



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

电机与电气控制技术

第2版

许 蓼 主编



机械工业出版社



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

电机与电气控制技术

第 2 版

主 编 许 蓼
参 编 苏世军



机械工业出版社

本书内容丰富、重点突出、图文并茂、讲究实用、层次分明、讲解清晰。它综合了“电机学”、“电力拖动基础”和“工厂电气控制设备”等课程的基本内容，以电动机为驱动元件、低压电器为控制与保护元件，讲述了拖动与控制、电气控制设备等方面的内容。其中，又以三相异步电动机及其拖动和控制为重点，以电气控制基本环节为主线。本书以培养应用型人才为目标，以技能培养为出发点，以劳动和社会保障部制定的“维修电工”中级职业标准要求为主要依据，实现对学生电工基本知识和技能的培养。

本书主要内容有：变压器、三相异步电动机、直流电动机、常用控制电机、常用低压电器、电气控制电路基本环节、典型设备电气控制电路分析等。

为方便教学，本书配有电子教案，凡选用本书作为教材的学校、单位，均可来电来函免费索取，联系电话：010 - 88379195，或登陆网站（www.cmpedu.com）进行注册、下载。

本书为三年制中等职业教育电气类专业的国家规划教材，亦可供相关专业师生、从事现场工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电机与电气控制技术/许蓼主编. 第2版. —北京：机械工业出版社，2007.3（2015.1重印）

中等职业教育国家规划教材
ISBN 978-7-111-10422-3

I. 电... II. 许... III. ①电机学—专业学校—教材②电气控制—专业学校—教材 IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字（2007）第030360号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
策划编辑：高倩 责任编辑：范政文 版式设计：冉晓华
责任校对：刘志文 责任印制：乔宇
北京汇林印务有限公司印刷
2015年1月第2版第12次印刷
184mm × 260mm · 15印张 · 367千字
标准书号：ISBN 978-7-111-10422-3
定价：32.00元

电话服务

服务咨询热线：010-88379833

读者购书热线：010-88379469

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网：www.cmpbook.com

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

金书网：www.golden-book.com

出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1 号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从 2001 年秋季开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要求）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，努力为教材选用提供比较和选择，满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

第2版前言

自本书出版5年来，中等职业教育定位进一步明确同时中等职业教育学制有所缩短，各校实践教学环节进一步加强，而理论教学时数普遍减少。为适应这一新的形势，作为电气类专业主干课程“电机与电气控制技术”的教材，亦应进行相应的修订。

此次修订，根据中等职业教育培养目标，结合“维修电工”初、中级职业资格证书考核要求，致力于培养学生的基本技能。力求反映新知识、新技术、新工艺、新方法，力求用定性的分析来阐明物理概念，避免过多的数学分析，使学生好学、乐学。在具体内容上，删去了“交流电梯的电气控制”与“组合机床的电气控制”两章，充实了“常用低压电器”一章，突出了“三相异步电动机”与“电气控制基本控制环节”两章，加重了实践技能训练环节的比例，加强了对基本控制环节、典型设备电气控制的分析。努力使学生对所学知识能举一反三、融会贯通，达到“维修电工”初、中级职业资格证书的要求。

全书共分7章。内容包括：变压器、三相异步电动机、直流电动机、常用控制电机、常用低压电器、电气控制电路基本环节、典型设备电气控制电路分析等。内容具有通用性、典型性、实用性，是广大电气运行与控制专业技术人员在生产实际中广为使用与应该掌握的知识。全书理论教学时数为110学时。除实验教学外还应安排两周的实训，以提高学生的基本操作技能和分析电气控制电路的能力。

本书可作为三年制中等职业教育电气类专业的教材，也可供相关专业的师生、从事现场工作的电气工程人员参考。

本书由河北机电职业技术学院许廖主编，参加编写的还有河北机电职业技术学院苏世军。

由于编者水平有限，难免存在错误、不足与疏漏，恳请读者批评指正。

编者

第 1 版前言

本书是根据教育部职业教育与成人教育司下达的“面向 21 世纪职业教育课程改革和教材建设规划”并由此制定出的中等职业学校电气运行与控制专业整体教学改革方案，方案中确定的“电机与电气控制技术”课程的教学大纲编写的。

