

全国中等职业技术学校电工类专业

电机与变压器课教学参考书

与《电机与变压器》（第三版）配套



中国劳动社会保障出版社

全国中等职业技术学校电工类专业

电机与变压器课教学参考书

与《电机与变压器》(第三版) 配套

林益江 主编

中国劳动社会保障出版社

版权所有

翻印必究

图书在版编目(CIP)数据

电机与变压器课教学参考书/林益江主编. —北京: 中国劳动社会保障出版社, 2001

ISBN 7-5045-3290-8

I. 电…

II. 林…

III. ①电机—专业学校—教学参考资料 ②变压器—专业学校—教学参考资料

IV. ①TM3 ②TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 074578 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出 版 人: 张梦欣

*

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷 新华书店经销

787 毫米×1092 毫米 32 开本 5.25 印张 117 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 7 月第 2 次印刷

印数: 1000 册

定价: 13.00 元

读者服务部电话: 64929211

发行部电话: 64911190

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

简 介

本书是全国中等职业技术学校电工类专业通用教材《电机与变压器》(第三版)的配套用书。本书根据教材的结构顺序编写,各章按照教学要求、课时分配、教材分析、教学建议、教学中应注意的问题、参考资料以及习题选解等部分进行叙述。

本书由林益江、盛其成编写,林益江主编;项继谦、李学炎审稿,项继谦主审。

目 录

第一章 变压器的结构与工作原理·····	(1)
一、教学要求·····	(1)
二、课时分配·····	(1)
三、教材分析·····	(2)
四、教学建议·····	(4)
五、教学中应注意的问题·····	(14)
六、参考资料·····	(15)
七、习题选解·····	(16)
第二章 变压器的连接与并联运行·····	(19)
一、教学要求·····	(19)
二、课时分配·····	(19)
三、教材分析·····	(19)
四、教学建议·····	(22)
五、教学中应注意的问题·····	(27)
六、参考资料·····	(28)
七、习题选解·····	(29)
第三章 专用变压器·····	(32)
一、教学要求·····	(32)

二、课时分配	(32)
三、教材分析	(32)
四、教学建议	(34)
五、教学中应注意的问题	(38)
六、参考资料	(39)
七、习题选解	(40)
第四章 三相异步电动机	(42)
一、教学要求	(42)
二、课时分配	(42)
三、教材分析	(43)
四、教学建议	(45)
五、教学中应注意的问题	(71)
第五章 三相异步电动机绕组	(75)
一、教学要求	(75)
二、课时分配	(75)
三、教材分析	(75)
四、教学建议	(76)
五、教学中应注意的问题	(86)
六、习题选解	(86)
第六章 单相异步电动机	(89)
一、教学要求	(89)
二、课时分配	(89)
三、教材分析	(90)
四、教学建议	(91)

五、教学中应注意的问题·····	(103)
六、习题选解·····	(103)
第七章 直流电机·····	(105)
一、教学要求·····	(105)
二、课时分配·····	(106)
三、教材分析·····	(106)
四、教学建议·····	(108)
五、教学中应注意的问题·····	(132)
六、习题选解·····	(132)
第八章 三相同步电机·····	(136)
一、教学要求·····	(136)
二、课时分配·····	(136)
三、教材分析·····	(137)
四、教学建议·····	(138)
五、教学中应注意的问题·····	(144)
六、参考资料·····	(145)
七、习题选解·····	(147)
第九章 特种电机·····	(149)
一、教学要求·····	(149)
二、课时分配·····	(149)
三、教材分析·····	(149)
四、教学建议·····	(150)
五、教学中应注意的问题·····	(155)
六、参考资料·····	(155)
七、习题选解·····	(158)

第一章 变压器的结构与工作原理

一、教学要求

1. 掌握电力变压器的基本原理、结构。
2. 了解变压器的分类及用途。
3. 掌握变压器空载运行时电压变换关系、变比及负载运行时的电流变换关系，一次侧、二次侧能量传递关系和阻抗变换；理解相量图的画法。
4. 了解变压器的外特性、损耗与效率及其简单计算；掌握空载和短路实验的目的和实际意义。
5. 了解变压器的检修及一般试验方法。

