



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部高等职业教育示范专业规划教材
机械工业出版社精品教材

(电气工程及自动化类专业)

电机与电气 控制技术

第2版

许 廖 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电 子 课 件



教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程及其自动化专业主干课程教材
《电机与电气控制》课程教材

中国电力出版社

电机与电气 控制技术

第2版



王 强 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS



ISBN 7-313-04511-1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
教育部高等职业教育示范专业规划教材
机械工业出版社精品教材
(电气工程及自动化类专业)

电机与电气控制技术

第 2 版

许 蓼 主编
徐 虎 主审



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,教育部高等职业教育示范专业规划教材(电气工程及自动化类专业)。

全书以电动机为驱动装置,低压电器为控制、保护元件,实现对电气控制设备的电力拖动和电气控制。其中以三相异步电动机拖动和控制为重点,以电气控制基本环节为主线,以常用典型设备电气控制为实例,阐述了电力拖动基本知识及常用设备的电气控制和电气控制系统设计的基本知识。全书以培养高级应用型人才为目标,以技能培养和工程应用能力培养为出发点,坚持教育服务的持续发展,突出生产实际应用,着力培养学生分析问题、解决生产实际问题的能力,提高学生专业技能。

本书主要内容有: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、电气控制电路基本环节、典型设备的电气控制和电气控制系统设计。

本书为高职高专、高等工科院校、成人教育学院以及技师学院电气工程及自动化类专业及相关专业的教材,也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

为方便教师授课,本书特备有免费电子课件,凡选用本书作为授课教材的院校,均可来电索取,咨询电话:010-88379375, Email: cmpgaozhi@sina.com。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术/许蓼主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2010.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 教育部高等职业教育示范专业规划教材. 机械工业出版社精品教材

ISBN 978-7-111-28838-1

I. 电… II. 许… III. ①电机学-高等学校:技术学校-教材②电气控制-高等学校:技术学校-教材 IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第209691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:于宁 责任编辑:于宁 版式设计:霍永明

封面设计:鞠杨 责任校对:刘志文 责任印制:洪汉军

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2010年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·432千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28838-1

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是教育部高等职业教育示范专业（电气工程及自动化类专业）规划教材。本书将“电机原理”、“电力拖动基础”、“工厂电气控制设备”三门课程进行有机整合，使其融为一体、前呼后应。全书以培养高级应用型人才为目标，以技能培养和工程应用能力培养为出发点，坚持教育服务的持续发展性。此次修订本着理论为实践服务，加强实践；应知为应会服务，加强应会；定量为定性服务，加强定性；数学为物理意义服务，加强物理意义的原则进行。删除陈旧过时、偏深的内容；努力反映新元件、新产品；加强定性分析和物理意义的阐述；突出典型性、实用性。

全书以电动机为驱动装置，低压电器为控制、保护元件，组成生产机械的电力拖动电气控制系统。其中以三相异步电动机拖动和控制为重点，以电气控制基本环节为主线，以常用典型设备电气控制电路为实例，阐述了电力拖动技术、电气控制技术和电气控制系统设计等的基本知识。从生产实际出发，对工厂电气控制设备常见电气故障进行了分析，力求做到举一反三、触类旁通。努力培养学生分析、解决生产实际问题的能力和进行简单电气控制系统设计的能力。

全书共分八章。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、电气控制电路基本环节、典型设备的电气控制和电气控制系统设计。由于本课程紧密结合生产实际，所以应通过实物教学、现场教学、生产实习、实训、顶岗实习及课程设计等教学手段和教学环节来达到教学目的和要求。书中有的章节附有“阅读与应用”内容，供学生自学，以扩展其知识面。第八章内容宜在课程设计中讲授。

本书为高职高专、高等工科院校、成人教育学院以及技师学院等电气工程及自动化类专业及相关专业的教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

本书由河北机电职业技术学院许廖主编，北京北广科技股份有限公司许欣参加编写。温州职业技术学院徐虎任本书的主审，他对全书进行了认真、细致、详尽的审阅，提出了许多宝贵意见和建议；上海理工大学孔凡才教授对本书修订提出了好的建议和意见，在此一并表示衷心的感谢！

