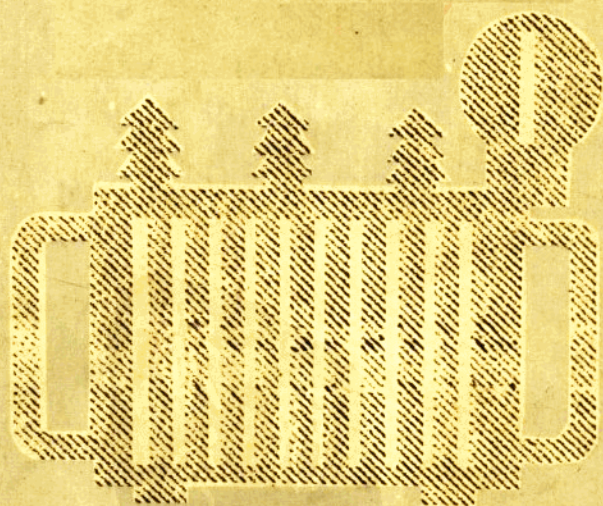


变压器专业工种 技术工人培训教材

第一分册



变压器专业工种技术工人培训教材编辑委员会

适用于变压器装配与检查工

西安变压器电炉厂

冷 晨 编

编委会主任：郭 斌

编委会副主任：王淑兰、熊洪满、杨师和

编 委：（以姓氏笔画为序）

马正昌、王玉华、王显文、王淑兰、朱宝来、
刘锦华、肖尔禄、杨师和、宗绪智、钟贵镒、
赵维君、徐振东、郭 斌、曹耀武、熊洪满、
魏光前。

主 编：曹耀武

副 主 编：朱宝来、王显文、马正昌

前 言

本教材是为适应变压器行业技术工人培训的迫切需要，根据国家机械委电器局制定的变压器行业《工人技术等级标准》，受全国变压器行业职工教育研究会委托，由沈阳变压器厂、西安变压器电炉厂、保定变压器厂、北京变压器厂和福州变压器厂等单位，有实践经验的工程技术人员联合编写的。它主要适用于变压器专业技术工种工人的培训和各变压器生产厂、变压器维修及运行部门的有关工程技术人员学习参考，也可做为技工学校变压器专业的参考教材。

本教材以中级工为主，初、高级工培训使用时，可结合本厂生产实际做必要的增减。考虑到教材在全国各变压器厂的通用性，教材内容以35~220千伏电力变压器为主，兼顾其它。新规定的初、中、高等级标准中有些内容虽超越了现时工人的实际水平或生产中尚未应用。但考虑到今后生产技术的发展，这部分内容也适当地纳入教材之中。全书共分十个分册：

- 第一分册：适用于变压器装配与检查工；
- 第二分册：适用于变压器绕线与检查工；
- 第三分册：适用于变压器铁芯装配与检查工；
- 第四分册：适用于变压器绝缘件制造与检查工；
- 第五分册：适用于产品试验工；
- 第六分册：适用于硅钢片冲剪与铁芯卷制成型处理工；
- 第七分册：适用于导线处理工；
- 第八分册：适用于变压器线圈压装处理工；
- 第九分册：适用于变压器处理工；
- 第十分册：适用于互感器装配与绕线工。

为便于组织技术工人培训，原则上一个工种编成一个分册。但考虑到变压器装配、变压器绕线、变压器铁芯装配和绝缘件制造四个工种的检查工，同这四个工种的等级标准内容很多是相同的。所以，合并在一起编写。两个工种合并后出现的共性和个性的不同要求，以共性为主，兼顾个性，确保教材完整性。

由于水平所限，教材中难免存在着局限性以及缺点、错误。恳请有关单位及学员在使用过程中，提出宝贵意见，以便在适当时机修改完善。

另外，由于各厂工艺条件不同，在制造方法上也不完全相同，本教材在讲述工艺方法时所提供的数据和有关规定，只供学员参考，不能代替各厂的现行技术文件。

在编写过程中，机械委电器工业职工教育研究会及沈阳、西安、保定各厂所在省、

市的上级领导机关给予我们的支持和指导，表示感谢；对沈阳变压器厂、西安变压器电炉厂和保定变压器厂在编印过程中做了大量工作的同志表示谢意。

变压器专业工种技术工人培训教材编辑委员会

一九八八年三月于沈阳

目 录

第一章 变压器基本理论

第一节 概述	3
第二节 变压器的基本工作原理	5
第三节 变压器空载运行	8
第四节 变压器的负载运行	12
第五节 变压器运行时付边电压变化与调压装置	21
第六节 变压器的短路	23
第七节 变压器的损耗及效率	26
第八节 变压器的发热和冷却	30

