

The background of the cover features a stylized, high-contrast image of a transformer assembly line. The scene is dominated by dark, silhouetted metal structures and components, set against a vibrant, glowing background of orange, red, and yellow light rays that create a sense of depth and industrial activity. The overall aesthetic is technical and dramatic.

● 变压器制造技术丛书 ●

# 变压器装配工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编

机械工业出版社

TM405  
W-219  
7

变压器制造技术丛书

# 变压器装配工艺

变压器制造技术丛书编审委员会 编



机械工业出版社

867595

本书以大型电力变压器为主,第一、二章介绍了变压器装配工人应掌握的变压器基本理论知识,第三、四章重点介绍变压器的基本结构、装配技术、装配工艺和质量检测等内容;第五章简单介绍了电抗器、电炉变压器、整流变压器等几种特种变压器的结构和性能;第六、七章简要介绍了变压器常见故障的检查、排除及变压器的运输、安装和检修知识。

本书适用于从事变压器制造的技术工人、工程技术人员和专业技术培训人员;也可作为技校变压器专业师生的参考教材。

#### 图书在版编目(CIP)数据

变压器装配工艺/变压器制造技术丛书编审委员会编.  
—北京:机械工业出版社,1998.6  
(变压器制造技术丛书)  
ISBN 7-111-06069-5

I. 变… II. 变… III. 变压器-装配-工艺 IV. TM405

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 01342 号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
责任编辑:何月秋 版式设计:王颖 责任校对:张媛  
封面设计:姚毅 责任印制:路琳  
机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行  
1998 年 6 月第 1 版第 1 次印刷  
787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·10.25 印张·246 千字  
0 001—4 000 册  
定价:15.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

## 《变压器制造技术丛书》编审委员会名单

<b>主任</b>	熊观银			
<b>副主任</b>	杨师和	邢瑞祥		
<b>委员</b>	邢瑞祥	宋哲滨	钱敬明	魏春华
	杨师和	张金琢	王勉	王显文
	熊观银	王承志	李宪霞	杭小民
<b>主编</b>	魏春华	王显文	王承志	

**本书编者** 冷晨

**本书审者** 王承志

## 前 言

《变压器制造技术丛书》是为适应变压器行业技术发展的迫切需要,满足变压器行业操作工人的专业培训和工程技术人员的业务学习参考要求,同时满足社会不同文化层次读者的需要,根据原国家机械委电器局制定的变压器行业《工人技术等级标准》和工程技术人员继续教育的要求,受全国变压器行业职工教育研究会的委托,由沈阳变压器有限责任公司、保定天威集团、西安变压器厂等单位组织有实践经验的工程技术人员,参照《变压器专业工种技术工人培训教材》(内部发行),结合目前国内外变压器发展的最新技术,对原书作了大量的删减、补充和修改后编写而成的。新编的《变压器制造技术丛书》共分八册:

第一册 绝缘材料与绝缘件制造工艺

第二册 变压器绕组制造工艺

第三册 变压器铁心制造工艺

第四册 变压器装配工艺

第五册 变压器处理工艺

第六册 变压器试验

第七册 变压器油箱制造工艺

第八册 干式变压器制造工艺

本套书以操作工人为主要读者对象,同时照顾工程技术人员继续教育的需要和全国变压器行业各厂家的通用性,内容从原 35~220kV 电力变压器,扩大为 35~500kV 的各类变压器,包括从小型配电变压器到大型五柱铁心变压器;从传统的常规心式变压器到性能较优越的壳式变压器。在技术水平方面,除介绍国际 80 年代水平的内容外,还考虑到今后的发展,介绍了一些具有 90 年代甚至跨世纪水平的最新技术,以满足不同读者的需要。

由于编著者来自不同工厂、不同岗位,因此在掌握内容的深度和广度上不尽相同,各册书之间的水平和尺度免不了有所差别,也免不了存在一些局限性和片面性,甚至有错误之处,恳请有关专家、学者和广大读者提出宝贵意见,以便今后再版时进一步完善。

由于各企业工艺条件不同,在制造方法上也不完全相同,本套书中所述的工艺方法、工艺参数及具体操作规定和要领仅供参考,望不要生搬硬套本套书内容并代替各厂现行技术文件。

在编写本套书过程中,承蒙机械部教育司及机械工业出版社和编写厂家所在省市的上级领导给予的大力支持和指导,在此表示感谢。对原《变压器专业工种技术工人培训教材》的组织者和全体作者,以及承担本套书编写任务的厂家和编印过程中做了大量工作的同志表示谢意。