限于编者水平，书中难免有差错与不妥之处，敬请读者指正。

编 者

第1版前言

本书是教育部高等职业教育示范专业规划教材（电气工程及自动化类专业），是集编者40多年电气类专业职业技术教学、培训和工程实践的经验编写而成的。本书根据教学改革方案的要求，将“电机原理”、“电力拖动基础”与“工厂电气控制设备”等三门课程进行有机整合，使其融为一体、前后呼应。全书以培养高级应用型人才为目标，以技能培养和工程应用能力的培养为出发点，突出实际应用。本书内容上进行了较大的改动，删除陈旧过时、偏多、偏深的内容；努力反映新技术、新元件；加强定性分析和物理意义的阐述，减少繁杂的公式推导，避免不必要的重复。

全书以交、直流电动机为驱动装置，低压电器为控制、保护元件，组成生产机械的电力拖动和电气控制系统。其中以三相异步电动机拖动和控制为重点，以电气控制基本环节为主线，阐述了电力拖动技术、常用设备的电气控制技术和电气控制系统设计等的基本知识。从生产实际出发，对常用设备的常见电气故障进行了分析，以期培养学生分析、解决生产实际问题的能力和进行简单的电气控制系统设计的能力。

全书共分十章。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、电气控制电路基本环节、典型设备的电气控制、交流双速信号控制电梯的电气控制、组合机床的电气控制、电气控制系统设计等。总课时数为120课时，另安排两周课程设计。书中第十章内容宜在课程设计中讲授，且标有“*”号的章节可根据教学计划选择使用。

本书可作为高职高专、高等工科院校、成人教育等电气工程及自动化专业及相关专业的教材，也可供相关专业工程技术人员参考。

本书由河北机电职业技术学院许蓼编写，由温州职业技术学院徐虎担任主审。主审对全书进行了认真、细致、详尽的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心地感谢！

由于编者水平有限，难免存在错误、不足与疏漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

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	15
第五节 其他用途的变压器	22
习题	26
第二章 三相异步电动机	29
第一节 三相异步电动机的结构与工作原理	29
第二节 三相异步电动机的空载运行	36
第三节 三相异步电动机的负载运行	37
第四节 三相异步电动机的工作特性	40
第五节 三相异步电动机的电磁转矩特性	41
第六节 三相异步电动机的机械特性	44
第七节 电力拖动基本知识	47
第八节 三相异步电动机的起动	51
第九节 三相异步电动机的制动	57
第十节 三相异步电动机的调速	61
第十一节 单相异步电动机	69
阅读与应用 三相异步电动机的运行维护与故障分析	75
习题	78
第三章 直流电机	80
第一节 直流电机的基本原理与结构	80
第二节 直流电动机的电磁转矩和电枢电动势	85
第三节 他励直流电动机的运行原理与机械特性	86
第四节 他励直流电动机的起动和反转	90
第五节 他励直流电动机的制动	92
第六节 他励直流电动机的调速	95
习题	98
第四章 常用控制电机	99
第一节 伺服电动机	99
第二节 测速发电机	103
第三节 步进电动机	106
习题	110
第五章 常用低压电器	111
第一节 常用低压电器基本知识	111

第二节 电磁式接触器	121
第三节 电磁式继电器	126
第四节 时间继电器	133
第五节 热继电器	142
第六节 速度继电器	146
第七节 熔断器	147
第八节 低压断路器	151
第九节 主令电器	155
习题	164
第六章 电气控制电路基本环节	166
第一节 电气控制系统图	166
第二节 电气控制电路基本控制规律	170
第三节 三相异步电动机的起动控制	176
第四节 三相异步电动机的制动控制	180
第五节 三相异步电动机的调速控制	185
第六节 直流电动机的电气控制	188
第七节 电气控制系统常用的保护环节	192
习题	194
第七章 典型设备的电气控制	196
第一节 电气控制电路分析基础	196
第二节 Z3040 型摇臂钻床的电气控制	202
第三节 XA6132 型卧式万能铣床的电气控制	209
第四节 交流桥式起重机的电气控制	223
阅读与应用一 M7120 型平面磨床的电气控制	231
阅读与应用二 T68 型卧式镗床电气控制电路分析	237
习题	243
第八章 电气控制系统设计	245
第一节 电气控制设计的原则和内容	245
第二节 电力拖动方案的确定和电动机的选择	246
第三节 电气控制电路设计的一般要求	249
第四节 电气控制电路设计的方法与步骤	252
第五节 常用控制电器的选择	256
第六节 电气控制的施工设计与施工	262
习题	266
附录	268
附录 A 低压电器产品型号编制方法	268
附录 B 电气图常用图形及文字符号一览表	270
参考文献	273

