



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)

电机与电气 控制技术

许 蓼 编



教育部高等职业教育示范专业规划教材

(电气工程及其自动化类专业)

电机与电气控制技术

许 琴 编
徐 虎 主审

附录 (A) 自学指导书



机械工业出版社

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）。

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，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，阐述了电力拖动基本知识；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依据，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，着力培养学生分析问题、解决问题的能力。

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、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。

本书为两年制或三年制高职高专、高等工科院校、成人教育电气工程及自动化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。

图书在版编目（CIP）数据

电机与电气控制技术/许蓼编. —北京：机械工业出版社，
2005.8

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

ISBN 7-111-17255-8

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. ①TM3
②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 096001 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：高 倩 版式设计：冉晓华 责任校对：吴美英

封面设计：鞠 杨 责任印制：洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2005 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ 19.75 印张·485 千字

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
本社购书热线电话（010）68326294
封面无防伪标均为盗版

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。

本书可作为两年制或三年制高职高专、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廖编写,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

前言	1	启动和反转	87
绪论	1	第五节 他励直流电动机的制动	89
第一章 变压器	4	第六节 他励直流电动机的调速	94
第一节 变压器基本工作原理和结构	4	习题	97
第二节 单相变压器的空载运行	8	第四章 常用控制电机	98
第三节 单相变压器的负载运行	10	第一节 控制电机概述	98
第四节 三相变压器	14	第二节 伺服电动机	98
第五节 其他用途的变压器	21	第三节 测速发电机	102
习题	25	第四节 步进电动机	106
第二章 三相异步电动机	27	习题	109
第一节 三相异步电动机的结构 与工作原理	27	第五章 常用低压电器	110
第二节 三相异步电动机的空载运行	34	第一节 概述	110
第三节 三相异步电动机的负载运行	35	第二节 常用低压电器的基本问题	113
第四节 三相异步电动机的工作特性	37	第三节 电磁式接触器	120
第五节 三相异步电动机的电磁 转矩特性	39	第四节 电磁式电压、电流继电器	126
第六节 三相异步电动机的机械特性	41	第五节 时间继电器	131
第七节 电力拖动基本知识	44	第六节 热继电器	137
第八节 三相异步电动机的起动	48	第七节 温度继电器与速度继电器	141
第九节 三相异步电动机的制动	53	第八节 熔断器	143
第十节 三相异步电动机的调速	57	第九节 刀开关与低压断路器	146
* 第十一节 三相异步电动机的运行 维护与故障分析	65	第十节 主令电器	158
* 第十二节 单相异步电动机	69	习题	162
习题	76	第六章 电气控制电路基本环节	164
第三章 直流电机	77	第一节 电气控制系统图	164
第一节 直流电机的基本原理与结构	77	第二节 电气控制电路基本控制规律	168
第二节 直流电动机的电磁转矩 和电枢电动势	81	第三节 三相异步电动机的起动控制	174
第三节 他励直流电动机的运行 原理与机械特性	82	第四节 三相异步电动机的制动控制	180
第四节 他励直流电动机的		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	189
		第七节 电动机的保护	193
		习题	195
		第七章 典型设备的电气控制	198
		第一节 电气控制电路分析基础	198

第二节	Z3040 型摇臂钻床的电气控制	204	第三节	组合机床的电气控制	275
第三节	XA6132 型卧式万能铣床的电气控制	211	习题		278
第四节	T68 型卧式镗床的电气控制	220	第十章 电气控制系统设计		279
第五节	交流桥式起重机的电气控制	226	第一节	电气控制设计的原则和内容	279
习题		235	第二节	电力拖动方案的确定和电动机的选择	280
*第八章 交流双速信号控制电梯的电气控制		236	第三节	电气控制电路设计的一般要求	283
第一节	电梯的基本结构、分类及基本参数	236	第四节	电气控制电路设计的方法与步骤	286
第二节	电梯的安全保护系统	238	第五节	常用控制电器的选择	290
第三节	交流双速信号控制电梯的电气控制	241	第六节	电气控制的施工设计与施工	296
第四节	电梯电气控制系统的常见故障及分析	258	习题		300
习题		260	附录		302
*第九章 组合机床的电气控制		262	附录 A	低压电器产品型号编制方法	302
第一节	组合机床控制电路基本环节	262	附录 B	电气图常用图形及文字符号一览表	305
第二节	通用部件的控制电路	266	参考文献		308