第二章 三相变压器

第一节 三相变压器的磁路系统	35
第二节 变压器的联接组	38
第三节 三相变压器的激磁电流、磁通和电势波形	44
第四节 变压器的并联运行	49
第五节 三绕组变压器	52
第六节 自耦变压器	54

第三章 电力变压器的结构

第一节 大型电力变压器结构概述	59
第二节 铁芯	60
第三节 线圈	62
第四节 变压器的绝缘	66
第五节 分接开关	75
第六节 大型变压器的冷却结构	81
第七节 油箱、套管和保护装置	86

第四章 变压器装配工艺与检查

第一节 线圈套装	93
第二节 器身检查和试验	102
第三节 引线	104
第四节 引线的检查和试验	110
第五节 器身干燥、整理和压紧	113
第六节 器身进箱前的检查和测量	116
第七节 防止器身受潮及注油	118
第八节 附件安装	120

第九节	压泵与试漏	122
第十节	拆附件及装箱	124
第五章 特种变压器		
第一节	电抗器	127
第二节	电炉变压器	131
第三节	整流变压器	135
第四节	试验变压器	139
第五节	超高压变压器简介	142
第六章 变压器试验及故障		
第一节	概述	146
第二节	变压器空载试验	148
第三节	工频耐压试验	152
第四节	感应高压试验	159
第五节	变压器短路阻抗、阻抗电压和负载损耗的测量	161
第六节	变压器冲击试验	163
第七节	变压器其它试验	163
第七章 变压器的运输安装和检修		
第一节	运输概述	174
第二节	大型变压器的无油运输	175
第三节	变压器的现场安装	176
第四节	变压器的检查	180
第五节	故障的分析与判断	183
第六节	变压器故障的修理	193

第一章 变压器基本理论

第一节 概述

一、变压器的用途

变压器的用途是多方面的，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。以电力系统而言，变压器就是一个主要的设备。我们知道，要将大功率的电能输送到很远的地方去，采用较低的电压来传输是不可能的。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。所以，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落以致使电能送不出去。例如，将3000千瓦的电能用发电机的端电压10千伏电压送电时，最远只能送到十几公里远的地方。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，当输电距离愈远，输送的功率愈大时，要求的输电电压也愈高。例如：用110千伏电压可以将5万千瓦的功率输送到50~150公里的地方；输电电压用220千伏时，输送容量为20~30万千瓦，输电距离可以达到200~400公里；使用500千伏超高压输电时，能将100万千瓦的功率输送到500公里以上的地方。因此，随着输电距离、输电容量的增长，对变压器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），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的电压以供使用（大型动力负荷用3000伏或6000伏；小型动力负荷或照明负荷用380/220伏）。

由此可见，在电力系统里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1:5~8，而且要求性能好，运行安全可靠。这就对制造部门提出了较高的要求。变压器除了应用在电力系统中，还应用在需要特种电源的工业企业中。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，焊接用的电焊变压器，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卷，测量用的互感器等等。

二、变压器分类

变压器的种类很多，可以从不同的观点来予以分类，能够分成许多类别。我们在日常生产中常按以下几种方式区别各类变压器。

1. 按用途分类

如上所提到的各种变压器，就是按变压器的用途进行分类的。其中最大的类别就是用于电力系统的变压器，称为电力变压器。其它各类变压器又统称杂类变压器或特种变压器。

2. 按其它方式分类

按相数来分，可以分为：

- 1) 单相变压器；
- 2) 三相变压器；
- 3) 多相变压器（如整流用六相变压器）。

按绕组来分，可以分为：

- 1) 双绕组变压器；
- 2) 自耦变压器；
- 3) 三绕组变压器；
- 4) 多绕组变压器。

按冷却条件来分，可以分为：

- 1) 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；
- 2) 干式变压器；
- 3) 充气式变压器。

除了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）；按铁芯型式可以分为心式和壳式等。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、变压器的额定数据