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装置。与其他原动机相比，电动机的控制方法更为简便，还可实现遥控和自动控制。用电动机拖动工作机械来实现生产工艺过程中的各种控制要求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等基本环节组成，其相互关系如图 0-1 所示。

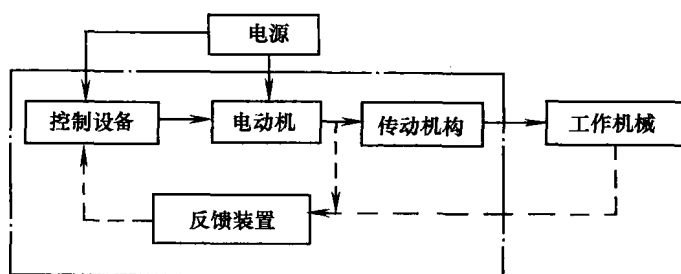


图 0-1 电力拖动系统

电力拖动系统按拖动电动机不同，分为直流拖动系统和交流拖动系统；按有无反馈装置区分为闭环电力拖动系统与开环电力拖动系统，其反馈装置往往采用控制电机等反馈装置来实现反馈功能。传统的控制设备多为继电器、接触器，而这类器件均带有触点，故应用继电器、接触器作为控制设备的电力拖动系统又称为有触点系统。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，现又发展到使用微型计算机控制的数字控制系统。本书以三相异步电动机控制及其电力拖动技术为重点，以继电器、接触器控制电路基本环节为主线，介绍了目前仍广泛使用的典型设备的经典电气控制技术。

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。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。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，更好地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各台电动机拖动，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；要求快速启动、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。要满足这些要求，除改进驱动装置——电动机外，必须加装自动控制设备，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运用，正在不断地完善。

电力拖动具有许多其他拖动方式无法比拟的优点：启动、制动、反转和调速的控制简单方便，快速性好、效率高，而且电动机的类型很多，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，以及电力拖动系统各参数的检测、信号的变换和传送方便，易于实现最优控制等。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

随着电力拖动方式的演变，其控制方式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。这种控制具有使用的单一性，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，控制是断续的，因而又称为断续控制。

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器件作为反馈装置，它不仅能反映信号的通与断，而且能反映信号的大小和变化。这种由连续控制元器件组成的反馈控制系统称为闭环控制系统，又称为连续控制系统，常用的连续控制元器件有晶闸管，构成晶闸管控制系统。

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，但仍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 年代出现了用软件手段来实现各种控制功能，以微处理器为核心的新型工业控制器——可编程序控制器。

随着计算机技术的发展，20 世纪 40 年代末，研制成了数控设备，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。最新发展起来了一种以数控机床为基本单元的计算机集成制造系统，即 CIMS，用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工程及自动化类专业高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，在进行了电工实训的基础上进行讲授的，以使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。本课程是原有的“电机原理”、“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的有机结合，加强了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，培养对典型生产机械

控制电路和电气设备常见故障的分析能力，力求能举一反三，触类旁通。

本课程除课堂教学外，还有实验、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工程及自动化类专业必备的基本理论知识，而且还具有较好的安装、调试和排除故障与初步设计的能力。学习时一定要理论联系实际，勤动手，善动脑，注意提高实践动手能力和分析、解决问题的能力，努力成为合格的高级应用型人才。

第一章 变 压 器

本章以一般用途的电力变压器为主要研究对象，着重分析单相变压器的工作原理、基本结构和运行情况，对其他用途的变压器作简单介绍。以期掌握变压器变电压、变电流、变阻抗的原理，掌握三相变压器的联结组别和并联运行条件；理解变压器铭牌数据含义；学会正确使用各种变压器。

变压器是一种静止的、将电能转换为电能的电气设备。它是根据电磁感应的原理，将某一等级的交流电压和电流转换成同频率的另一等级电压和电流的设备。具有变换电压、变换电流和变换阻抗的作用，因此无论在电力系统、电气测量、电子线路还是自动控制系统中都具有广泛的应用。

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（也称原绕组或初级绕组），其匝数为 N_1 ；另一侧绕组接负载，称为二次绕组（也称副绕组或次级绕组），其匝数为 N_2 。

