

油库电气设备 及防爆

马智刚 冯 平 主编

中国石化出版社

72
2

油库电气设备及防爆

马智刚 冯 平 主编

中国石化出版社

内 容 简 介

本书是根据当前油库的实际和今后的发展趋势,在原内部教程《油库电气设备及防爆》的基础上补充完善而成的。

全书共六章:第一章变压器;第二章发电机;第三章变电所电气设备及油库常用电工仪表;第四章异步电动机及其起动控制设备;第五章电线电缆及熔断器选择;第六章油库安全用电及防爆。各章均附有思考题和习题。

与原教材相比,新增加了2000年国家防爆电气设备新标准,还补充了无刷电机、智能电工仪表、异步电动机的变频调速等新技术。

本书可供本科油气储运工程、油料储运自动化、油料管理工程等相关专业使用,也可作为油库技术人员培训教材及参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油库电气设备及防爆/马智刚,冯平主编.

—北京:中国石化出版社,2005

ISBN 7-80164-843-9

I.油… II.①马…②冯… III.①油库-电气设
备-高等学校-教材②油库-防爆-高等学校-教材
IV.①TE972②TE88

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 080155 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

河北天普润印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 314 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

定价:28.00 元

编 审 人 员

主 审：王维俊

主 编：马智刚

副 主 编：冯 平

编写组成员：宋宏洲(第一章)

马智刚(第二章、第四章)

葛 敏(第三章)

冯 平(第五章、第六章)

目 录

第一章 变压器	(1)
§ 1-1 概述	(1)
§ 1-2 单相变压器的工作原理	(2)
§ 1-3 变压器的功率和效率	(6)
§ 1-4 三相变压器	(8)
§ 1-5 三相电力变压器的构造及铭牌	(10)
§ 1-6 变压器的并联运行	(16)
§ 1-7 电力变压器的使用与管理	(17)
§ 1-8 特种变压器	(18)
思考题	(22)
习题	(23)
 第二章 发电机	(24)
§ 2-1 概述	(24)
§ 2-2 直流发电机的基本工作原理及构造	(24)
§ 2-3 直流发电机电枢绕组的感应电势及电磁转矩	(29)
§ 2-4 直流发电机的分类及运行	(30)
§ 2-5 同步发电机的基本结构及铭牌	(35)
§ 2-6 同步发电机的基本作用原理	(37)
§ 2-7 同步发电机的电枢反应	(38)
§ 2-8 同步发电机的特性曲线	(38)
§ 2-9 同步发电机的并联运行	(40)
§ 2-10 发配电操作	(43)
§ 2-11 同步发电机常见故障及定期保养	(45)
§ 2-12 无刷励磁同步发电机介绍	(47)
思考题	(51)
习题	(51)
 第三章 变电所电气设备及油库常用电工仪表	(52)
§ 3-1 开关设备	(52)
§ 3-2 常用直读式电工仪表的构造及原理	(56)
§ 3-3 配电盘上的仪表及其应用	(61)
§ 3-4 感应式过电流继电器	(73)
§ 3-5 配电盘仪表接线	(75)
§ 3-6 常用电工测量仪表	(79)
思考题	(90)
习题	(91)

第四章 异步电动机及其起动控制设备	(92)
§ 4-1 异步电动机的分类及构造	(92)
§ 4-2 异步电动机定子绕组的接用和判断头、尾端的方法	(94)
§ 4-3 异步电动机的工作原理	(96)
§ 4-4 三相异步电动机的电路分析及工作过程	(101)
§ 4-5 异步电动机的功率与效率	(103)
§ 4-6 异步电动机的电磁转矩和工作特性	(105)
§ 4-7 异步电动机的使用	(110)
§ 4-8 三相异步电动机的直接起动控制设备及正、反转控制电路	(121)
§ 4-9 三相异步电动机自耦降压起动控制设备	(131)
§ 4-10 三相异步电动机星形—三角形换接起动及控制设备	(139)
§ 4-11 单相异步电动机	(143)
思考题	(146)
习题	(148)
第五章 电线电缆及熔断器选择	(150)
§ 5-1 常用电线电缆	(150)
§ 5-2 常用电线电缆的选用	(151)
§ 5-3 熔断器选择	(159)
第六章 油库安全用电及防爆	(165)
§ 6-1 触电的危险性及带电作业	(165)
§ 6-2 接地与接零保护	(167)
§ 6-3 防雷保护	(170)
§ 6-4 油库防静电	(171)
§ 6-5 防爆电气设备及可燃气体(蒸气)的类别、组别、级别的划分	(174)
§ 6-6 各种防爆电气设备的防爆原理	(175)
§ 6-7 防爆电气设备的标志	(177)
§ 6-8 爆炸危险场所等级的划分	(178)
§ 6-9 防爆电气设备选型	(180)
§ 6-10 防爆工艺安装要求	(183)
§ 6-11 一般防爆安全知识	(192)
§ 6-12 油库防爆电气设备的检修	(193)
第五章、第六章思考题	(195)