1) 额定容量 P_N 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，额定电压都是指线电压。

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

额定容量、额定电压、额定电流的关系满足下式。

对于单相变压器：

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

对于三相变压器：

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

4) 频率 f ，赫芝，我国定为50赫芝。

5) 阻抗电压,即当一侧线圈短路,在另一侧线圈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,单位以瓦或千瓦来表示。

7) 空载电流,以额定电流的百分数表示。

8) 负载损耗,单位以瓦或千瓦来表示。

此外,在变压器的名牌上还给出,相数,接线图与联接组,运行方式和冷却方式,变压器总重、油重、器身重等数据。

第二节 变压器的基本工作原理

一、电磁规律

我们在分析研究变压器基本工作原理之前,要先复习一下电磁基本规律,然后将这些电磁基本规律应用到变压器的电路和磁路中去,从而确定变压器的电压、电势、电流、磁势和磁通之间的相互关系,列出方程式。

电路磁路规律主要有下列几项:

1. 克氏第一和第二定律

这是电路的定律,即在电路的结点上,电流的代数和等于零(第一定律),在闭合的回路中所有的电势之和等于所有压降之和(第二定律)。第二定律也可以称为电势平衡规律,如果把回路中的压降看做为负的电势,那么回路中电势的总和等于零。

2. 磁路规律

由于磁与电有相似的规律,克氏第一和第二定律同样可以应用到磁路上。设 ϕ 为磁路中的磁通, R 为磁路的磁阻, F_0 为磁势,应用欧姆定律则有:

$$\phi = \frac{F_0}{R} \quad (1-3)$$

在同一磁路上有几个线圈就产生几个磁势,磁通决定于磁势的总和,即其合成磁势。当有两个磁势时,合成磁势为:

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

电路上的串并联也同样可以应用。

3. 法拉第电磁感应定律

当磁通在线圈中交变时,感应电势由下式决定:

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

式中 $\frac{d\phi}{dt}$ 表示磁通对时间的变化率, $\phi = w\phi$,这是磁生电的规律。这个定律是变压器原

绕组把电功率传给付绕组的基础。

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。根据前面几个电磁基本规律，我们很容易总结出变压器的基本工作原理。当图1—1的原绕组加上交流电压 $\dot{U}_1$ 时，原绕组里就有交流电流 $\dot{I}_1$ 流

过，此时原绕组就将产生一个磁势 $\dot{F}_1 = W_1 \dot{I}_1$ （电生磁），这个磁势就会在铁芯中产生一个磁通 ϕ （欧姆定律用于磁路），显然这个磁通也是交变的，所以它将在付绕组（也包括原绕组）中感应出一个电势 e_2 （法拉第定律）。当付边接上负载时，在 $\dot{E}_2$ 的作用下负载中将有电流 $\dot{I}_2$ 流过。这就是变压器将电能从原边传递到付边的工作过程。用符号表示这个过程如下：

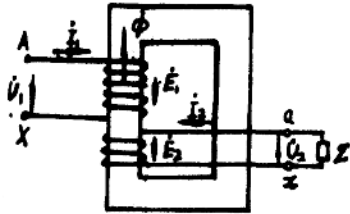


图 1—1 变压器原理图

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

变压器工作的目的不仅在于实现能量从原边传递到付边，而是通过传递过程实现改变电压和电流。所以下面我们将更加确切地讨论各个物理量之间的关系及改变电压、电流的原理。

1. 正方向的确定

图1—1中的箭头是按下述方法标出的。先考虑原边AX绕组，U标端电压的压降，E标绕组中电势的升高。第一步定 $\dot{U}_1$ 的方向，当 $\dot{U}_1$ 是正的，A的电位高于X的电位。第二步定 $\dot{I}_1$ 的方向，这里当 $\dot{I}_1$ 是正的时候，电流从高电位点A流入变压器。第三步定 ϕ 的方向，根据右手定则和电流正方向、绕向确定。第四步定 $\dot{E}_1$ 的方向，习惯上往往标 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{E}_1$ 为同一方向，图中 $\dot{E}_1$ 向下为正方向。这里要请注意 $\dot{E}_1$ 的正方向是习惯上的标注，实际是当 ϕ 增长时，电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（1—5）式 $e = - \frac{d\phi}{dt}$ 中的负号。现在考虑付边ax绕组，第一步定 $\dot{I}_2$ 的方向，根据右手定则，使正 $\dot{I}_2$ 产生正磁通。第二步定 $\dot{E}_2$ 方向，正电势产生正电流。第三步定 $\dot{U}_2$ 的方向，要求电流 $\dot{I}_2$ 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，以上各量的向量关系如图1—2所示，这是理想变压器的向量图。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。