当在一次绕组中加上交流电压 u_1 时，流过交流电流为 i_1 ，并建立了交变的磁动势，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

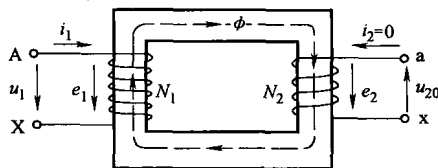


图 1-1 变压器基本工作原理

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

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

则

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-1)$$

由此可知，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 u_{20} 的目的。

二、变压器的应用与分类

变压器除了能够变换电压外，还有变换电流、变换阻抗的作用，因此在电力系统和电子

设备中获得广泛的应用。

在电力系统中,变压器是输配电能的主要电气设备。三相变压器的输出容量 $S = \sqrt{3}UI$, 可见在同等容量的情况下电压 U 越高, 线路电流越小, 则输电线路上的压降和功率损耗也就越小, 同时还可以减小输电线的截面积, 节省材料, 达到减小投资和降低运行费用的目的。我国规定高压输电线路电压为 110kV、220kV、330kV 与 500kV 等几种, 但发电厂的交流发电机受绝缘和制造技术上的限制, 难以达到这么高的电压, 因此发电机发出的电压需经变压器升高后再输送。从用电方面考虑, 大都采用低压用电, 这一方面是为了用电安全, 另一方面是为了使用电设备的绝缘等级降低, 以降低制造成本, 因此又必须经降压变压器降压, 往往经几次降压后才可供用户使用。在电力系统中变压器对电能的经济输送、灵活分配和安全使用具有重要意义, 因此获得广泛应用。

另外, 在测量系统中使用的仪用互感器, 可将高电压变换成低电压, 或将大电流变换成小电流, 以隔离高压和便于测量; 在实验室中使用的自耦变压器, 可调节输出电压的大小, 以满足负载对电压的不同要求; 在电子线路中, 有电源变压器, 还有用变压器来耦合电路、传递信号、实现阻抗匹配等。

变压器的种类很多, 按用途不同主要分为:

- 1) 电力变压器: 供输电系统中升压或降压用。
- 2) 特殊变压器: 如电炉变压器、电焊变压器和整流变压器等。
- 3) 仪用互感器: 如电压互感器与电流互感器。
- 4) 试验变压器: 高压试验用。
- 5) 控制用变压器: 控制线路中使用。
- 6) 调压器: 用来调节电压。

三、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。

(一) 铁心

铁心是变压器的磁路部分, 是磁通闭合的路径, 又是绕组的支撑骨架。铁心由心柱和磁轭两部分组成, 套装有绕组的部分为心柱, 连接心柱以构成闭合磁路的部分为磁轭。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, 圆筒式高压绕组在外层, 低压绕组在里层, 这样易于实现低压绕组与铁心柱之间的绝缘。所以结构简单、制造方便的国产电力变压器均采用此种结构。