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。

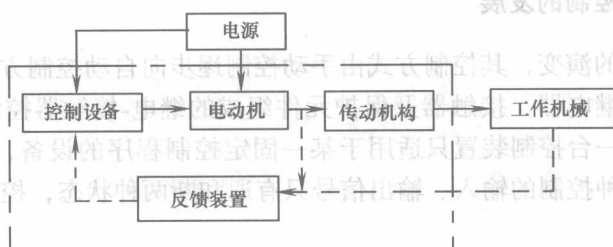


图 0-1 电力拖动系统

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气机，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:起动、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、解决的问题能力，努力成为合格的高级应用型人才。

本书共分五章。第一章为绪论，介绍本课程的教学目的、任务、学习方法及本课程在电气工程及其自动化专业中的地位。第二章为变压器的基本原理，介绍变压器的结构、工作原理、铭牌数据、变比、效率、损耗、绝缘、冷却、保护及试验。第三章为特殊变压器的基本原理，介绍自耦变压器、三绕组变压器、电抗器、互感器、特种变压器。第四章为变压器的运行，介绍变压器的运行特性、并列运行、短路、过电压、过电流、绝缘老化、油质劣化、故障及检修。第五章为变压器的维护与检修，介绍变压器的巡视检查、维护、检修及试验。

第一章 变压器的基本原理

第一节 变压器的基本原理

变压器是电力系统中不可缺少的重要设备，它的作用是将电能从一种电压等级变换到另一种电压等级，从而实现电能的远距离输送和分配。



图 1-1 变压器的基本原理

变压器的工作原理基于电磁感应定律。当交流电通过初级绕组时，在铁芯中产生交变磁通。这个磁通穿过铁芯并穿过次级绕组，从而在次级绕组中感应出电动势。如果次级绕组与负载连接，就会有电流流过，从而实现电能的传递。

变压器的主要参数包括变比、效率、损耗、绝缘、冷却、保护及试验。变比是指初级电压与次级电压之比，它决定了变压器的电压变换能力。效率是指输出功率与输入功率之比，反映了变压器的能量转换效率。损耗包括铜损和铁损，是变压器运行时的主要能量损失。绝缘、冷却、保护及试验是保证变压器安全可靠运行的关键因素。

$$\begin{aligned}
 \frac{e_b}{I_b} \cdot I_b &= I_b^2 R \\
 \frac{e_b}{I_b} \cdot I_b &= I_b^2 R \\
 \frac{I_b}{I_a} &= \frac{I_b}{I_a} = \frac{I_b}{I_a}
 \end{aligned}
 \tag{1-1}$$

图

变压器的变比是指初级电压与次级电压之比，它决定了变压器的电压变换能力。

第二节 变压器的运行特性

变压器的运行特性是指变压器在运行过程中，其电压、电流、功率、效率等参数的变化规律。了解变压器的运行特性对于变压器的运行和维护具有重要意义。

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 。

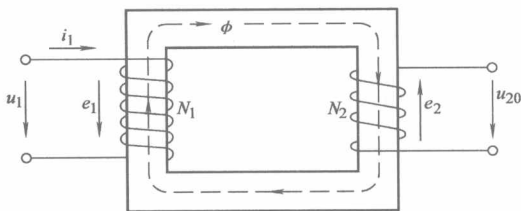


图 1-1 变压器基本工作原理

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

$$\begin{aligned}
 e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} \\
 e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} \\
 \text{则} \quad \frac{e_1}{e_2} &= \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{1-1}
 \end{aligned}$$

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 $S = \sqrt{3}UI\cos\varphi$ ，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，均采用低压用电，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：供输配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铁轭。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。

