线圈开路, $i_2 = 0$, 因此 i_0 称空载电流。 i_0 在一次线圈中产生交变磁势 $\dot{F}_0 = i_0 N_1$ 。磁势 $\dot{F}_0$ 产生交变磁通。磁通的大部分通过铁心而闭合, 既穿过一次线圈, 也穿过二次线圈, 称主磁通, 以 $\dot{\Phi}$ 表示。另有小部分磁通溢出铁心, 在一次线圈侧自行闭合, 而不穿过二次线圈, 称漏磁通, 以 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 表示。 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 通常很小, 约为总磁通的 10% 左右。

根据电磁感应定律, 主磁通 $\dot{\Phi}$ 将在一次、二次线圈中产

生感应电势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ ；漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 只在一次线圈中产生漏磁感应电势 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 。

由于变压器中电压、电流、磁通及电势的大小和方向均随时间而交变，为了正确表示各量之间的相互关系，必须规定它们的正方向。通常按下述惯例来规定变压器中各个量的正方向：

(1) 在同一支路内，电压降的正方向与电流的方向一致；

(2) 磁通的正方向与电流的正方向之间符合右手螺旋定则；

(3) 由交变磁通产生的感应电势，其正方向与产生该磁通的电流方向一致。

图 1-10 中各个有关量的正方向就是根据上述原则规定的。

根据图 1-10 中各个量的正方向的规定，可列出一 次及二次线圈中的电压方程式分别为：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 r_1 \quad (1-1)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 \quad (1-2)$$

如果忽略一次线圈的电阻 r_1 及漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ ，式 (1-1) 可简化为：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (1-3)$$

变压器一次线圈电压与二次线圈电压的比值称为电压比，以 K 表示。当变压器空载运行时，在数值上，

$$U_1 = E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (\text{V})$$

$$U_2 = E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (\text{V})$$

式中 Φ_m ——主磁通的最大值，单位为 Wb。

电压比 K 则为：

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-4)$$

如果忽略电阻、漏磁通和铁耗，空载电流 i_0 纯粹是为了建立主磁通 ϕ ，称为励磁电流。 i_0 与 ϕ 同相位，是无功电流，所以电源电压 $\dot{U}_1$ 较 i_0 超前 90° ，也较 ϕ 超前 90° 。 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 与 $\dot{U}_1$ 方向相反，它们之间的相位关系可用图 1-11 的相量图来表示，这种变压器称为理想变压器。

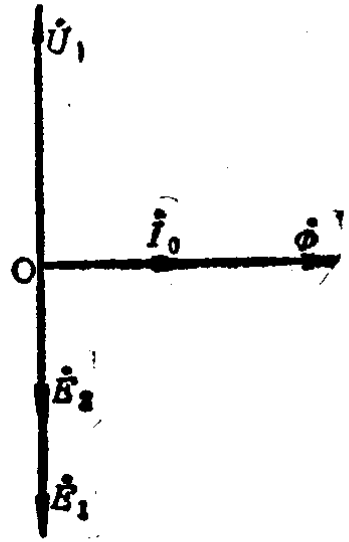


图1-11 理想变压器空载运行的相量图

实际上，空载运行时有铁耗存在，空载电流 i_0 是由铁耗电流 i_{0p} 和励磁电流 i_{0q} 两个分量组成，如图 1-12 所示。

根据电压方程式 (1-1) 及式 (1-2) 和空载电流 i_0 与电压 $\dot{U}_1$ 的相位关系，可绘制出如图 1-12 所示的空载运行时的相量图。

漏磁电势 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 和空载电流 i_0 之间的关系是：

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{i}_0 x_1 \quad (1-5)$$

式中 x_1 ——对应漏磁通 $\phi_{\sigma 1}$ 的电抗；

“ $-j$ ”——表示把一个相量朝负方向（顺时针方向）旋转 90° 。

因此，式(1-1)可化为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + j\dot{i}_0 x_1 + \dot{i}_0 r_1 \\ \text{或 } \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{i}_0 Z_1 \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 称为一次线圈的漏阻抗。

2. 变压器的负载运行 当变压器的二次线圈接通负载