第一章 变 压 器

§ 1-1 概 述

变压器是一种静止的电气设备，它利用电磁感应原理把某一数值的交变电压变化为同频率的另一数值的交变电压。

在电力系统中，变压器是一个重要的设备。它对电能的经济传输、灵活分配和安全使用具有重要意义。通常发电厂生产的交流电能要供给用户，需要输送很远的距离。在远距离输电中，一般都采用高压输电。因为输送一定功率的电能时，随着输电电压的升高，输电电流将变小，若输电线的截面积不变，则线路损耗将降低，若保持线路损耗不变，则输电线的截面积可以减少，节约输电线用量。因此，远距离采用高压输电是经济合理的。目前的输电电压有 100kV、220kV、330kV 和 500kV 等几个等级。但这样高的电压，不论从发电机的安全运行方面或从制造成本方面考虑，都不允许由发电机直接产生。发电机的额定电压一般有 3.15kV、6.3kV、11.5kV、15.75kV 等几种。因此，在输电之前，必须利用变压器把电压升高到所需的数值。在用电方面，为了用电设备制造成本低廉、使用安全和操作方便，电压不宜太高，多数的用电器是 220V、380V，少数的电动机也有采用 3000V 或 6000V 的。因此在供电之前，又要用变压器将输电电压降低。图 1-1 所示为一个简单的电力系统示意图。由于输配电中升压和降压进行多次，变压器的安装容量是发电机容量的 5~8 倍。

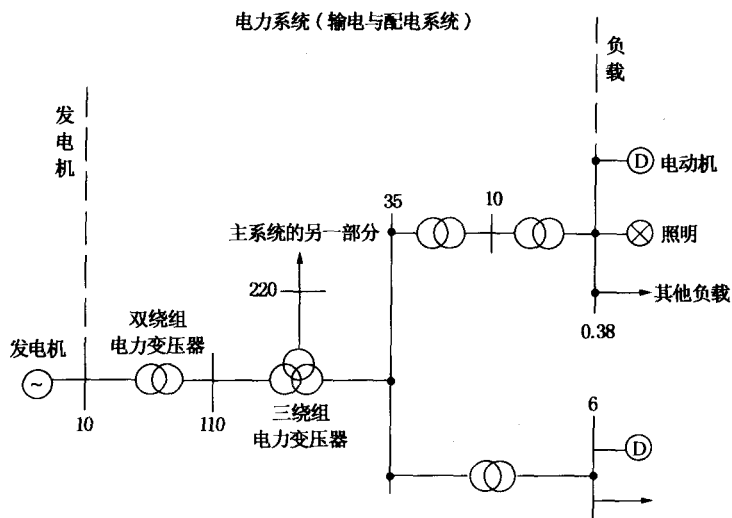


图 1-1 简单的电力系统示意图
(图中数字单位为 kV)

随着国家电气事业的发展，高压输电线深入祖国的农村、山区、为油库用电提供了方便条件。虽然各油库都配有发电设备，以供战时和特殊情况下使用，但在平时用降压变压器从高压电网取用电能，比自己发电具有设备简单、使用方便、便于维护、费用低等优点。因此变压器已成为多数油库的主要电源设备。

§ 1-2 单相变压器的工作原理

一、变压器的结构及分类

变压器主要由磁路和电路两部分构成。一般，双绕组变压器的电路是由两个匝数不同且彼此绝缘的绕组(线圈)组成，为了加强绕组间磁的联系，两个绕组同装在一个闭合的铁芯(磁路)上，绕组与铁芯之间亦彼此绝缘，为了减小涡流和磁滞损耗，铁芯是用涂有绝缘漆，厚度为 $0.35 \sim 0.5\text{mm}$ 的硅钢片叠成。如图 1-2 所示。

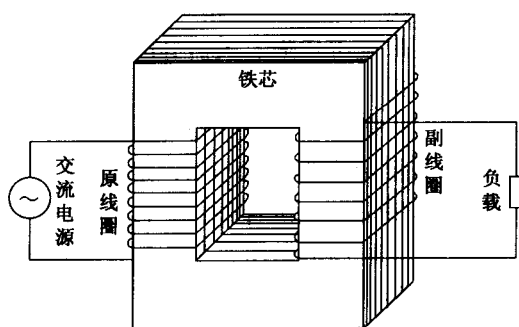


图 1-2 单相变压器的示意图

变压器与电源连接的绕组，亦即自电网吸取电能的绕组，称为“原绕组”或“初级绕组”。所有与原绕组有关的量标以脚注“1”。如原边电压、原边电流、原边功率、原边阻抗等，分别以符号 V_1 、 I_1 、 P_1 、 Z_1 等表示之。与负载相连的绕组，亦即向外输出电能的绕组称为“副绕组”或“次级绕组”。所有与副绕组有关的量标以脚注“2”。如副边电压、副边电流、副边功率、副边阻抗等，分别以 V_2 、 I_2 、 P_2 、 Z_2 等表示之。

如果原绕组端的电压(初级电压) V_1 低于次级电压 V_2 ，则在这种情况下运行的变压器称为“升压变压器”($V_1 < V_2$)，在相反情况下运行的变压器则称为“降压变压器”($V_1 > V_2$)。变压器的两个绕组中，额定电压较高的那个绕组，叫做“高压绕组”，而额定电压较低的那一个绕组，叫“低压绕组”。

变压器在国民经济各部门中应用很广，为了适应不同的使用目的和工作条件，变压器的类型很多，且各种类型的变压器在结构上、性能上的差异也很大。一般按照变压器的用途进行分类，也有按照结构特征、相数多少、冷却方式等进行分类的。