(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。

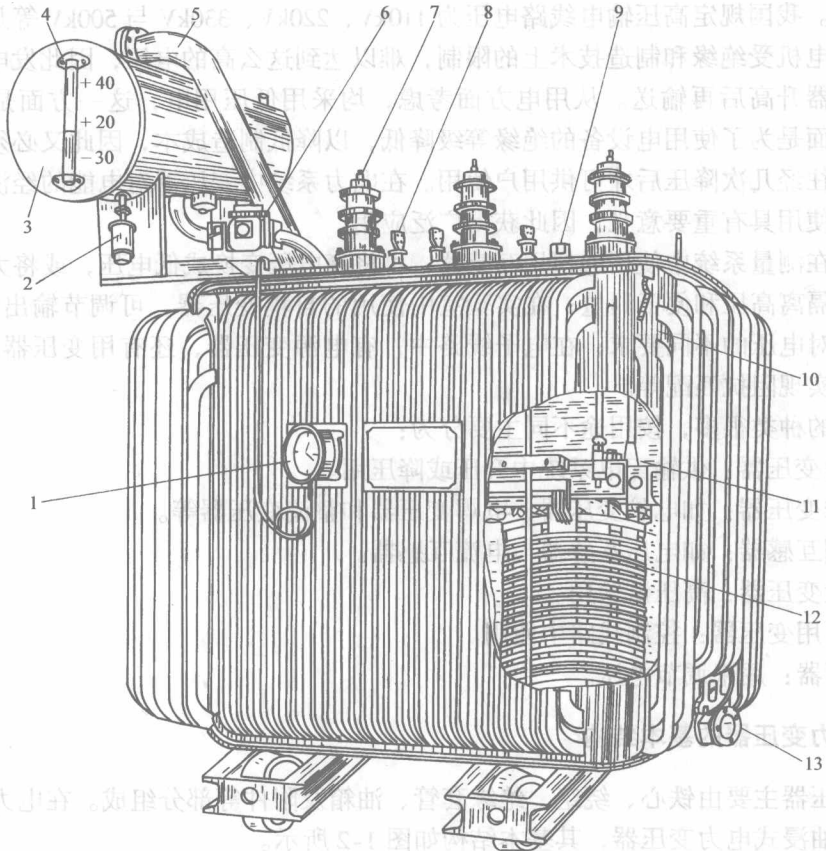


图 1-2 油浸式电力变压器

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

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数据，以便正确、合理地使用变压器，使变压器安全、合理、经济地运行，图 1-3 为电力变

压器的铭牌。

(一) 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。

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·A 或 kV·A。

单相变压器的额定容量为

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

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} 为一次绕组额定电压，它是根据变压器的绝缘强度和允许发热条件而规定的一次绕组正常工作电压值。

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时，二次绕组的空载电压值。对于三相变压器，额定电压值指的是线电压，单位为 V 或 kV。

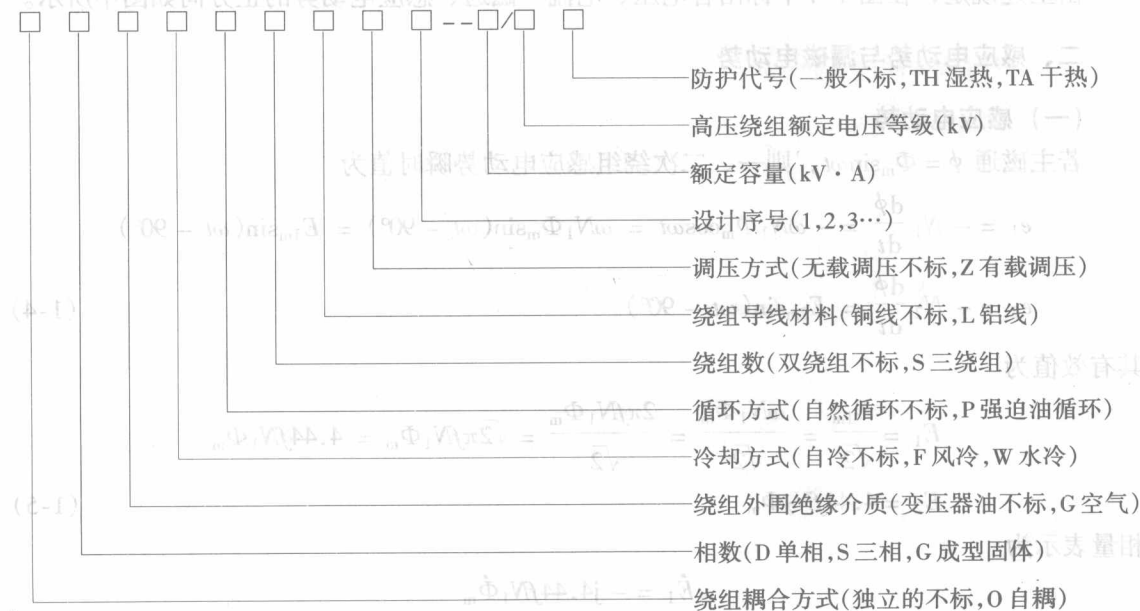
3. 额定电流 I_{N1} 和 I_{N2} 额定电流是根据允许发热条件所规定的绕组长期允许通过的最大电流值，单位是 A 或 kA。 I_{N1} 是一次绕组的额定电流； I_{N2} 是二次绕组的额定电流。对于三相变压器，额定电流是指线电流。