本书将“电机原理”、“电力拖动基础”与“工厂电气控制设备”融为一体，前呼后应，对其内容进行了筛选和更新，删去了偏深的内容，避免了不必要的重复。全书以电动机为驱动元件，低压电器为控制元件，实现对生产机械的电力拖动和电气控制。全书以三相异步电动机及其拖动为重点，以基本控制环节为主线，阐述了电动机电力拖动基本知识；继电-接触器控制电路基本环节、电梯电气控制基本环节、组合机床控制电路基本环节；机床、组合机床、桥式起重机、交流电梯等典型设备的电气控制，并力求从生产实际出发，对上述电气设备常见故障进行了分析，努力培养分析与解决生产实际问题的能力。

全书共 9 章。内容包括：变压器、三相异步电动机、直流电机、常用控制电机、常用低压电器、电动机的基本控制环节、典型设备的电气控制、组合机床电气控制等。全书理论授课时数为 113 学时，学时较少时，可考虑删去书中标有“*”号的内容。

本书为中等职业学校电气运行与控制专业的教材，也可供有关专业师生、从事现场工作的工程技术人员参考。

本书由河北省机电学校许廖主编。参加本书编写的有河北省机电学校苏世军（编写第五、六章），其余由许廖编写。

本书由王海萍主审。在此对本书作出较大贡献的魏素珍、王淑英等同志表示衷心感谢。

由于编者水平有限，缺点和错误难免，恳求读者提出宝贵意见。

编者
2002 年元旦

目 录

出版说明	
第2版前言	
第1版前言	
绪论	1
第一章 变压器	4
第一节 变压器基本工作原理和结构	4
第二节 单相变压器的空载运行	8
第三节 单相变压器的负载运行	10
第四节 三相变压器	13
第五节 仪用互感器与弧焊变压器	18
职业技能鉴定考核复习题	22
第二章 三相异步电动机	24
第一节 三相异步电动机的结构与 工作原理	24
第二节 三相异步电动机的空载运行	32
第三节 三相异步电动机的负载运行	33
第四节 三相异步电动机的电磁转矩	35
第五节 三相异步电动机的机械特性	37
第六节 电力拖动的基本知识	41
第七节 三相异步电动机的起动	44
第八节 三相异步电动机的制动	49
第九节 三相异步电动机的调速	55
*第十节 单相异步电动机	61
职业技能鉴定考核复习题	66
第三章 直流电动机	68
第一节 直流电机的基本原理与结构	68
第二节 直流电动机电磁转矩和 电枢电动势	73
第三节 他励直流电动机的机械特性	74
第四节 他励直流电动机的起动和反转	77
第五节 他励直流电动机的制动	79
第六节 他励直流电动机的调速	85
职业技能鉴定考核复习题	88
*第四章 常用控制电机	89
第一节 控制电机概述	89
第二节 伺服电动机	89
第三节 测速发电机	92
第四节 步进电动机	95
职业技能鉴定考核复习题	97
第五章 常用低压电器	99
第一节 常用低压电器的基本知识	99
第二节 电磁式接触器	108
第三节 电磁式继电器	112
第四节 热继电器	122
第五节 熔断器	127
第六节 低压开关与主令电器	131
第七节 速度继电器与干簧继电器	144
职业技能鉴定考核复习题	146
第六章 电气控制电路基本环节	150
第一节 电气控制系统图	150
第二节 电气控制电路基本控制规律	155
第三节 三相异步电动机的起动控制	161
第四节 三相异步电动机的制动控制	165
第五节 三相异步电动机的调速控制	170
第六节 直流电动机的电气控制	172
第七节 电气控制系统常用的保护 环节	176
职业技能鉴定考核复习题	178
第七章 典型设备电气控制电路 分析	180
第一节 电气控制电路分析基础	180
第二节 M7130型平面磨床电气控制 电路分析	185
第三节 Z3040型摇臂钻床电气控制 电路分析	190
第四节 T68型卧式镗床电气控制电路	

分析	196	附录	224
第五节 XA6132 型卧式铣床电气控制		附录 A 低压电器产品型号编制办法	224
电路分析	202	附录 B 电气图常用图形及文字符号	
第六节 交流桥式起重机电气控制电路		一览表	227
分析	210	参考文献	230
职业技能鉴定考核复习题	223		



绪 论

电能是现代工业生产的主要能源和动力，电动机是将电能转换为机械能拖动生产机械的驱动元件。与其他原动机相比，电动机的控制方法更为简便，并可实现遥控和自动控制。用电动机拖动工作机械运动的系统称为电力拖动系统，电力拖动系统主要由电动机、传动机构和控制设备三个基本环节组成，三者关系如图 0-1 所示。