二、课时分配

章节	名 称	总课时	讲课	实验	机动
第一章	变压器的结构与工作原理	14	11	2	1
§ 1—1	变压器的用途和分类		1		
§ 1—2	变压器的结构		1		
§ 1—3	变压器的空载运行及负载运行		3		
§ 1—4	变压器的阻抗变换		1		
§ 1—5	变压器的外特性		1		
§ 1—6	变压器的空载试验与短路试验		2	2	
§ 1—7	变压器的损耗、效率及冷却方式		1		
§ 1—8	变压器的故障检修及一般试验		1		

三、教材分析

在这一章中，系统阐述了变压器的结构与原理。在变压器的用途和分类这节中，重点突出了变压器的基本工作原理，明确了变压器是一种利用电磁感应原理制成的静止的电气设备。在传递电能的过程中因结构上一次侧、二次侧绕组的匝数不等，可以起到改变电压和电流的作用。在分析变压器的作用时，教材是以整个电力系统中电能的生产、输送、分配和使用等各个环节的电压等级不同而产生矛盾入手来说明的。即发电机的输出电压不高，用户能直接使用的电压很低，而电网远距离输送的电压较高。怎样解决这一矛盾呢？这就需要有一种电气设备——变压器来实现电压的变换，也就是电力变压器的作用。同时本节中还对变压器的其他用途和分类作了一般的介绍。

在变压器的结构这一节中，教材以国产油浸自冷式电力变压器为例说明了它的组成部分及各部分的作用。变压器的主要组成部件是铁心和绕组，它们构成了变压器的主体，称为器身。其他部件如油箱、绝缘套管、储油柜、冷却装置、安全气道、温度计和气体继电器（亦称瓦斯继电器）等附件，是为了解决变压器散热、绝缘、密封、安全等问题的需要而设置的。重点应突出绕组和铁心的结构材料和作用。

变压器的空载和负载运行这一节中，教材先分析空载状态，后分析负载状态，由简到繁，由特殊到一般，逐步说明变压器的电磁本质、电磁关系、电磁规律和运行性能。在空载运行分析中，首要的任务是明确交流量中正方向的选定问题。在此基础上，才能建立起一次侧、二次侧绕组的电压平衡方程式和电势平衡方程式。对于电压平衡方程式 $U_1 =$

$I_0 Z_{s1} - \dot{E}_1$, $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$ 因为空载电流 I_0 很小, 所以它的一次侧绕组阻抗上的压降 $I_0 Z_{s1}$ 也很小, 在忽略不计 $I_0 Z_{s1}$ 时, 一次侧绕组的电势平衡方程式成为 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 = j4.44 f N_1 \Phi_m$ 。这是一个很重要的方程式。它对分析变压器的性能和运行情况很有价值。对理想变压器而言, 当电源电压依正弦规律变化时, 主磁通 Φ_m 也将依正弦规律变化, 即 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 则主磁通在一次侧、二次侧绕组中的感应电动势分别为 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$, $e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$, 再根据有效值和平均值的换算可导出 $E = 4.44 f N \Phi_m$ 。

变压器负载运行时, 由于二次侧出现了负载电流 I_2 , I_2 产生的磁通企图削弱空载时由 I_0 形成的磁场 F_0 产生的主磁通 Φ_m , 而使一次侧、二次侧的 E_1 、 E_2 发生变化, 但是, 在电源电压 U_1 及频率 f 保持不变的情况下, 根据电势平衡方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 = j4.44 f N_1 \Phi_m$, Φ_m 应基本保持不变。因此, 二次侧出现负载电流 I_2 后, 一次侧电流 I_1 及其磁势 $I_1 N_1$ 也必定随之增大, 以抵消 $I_2 N_2$ 的作用。自然负载状态首先是建立磁势平衡方程式, 从磁势平衡方程式中可知, 变压器接负载以后, 一次侧的电流 I_1 由两部分组成。其一, 励磁分量; 其二, 负载分量。所以变压器接负载以后, 一次侧的电流就由空载时的 I_0 变成了 I_1 。从磁势平衡方程式中可以看出, 负载的变化引起 I_2 的变化, 导致一次侧的负载分量跟着发生变化, 这充分说明了二次侧向负载供给的电能是一次侧向电源索取的, 是通过交变的工作磁通传递实现的。磁势平衡方程式中, 如果忽略 I_0 不计, $I_1 \approx \frac{N_2}{N_1} I_2$, 即电流与匝数近似成反比的关系。负载状态下的磁势平衡方程式是本节