从用途来说，变压器分为电力变压器(如升压变压器、降压变压器、配电变压器等)、特种变压器(如电炉变压器、整流变压器等)、仪用互感器(如电压互感器、电流互感器等)、试验用的高压变压器和调压器等。

按线圈数目的多少，分为两线圈、三线圈和多线圈变压器以及自耦变压器。

按相数的多少，分为单相变压器和三相变压器等。

对变压器的冷却方式和冷却介质而言，分为用空气冷却的干式变压器和用油冷却的油浸式变压器等。

虽然变压器的种类很多，用途不同，但它们的工作原理都是基于电磁感应现象，现以双绕组单相变压器为例讨论变压器的原理和运行特性。在负载对称的条件下，这些分析完全适用于三相变压器。

二、变压器的空载运行

变压器的原边接在电源上，副边开路无电流的情况叫做空载运行。电路如图 1-3 所示。

变压器的原绕组匝数为 N_1 ，副绕组匝数为 N_2 。当原边接上电源电压 v_1 ，副边开路时，

原绕组中流过的电流为 i_0 ，叫空载电流，产生的磁势 $i_0 N_1$ 为空载磁势。一般空载电流 i_0 很小，其有效值 I_0 约为额定值 I_{1e} 的 3% ~ 8%。在空载磁势 $i_0 N_1$ 的作用下，磁路中产生磁通，因此空载磁势又叫做励磁磁势，空载电流又叫做励磁电流。磁通分为两种：一种是同时环链着原绕组和副绕组的，称为主磁通，用 Φ 表示；一种是只环链原绕组本身而不环链副绕组的，称为原绕组的漏磁通，用 $\Phi_{\sigma 1}$ 表示。交流电网的电压 v_1 随时间以电源频率 f 做正弦变化，因此励磁电流 i_0 、主磁通 Φ 及原绕组漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 也随时间交变，频率都为 f 。交变的磁通在与它环链的绕组中感应电势，主磁通 Φ 在原绕组中感应电势为 e_1 ，在副绕组中感应电势为 e_2 ；原绕组漏磁通 $\Phi_{\sigma 1}$ 在原绕组中感应电势为 $e_{\sigma 1}$ 。副绕组在空载时的端电压为 v_{20} 。

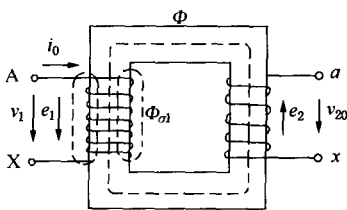


图 1-3 变压器的空载运行

上述的电流关系可表示如下：

$$\begin{aligned}
 v_1 &\rightarrow i_0 (i_0 N_1) \rightarrow \Phi \\
 &\quad \downarrow \Phi_{\sigma 1} \\
 e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\
 e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \\
 e_{\sigma} &= -N_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = -L_{\sigma 1} \frac{di_0}{dt}
 \end{aligned}$$

当外加电压 v_1 按正弦规律变化时，则磁通也将按正弦规律变化，设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ (Φ_m 是工作磁通的最大值)，则

$$\begin{aligned}
 e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \\
 &= 2\pi f N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)
 \end{aligned}$$

上式中 $E_{1m} = 2\pi f N_1 \Phi_m$ 是原绕组上产生的电动势 e_1 的幅值，其有效值则为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-1)$$

同理

$$\begin{aligned}
 E_{2m} &= 2\pi f N_2 \Phi_m \\
 E_2 &= 4.44 f N_2 \Phi_m
 \end{aligned}$$

根据克希荷夫电压定律，对原绕组电路可列出电压方程为

$$v_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_0 R_1 \quad (1-2)$$

由于原绕组的电阻 R_1 和漏磁电动势 $e_{\sigma 1}$ 很小，因此 $i_0 R_1$ 与 $e_{\sigma 1}$ 可以忽略不计，于是 (1-2) 式可简化为

$$v_1 \approx -e_1$$

用矢量表示为

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 &\approx \dot{E}_1 \\
 V_1 &\approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m
 \end{aligned} \quad (1-3)$$

同理，副边电势的有效值 $E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$ (1-4)

由于空载时变压器副绕组是开路的、副绕组内的电流 i_2 为零，所以它的端电压 V_{20} 等于副边电势 E_2 ，即 $V_{20} = E_2$

因此

$$\frac{V_1}{V_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-5)$$

此比值 K 称为电压“变换系数”或“变压比”(变比)。它等于变压器空载时原副绕组的端电压之比。变比通常标明在变压器的名牌上,例如“10/0.4kV”。因为同一变压器既可作升压变压器又可作降压变压器(油库用的电力变压器都是降压变压器),所以变比 K 通常是指高压绕组电压对低压绕组电压之比。

【例 1-1】 一台额定容量 $S_e = 600\text{kV}\cdot\text{A}$ 的单相变压器,接在电压 $V_1 = 10000\text{V}$ 的电源上。空载时它的副边电压 $V_{20} = 400\text{V}$ 。试求变压比 K 等于多少? 如果已知副绕组的匝数 $N_2 = 32$ 匝,原绕组匝数 N_1 等于多少?