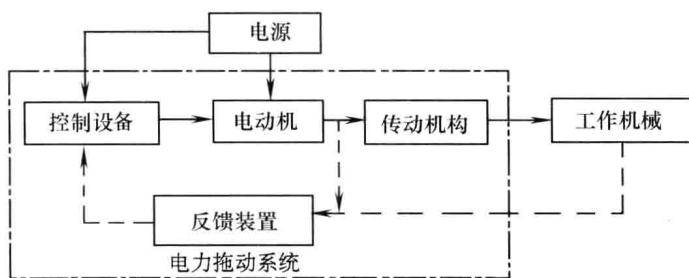


图 0-1 电力拖动系统构成图

由于开环的电力拖动系统不需反馈装置，只有在闭环系统中使用，所以图中反馈装置及其控制方向箭头用虚线表示。反馈装置往往采用控制电机来实现反馈功能。控制设备传统采用继电器-接触器控制系统，由于继电器、接触器均为带触点的控制电器，又称为有触点系统。为提高系统工作的可靠性，近年来出现了以数字电路为主的无触点系统。数字电路发展很快，从分立元件到集成电路，现又发展到微型计算机控制系统。本书从中等职业教育培养目标出发，针对目前仍广泛使用的传统、经典的电气控制技术，以三相异步电动机及其电力拖动为重点，以继电器-接触器控制电路基本环节为主线，阐明常用典型设备的电气控制。

一、电机与电力拖动系统发展概况

从 1820 年奥斯特、安培和法拉第相继发现载流导体在磁场中受力并提出电磁感应定律后，出现了电动机和发电机的雏形，而从它形成一个工业部门至今才不过 120 多年，但经济发展的需要使电机获得迅速的发展。从 19 世纪末期，电动机逐渐代替了蒸汽机，出现了电力拖动。在其初期，常以一台电动机拖动多台设备，或一台设备上的多个运动部件由一台电动机拖动，称之为集中拖动。随着生产发展的需要，20 世纪 20 年代发展成为单独拖动。为进一步简化机械传动机构，更好满足生产机械各运动部件对机械特性的不同要求，在 20 世纪 30 年代出现了多电动机拖动，即生产机械各运动部件分别由不同电动机拖动，这使生产

机械的机械结构大为简化。

随着生产的发展,对上述单电动机拖动系统及多电动机拖动系统提出了更高的要求:如要求提高加工精度和运行速度;要求快速起动、制动及反转;要求实现很宽范围内的速度调节及整个生产过程的自动化等。要完成这些要求,除驱动元件电动机外,必须要有自动控制设备,组成自动化的电力拖动系统。而这些自动化的电力拖动系统随着自动控制理论的发展,半导体器件和电力电子技术的应用,以及数控技术和计算机技术的发展和应用,正在不断地完善和提高。

电力拖动具有许多其他拖动方式无法比拟的优点,如起动、制动、反转和调速的控制简单方便,速度快且效率高等,而且电动机类型很多,具有各种不同的运行特性,可满足各种类型生产机械的要求。另外,电力拖动系统各参数的检测、信号的变换和传送方便,易于实现最优控制。因此,电力拖动成为现代工农业电气自动化的基础。

二、电力拖动自动控制的发展

电力拖动控制方式不断演变,由手动控制逐步向自动控制方向发展。最初的自动控制是用数量不多的继电器、接触器及保护元件组成的继电-接触器控制系统。这种控制在使用上具有单一性,即一台控制装置只适用于某一固定控制程序的设备,若程序发生改变,必须重新接线,而且这种控制的输入、输出信号只有通和断两种状态,因而这种控制是断续的,又称为断续控制。

为使控制系统具有良好的静态与动态特性,常采用反馈控制系统。反馈控制系统由连续控制元件作为反馈装置,它不仅能反映信号的通与断,还能反映信号的大小和变化。这种由连续控制元件组成的反馈控制系统成为闭环控制系统,又称为连续控制系统,常见的为由连续控制元件晶闸管构成的晶闸管控制系统。

20世纪60年代出现了顺序控制器,它能根据生产需要,灵活地改变控制程序,使控制系统具有较大的灵活性和通用性,但它使用硬件手段且装置体积大,功能也受到一定限制。20世纪70年代出现了以微处理器为核心的新型工业控制器——可编程序控制器,从而实现了用软件手段来实现各种控制功能。