的重点内容。变压器阻抗变换在电子线路中应用较广泛，教材通过实际例子验证了。把阻抗较小的负载，通过变压器的阻抗变换后成为等效阻抗较大的负载，从而得到较大的输出功率。本节的重点是阻抗变换的原理及其应用。

变压器的外特性是反映二次侧电压 U_2 与负载电流 I_2 的关系特性，本节主要论述变压器接负载以后，二次侧电压发生变化的原因及电压调整率的物理意义。

在变压器的空载试验和短路试验这一节中，教材主要论述了试验的目的和方法。空载试验，主要是为了测定变比 K ，空载电流 I_0 ，空载损耗功率 P_0 和励磁阻抗 Z_m 等。而励磁阻抗是决定 I_0 大小的重要参数。短路试验，主要是为了测取短路电压和短路损耗，以便计算出变压器的短路阻抗。短路阻抗是一个较重要的参数。本节的重点是试验的目的、意义和方法。

变压器的损耗基本上就是铜耗和铁耗，其中铜耗是可变损耗，铁耗是不变的损耗。由于变压器是一种高效率设备，损耗是很小的，所以想通过直接测量输入功率 P_1 ，输出功率 P_2 的方法求取效率是很难的，故有必要整理出一种实用的效率计算公式，它实际上就是效率特性。本节还介绍了变压器的冷却方式。而重点应突出变压器效率 η 的实际意义和计算方法。

本章最后一节介绍了电力变压器的故障检查及一般试验。其目的是保证变压器的安全可靠的运行。检查的方法主要分外部观察和内部测试两种。而试验的项目主要有绝缘电阻、直流电阻的测量和耐压试验。

四、教学建议

§1—1 变压器的用途和分类

这节课在教学方法上应当注意灵活性，要根据学生的实

际,选择适当的教学方法。在讲述变压器的用途和分类之前,先讲述电能 in 科学技术和生产发展中的地位和作用。通过电力系统的示意图(可参照教材图 1—2)说明电能的生产、输送、分配和使用的整个过程,然后讲述这几个环节的电压等级是不同的,发电机的输出电压通常为 3.15 kV、6.3 kV 和 10.5 kV,输电线路的电压通常为 35 kV、220 kV、500 kV,而用户电压为 0.38 kV,电力系统中的电压变换需要通过一种电气设备即变压器来实现,从而引出变压器的作用。它的工作原理是利用电磁感应定律来完成电能传递任务的。讲变压器的基本原理必须建立这样一个概念,即只有通过交流电产生的磁场发生交变磁通,才能在彼此没有电的直接联系的两个绕组中感生电势。这就体现了是由交变的磁通把本来没有电的直接联系的两个绕组建立了电的联系,从而才能把变压器的一次侧向电源吸收的电能传递给二次侧而向负载进行分配和输送。这是变压器工作原理的实质所在,反之对直流电就不存在变压的问题。同时也要讲清为什么高压输电能节省投资和电能的损耗。这是本节的重点。关于变压器的其他用途及分类作一般的介绍即可。

§ 1—2 变压器的结构

电力变压器的结构比较复杂,对初学者来说很难理解。因此在讲述这一节的内容时,应把握主次,把讲课的重点放在主要部分,即绕组和铁心的结构和作用上,尽可能地利用模型和挂图等教具,使学生建立感性认识。绕组是变压器的电路部分,常用带绝缘的铜或铝线绕制而成。不同绕组之间,同一绕组的匝数之间及绕组与铁心之间都是相互绝缘的,铁心是变压器的磁路部分;又作为器身的骨架,用来固定和支撑绕组。铁心通常采用厚度为 0.35 mm 或 0.5 mm

的两面涂有绝缘漆膜的硅钢片叠成。每片之间只有磁的联系而没有电的联系，并强调冷轧硅钢片的优点和工艺上的特殊要求。这样制造的目的是为了提高导磁性能，减少涡流损耗。对于绕组的排列和铁心柱截面的结构，不宜过细讲述。而对主要附件：油箱、储油柜、瓦斯继电器、分接开关、绝缘套管、安全气道、测量装置的结构和原理作一般介绍即可。但要强调它们的功能，装设附件的目的是为了解决散热、绝缘、密封、安全等问题，对保证变压器能安全可靠地运行是必不可少的。