(三) 绝缘套管

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

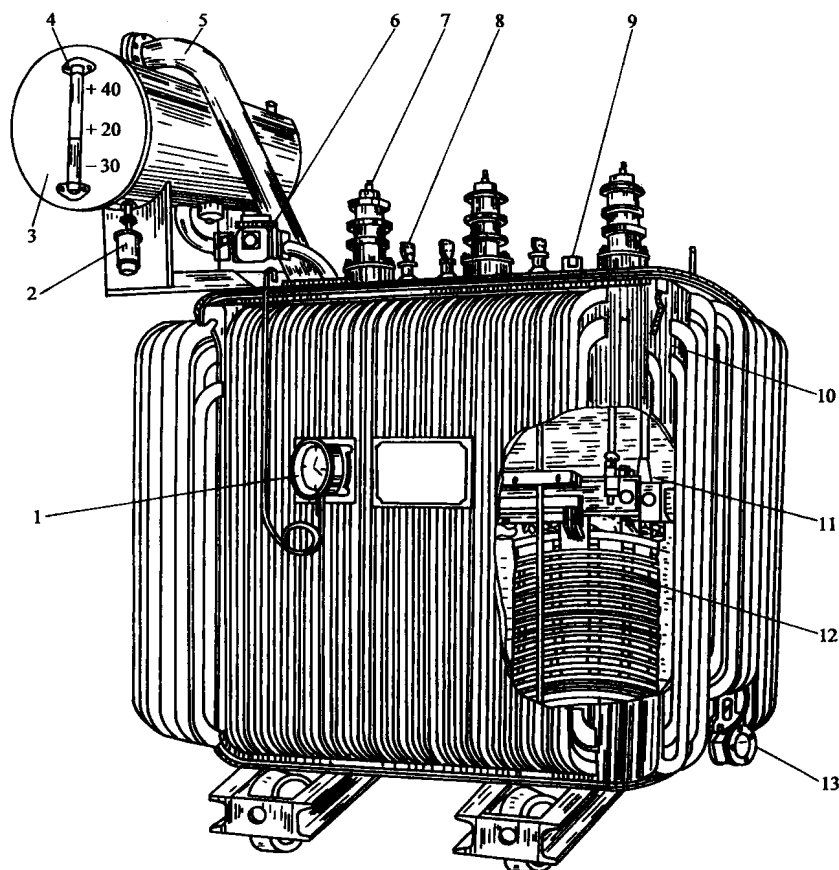


图 1-2 油浸式电力变压器

- 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

(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，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因潮湿而侵蚀。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升。

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，这就降低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。

电力变压器附件还有安全气道、测温装置、分接开关、吸湿器与油表等。

四、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，其上标明了变压器型号及各种额定

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, 而二次绕组开路时的工作情况, 如图 1-4 所示。

一、空载运行时各物理量正方向的规定

当变压器一次绕组接上额定电压 $\dot{U}_{1N}$ 空载运

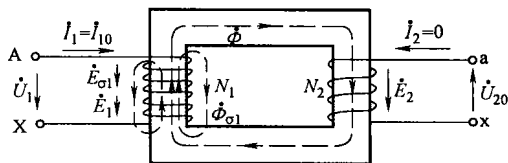


图 1-4 单相变压器空载运行原理图

行时, 一次绕组中流过的电流称空载电流 $\dot{I}_{10}$,

它产生空载磁通势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_{10} N_1$, 产生交变磁通。交变磁通绝大部分沿铁心闭合且与一、二次绕组同时交链, 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而闭合, 称为一次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 。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 $\dot{E}_{\sigma 1}$, 称为漏磁感应电动势。二次绕组电动势 $\dot{E}_2$ 对负载而言即为电源电动势, 其空载电压为 $\dot{U}_{20}$ 。

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

- 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 $\dot{I}$ 产生的磁通势所建立的磁通 $\dot{\Phi}$, 这两者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 $\dot{E}$, 两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, 在图 1-4 中标出各电压、电流、磁通、感应电动势的正方向如图中所示。

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

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

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

其有效值为

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

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

相量表示为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可知, 变压器一、二次绕组感应电动势的大小与电源频率 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 $\dot{\Phi}_{\sigma 1}$ 在一次绕组中产生漏磁感应电动势 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 为

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_{\sigma 1m} = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_{\sigma 1m} \quad (1-7)$$

由于漏磁通通过的路径主要为非磁性物质变压器油或空气, 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 (近似于 I_{10}) 成正比, 且相位相同。若用绕组的漏电感系数 L_1 来表示二者之间的关系, 则

$$L_1 = \frac{N_1 \dot{\Phi}_{\sigma 1m}}{\sqrt{2} I_{10}} \quad (1-8)$$

$$\text{则} \quad \dot{E}_{\sigma 1} = -j \frac{\omega N_1}{\sqrt{2}} \dot{\Phi}_{\sigma 1m} = -j \dot{I}_{10} \omega L_1 = -j \dot{I}_{10} X_1$$

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、空载运行时的电动势平衡方程式和电压比

变压器空载运行时, 在一次绕组电路中, 除感应电动势 $\dot{E}_1$ 和漏磁电动势 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 外, 空载电流 $\dot{I}_{10}$ 流过一次绕组时, 还要产生电阻压降 $\dot{I}_{10} R_1$ 。根据基尔霍夫第二定律以及图 1-4 所示正方向可列出一一次绕组电动势平衡方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_{10} R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} R_1 + j \dot{I}_{10} X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10} Z_1 \quad (1-9)$$