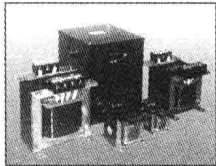
随着计算机技术的发展,20世纪40年代末,出现了数控设备,它是用电子计算机按预先编制好的程序,对机床实现自动化的数字控制。随着微型计算机的出现,数控机床获得很快的发展,先后出现了由硬件逻辑电路构成的专用数控装置(NC)、小型计算机控制系统(MNC),近年来又发展成柔性制造系统(FMS)。最新发展起来的以数控机床为基本单元的计算机集成制造系统,即CIMS,可以实现无人自动化工厂。

三、课程的性质和学习方法

本课程是一门综合性的主干课、专业课,对培养应用型的电气类专业中等职业教育人才具有重要作用。本课程是在学习了“电工基础”、“机械基础”之后,在进行了电工实习的基础上进行讲授的,以使學生具有较牢固的基础理论知识和初步的电工实践技能,为学习本课程打下基础。本课程将原有的“电机学”、“电力拖动基础”与“工厂电气控制设备”等三门课程的主要内容有机结合起来,强调电动机在自动控制系统中的应用,将电动机作为一

个驱动元件来对待，以三相异步电动机为重点，以低压电器为控制元件，以电动机控制电路基本环节为主线，分析生产机械典型设备的电气控制，培养学生对典型生产机械控制电路及其电气设备常见故障的分析能力，并力求能举一反三，触类旁通。

本课程除课堂教学外，还需辅以实验、现场教学、电气控制实训、课程设计、毕业实习和毕业设计等实践性教学环节，使学生不仅掌握电气类专业必备的基本理论知识，而且还具有较好的安装、调试和排除故障的能力。学习时一定要理论联系实际，勤动手，善动脑，不断提高实践动手能力，提高分析问题能力。



第一章

变 压 器

变压器是一种静止的、将电能转换为电能的电气设备。它是利用电磁感应的原理，将某一交流电压和电流等级转变成同频率的另一电压和电流等级的设备。其对电能的经济输送、灵活分配和安全用电具有重要意义，在电气测量、电气控制中都获得广泛的应用。

本章对常用的电力变压器工作原理、基本结构、运行情况作一介绍，从而掌握变压器变电压、变电流、变阻抗的3大作用，掌握三相变压器的联结组别；理解变压器铭牌数据的涵义；学会正确使用和选择变压器。另外，对仪用互感器和电焊变压器也作了介绍。



第一节 变压器基本工作原理和结构

一、变压器的基本工作原理

变压器是在一个闭合的铁心磁路中，套上两个相互独立的、绝缘的绕组。这两个绕组之间只有磁的耦合，没有电的联系，如图1-1所示。通常在一个绕组上接交流电源，称为一次绕组（或称原绕组或初级绕组），其匝数为 N_1 ；另一个绕组接负载，称为二次绕组（或称副绕组或次级绕组），其匝数为 N_2 。

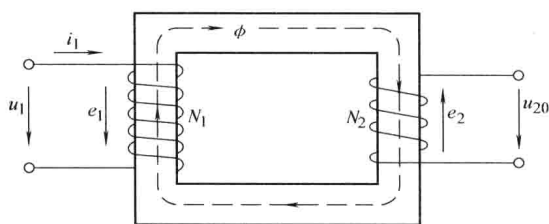


图1-1 变压器工作原理

当在一次绕组上加交流电源时，在电压 u_1 作用下，流过交流电流 i_1 ，并建立交变磁动势，在铁心中产生交变磁通 ϕ 。该磁通同时交链一、二次绕组，根据电磁感应定律，在一、二次绕组中产生感应电动势 e_1 、 e_2 。二次绕组在感应电动势 e_2 作用下向负载供电，实现电能传递。其感应电动势瞬时值分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

由于 $u_1 \approx -e_1$ ， $u_2 = e_2$ ，则一、二次绕组电压和电动势有效值与匝数的关系为

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

由此可知，变压器一、二次绕组电压之比等于一、二次绕组的匝数比。在磁动势一定的条件下，只要改变一次或二次绕组的匝数，便可达到改变二次绕组输出电压大小的目的。这就是变压器利用电磁感应定律，将一种电压等级的交流电源转变成同频率的另一电压等级电源的基本工作原理。