§ 1—3 变压器的空载运行及负载运行

变压器工作状态分析是本章的一个重点，也是一个难点。在讲述变压器的空载运行主要应突出以下几个重要概念：电、磁各量正方向的规定；一次侧、二次侧电压平衡方程式；空载电流、变比。并弄清以下几个电、磁量的关系：主磁通与漏磁通、感应电势与主磁通、漏磁电势与漏电抗。

首先应交代一下空载状态的物理概念。所谓空载，是指变压器一次侧绕组接上额定的正弦电压，二次侧绕组开路的状态。空载运行是变压器的一种极限运行状态，也是最简单的运行情况。对空载运行状态进行研究，既有理论意义，又有实用价值。

关于正方向的规定，应使学生明确正方向是可以任意规定的，但在研究问题时，选取正方向通常有一个习惯标注法，即变压器一次侧按负载的惯例规定正方向（一次侧对电源相当于负载），电源电压正方向由 $1U_1$ 指向 $1U_2$ ，电流 I_0 的正方向由 $1U_1$ 端流入变压器；变压器二次侧对负载而言相当于一个电源，习惯上就按电源的惯例来规定其正方向。所以，二次侧电流 I_2 的正方向与 E_2 一致， U_{02} 的正方向规定依 I_2 在负载中的电压降来确定。

应强调指出，电磁定律是规律，是不能改变的。因此，凡是反映电磁规律的有关物理量 E 、 Φ ，它们的正方向选定必须要与反映电磁规律的方程式紧密配合，否则就不能反映真实的规律。为此，规定 Φ_m 的正方向必须与励磁电流 I_0 遵守右手螺旋法则； E_1 、 E_2 的正方向必须与 Φ_m 遵守右手螺旋法则。见图 1—1。

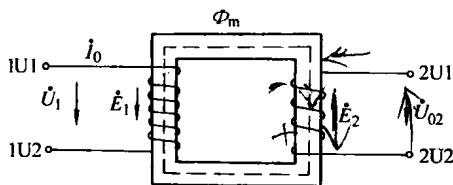


图 1—1

讲述感应电动势 E 的计算，主要突出法拉第电磁感应定律。当电源电压依正弦规律变化时，主磁通也将依正弦规律变化。设 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，则主磁通在一次侧、二次侧绕组中的感应电势分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = -\sqrt{2} E_1 \cos \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin (\omega t - 90^\circ)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = -\sqrt{2} E_2 \cos \omega t = \sqrt{2} E_2 \sin (\omega t - 90^\circ)$$

感应电势与主磁通的数值关系为

$$E_1 = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \sqrt{2} \pi f N_2 \Phi_m = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

上两式表明，变压器绕组内的感应电势的大小与频率、绕组匝数、主磁通最大值成正比。由此也很容易得出变比 K 的公式：

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_m}{4.44 f N_2 \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2}$$

在理想情况下：由于 $E_1 \approx U_1$, $E_2 \approx U_2$, 故 $K \approx \frac{U_1}{U_2}$

实际变压器与理想变压器相比，绕组中多了一个漏磁通 Φ_{sl} 。主磁通 Φ_m 和漏磁通 Φ_{sl} 在性质上、作用上都不相同，现将两者比较如表 1—1。

表 1—1 主磁通和漏磁通的比较

	回路	性质	与励磁电流关系	作用
主磁通	沿铁心磁路而闭合	受铁心饱和影响	非线性	传递能量
漏磁通	沿空气或油等非铁磁材料而闭合	不受铁心饱和影响	线性	不能传递能量 产生内阻压降