我们可以借图 1—1 和图 1—2 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。注意图 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,这时我们说电流是负的。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。

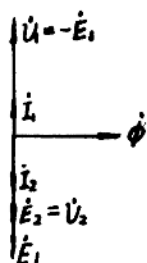


图 1—2 理想变压器向量图

2. 电压比

设原、付绕组的匝数分别为 W_1 及 W_2 , 当变压器的原边接到频率为 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 ϕ 将分别在原、付绕组中感应电势。原绕组感应电势为:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt}$$

式中 $\frac{d\phi}{dt}$ 为磁通的变化率, 负号表示磁通增大时, 电势 e_1 的实际方向与电势的正方向相

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)

$$U_1 = E_1 = 4.44fW_1\phi_m \quad (1-7)$$

式中 ϕ_m 为磁通幅值。公式说明, 当频率 f 及原边匝数 W_1 一定时, 磁通的大小决定于外加电压 U_1 。

在付边同理可以得出

$$U_2 = E_2 = 4.44fW_2\phi_m \quad (1-8)$$

由 (1—7) 及 (1—8) 式之比可得

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = k_{12} \quad (1-9)$$

式中 k_{12} 就是变压器的变比, 或叫匝数比。设计时, 选择适当的变比, 就可以实现把原边电压变到需要的付边电压。一般习惯, 取变比 k_{12} 为高压匝数与低压匝数之比, 因此 k_{12} 总大于 1。

3. 电流比

当付边接上负载后, 付绕组中就有电流 I_2 , 这个电流有趋势要改变铁心中的磁通, 为了保持 (1—7) 式中的 ϕ 不变, 原绕组输入电流增加以平衡付绕组产生的磁势, 合成磁势仍等于零,

$$\text{即} \quad \dot{F}_1 + \dot{F}_2 = 0$$

式中 $\dot{F}_1$ 中包含激磁磁势 $\dot{F}_0$ 。

$$\text{则} \quad \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = 0$$

$$\dot{I}_1 = - \frac{W_2}{W_1} \dot{I}_2 \quad (1-10)$$

由(1-10)得出原、付边电流数值关系是

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{k_{12}} \quad (1-11)$$

与匝数成反比。

4. 功率关系

从式(1-9)和式(1-11)可以得出

$$P_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2 = P_2 \quad (1-12)$$

这是理想变压器的功率关系，即输出等于输入，效率是100%。

从上面的讨论中我们得出了变压器改变电压的原理，是在忽略了一些次要因素的前提下得出的结论，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，就必须考虑其它因素。下面几节将讨论实际变压器的情况。

第三节 变压器空载运行

变压器的原绕组接在交流电源上而付绕组开路时的运行叫做空载运行。空载运行时由于付绕组中没有电流，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。当原边加上额定频率 f 的正弦波形的额定电压 U_1 时，图中各物理量的正方向按上节方法标出。原绕组在电压 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势 $F_0 = I_0 W_1$ ，在 F_0 的作用下铁芯内将要产生磁通。空载时铁芯内产生的磁通可分为两个部分，其中，主要的一部分磁通 ϕ 是以闭合铁芯为路径，它即和原绕组相匝链，又和付绕组相匝链，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 $\phi_{1\sigma}$ 它仅和原绕组相匝链而不与付绕组相匝链。主要通过非磁性介质而形成闭路，这部分磁通称为原绕组的漏磁通。根据上节的磁路规律1-3式，在一定磁势作用下所产生的磁通的大小与磁路的磁阻成反比。由于变压器的铁芯都是用高导磁材料硅钢片制成的，它的导磁系数 μ 为空气的数千倍。因此，空载运行时，绝大部分磁通都在铁芯中闭合，只有很少部分漏在铁芯外面。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。

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势。因此,主磁通 ϕ 将分别在原、付绕组中感应出电势 e_1 和 e_2 。即

$$e_1 = -W_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (1-13)$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (1-14)$$

漏磁通 $\phi_{1\sigma}$ 则只在原绕组中感应出漏感电势 $e_{1\sigma}$ 即

$$e_{1\sigma} = -W_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} \quad (1-15)$$