变压器制造技术丛书编审委员会

1997 年 12 月

# 目 录

前言

<b>第一章 变压器基本理论</b> .....	1
第一节 概述.....	1
第二节 变压器的基本工作原理.....	2
第三节 变压器的空载运行.....	5
第四节 变压器的负载运行.....	8
第五节 变压器运行时二次电压变化与调压装置 .....	14
第六节 变压器的短路 .....	16
第七节 变压器的损耗及效率 .....	18
第八节 变压器的发热和冷却 .....	21
复习思考题 .....	24
<b>第二章 三相变压器</b> .....	26
第一节 三相变压器的磁路系统 .....	26
第二节 变压器的联结组 .....	29
第三节 三相变压器的励磁电流、磁通和电动势波形.....	34
第四节 变压器的并联运行 .....	38
第五节 三绕组变压器 .....	40
第六节 自耦变压器 .....	42
复习思考题 .....	45
<b>第三章 电力变压器的结构</b> .....	46
第一节 大型电力变压器结构概述 .....	46
第二节 铁心 .....	46
第三节 绕组 .....	50
第四节 变压器的绝缘 .....	53
第五节 分接开关 .....	61
第六节 大型变压器的冷却结构 .....	66
第七节 油箱、套管和保护装置.....	69
复习思考题 .....	74
<b>第四章 变压器装配工艺与检查</b> .....	76
第一节 绕组套装 .....	76
第二节 器身检查和试验 .....	82
第三节 引线 .....	84
第四节 引线的检查和试验 .....	89
第五节 器身干燥、整理、压紧和下箱与接线 .....	92

第六节	器身进箱前的检查与测量 .....	95
第七节	器身受潮的防止及注油 .....	97
第八节	附件安装 .....	98
第九节	压泵与试漏 .....	100
第十节	拆附件及装箱 .....	101
第十一节	变压器的装配质量与变压器运行的可靠性 .....	102
	复习思考题 .....	105
<b>第五章</b>	<b>特种变压器 .....</b>	<b>106</b>
第一节	电抗器 .....	106
第二节	电炉变压器 .....	109
第三节	整流变压器 .....	112
第四节	试验变压器 .....	116
第五节	超高压变压器简介 .....	118
	复习思考题 .....	120
<b>第六章</b>	<b>变压器常见故障及处理 .....</b>	<b>121</b>
第一节	概述 .....	121
第二节	变压器空载试验故障 .....	123
第三节	工频耐压试验故障 .....	125
第四节	感应高压试验故障 .....	130
第五节	变压器负载试验中的几个问题 .....	132
第六节	变压器冲击试验故障 .....	133
第七节	局部放电故障 .....	135
	复习思考题 .....	139
<b>第七章</b>	<b>变压器的运输、安装和检修 .....</b>	<b>140</b>
第一节	运输概述 .....	140
第二节	大型变压器的无油运输 .....	141
第三节	变压器的现场安装 .....	142
第四节	变压器的检查 .....	145
第五节	变压器运行故障的分析与判断 .....	148
第六节	变压器运行故障的修理 .....	155
	复习思考题 .....	157

# 第一章 变压器基本理论

## 第一节 概 述

### 一、变压器的用途

变压器的用途很广，在国民经济的各个部门，都十分广泛地应用着各种各样的变压器。就电力系统而言，变压器就是一个主要的设备。要将大功率的电能输送到很远的地方，采用较低的电压传输是不可能的。这是因为，当采用较低的电压输电时，其相应的输电电流就很大。一方面大的电流将在输电线路引起很大的功率损耗；另一方面，大的电流还将在线路上引起很大的电压降，以致电能送不出去。例如，将 3000kW 功率的电能用端电压为 10kV 的发电机送电时，最远只能送到十几千米远的地方，而制造电压很高的发电机，目前在技术上还很难实现。为此，就只有依靠变压器来将发电机的端电压升高进行输电。一般来说，输电距离越远，输送功率越大时，要求的输电电压也越高。例如：用 110kV 电压可以将 5 万 kW 功率的电能输送到 50~150km 的地方；输电电压为 220kV 时，输送电能功率为 20~30 万 kW，输电距离可以达到 200~400km；使用 500kV 超高压输电时，能将 100 万 kW 功率的电能输送到 500km 以外的地方。因此，随着输电距离的增加，输电功率的增大，对变压器的容量和电压等级的要求也就越来越高。

当电能输送到受电区（例如城市或工厂）时，又必须用降压变压器将输电线上的高电压降低到配电系统的电压，然后再经过一系列的配电变压器将电压降低到用电电压以供使用（大型动力负荷用 3000V 或 6000V；小型动力负荷或照明负荷用 380/220V）。

由此可见，在电力系统中变压器的地位是十分重要的。不仅需要变压器的数量多（这是因为一般发电机与变压器的相对总容量之比是 1:5~1:8），而且要求其性能好、运行安全可靠。这就对变压器的制造部门提出了较高的要求。变压器除了应用在电力系统外，还应用在需要特种电源的工业企业。例如，给冶炼供电用的电炉变压器；电解或化工用的整流变压器；焊接用的弧焊变压器；试验用的试验变压器和调压器；交通运输用的电机车变压器；补偿用的电抗器；输电线路保护用的消弧线圈；测量用的互感器等等。

### 二、变压器的分类

变压器的种类很多，可以按不同的方式进行分类：

#### 1. 按用途分类

变压器按用途可以分为电力变压器；给冶炼供电用的电炉变压器；电解或化工用的整流变压器；焊接用的弧焊变压器；试验用的试验变压器和调压器；交通运输用的电机等变压器，补偿用的电抗器；测量用的互感器等。其中，电力变压器是用途最多、最广的变压器，其他变压器又称特种变压器。