二、电力变压器的基本结构

电力变压器主要由铁心、绕组、绝缘套管、油箱及附件等部分组成。在电力系统中应用最广泛的是油浸式电力变压器，其基本结构如图 1-2 所示。

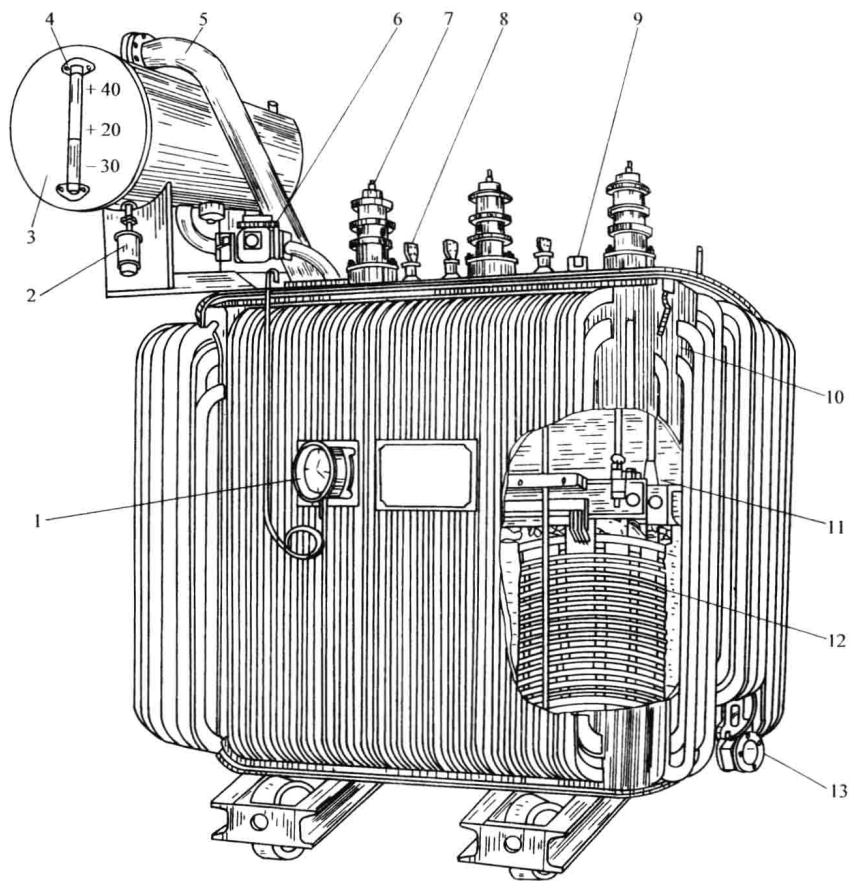


图 1-2 油浸式电力变压器

1—信号式温度计 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—铁心 12—线圈 13—放油阀门

(一) 铁心

铁心是变压器磁通的闭合路径，同时又是绕组的支撑骨架。铁心由心柱和铁轭两部分组成，其中心柱上套装有绕组，铁轭用来连接心柱以构成闭合磁路。为提高铁心的导磁性能，减小磁滞损耗和涡流损耗，铁心大多采用厚度为 0.35mm，表面涂有绝缘漆的热轧硅钢片或冷轧硅钢片叠装而成。

（二）绕组

绕组是变压器的电路部分，常用绝缘铜线或铝线绕制而成。在变压器中，工作电压高的绕组称为高压绕组，工作电压低的绕组称为低压绕组。一般高、低压绕组套装在同一铁心柱上，高压绕组在外层，低压绕组在里层，这样不但易于实现低压绕组与铁心柱之间的绝缘，同时结构简单、制造方便，国产电力变压器均采用此结构。

（三）绝缘套管

绝缘套管是变压器绕组的引出装置，装在变压器的油箱上，用来实现带电的变压器绕组引出线与接地油箱之间的绝缘。

（四）油箱及其附件

变压器的铁心与绕组构成了变压器的器身，安装在装有变压器油的油箱内，变压器油起绝缘和冷却作用。由于器身全部浸在变压器油中，这样铁心和绕组不会被潮气侵蚀。同时，还可通过变压器油的对流，将铁心和绕组产生的热量经油箱和油箱上的散热管散发出去，从而降低变压器的温度，确保变压器正常运行。

为使变压器长久保持良好状态在变压器油箱上方安装了圆筒形的储油柜（又称油枕），并经连通管与油箱相连。柜内油面高度随变压器油的热胀冷缩而变化，由于储油柜内油与空气接触面积小，这就缓解了变压器油的受潮和老化速度，确保变压器油的绝缘性能。