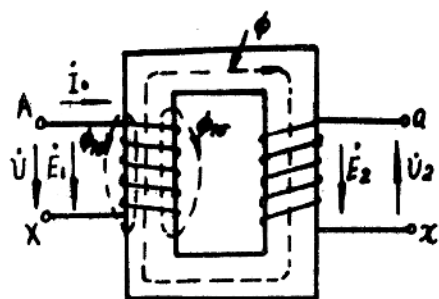


图 1-8 变压器空载运行

下面进一步分析磁通和感应电势间的相位关系。在第二节的(1-7)式中,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 ϕ_m 是主磁通的最大值。

将(1-16)代入(1-13)经计算得:

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

式中 $E_{1m} = W_1 \omega \phi_m$ 为感应电势 e_1 的最大值。

如换算为有效值 E_1 时:

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} W_1 \omega \phi_m = \frac{1}{\sqrt{2}} 2 \pi f W_1 \phi_m = 4.44 f W_1 \phi_m$$

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

从公式(1-17)和(1-18)可以看出,当主磁通按正弦规律变化时,它所产生的感应电势也按正弦规律变化,但感应电势在时间相位上落后于主磁通 90° 。

漏感电势可以用一个电抗压降来表示,即

$$E_{1\sigma} = I_0 x_1 \quad (1-19)$$

式中 x_1 是原绕组的漏电抗。

变压器空载运行时,近似一个带铁芯的电感线圈,其漏电抗就是漏磁电感。因此,漏感电势在相位上落后于空载电流 90° 。

另外,空载电流在原绕组内产生电阻压降 $I_0 r_1$,显然电阻压降同空载电流同相位。

二、空载电流和空载损耗

变压器空载运行时,原边输入的电流,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芯激磁不需要消耗任何有功功率（ I_0 在原绕组中的铜损除外），产生正弦磁通所需的激磁电流基本上也是正弦的，且和磁通 ϕ 同相位。但是，实际上变压器铁芯是有铁损的，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_{0a} 称损耗电流。空载电流就是这两个分量的向量合成。其中一个分量产生主磁通 ϕ ，是无功的磁化分量，因此与 ϕ 同相；另一个分量供给铁芯损耗，是有功的损耗电流，它超前无功分量 90° ，即与 $-\dot{E}_1$ 同相位。由这两个分量矢量合成后的空载电流则与磁通 ϕ 不再同相位，而是要超前 ϕ 一个角度 α ， α 的大小决定于铁损的大小，一般变压器铁芯都用高导磁材料制成，所以铁损不大，故 α 角一般也较小。

三、原边电势平衡方程式

通过前面对外加电压、感应电势、漏感电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，根据电势平衡规律，我们很容易得出原边的电势平衡方程式为：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 \quad (1-20)$$

如果用漏抗压降来代替漏感电势 $E_{1\sigma}$ 时，则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 $Z_1 = r_1 + jx_1$ 就是原绕组的漏阻抗。

从公式1—20可以看出，感应电势 E_1 的大小和性质要由电源电压 U_1 、漏感电势 $E_{1\sigma}$ 及电阻压降 $I_0 r_1$ 等三个因素所决定。但从量上来分析，原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 $\phi_{1\sigma}$ 本身就很很小，因此漏感电势也不大。在进行空载分析时，如果将这两个因素略去不计，则1—20式变为：

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44fW_1\dot{\phi}_m \quad (1-22)$$

就是上节中的1—6式。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° 。

综合上面的讨论可以得出下列结论：

1. 铁芯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，以便能够在原绕组上感应出一定的电势 E_1 来和它相平衡。因此，也可以认为变压器的主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 ϕ 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，感应电势和主磁通的波形也基本上是正弦的。空载电流在不计铁损和磁路不饱和时波形也基本上是正弦的，并与 ϕ 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 ϕ 不再

同相，而出现一个 α 角，空载电流的有功分量损耗电流愈大， α 角也愈大，铁损也愈大。

4. 如果电源电压和频率已给定（一般是这样），则变压器的主磁通的大小就决定于原绕组的匝数 W_1 。反之如果希望有一定的主磁通 Φ ，那么就应按1—22来确定。

四、空载运行的等值电路和向量图

1. 等值电路

根据空载时原边电势平衡方程式（1—21）很容易画出变压器空载运行的等值电路。如图（1—4）。这个等值电路的电势平衡方程为：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 (r_1 + jx_1) + \dot{I}_0 (r_0 + jx_0) = \dot{I}_0 Z_1 - \dot{E}_1$$