#### 2. 按相数分类

变压器按相数可以分为单相变压器、三相变压器和多相变压器（如整流用的变压器）。



### 3. 按绕组分类

变压器按绕组可以分为双绕组变压器、自耦变压器、三绕组变压器和多绕组变压器。

### 4. 按冷却条件分类

变压器按冷却条件可以分为油浸变压器（又分为油浸自然风冷却、油浸吹风冷却、强油循环吹风冷却、强油循环水冷却等多种）、干式变压器和充气式变压器。

变压器除上述几种分类方法之外，还有很多种分类法。如：按调压方式可分为有载调压和无载调压变压器；按中性点绝缘水平可分为全绝缘变压器和半绝缘变压器（或称分级绝缘变压器）；按铁心形式可分为心式和壳式等，这里不再多述。但要说明一点，上列各类变压器，虽然在结构和工作性能方面各有特点，但它们的基本工作原理是一致的。因此，本书的大部分章节将着重讨论电力变压器的问题。

## 三、变压器的额定参数

1) 视在功率  $S$  用千伏安 (kVA) 来表示。

2) 额定电压  $U_{1N}/U_{2N}$  用千伏 (kV) 来表示，对于三相变压器，额定电压均指线电压。

3) 额定电流  $I_{1N}/I_{2N}$  用安 (A) 来表示，对于三相变压器，额定电流均指线电流。

视在功率、额定电压、额定电流的关系满足下式：

对于单相变压器

$$P_N = U_{1N} I_{1N}; P_N = U_{2N} I_{2N} \quad (1-1)$$

对于三相变压器

$$P_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N}; P_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \quad (1-2)$$

4) 频率  $f$ ，单位名称赫兹 (Hz)，我国工频定为 50Hz。

5) 阻抗电压即当一侧绕组短路，在另一侧绕组中流有额定电流时所施加的电压。一般均以额定电压的百分数来表示。

6) 空载损耗单位以瓦 (W) 或千瓦 (kW) 来表示。

7) 空载电流以额定电流的百分数表示。

8) 负载损耗单位以瓦 (W) 或千瓦 (kW) 来表示。

此外，在变压器的铭牌上还给出：相数、接线图与联结组、运行方式和冷却方式、变压器总质量<sup>⊖</sup>、油的质量、器身的质量等数据。

## 第二节 变压器的基本工作原理

### 一、电磁规律

#### 1. 基尔霍夫第一定律和第二定律

这是电路的定律，即在任一瞬间流过任意一个结点的电流的代数和等于零（基尔霍夫第一定律）。在任意回路中所有电动势之和恒等于各电阻上电压降之和（基尔霍夫第二定律）。基尔霍夫第二定律也可以称为电动势平衡规律，如果把回路中的电压降看作负的电动势，那么回路中电动势的总和等于零。

#### 2. 磁路规律

⊖ 此处质量指人们习惯称的重量，GB3102.3—93 规定用“质量”代替“重量”，单位为千克，不赞成用“重量”一词。

由于磁与电有相似的规律，故应用于电路的定律同样可以应用到磁路上。设  $\Phi$  为磁路中的磁通， $R_m$  为磁路的磁阻， $F_0$  为磁动势，应用欧姆定律则有：

$$\Phi = \frac{F_0}{R_m} \quad (1-3)$$

在同一磁路上有几个线圈就产生几个磁动势，磁通决定于磁动势的总和，即其合成磁动势。应用基尔霍夫定律，当有两个磁动势时，合成磁动势为：

$$F_0 = F_1 + F_2 \quad (1-4)$$

电路上的串并联也同样可以应用到磁路中。

### 3. 法拉第电磁感应定律

当磁通在线圈中交替时，感应电动势由下式决定：

$$e = -\frac{d\psi}{dt} \quad (1-5)$$

式中  $\frac{d\psi}{dt}$  表示磁链对时间的变化率， $\psi = N\Phi$ ，这是磁生电的规律。这个定律是变压器一次绕组把电功率传给二次绕组的基础。

## 二、变压器基本工作原理

变压器的基本组成部分是由绕在共同磁路上的两个或两个以上的绕组所构成的。图 1-1 表示一台单相变压器。当图 1-1 的一次绕组加上交流电压  $U_1$  时，一次绕组里就有交流电流  $I_1$  流过，此时一次绕组将产生一个磁动势  $F_1 = N_1 I_1$ （电生磁），这个磁动势就会在铁心中产生一个磁通  $\Phi$ （欧姆定律用于磁路），显然这个磁通也是交变的，所以它将在二次绕组（也包括一次绕组）中感应出一个电动势  $e_2$ （法拉第电磁感应定律）。当二次侧接上负载时，在  $E_2$  的作用下，负载中将有电流  $I_2$  流过。这就是变压器将电能从一次侧传递到二次侧的工作过程。用符号表示这个过程如下：

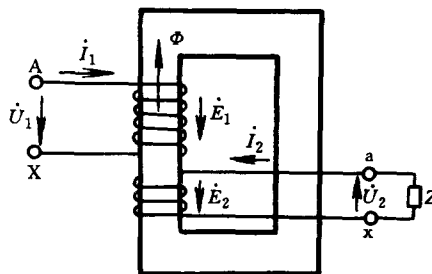


图 1-1 变压器工作原理图

$$U_1 \rightarrow I_1 \rightarrow F_1 \rightarrow \Phi \begin{cases} \rightarrow e_1 \\ \rightarrow e_2 \rightarrow I_2 \end{cases}$$