解: 由 $K = \frac{V_1}{V_{20}} = \frac{10000}{400} = 25$

$$N_1 = KN_2 = 25 \times 32 = 800(\text{匝})$$

【例 1-2】 一台额定容量 $S_e = 600\text{kV}\cdot\text{A}$ 的单相变压器,原、副绕组匝数分别为 $N_1 = 480$ 匝、 $N_2 = 32$ 匝。空载时原边端电压 $V_1 = 6000\text{V}$ 。试求副边端电压 V_{20} 等于多少伏?

解: $K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{480}{32} = 15$

$$V_{20} = \frac{V_1}{K} = \frac{6000}{15} = 400\text{V}$$

三、变压器的满载运行

变压器的原边接在电源上,副边接上负载的运行情况叫做变压器的满载运行。

图 1-4 为变压器满载运行的原理示意图。

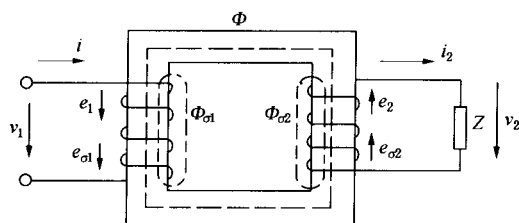


图 1-4 变压器的满载运行

当副绕组与负载接通时,由于电势 e_2 的作用,在负载与副绕组组成的电路内就有电流 i_2 通过,这时负载从变压器得到能量。由于有 i_2 通过副绕组、副绕组的磁势 i_2N_2 也要产生磁通,其绝大部分也通过铁芯闭合,因此,铁芯中的磁通是一个由原、副绕组的磁通势共同产生的合成磁通,用 Φ 表示,主磁通 Φ 通过原、副绕组产生的感应电动势为 e_1 和 e_2 ,此

外原副绕组的磁通势还将在各自绕组上产生漏磁电动势 $e_{\sigma 1}$ 和 $e_{\sigma 2}$ 。上述的电磁关系可表示为:

$$\begin{aligned} v_1 \rightarrow i_1 N_1 \rightarrow \Phi & \quad e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ \downarrow \Phi_{\sigma 1} & \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_{\sigma 1} = L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt} & \quad i_2 (i_2 N_2) \rightarrow \Phi_{\sigma 2} \rightarrow e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt} \end{aligned}$$

可见,变压器空载时,铁芯中的主磁通由原绕组的磁势 $i_0 N_1$ 产生,而变压器有载时,铁芯中的主磁通由原副绕组磁势 $i_1 N_1$ 与 $i_2 N_2$ 共同产生。根据铁芯线圈的电磁关系: $V = E = 4.44fN\Phi_m$ 由于空载与有载时外加电压 V_1 和频率 f 都不变,因此铁芯中的主磁通 Φ_m

也就不会改变(即 Φ_m 不随负载的变化而变化)。这样,有负载时产生主磁通的原、副绕组的合成磁势($i_1 N_1 + i_2 N_2$)应该和空载时产生主磁通的原绕组的磁势($i_0 N_1$)相等,即:

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$$

如用矢量表示为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-6)$$

上面已讲空载电流 i_0 很少,其有效值 I_0 仅为原绕组额定值 I_{1e} 的 3% ~ 8%,因此 $I_0 N_1$ 与 $I_1 N_1$ 相比,可以忽略,于是(1-6)式可写成

$$\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2$$

上式说明原、副绕组磁势大小近似相等,而相位相反,即副绕组的磁势对原绕组的磁势有去磁作用。若只考虑数量关系,则

$$I_1 N_1 \approx I_2 N_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (1-7)$$

和原绕组一样,副绕组漏磁通和副绕组线圈电阻 r_2 都较小,在其上产生的漏抗压降 $E_{\sigma 2}$ 和电阻压降 $I_2 r_2$ 也很小,都可忽略不计。因此变压器加上负载后,副绕组端电压(负载端电压) V_2 与主磁电动势 E_2 的数值关系仍可写为:

$$V_2 \approx E_2 = 4.44 N_2 f \Phi_m \quad (1-8)$$

因此有:

$$\frac{V_1}{V_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-9)$$

式(1-7)说明,副绕组中的电流与它们的匝数成反比。而式(1-9)说明原、副绕组的电压与它们的匝数成正比。即原、副绕组中的电流与电压成反比。因此,高压侧绕组的匝数多电流小而导线细,低压侧绕组的匝数小电流大而导线粗。

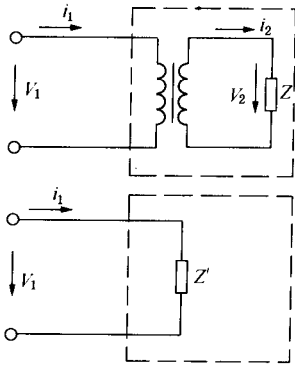
变压器有载时,由于漏抗压降和副线圈电阻压降的影响。副边电压 V_2 较空载时的电压 V_{20} 有所降低。副边电压变化的程度用“电压变化率”来表示,电压变化率是指空载电压(这时的空载电压为额定电压)与负载时端电压之差与额定电压的比值,用百分数表示,即为:

$$\Delta V = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \times 100\% = \frac{V_{2e} - V_2}{V_{2e}} \times 100\% \quad (1-10)$$