在油箱和储油柜的连通管里装有气体继电器，当变压器内部发生故障时，内部绝缘物气化产生气体，使气体继电器动作，发出故障信号或切除变压器电源，起自动保护作用。

分接开关一般装在一次侧（高压侧），通过改变一次侧线圈匝数来调节输出电压。

电力变压器附件还有安全气道、测温装置、吸湿器与油表等。

三、电力变压器的额定值与主要系列

为表明变压器的性能，在每台变压器上都装有铭牌，其上标明了变压器的型号及各种额定数据，以便正确、合理地使用变压器，保证变压器安全、合理、经济地运行，图 1-3 为电力变压器的铭牌。

（一）电力变压器的额定值

额定值是对变压器正常工作所作出的使用规定，它是正确使用变压器的依据。在额定状态下运行时，可保证变压器长期可靠地工作，并具有良好的性能。

额定值通常标注在变压器铭牌上，又称为铭牌值。

1. 额定容量 S_N S_N 表示变压器在额定工作条件下输出能力的保证值，指的是变压器的视在功率，单位为 $V \cdot A$ 或 $kV \cdot A$ 。

单相变压器的额定容量为

产品型号	S9-500/10	标准号	
额定容量	500kV·A	使用条件	户外式
额定电压	10000/400V	冷却条件	ONAN
额定电流	28.9/721.7A	短路电压	4.05%
额定频率	50Hz	器身吊重	1015kg
相数	三相	油重	302kg
联结级别	Yyn0	总重	1753kg
制造厂		生产日期	

图 1-3 电力变压器的铭牌

$$S_N = U_{N1} I_{N1} = U_{N2} I_{N2} \quad (1-2)$$

三相变压器的容量为

$$S_N = \sqrt{3} U_{N1} I_{N1} = \sqrt{3} U_{N2} I_{N2} \quad (1-3)$$

2. 额定电压 U_{N1} 和 U_{N2} U_{N1} 为一次绕组的额定电压，它是根据变压器的绝缘强度和允许发热条件所规定的一次绕组正常工作时的电压值； U_{N2} 为二次绕组额定电压，它是当一次绕组加上额定电压，而变压器分接开关置于额定分接头处，二次绕组的空载电压值，额定电压的单位为 V 或 kV。对于三相变压器，额定电压值指的是线电压。

3. 额定电流 I_{N1} 和 I_{N2} 额定电流是根据允许发热条件所规定的绕组长期允许通过电流的最大值，单位是 A 或 kA。 I_{N1} 是一次绕组的额定电流； I_{N2} 是二次绕组的额定电流。对于三相变压器，额定电流是指线电流。

4. 额定频率 f 我国规定的标准工业用电频率为 50Hz。

5. 短路电压 U_k 当低压绕组短路时，高压绕组绝对不允许加额定电压，否则一、二次绕组会因电流过大被烧毁。将低压绕组短路且电流达额定值时对应的高压绕组所加电压定义为短路电压。其值通常为高压绕组额定电压的 4% 左右。

电力变压器的容量等级和电压等级，在国家标准中都作了规定，在此不再列举。

(二) 电力变压器的型号及主要系列

变压器的型号包括变压器的结构性能特点的基本代号、额定容量 (kV·A) 和高压侧的电压等级 (kV)。其型号具体意义如下：



目前我国生产的变压器系列产品有 SL7 (三相油浸自冷式铝线电力变压器)、S9 (三相油浸自冷式铜线变压器)、SFPL1 (三相强油风冷铝线电力变压器)、SFPSL1 (三相强油风冷三绕组铝线电力变压器) 等。