变压器工作的目的不仅在于实现能量从一次侧传递到二次侧，而是通过传递过程实现电压和电流的改变。

#### 1. 正方向的确定

图 1-1 中的箭头是按下述方法标出的。先考虑一次侧 AX 绕组。第一步定  $U_1$  的方向，当  $U_1$  为正时，A 的电位高于 X 的电位；第二步定  $I_1$  的方向，当  $I_1$  为正时，电流从高电位点 A 流入变压器；第三步定  $\Phi$  的方向，根据右手定则和电流正方向、绕向确定；第四步定  $E_1$  的方向，习惯上往往标  $I_1$  和  $E_1$  为同一方向，则图中  $E_1$  向下为正方向。这里要注意的是  $E_1$  的正方向是习惯上的标注，实际是当  $\Phi$  增长时，电动势的方向应产生削磁的电流，即实际的  $e_1$  此时向上（楞次定律），因此有式 (1-5)  $e = -\frac{d\psi}{dt}$  中的负号。现在考虑二次侧 ax 绕组，第一步定  $I_2$  的方向，根据右手定则，使正  $I_2$  产生正磁通；第二步定  $E_2$  方向，正电动势产生正电流；第三步定  $U_2$  的方向，要求电流  $I_2$  自高电位点流出。此时，功率自变压器输出。

按上述规定的正方向,当负载阻抗为一电阻时,以上各量的相量关系如图 1-2 所示,这是理想变压器的相量图。所谓理想变压器就是忽略变压器中各次要因素,如:不计导线电阻、没有漏磁、没有损耗等。

从图 1-1 和图 1-2 可以看出任一瞬间各量的方向和它们所表示的变压器中的物理现象。图 1-1 中箭头并不表示电压、电流的实际方向,例如实际电流可以反着图中的箭头流,这时可以说电流是负的。箭头方向的选定从原理上来说是可以任意的,但电磁规律是一定的,采用上述选择,就使表示电磁规律的方程与选定的方向配合,以正确表示出真实规律。

## 2. 电压比

设一次、二次绕组的匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ ,当变压器的一次侧接到频率为  $f$ 、电压为  $U_1$  的正弦交流电源时,根据前面讲过的变压器基本原理可知,铁心中的交变磁通  $\Phi$  将分别在一次、二次绕组中感应出电动势。一次绕组的感应电动势为:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

式中  $\frac{d\Phi}{dt}$  为磁通的变化率,负号表示磁通增大时,电动势  $e_1$  的实际方向与电动势的正方向相反。如果不计漏阻抗,根据回路电势平衡规律可得:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \quad (1-6)$$

可以推导出它们的数值(参考电工学):

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (1-7)$$

式中  $\Phi_m$  为磁通幅值。式(1-7)说明:当频率  $f$  及一次绕组匝数  $N_1$  一定时,磁通的大小决定于外加电压  $U_1$ 。

在二次侧同理可以得出:

$$U_2 = E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (1-8)$$

由式(1-7)及式(1-8)之比可得:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-9)$$

式(1-9)中  $K$  就是变压器的电压比,或称变比、匝数比。设计时,选择适当的电压比,就可以实现把一次电压变到需要的二次电压。一般习惯,取电压比  $K$  为高压绕组匝数与低压绕组匝数之比,因此  $K$  总大于 1。

## 3. 电流比

当二次侧接上负载后,二次绕组中就有电流  $I_2$ ,这个电流有改变铁心中磁通  $\Phi$  的趋势,为了保持式(1-7)中的  $\Phi$  不变,可以增加一次绕组输入电流以平衡二次绕组所产生的磁动势,使合成磁动势仍等于 0。

$$\text{即} \quad F_1 + F_2 = 0$$

式中  $F_1$  中包含励磁磁动势  $F_0$ 。

$$\text{则} \quad I_1 N_1 + I_2 N_2 = 0$$

$$I_1 = -\frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (1-10)$$

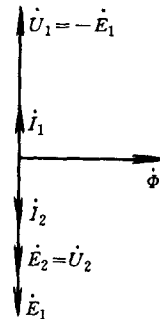


图 1-2 理想变压器相量图

由式 (1-10) 得出一次、二次电流与匝数的数量关系:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (1-11)$$

可见, 一次、二次电流与匝数成反比。

#### 4. 功率关系

从式 (1-9) 和式 (1-11) 可以得出:

$$P_1 = U_1 I_1 = \frac{U_2 N_1}{N_2} \times \frac{N_2 I_2}{N_1} = U_2 I_2 = P_2 \quad (1-12)$$

这是理想变压器的功率关系, 即输出功率等于输入功率, 效率是 100%。

从上面的讨论中得出的变压器改变电压的原理, 是在忽略了一些次要因素的前题下得出的结论, 这一结论是正确的。但是要研究实际变压器的性能, 即电压变化和效率, 就必须考虑其他因素。下面几节将讨论实际变压器的情况。

### 第三节 变压器的空载运行

变压器的一次绕组接在交流电源上而二次绕组开路时的运行叫做空载运行。空载运行时由于二次绕组中没有电流, 因此空载运行是比较简单的, 但它却是变压器的一种基本运行状态, 因此分析变压器时往往先从空载运行开始。