电压变化率是变压器的主要性能指标之一,它反映了变压器的供电质量。当负载变动时,变压器副边的电压变动越小,则供电的质量越高。为了保证负载的正常工作,国家对供电质量规定如下:35kV 及以上的电压,允许偏差 $\pm 5\%$;10kV 及以下的高压供电和动力供电为 $\pm 7\%$;使用变压器时应该尽可能在额定值情况下运行,以减少设备的投资和提高设备的利用率,同时满足负载的需要。但是,高压经过远距离输电到各用户(如油库)的变压器,在输电线上会产生电压损失(电压降),输电距离不同,实际输入用户变压器的电压各有不同程度的降低。因此,二次电压也会降低,严重时会影响用电设备的正常工作。为了解决这个矛盾,制造变压器时,在降压变压器一次绕组的一端有 95%、100%、105% 三个抽头。当电源电压高于额定电压时,可采用 105% 的抽头,当电源电压低于额定电压时,可采用 95% 的抽头,从而保证二次侧输出额定电压,即在使用中电源电压变动不能超过 $\pm 5\%$ 。

例如,某油库有一台变压器,一次侧额定电压为 6kV 二次侧额定电压为 400V,由于高

压输电较远，到油库变压器一次侧只有 5.7kV，因此，二次侧输出电压也相应降低。为了保证二次侧输出额定电压，必须减少一次绕组匝数（相当增加二次绕组匝数），高压侧应采用 95% 的抽头。



从上面讨论中我们知道变压器能起变换电压和变换电流的作用，此外它还有变换阻抗的作用。在电子线路中常用它来实现阻抗匹配。

在图 1-5 中，负载阻抗 Z 接在变压器副边，而图中的虚线框部分可以用一个阻抗 Z' 来等效代替。所谓等效，就是输入电路的电压、电流和功率不变。就是说直接接在电源上的阻抗 Z' 和接在变压器副边的负载阻抗 Z 是等效的。两者的关系可通过下面计算得出。

图 1-5 负载阻抗的等效变换

$$\frac{V_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} V_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{V_2}{I_2}$$

由图 1-5 可知

$$\frac{V_1}{I_1} = |Z'| \quad \frac{V_2}{I_2} = |Z|$$

代入则得

$$|Z'| = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 |Z|$$

匝数比不同，负载阻抗 Z 折算到（反映到）原边的等效阻抗 $|Z'|$ 也不同。我们可以采用不同的匝数比，把负载阻抗变换为所需的、比较合适的数值。这种做法通常称为阻抗匹配。

【例 1-3】 有一台降压变压器，原边电压 $V_1 = 3000\text{V}$ ，副边电压 $V_2 = 220\text{V}$ ，如果副边接用一台 $P = 25\text{kW}$ 的电炉，求变压器原副边电流各是多少安？这台电炉的电阻值是多少？

解：副边电流就是这台电阻炉的电流，即

$$I_2 = \frac{P}{V_2} = \frac{25 \times 10^3}{220} = 113.6\text{A}$$

原边电流

$$I_1 = \frac{V_2}{V_1} \times I_2 = \frac{220}{3000} \times 113.6 = 8.33\text{A}$$

$$R = \frac{V_2}{I_2} = \frac{220}{113.6} = 1.94\Omega$$

§ 1-3 变压器的功率和效率

变压器原绕组额定电压 V_{1e} 是按照变压器的绝缘强度和容许发热在设计时所规定的在原绕组上应加的电压值；副绕组额定电压 V_{2e} 是当变压器空载而原绕组电压为额定电压时的副绕组端的电压值。变压器原、副绕组的额定电流 I_{1e} 、 I_{2e} 是按变压器的容许发热在设计时所规定的原、副绕组中能长期容许通过的最大电流值。若实际电流超过此值，则由于发热过多使变压器受到损害。副绕组的额定电压与额定电流的乘积 $V_{2e} I_{2e}$ 叫作变压器的“额定容量”，

以 S_e 表示, 也就是变压器的额定视在功率, 以 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 为单位, 即

$$S_e = \frac{V_{2e} \cdot I_{2e}}{1000} \text{kV} \cdot \text{A} \quad (\text{三相变压器: } S_e = \frac{\sqrt{3} V_{2e} I_{2e}}{1000} \text{kV} \cdot \text{A}) \quad (1-11)$$

由于变压器在有载运行时的 V_2 一般不等于 V_{20} (即 V_{2e}), 所以变压器的实用视在功率与它的额定容量是有区别的。

变压器实际输出的有功功率 P_2 不仅决定于副绕组实际电压 V_2 和实际电流 I_2 , 而且还与负载的功率因数 $\cos \varphi_2$ 有关, 即

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

而输入功率决定于输出功率, 输入的有功功率 P_1 为

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

变压器的输入功率 P_1 大于输出功率 P_2 , 两者之差是变压器本身所消耗的功率, 称为变压器的“功率损失”, 或简称为“损耗”。变压器的损耗包括两部分。

(1) 铜损耗 P_{Cu} : 这是由于原、副绕组中具有电阻 r_1 、 r_2 , 当电流 i_1 、 i_2 通过时将有一部分电能变热能而损失掉, 其值为

$$P_{Cu} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 \quad (1-12)$$

由于铜耗是电阻上的功率损失, 它与电流的平方成正比, 所以在给定的变压器中, 这部分损失仅与变压器的负载有关。变压器的铜耗(表现为原、副绕组发热)可由短路实验测出, 如图 1-6 所示。