第二节 单相变压器的空载运行

变压器的空载运行是指变压器的一次绕组接在额定电压的交流电源上，二次绕组开路时的工作情况，如图 1-4 所示。

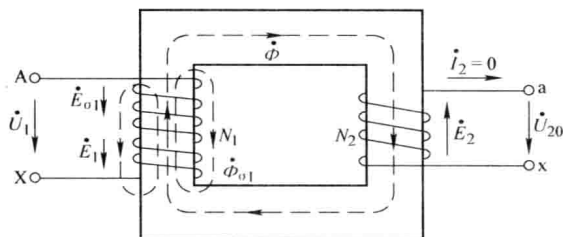


图 1-4 单相变压器空载运行原理图

一、空载运行时各物理量正方向确定

当变压器一次绕组接上额定电压 \dot{U}_{1N} 空载运行时，一次绕组中流过的电流 \dot{I}_{10} 称为空载电流，它产生空载磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_{10} N_1$ ，产生交变磁通。交变磁通绝大部分沿铁心闭合且同时与一、二次绕组交链，这部分磁通称为主磁通 $\dot{\Phi}$ ；另有很少的一部分磁通只与一次绕组交链，且主要经非磁性材料（变压器油或空气等）而闭合，称为一次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 。由于铁心磁导率远比空气的大，故变压器空载时的主磁通占总磁通的绝大部分，而漏磁通只为总磁通的 0.2% 左右。根据电磁感应定律，主磁通 $\dot{\Phi}$ 在一、二次绕组中分别产生感应电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 ；漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 只在一次绕组中产生感应电动势 $\dot{E}_{\sigma 1}$ ，称为漏磁电动势。二次绕组电动势 \dot{E}_2 对负载而言即为电源电动势，空载时为空载电压 \dot{U}_{20} 。

为表明上述各正弦量的相互关系，根据电工基础可知，应首先规定上述各量的正方向，这些正弦量的正方向规定如下：

- 1) 电源电压 \dot{U} 正方向与其电流 \dot{I} 正方向采用关联方向，即两者正方向一致。
- 2) 绕组电流 \dot{I} 与它产生的磁动势所建立的磁通 $\dot{\Phi}$ 的正方向符合右手螺旋定则。
- 3) 由交变磁通 $\dot{\Phi}$ 产生的感应电动势 \dot{E} ，二者的正方向符合右手螺旋定则，即 \dot{E} 的正方向与产生该磁通的电流正方向一致。

由上述规定，标出各电压、电流、磁通、感应电动势的正方向如图 1-4 所示。

二、感应电动势与漏磁电动势

(一) 感应电动势

若主磁通 $\phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，则一、二次绕组感应电动势瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-4)$$

有效值为

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

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-5)$$

由式(1-4)、式(1-5)可知,变压器一、二次绕组感应电动势大小与电源频率 f 、绕组匝数 N 及铁心主磁通的最大值 Φ_m 成正比,在相位上滞后于产生感应电动势的主磁通 90° 。

(二) 漏磁电动势

变压器一次绕组的漏磁通 $\phi_{\sigma 1} = \Phi_{\sigma 1m} \sin \omega t$ 在一次绕组中产生漏磁感应电动势

$$e_{\sigma 1} = -N_1 \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = E_{\sigma 1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

其有效值为

$$E_{\sigma 1} = 4.44 f N_1 \Phi_{\sigma 1m} \quad (1-6)$$

由于漏磁通通过的路径主要为非磁性物质油或空气,其导磁率 μ_0 为一常数,所以漏磁通大小与产生此漏磁通的励磁电流成正比,且相位相同。常用绕组的漏电感系数 L_1 来表示二者之间的关系, L_1 的计算方法为

$$L_1 = \frac{N_1 \Phi_{\sigma 1m}}{\sqrt{2} I_{10}}$$

$$\text{则} \quad E_{\sigma 1} = I_{10} \omega L_1 = I_{10} X_1 \quad (1-7)$$

式中 L_1 ——一次绕组的漏电感系数;

X_1 ——一次绕组的漏电抗。

三、变压器的电压比

变压器空载运行时,一次绕组的漏磁通很小,铁心损耗也很小,所以一次绕组电阻和空载电流都很小,忽略绕组压降,有

$$U_1 \approx -E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-8)$$

由于变压器空载运行时,其二次绕组开路,所以二次绕组的端电压等于其感应电动势,即

$$U_{20} = E_2 \quad (1-9)$$

变压器一、二次绕组感应电动势之比值,称为变压器的电压比,用 k 表示,它等于一、二次绕组匝数之比,即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (1-10)$$

当 $N_2 > N_1$ 时, $k < 1$,则 $U_2 > U_1$,为升压变压器;若 $N_2 < N_1$, $k > 1$,则 $U_2 < U_1$,为降压变压器。可见改变电压比 k 就可达到改变二次绕组输出电压 U_{20} 的目的。

四、空载电流和空载损耗

变压器空载运行时,空载电流 \dot{I}_{10} :一方面用来产生主磁通,另一方面用来补偿变压器