#### 一、变压器空载运行时的物理情况

图 1-3 是单相变压器空载运行的示意图。当一次侧加上额定频率为  $f$  的正弦波形额定电压  $U_1$  时, 图中各物理量的正方向按上节方法标出。一次绕组在电压  $U_1$  的作用下将有空载电流  $I_0$  流过, 并产生相应的空载磁动势  $F_0 = I_0 N_1$ , 在  $F_0$  的作用下铁心内将产生磁通。空载时铁心内产生的磁通可分为两个部分: 其中主要部分磁通  $\Phi$  是以闭合铁心为路径, 它既和一次绕组相匝链, 又和二次绕组相匝链, 是变压器传递能量的主要因素, 称它为主磁通; 还有另一部分磁通  $\Phi_{1L}$  它仅和一次绕组相匝链而不与二次绕组相匝链, 主要通过非磁性介质而形成闭合回路, 这部分磁通称为一次绕组的漏磁通。根据上节的磁路规律式 (1-3), 在一定磁动势作用下所产生的磁通大小与磁路的磁阻成反比。由于变压器的铁心都是用高导磁材料硅钢片制成的, 它的磁导率  $\mu$  为空气的数千倍。因此, 空载运行时, 绝大部分磁通都在铁心中闭合, 只有很少部分漏在铁心外面。根据试验分析, 空载运行时漏磁通仅占全部磁通的 0.1%~0.2%, 而 99% 以上是主磁通。

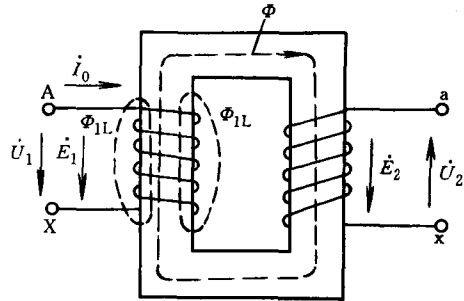


图 1-3 单相变压器空载运行示意图

根据电磁感应定律, 任一交变磁通都将在与其相匝链的绕组中感应出感应电动势。因此, 主磁通  $\Phi$  将分别在一次、二次绕组中感应出电动势  $e_1$  和  $e_2$ 。即

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-13)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-14)$$

漏磁通  $\Phi_{1l}$  则只在一次绕组中感应出漏感电动势  $e_{1l}$ 。即

$$e_{1l} = -N_1 \frac{d\Phi_{1l}}{dt} \quad (1-15)$$

下面进一步分析磁通和感应电动势间的相位关系。在第二节的式 (1-7) 中, 已经说明磁通的大小决定于外加电压, 这虽然只表示了数量关系而不是矢量关系, 但就波形而言, 当外加电压为额定频率的正弦波形时, 磁通的波形也基本上按正弦规律变化。磁通的正弦规律变化方程为:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-16)$$

式中  $\Phi_m$  是主磁通的幅值。

将式 (1-16) 代入式 (1-13), 经计算得:

$$e_1 = E_{1m} \sin (\omega t - 90^\circ) \quad (1-17)$$

式中  $E_{1m} = N_1 \omega \Phi_m$  为感应电动势  $e_1$  的最大值。

如换算为有效值  $E_1$ , 则

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 \omega \Phi_m = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

同理可以推导出  $e_2 = E_{2m} \sin (\omega t - 90^\circ)$  (1-18)

从式 (1-17) 和式 (1-18) 可以看出, 当主磁通按正弦规律变化时, 它所产生的感应电动势也按正弦规律变化, 但感应电动势在时间相位上落后于主磁通  $90^\circ$ 。

漏感电动势可以用一个电抗压降来表示, 即

$$E_1 = I_0 X_1 \quad (1-19)$$

其中  $X_1$  是一次绕组的漏电抗。

变压器空载运行时, 近似一个带铁心的电感绕组, 其漏电抗就是漏磁电感。因此, 漏感电动势在相位上落后于空载电流  $90^\circ$ 。

另外, 空载电流在一次绕组内产生电阻压降  $I_0 R_1$ , 显然电阻压降与空载电流同相位。

## 二、空载电流和空载损耗

变压器空载运行时, 一次侧输入的电流, 称为空载电流。空载电流在不考虑铁损时, 它纯粹是一个无功的磁化电流, 这是因为在这种情况下铁心励磁不需要消耗任何有功功率 ( $I_0$  在一次绕组中的铜损除外), 产生正弦磁通所需的励磁电流基本上也是正弦的, 且和磁通  $\Phi$  同相位。但是, 实际上变压器铁心是有铁损的, 即存在着磁滞现象和涡流现象。这时的空载电流除了无功分量即磁化电流外 (波形不再是正弦的), 还包括一个有功分量  $I_{0\omega}$ , 称损耗电流。空载电流就是这两个分量的相量合成。其中一个分量产生主磁通  $\Phi$ , 是无功的磁化分量, 因此与  $\Phi$  同相; 另一个分量供给铁心损耗, 是有功的损耗电流, 它超前无功分量  $90^\circ$ , 即与  $-E_1$  同相位。由这两个分量矢量合成后的空载电流则与磁通  $\Phi$  不再同相位, 而是要超前  $\Phi$  一个角度  $\alpha$ ,  $\alpha$  的大小决定于铁损的大小, 一般变压器铁心都用高导磁材料制成, 所以铁损不大, 故  $\alpha$  角一般也较小。

## 三、一次侧电动势平衡方程式

通过前面对外加电压、感应电动势、漏感电动势及电阻压降等物理量的分析, 按图 1-3 中

所规定的正方向，根据电动势平衡规律，很容易得出一次侧的电动势平衡方程式为：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1L} + \dot{I}_0 R_1 \quad (1-20)$$