(2) 铁损耗 P_{Fe} : 它是由交变磁通穿过铁芯所引起的“涡流损失” P_{WL} 和“磁滞损失” P_{CZ} 组成的, 即

$$P_{Fe} = P_{WL} + P_{CZ} \quad (1-13)$$

铁损耗的大小与主磁通有关, 由于主磁通几乎是不随负载大小改变的, 所以在额定电压下, 铁耗与变压器负载大小无关, 故铁耗也叫做“固定损耗”。变压器的铁耗(表现为铁芯发热)可由空载实验测出。如图 1-7 所示。

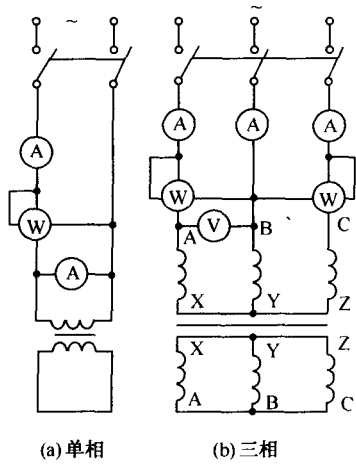


图 1-6 变压器短路试验接线图

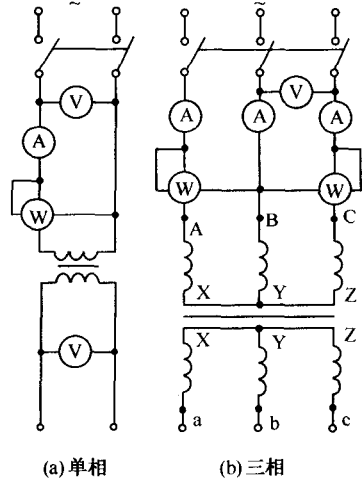


图 1-7 变压器空载试验接线图

变压器的效率是指它输出的有功功率 P_2 和输入有功功率 P_1 之比的百分数, 它与副边端电压的变化一样, 也是衡量变压器运行性能的主要指标之一。用符号 η 表示。即

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}}} \times 100\% \\ &= \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}}} \times 100\%\end{aligned}\quad (1-14)$$

变压器没有转动部分，因而没有机械摩擦损失，所以它的效率很高，大容量变压器的效率可达 98% ~ 99%。

当 $\eta = 1$ 时，可认为 $S_e = I_{2e} V_{2e} \approx I_{1e} V_{1e}$ (单相)， $S_e = \sqrt{3} I_{2e} V_{2e} = \sqrt{3} I_{1e} V_{1e}$ (三相)

【例 1-4】 一台变压器的额定容量 $S_e = 100\text{kV}\cdot\text{A}$ ，电压为 6300/230V，铁损 $P_{\text{Fe}} = 600\text{W}$ ，额定负载时的铜损 $P_{\text{Cu}} = 2400\text{W}$ 。求下列两种情况下变压器的效率①在额定负载情况下向功率因数为 0.9(滞后)的负载供电；②在 50% 负载下向功率因数为 0.8(滞后)的负载供电。

解：(1)在额定负载情况下：

变压器的输出功率为

$$P_2 = S_e \cos \varphi_2 = 100 \times 0.9 = 90\text{kW} = 90000\text{W}$$

故变压器的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fe}} + P_{\text{Cu}}} = \frac{90000}{90000 + 600 + 2400} = 0.968 = 96.8\%$$

(2)在 50% 负载情况

变压器的输出功率为

$$P_2 = 100 \times 0.5 \times 0.8 = 40\text{kW} = 40000\text{W}$$

变压器的铜损为

$$P'_{\text{Cu}} = 2400 \times 0.5^2 = 600\text{W}$$

故此时变压器的效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{Fe}} + P'_{\text{Cu}}} = \frac{40000}{40000 + 600 + 600} = 97.09\%$$

§ 1-4 三相变压器

现代交流电能的产生和输送几乎都采用三相制，欲把某一数值的交流电压变换为同频率的另一数值的三相电压，可用三台单相变压器联接成三相变压器组或用一台三相变压器来实现。

图 1-8 是三相变压器组。根据电力网的线电压和各个原绕组额定电压的大小，可把三个原绕组接成星形或三角形。根据供电需要，它们的副绕组也可以接成上述的形式。

图 1-9 是三相变压器，它的铁芯具有三个芯柱，在每个铁芯柱上各有一个原绕组和一个副绕组。各相高压绕组的起端和末端分别用 A、B、C 和 X、Y、Z 表示；低压绕组的起端和末端分别用 a、b、c 和 x、y、z 表示。如果把 X、Y、Z 接在一起，A、B、C 接到电源上，则原绕组为星形联接。在对称情况下，三相变压器各相电压都是对称的。由于变压器的铁芯磁通可以认为正比于电压，所以三相主磁通是对称的，和三相对称电压一样，三个主磁通矢量之和必等于零，即 $\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0$ ，也就是说，任何瞬间变压器的每一个铁芯柱中的磁通量等于其他两铁芯柱磁通量的代数和。图 1-10(a)画出三个主磁通的波形图，图 1-10(b)画出在 t_1 瞬间三个主磁通在变压器的三个铁芯柱的分布情况。由图可知，在 t_1 瞬间，A 相绕组的磁通达到正最大值，而 B 相和 C 相的磁通恰好是反方向，且为最大值的一半。