式中 Z_1 ——一次绕组的漏阻抗, $Z_1 = R_1 + jX_1$ 。

由于空载电流 $\dot{I}_{10}$ 很小, 电阻 R_1 和漏电抗 X_1 均很小, 可忽略不计, 则

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m \quad (1-10)$$

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

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-11)$$

变压器一次绕组的匝数 N_1 与二次绕组匝数 N_2 之比称为变压器的电压比 k , 即

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (1-12)$$

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。若改变电压比 k , 即改变一次或二次绕组匝数, 则可达到改变二次绕组输出电压 $\dot{U}_{20}$ 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空载时的损耗。为此，将 $\dot{I}_{10}$ 分解成两部分，一部分为无功分量 $\dot{I}_{10Q}$ ，用来建立磁场，起励磁作用，与主磁通同相位；另一部分为有功分量 $\dot{I}_{10P}$ ，用来供给变压器铁心损耗，其相位超前主磁通 90° ，即

$$\dot{I}_{10} = \dot{I}_{10P} + \dot{I}_{10Q} \quad (1-13)$$

空载电流一般只占额定电流的 $2\% \sim 10\%$ ，而 $I_{10P} < 10\% I_{10}$ ，因此 $I_{10} \approx I_{10Q}$ ，即空载电流 I_{10} 主要用来建立主磁通，故空载电流也称作励磁电流。变压器空载时没有输出功率，它从电源获取的全部功率都消耗在其内部，称为空载损耗。空载损耗绝大部分是铁心损耗 $E_1 I_{10P}$ ，即磁滞损耗与涡流损耗，只有极少部分是一次绕组电阻上的铜损耗 $I_{10}^2 R_1$ ，故可认为变压器的空载损耗就是变压器的铁心损耗。

五、变压器空载运行时的相量图

为了直观地表示变压器中各物理量之间的大小关系和相位关系，可在一张相量图上将各物理量用相量形式表示出来，称之为变压器的相量图。

根据空载运行时的电动势平衡方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10}R_1 + j\dot{I}_{10}X_1$ ， $\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$ 和 $\dot{I}_{10} = \dot{I}_{10P} + \dot{I}_{10Q}$ ，可作出如图 1-5 所示的变压器空载运行时的相量图。

作相量图时，先以主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 为参考相量，画在水平线上；再根据 $\dot{E}_1 = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m$ 、 $\dot{E}_2 = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m$ 画出滞后 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ 的 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 相量；然后根据 $\dot{I}_{10Q}$ 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相位， $\dot{I}_{10P}$ 超前 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ ， $\dot{I}_{10P} + \dot{I}_{10Q} = \dot{I}_{10}$ 画出 $\dot{I}_{10}$ 相量， $\dot{I}_{10}$ 超前于 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁耗角 α_{Fe} ；最后由 $-\dot{E}_1 + \dot{I}_{10}R_1 + j\dot{I}_{10}X_1 = \dot{U}_1$ 作出 $\dot{U}_1$ 相量。由图

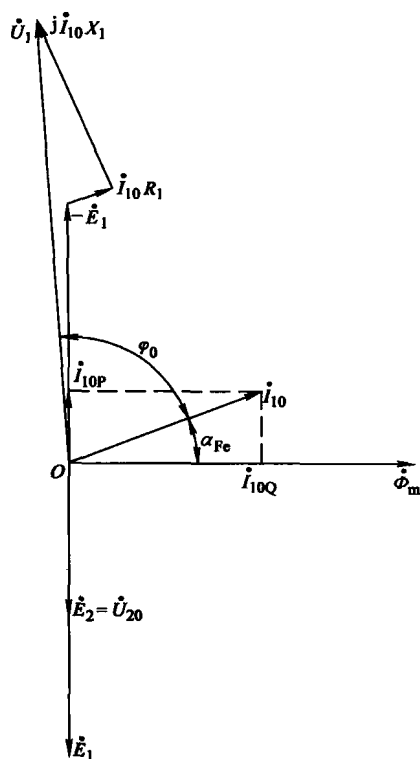


图 1-5 变压器空载运行时的相量图

可知 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_{10}$ 相位差角 $\varphi_0 \approx 90^\circ$ ，一般 $\cos\varphi_0 = 0.1 \sim 0.2$ ，变压器空载运行时的功率因数很低。

第三节 单相变压器的负载运行

变压器的负载运行是指变压器在一次绕组加上额定正弦交流电压，二次绕组接负载 Z_L 的情况下的运行状态，如图 1-6 所示。