如果用漏抗压降来代替漏感电动势  $E_{1L}$ ，则式 (1-20) 的矢量方程式变为：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-21)$$

式中  $Z_1 = R_1 + jX_1$  就是一次绕组的漏阻抗。

从式 (1-20) 可以看出，感应电动势  $E_1$  的大小和性质要由电源电压  $U_1$ 、漏感电动势  $E_{1L}$  及电阻压降  $I_0 R_1$  等三个因素所决定。但从量上来分析，一次绕组中的电阻压降通常是很小的，即当额定负载运行时，电阻压降  $I_{1N} R_1$  也不到  $U_{1N}$  的 1%。漏磁通  $\Phi_{1L}$  本身就很很小，因此漏感电动势也不大。在进行空载分析时，如果将这两个因素略去不计，则式 (1-20) 变为：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44fN_1\dot{\Phi}_m \quad (1-22)$$

这表明，在数量上  $E_1 \approx U_1$ ；在波形上，二者相似；在相位上相差  $180^\circ$ 。

综合上面的讨论可以得出下列结论：

1) 铁心内的主磁通主要决定于外加电源电压和频率，而与磁路的材料、性质、尺寸等因素无关。可以这样认为，是由于外加电源电压要求变压器产生一定的主磁通，以便能够在一次绕组上感应出一定的电动势  $E_1$  来和它相平衡。因此，也可以认为变压器的磁通主要由外加电源电压来控制。这是变压器的一个重要特性。

2) 磁路材料、性质、尺寸等只决定产生  $\Phi$  所需的空载电流  $I_0$ 。如果磁路由很好的磁性材料构成，则空载电流就很小。反之，空载电流将增大。

3) 当外加电压是正弦波时，感应电动势和主磁通的波形也基本上正弦的。空载电流在不计铁损和磁路不饱时波形也基本上正弦的，并与  $\Phi$  同相。计入铁损及磁路饱和后，空载电流波形变成尖顶波，其中含有三次以上的高次谐波，此时空载电流与  $\Phi$  不再同相，而出现一个  $\alpha$  角，空载电流的有功分量损耗电流越大， $\alpha$  角也越大，铁损也越大。

4) 如果电源电压和频率已给定（一般是这样），则变压器主磁通的大小就决定于一次绕组的匝数  $N_1$ 。反之如果希望有一定的主磁通  $\Phi$ ，那么就应按式 (1-22) 来确定一次绕组的匝数  $N_1$ 。

#### 四、空载运行的等效电路和相量图

##### 1. 等效电路

根据空载时一次侧电动势平衡方程式 (1-21) 很容易画出变压器空载运行的等效电路，如图 1-4 所示。

这个等效电路的电动势平衡方程为：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (R_1 + jX_1) + \dot{I}_0 (R_0 + jX_0) = \dot{I}_0 Z_1 - \dot{E}_1 \quad (1-23)$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (R_0 + jX_0) = \dot{I}_0 Z_0$$

式中  $R_1$  —— 一次绕组等值电阻；

$X_1$  —— 一次绕组等值漏电抗；

$R_0$  —— 铁心励磁时，铁心损耗的等值电阻；

$X_0$  —— 一次绕组中除掉漏磁以外的自感电抗，即励磁电路的等值电抗；

$Z_0$  —— 励磁电路等值阻抗。

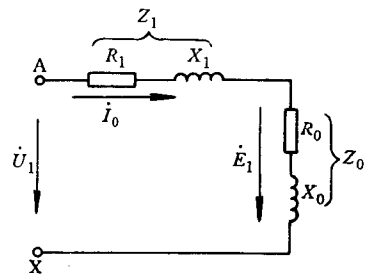


图 1-4 变压器空载等效电路

$R_0$ 、 $X_0$ 、 $Z_0$  均不是常数，但在实际运行中，当  $U_1$  变动不大时，可不考虑  $Z_0$  的变化。在数值上  $Z_0$  比漏阻抗  $Z_1$  大得多，这是由于在额定电压下的空载损耗比空载时的绕组电阻损耗大得多，主磁通比漏磁通大得多。

## 2. 相量图

根据以上对各个物理量的分析及一次侧电动势平衡方程，来制作变压器空载运行的相量图（图 1-5）。

1) 在水平轴方向画出主磁通  $\Phi_m$  作为参考相量。

2) 根据  $\dot{E} = -j4.44fN\dot{\Phi}_m$ ，画出  $\dot{E}_1$  和  $\dot{E}_2$  的相量，它们都落后于主磁通  $\Phi_m$   $90^\circ$ 。

3) 画空载电流  $I_0$  的相量，当计入铁损和磁路饱和时，空载电流有两个分量，先画无功分量磁化电流  $I_u$ ，它与  $\Phi_m$  同相，再画有功分量损耗电流  $I_{FB}$ ，它与  $-E_1$  同相，最后画出合成电流  $I_0$ ，它与  $\Phi_m$  夹角为  $\alpha$ 。