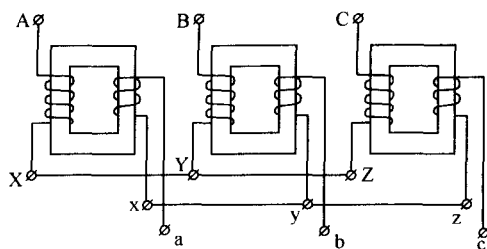


图 1-8 由三台单相变压器接成的 Y/Y 连接的三相变压器组

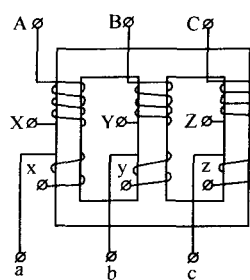
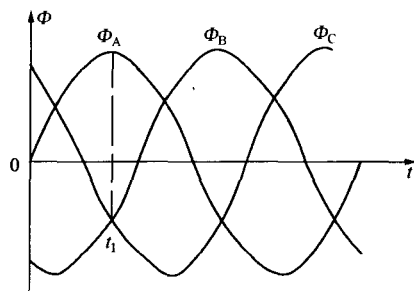
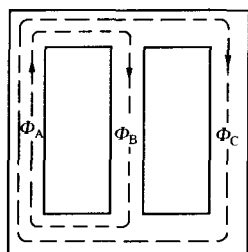


图 1-9 三相变压器



(a) 三相主磁通波形



(b) t_1 瞬时的磁通

图 1-10 三相变压器铁芯中的磁通

虽然铁芯中磁通的大小和方向时刻在变化,但由于铁芯柱中的磁通到达正方向最大值时总是依次地相差 120° 。因此,在三个副绕组中产生的正方向感应电动势也互有 120° 相位差。由此可见,三相变器的每一铁芯柱就相当于一个单相变压器。通过改变三相变压器原副绕组的匝数,便可达到升高或降低三相电压的目的。

三相电力变压器绕组的接法常用的有下列五种:Y/Y₀-12;Y/Y-12;Y₀/Y-12;Y/Δ-11;Y₀/Δ-11。在上述符号中,分子表示三相高压绕组的接法,分母表示三相低压绕组的接法,后面的数代表三相变压器的联接组别 ($K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1 \phi}{V_2 \phi}, \frac{1}{K} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{I_{1\phi}}{I_{2\phi}}$)。例如:Y/Y₀-12 表示三相变压器原绕组接成星形,副绕组也接成星形并有中线。在这种接法中,其电压变换关系为

$$V_{2l} = \sqrt{3} V_{2\phi} = \frac{\sqrt{3} V_{1\phi}}{K} = \frac{\sqrt{3} \left(\frac{V_{1l}}{\sqrt{3}} \right)}{K} = \frac{V_{1l}}{K} \quad (1-15)$$

又如 Y/Δ-11 表示三相变压器原绕组接成星形,副绕组接成三角形,这种接法其电压变换关系为

$$V_{2l} = V_{2\phi} = \frac{V_{1\phi}}{K} = \frac{V_{1l}}{\sqrt{3} K} \quad (1-16)$$

【例 1-5】 一台三相变压器,额定容量 $S_e = 400 \text{ kV} \cdot \text{A}$,原、副线圈额定电压 $V_{1e}/V_{2e} = 36000/6000 \text{ V}$,联接法为 Y/Δ-11,试求(1)原、副边额定电流;(2)在额定工作情况下,原、副线圈中实际通过的电流;(3)已知原线圈每相绕组 600 匝,问副线圈每相大约绕多少匝?

解：(1) 原边额定电流

$$I_{1e} = \frac{S_e}{\sqrt{3} V_{1e}} = \frac{400 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 36000} = 6.4A$$

副边额定电流

$$I_{2e} = \frac{S_e}{\sqrt{3} V_{2e}} = \frac{400 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 38.5A$$

(2) 额定工作时，原线圈因为星形联接，故原线圈中的实际电流

$$I_{1\Phi} = I_{1e} = 6.4A$$

副线圈为三角形联接，所以实际通过的电流

$$I_{2\Phi} = \frac{I_{2e}}{\sqrt{3}} = 22.2A$$

(3) 变压器原边每相电压

$$V_{1\Phi} = \frac{V_{1e}}{\sqrt{3}} = \frac{36000}{\sqrt{3}} \\ = 20800V$$

副边每相电压

$$V_{2\Phi} = V_{2e} = 6000V$$

故

$$N_2 = N_1 \times \frac{V_{2\Phi}}{V_{1\Phi}} = 600 \times \frac{6000}{20800} = 173(\text{匝})$$

(注：三相电力变压器的额定电流、电压均指线量)

§ 1-5 三相电力变压器的构造及铭牌

一、构造

通常油库中所有的三相油浸式电力变压器，如图 1-11 所示，它的主要结构部件有：组成器身的铁芯和绕组；置放器身且装有变压器的油箱以及绝缘套管、油枕等。下面对其主要部件构造及作用加以阐述。