式中 $-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (r_0 + jx_0) = \dot{I}_0 Z_0$

（1—23）

等值电路中：

r_1 —原绕组等值电阻。

x_1 —原绕组等值漏电抗。

r_0 —铁芯激磁时，铁芯损耗的等值电阻。

x_0 —原绕组中除掉漏磁以外的自感电抗，即激磁电路的等值电抗。

z_0 —激磁电路等值阻抗。

r_0 、 x_0 、 z_0 均不是常数，但在实际运行中，当 $\dot{U}_1$ 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频损耗比空载时的线圈电阻损耗大得多，主磁通比漏磁通大得多。

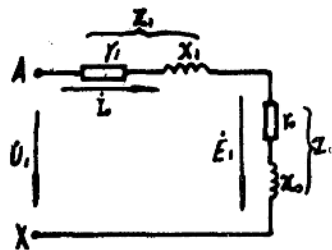


图 1—4 变压器空载等值电路

2. 向量图

根据以上对各个物理量的分析及原边电势平衡方程，现在我们来制作变压器空载运行的向量图。

1) 先在水平轴方向画出主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 作为参考向量；

2) 根据 $\dot{E} = -j4.44fW\dot{\Phi}_m$ ，画出 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 的向量，它们都落后于主磁通 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ ；

3) 下面画空载电流 $\dot{I}_0$ 的向量，当计入铁损和磁路饱和时，空载电流有二个分量，先画无功分量磁化电流，它与 $\dot{\Phi}_m$ 同相，再画有功分量损耗电流，它与 $-\dot{E}_1$ 同相，最后画出合成电流 $\dot{I}_0$ ，它与 $\dot{\Phi}_m$ 夹角 α 。

4) 画原绕组的电阻压降 $\dot{I}_0 r_1$ ，提示一点，根据原边电势平衡方程，电源电压向量 $\dot{U}_1$ 由 $-\dot{E}_1$ 、 $\dot{I}_0 r_1$ 、 $\dot{E}_1 \sigma$ 三个向量合成，符合回路中电势总和等于零的电磁规律，所以画 $\dot{I}_0 r_1$ 之前先画出 $-\dot{E}_1$ ，它与 $\dot{E}_1$ 差 180° ，然后在 $-\dot{E}_1$ 的端部画 $\dot{I}_0 r_1$ ，它与 $\dot{I}_0$ 同相。

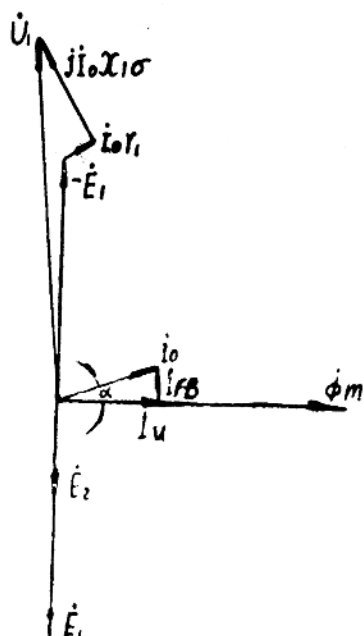


图 1—5 变压器空载向量图

5) 画漏感电势 $-\dot{E}_1\sigma = j\dot{I}_0 x_{1\sigma}$, 它超前 $\dot{I}_0 90^\circ$ 。注意这里我们要画的漏感电势是负的。

6) 最后得到合成的 $\dot{U}_1$ 向量。

这里应当说明一点：我们在画向量图时放大了 $\dot{I}_0$ 、 $\dot{I}_0 r_1$ 、 $j\dot{I}_0 x_{1\sigma}$ 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付边情况是最简单的。因付边开路而没有电流流过付绕组，所以只有主磁通在付绕组中感应出的感应电势 $\dot{E}_2$ ，并且感应电势就等于付端的端电压即：

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

第四节 变压器的负载运行

当变压器的原绕组接到交流电源上，而在付绕组的出线端接上负载时，于是付绕组内就有电流 I_2 流过，这样变压器就进入负载运行状态。如图 1—6。

一、负载运行时的磁势平衡方程式