4) 画一次绕组的电阻压降  $I_0 R_1$ 。根据一次侧电动势平衡方程，电源电压相量  $\dot{U}_1$  由  $-E_1$ 、 $I_0 R_1$ 、 $\dot{E}_{1L}$  三个相量合成，符合回路中电动势总和等于零的电磁规律，所以画  $I_0 R_1$  之前先画出  $-E_1$ ，它与  $E_1$  差  $180^\circ$ ，然后在  $-E_1$  的端部画  $I_0 R_1$ ，它与  $I_0$  同相。

5) 画漏感电动势  $-\dot{E}_{1L} = jI_0 X_1$ ，它越前  $I_0$   $90^\circ$ （注意这里要画的漏感电动势是负的）。

6) 最后得到合成的  $\dot{U}_1$  相量。

这里在画相量图时放大了  $I_0$ 、 $I_0 R_1$ 、 $jI_0 X_1$  的比例，目的是为了看得清楚。实际上它们的数量都很小，按同一比例画就很难表示清楚。

至于  $\dot{E}_2$ ，我们在前面的分析中很少提到，这是因为空载运行时二次侧情况是最简单的。因二次侧开路而没有电流流过二次绕组，所以只有主磁通在二次绕组中感应出的感应电动势  $\dot{E}_2$ ，并且感应电动势就等于二次侧的端电压，即：

$$-\dot{E}_2 = \dot{U}_2 \quad (1-24)$$

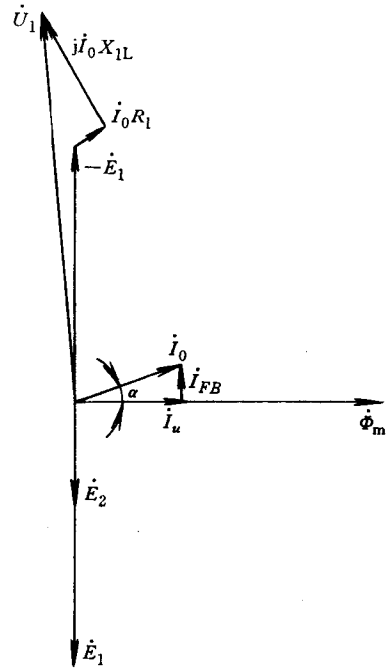


图 1-5 变压器空载相量图

## 第四节 变压器的负载运行

当变压器的一次绕组接到交流电源上，而在二次绕组的出线端接上负载时，二次绕组内就有电流  $I_2$  流过，这样变压器就进入负载运行状态，如图 1-6 所示。

### 一、负载运行时的磁动势平衡方程式

由于变压器一次、二次绕组间的联系主要是通过主磁通来实现的，因此研究变压器负载运行时，应先从磁路开始。

根据磁路的基本规律，无论变压器运行在何种状态下，都应该满足这些磁路的基本规律。

$$\text{即} \quad \Sigma \dot{F} = \dot{\Phi} R_m \quad (1-25)$$

式中  $\Sigma \dot{F}$ ——作用在磁路上的总磁动势；

$R_m$ ——主磁路的磁阻。

当变压器空载运行时, 由于  $I_2=0$ , 空载磁动势就等于励磁磁动势, 磁动势方程为:

$$\Sigma F = F_0 = I_0 N_1 = \Phi R_m \quad (1-26)$$

当变压器负载运行时, 一次侧、二次侧分别有电流  $I_1$  和  $I_2$  流过。这时在磁路上作用着一次侧磁动势  $F_1 = I_1 N_1$  及二次侧磁动势  $F_2 = I_2 N_2$ 。因而负载情况下铁心内的主磁通  $\Phi$  应该由一次侧、二次侧的合成磁动势所产生。其磁动势方程为:

$$\Sigma F = F_1 + F_2 = F_m = \Phi R_m \quad (1-27)$$

式中的  $F_m$  为负载时铁心中为产生主磁通  $\Phi$  所需的励磁磁动势。

在上节的结论中已经明确, 主磁通主要决定于外加电源电压和频率。因此, 当变压器由空载到负载的过程中, 只要保持电源电压和频率不变, 则主磁通也将保持不变。负载时, 合成磁动势  $F_m$  (励磁磁动势) 就是为了产生主磁通  $\Phi$  所需要的磁动势, 所以负载时的  $F_m$  就等于空载磁动势  $F_0$ 。

$$\text{即} \quad F_m = F_0 = I_0 N_1 \quad (1-28)$$

比较式 (1-28) 与式 (1-27) 可得:

$$F_1 + F_2 = F_0 \text{ 或:}$$

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1 \quad (1-29)$$

式 (1-29) 即为负载运行时的磁动势平衡方程式。它的物理过程可以理解为: 当二次侧出现电流  $I_2$  并形成磁动势  $F_2 = I_2 N_2$  时, 由于主磁通不变, 要求励磁磁动势  $I_0 N_1$  保持不变。因此, 一次侧就必然产生一个电流分量  $I_{1F}$ , 以便产生一个磁动势  $I_{1F} N_1$  抵消二次侧磁动势  $F_2$ , 即存在  $I_{1F} N_1 = -I_2 N_2$  和  $I_1 = I_0 + I_{1F}$  的关系, 只有这样, 才能保证励磁磁动势不变。由于一次侧、二次侧存在着这种磁动势平衡关系, 随着二次电流的增加, 一次电流也就相应增加, 磁动势平衡关系得以保持。再通过主磁通的电磁感应将功率从一次侧传到二次侧。变压器一次、二次侧的功率传递正是依靠这种磁动势平衡原理。