(1) 铁芯：是变压器的导磁部分。为了减少磁滞与涡流损耗，铁芯通常用含硅量较高、彼此绝缘的硅钢片叠成。

(2) 绕组：分高压绕组和低压绕组两部分。低压绕组匝数少，用截面积较大的纱包铜线或铝线绕成筒形，套在铁芯柱上，因为低电压容易绝缘，所以，把它放在靠近铁芯柱的位置。高压绕组匝数多，用截面积较小的纱包铜线或铝线绕成筒形，套在低压绕组的外面。高压和低压绕组之间，保持一定的间隙，用以增强绝缘和便于变压器油的流动以利于散热。

(3) 绝缘套管：在油箱顶盖上(或两侧)，有高压和低压两排绝缘套管，它们由外部的瓷套与中间的穿心螺杆组成，并穿过变压器的箱壁。穿心螺杆将外线路和变压器绕组接通。

(4) 外壳(也叫油箱)：用铁板焊接成椭圆(或长方)筒形，并用箱盖加垫密封起来。在箱里面装着变压器的铁芯及绕组。此外，装满变压器油，用以加强绝缘，并利用油的对流作用提高散热能力。在油箱底部的一侧有一个放油阀门，用以放油样作油料理化分析及绝缘耐压试验。

油箱的外壁周围焊接着很多根管子，管子的上下两端和油箱的内部相通。当变压器油的

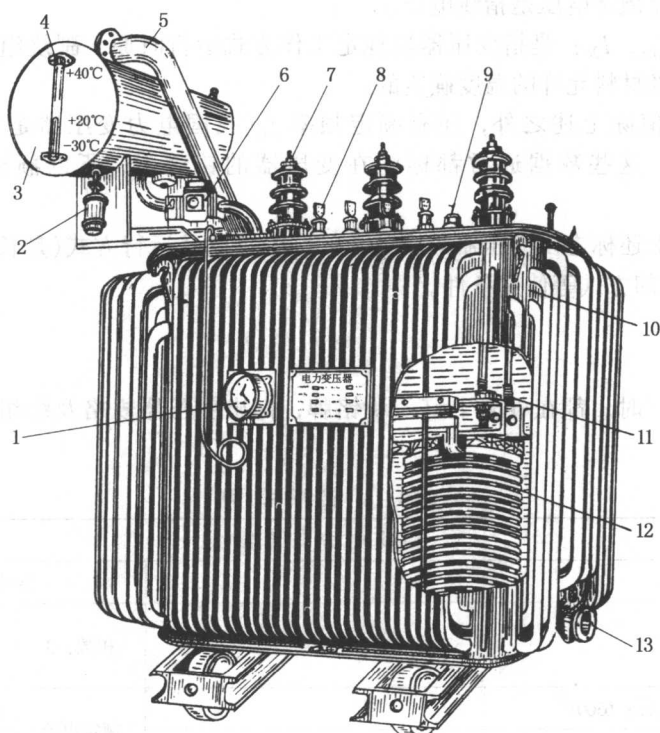


图 1-11 油浸式电力变压器

1—讯号式温度计；2—吸湿器；3—储油柜；4—油表；5—安全气道；6—气体继电器；7—高压套管；8—低压套管；
9—分接开关；10—油箱；11—铁芯；12—线圈；13—放油阀门

温度升高以后，就会膨胀上升，靠近外壳及管子中的油，冷却较快，冷却后的油沿着外壳及管子向下降。如此循环便可降低变压器的温度。

油箱壁的顶部或箱盖上，装着一只温度计和箱内部连通，可以直接指示箱内上层油温。

(5) 油枕：在外壳的顶盖上一端，横装着一个园筒形容器，叫油枕或储油器。油枕底部有油管和油箱内部连通，用以容纳因温度升高而膨胀的变压器油。并使油和空气的接触面减小，以降低油的氧化速度和侵入变压器油的水分。油枕的一端，装有油面指示计(玻璃管)，并标着油面线，在正常状态下，油枕的油面应在标准油面线上。

二、变压器的额定值

额定值是国家(或有关部门)对变压器正常运行时所作的使用规定。在额定工作状态下运行可以保证变压器长期可靠地工作，并且有良好的性能。

变压器的主要额定值分述如下：

(1) 额定容量 S_e ：其值等于变压器额定电压 V_e 与额定电流 I_e 的乘积。

$$\text{三相变压器的容量} \quad S_e = \sqrt{3} V_{2e} \cdot I_{2e} \approx \sqrt{3} V_{1e} I_{1e} \quad (\eta = 1) \quad (1-17)$$

$$\text{单相变压器的容量} \quad S_e = V_{2e} \cdot I_{2e} \approx V_{1e} I_{1e} \quad (\eta \approx 1) \quad (1-18)$$

变压器的容量 S_e 的单位是 $V \cdot A$ 或 $kV \cdot A$ 。

(2) 额定电压 V_{1e} 、 V_{2e} ：变压器的原边额定电压 V_{1e} 是指正常运行时，应该接至原边端点间的电压。副边额定电压 V_{2e} 是指变压器原边加额定电压，副边空载时的开路电压。