讲述变压器的负载运行，主要突出一个中心内容：磁势平衡方程式。而要正确理解此方程式，必须先分析负载时的基本电磁过程。

变压器空载时，铁心中的主磁通仅由一次侧空载电流 I_0 产生，主磁通在一次侧、二次侧绕组的感应电势为 E_1 、 E_2 ，分别建立了一次侧、二次侧的电势平衡：空载电流 I_0 恰能产生维持这一种电势平衡所需要的主磁通 Φ_m 。当二次侧绕组接上负载后，在电势 E_2 的作用下，二次侧绕组便有电流 I_2 流过，如教材图 1—17 所示。 I_2 也将产生磁势 $I_2 N_2$ ，并作用于铁心磁路，企图改变主磁通 Φ_m 及其感生的电势 E_1 和 E_2 ，打破空载时的平衡状态。但当 U_1 及 f 一定时，为保持 U_1 与 $-E_1$ 的平衡，一次侧电流必须由 I_0 增为 I_1 ，使一次侧磁势相应地由 $I_0 N_1$ 增为 $I_1 N_1$ ，用其所增加的磁势去抵偿二次侧磁势的反应，才能维持主磁通不变，建立起负载运行时新的电磁平衡状态。这种情况下，主磁通

Φ_m 实际上由一次侧、二次侧的合成磁势 ($I_1 N_1 + I_2 N_2$) 所产生。也就是说, 负载状态下两个磁势共同建立的主磁通, 应该等于空载状态下一个磁势建立的主磁通。于是就建立了负载状态下的磁势平衡方程式: $I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_0 N_1$ 。

从磁势平衡方程式中可得到: $I_1 = I_0 + (-\frac{N_2}{N_1} I_2)$ 。说明负载时一次侧绕组的电流 I_1 由两个分量组成, 一个是励磁分量 I_0 , 它是用来建立 ($\frac{N_1}{N_2} I_2$) 主磁通的, 另一个是负载分量, 它是用来产生磁势以抵偿二次侧磁势对主磁通的影响。同时, 上式进一步说明了, 由于二次侧绕组内电流 I_2 的增减, 从而形成电流从一次侧向二次侧的传递, 论证了变压器的工作性质只能是进行电能传递的理论。

如果忽略 I_0 不计, 上式可演变成 $I_1 \approx (-\frac{N_2}{N_1} I_2)$, 如只考虑数值关系, 则有 $\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1}$ 。即是说, 变压器一次侧、二次侧绕组的电流与一次侧、二次侧绕组的匝数近似成反比, 这说明了变压器有变换电流的作用。

讲解中, 应尽量把原理图、等效电路图、矢量图和电压方程式结合起来讲, 很形象, 便于理解记忆。

§ 1—4 变压器的阻抗变换

本节重点讲解阻抗变换公式的由来及其在电子线路中的应用

则
$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1/I_1}{U_2/I_2} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} = K \cdot K = K^2$$

在讲授中建议教师结合阻抗比公式举例说明它的应用: 如图 1—2 所示, 设负载获得最大功率为 36 W, 问若负

载不通过变压器而直接接电压 U_1 ，则负载电阻抗应为多大，才能保证负载仍然获得 36 W 的功率？作简单的计算，就可得出 $Z_1 = 36 \Omega$ 。为此教师可向学生说明从获得相同功率的角度讲，将阻抗较小的负载通过变压器（变比 $K > 1$ ）接到交流电源上，和将阻抗值较大的负载直接接在交流电源上的效果是一样的。也就是说，从一个阻抗值较小的负载通过变压器变换后，就可“变成”阻抗值较大的负载来理解为什么变压器能够变换阻抗的原理。阻抗变换的目的是为了使负载获得最大功率，而不同的变比可实现不同的阻抗变换，所以应“合理地选择变比”。

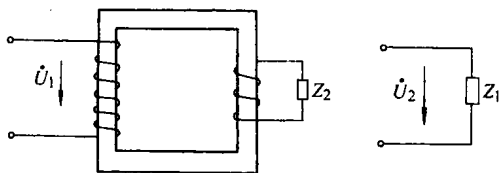


图 1—2

§ 1—5 变压器的外特性

讲述本节内容时，应明确分析外特性的目的。其目的是分析影响电压变化率的各种因素，并计算变压器的电压变化率。

所谓外特性，是指一次侧电压 U_1 和负载的功率因数 $\cos \varphi_2$ 一定时，二次侧电压 U_2 与负载电流 I_2 的关系。理解外特性有两层意思，其一，负载的性质一定时，二次侧端电压的变化仅取决于负载的大小。负载电流越大输出电压变化越大。其二，负载电流的大小一定，二次侧端电压的变化仅取决于负载的性质。当 $\cos \varphi_2 = 1$ 时，即纯电阻负载，端电压下降的程度就小。当 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 时，为感性负载，端电