变压器负载后的电流关系是:

将式 (1-29) 两边同除以匝数  $N_1$  得:

$$I_1 + I_2 \frac{N_2}{N_1} = I_0$$

或

$$I_1 + \frac{I_2}{K} = I_0$$

也可写作:

$$I_1 = I_0 + \left( -\frac{I_2}{K} \right) = I_0 + I_{1F} \quad (1-30)$$

式中  $I_{1F} = -\frac{I_2}{K}$

从式 (1-30) 可以看出: 当变压器有负载时, 可以把一次绕组中的电流  $I_1$  看作是由两个

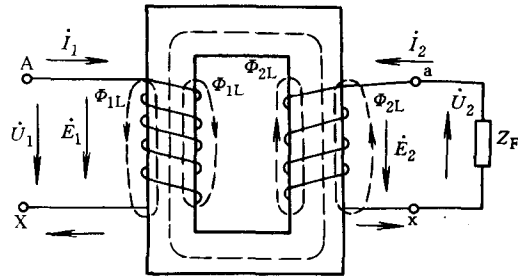


图 1-6 变压器负载运行示意图



分量组成：一个是励磁电流  $I_0$ ，用来产生主磁通；另一个是随负载电流  $I_2$  变化的分量  $I_F$ ，它所产生的磁动势用来抵消负载电流  $I_2$  所产生的磁动势。所以称为一次电流的负载分量。

## 二、负载运行时的电动势平衡关系

负载时，除了铁心的主磁通以外，还分别有一次、二次绕组漏磁通  $\Phi_{1L}$  与  $\Phi_{2L}$  单独与一次、二次绕组相匝链，二者分别由一次、二次绕组的磁动势产生。主磁通  $\Phi$  在一次、二次绕组分别感应电动势  $E_1$  与  $E_2$ ，漏磁通  $\Phi_{1L}$  在一次绕组感应出漏感电动势  $E_{1L}$ ， $\Phi_{2L}$  在二次绕组感应出  $E_{2L}$ 。电流  $I_1$  和  $I_2$  分别在一次、二次绕组中产生电阻压降  $I_1 R_1$  和  $I_2 R_2$ 。

根据图 1-6 所规定的正方向，可以列出负载时一次侧和二次侧的电动势平衡方程式。

$$\text{一次侧} \quad \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 R_1 + jI_1 X_1 = -\dot{E}_1 + I_1 (R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + I_1 Z_1 \quad (1-31)$$

$$\text{二次侧} \quad -\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 + I_2 R_2 + jI_2 X_2 = -\dot{E}_2 + I_2 (R_2 + jX_2)$$

$$\text{或} \quad \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - I_2 R_2 - jI_2 X_2 = \dot{E}_2 - I_2 Z_2 \quad (1-32)$$

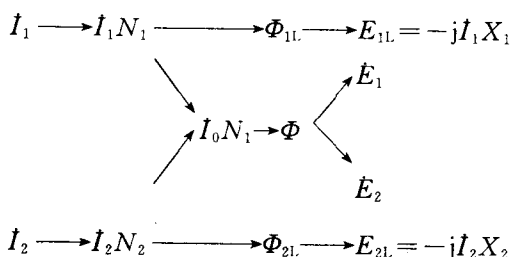
$-jI_2 X_2 = E_{2L}$  即二次绕组的漏感电动势用漏抗压降来表示。

式中  $R_2$ ——二次绕组电阻；

$X_2$ ——二次绕组漏电抗；

$Z_2$ ——二次绕组的漏阻抗。

综上所述，变压器负载运行时，一次、二次侧的电流、磁动势、磁通和电动势的关系如下：



## 三、变压器的折算法

在实际变压器中，由于  $N_1 \neq N_2$ ，这就使变压器的分析计算复杂了。如果能够设法把实际的二次绕组用一个匝数和一次绕组相同的绕组来代替，使电压比  $K=1$ ，则变压器的分析计算工作将会大大简化。用一个同一次绕组匝数相同的等效二次绕组来代替原来的二次绕组，必须做到对变压器的运行不受任何影响才行。从前面的分析可知，二次绕组内的电流是通过它的磁动势去影响一次绕组中的电流的。因此，只要保证二次绕组能产生同样的  $F_2$ ，那么从一次侧看过去，效果完全是一样的。然而要产生同样的  $F_2$ ，二次绕组的匝数就可以自由选定了。

现在保持一次绕组和铁心不变，而把二次绕组的匝数换成  $N_1$ ，但这时必须通过改变负载的阻抗值，使得原来二次绕组中的电流  $I_2$  改变为  $I_2'$ ，以满足  $I_2' N_1 = I_2 N_2 = F_2$  的关系。这个电流为  $I_2'$ 、匝数为  $N_1$  的二次绕组和原来电流为  $I_2$ 、匝数为  $N_2$  的二次绕组，对一次侧来说则完全是等效的。

把实际的二次绕组用一个和一次绕组匝数相同的等效二次绕组来代替，就称为二次绕组折算或叫归算到一次侧。这种方法就称为变压器的折算法。同样也可以把一次侧折算到二次侧。这只是人为处理问题的一种方法，即不改变其结构，也不改变其电磁本质。经过折算以后问题可以简化。如变压器原来具有两个电路和一个磁路就可以简化为一个等效的纯电路问