4. 额定频率 f 我国规定的标准工业用电频率为 50Hz。

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、额定容量和高压侧的电压等级 (kV)，其型号具体意义如下：



产品型号	S9_500/10	标准号	
额定容量	500kVA	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

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 $\dot{F}_0 = \dot{I}_{10} N_1$,为交变磁通。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} 。

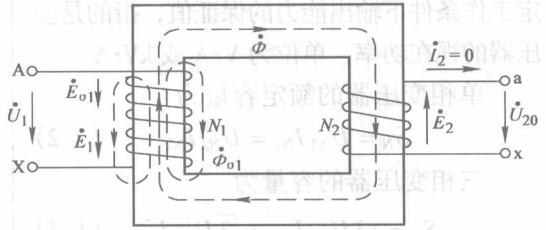


图 1-4 单相变压器空载运行原理图

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 $\dot{\Phi}$, 这二者的正方向符合右手螺旋定则。
- 3) 由交变磁通 ϕ 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,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

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\phi}{dt} = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-4)$$

其有效值为

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m \\ E_2 &= 4.44 f N_2 \Phi_m \end{aligned} \quad (1-5)$$

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流频率 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

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

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

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

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

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}_2 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，其与主磁通同相位；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% ~ 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 $\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$ 、 $\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$ 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。

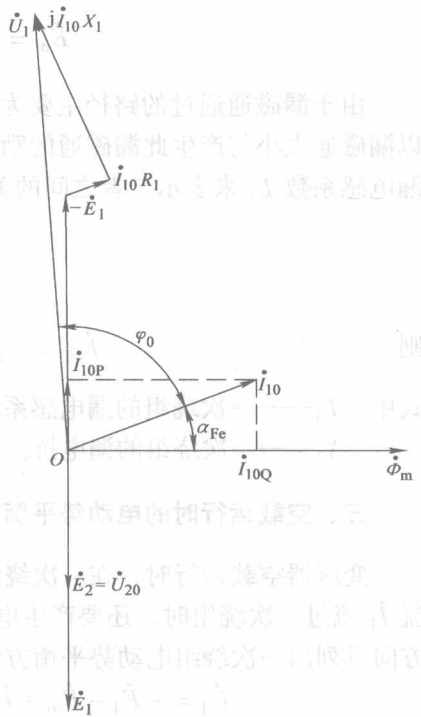


图 1-5 变压器空载运行时的相量图

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。

一、负载运行时的各物理量

当变压器二次绕组接上负载 Z_L 时，在感应电动势 \dot{E}_2 作用下，二次绕组中流过电流 \dot{I}_2 ， \dot{I}_2 随负载的变化而变化。 \dot{I}_2 流过二次绕组 N_2 时建立磁通势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ，此时铁心中的主磁通 $\dot{\Phi}$ 不再单由一次绕组的磁通势 \dot{F}_1 产生，而

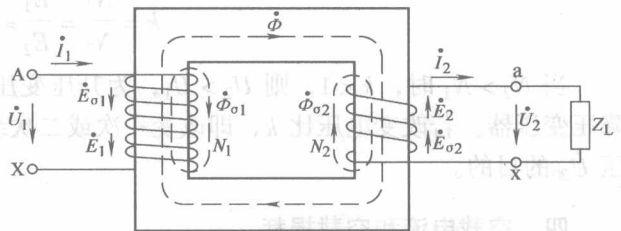


图 1-6 变压器负载运行示意图

是由一次和二次绕组的磁通势 \dot{F}_1 、 \dot{F}_2 共同产生。 \dot{F}_2 的出现将使主磁通最大值 $\dot{\Phi}_m$ 趋于减小, 随之感应电动势 \dot{E}_1 也将减小。由于电源电压 \dot{U}_1 不变, \dot{E}_1 的减小将导致一次电流 \dot{I}_1 增加, 即由空载电流 \dot{I}_{10} 变为负载电流 \dot{I}_1 , 其增加的磁通势以抵消 $\dot{I}_2 N_2$ 磁通势对空载主磁通的去磁影响, 使加负载时的主磁通值基本回升到空载时的值。这也就是说, 一次电流增加量 $\Delta \dot{I}_1 = \dot{I}_1 - \dot{I}_{10}$ 所产生的磁通势 $\Delta \dot{I}_1 N_1$ 基本上与二次绕组电流 \dot{I}_2 产生的磁通势 $\dot{I}_2 N_2$ 两者大小相等, 方向相反, 可以相抵消, 因此可以维持主磁通基本不变, 即

$$\Delta \dot{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad (1-14)$$

式 (1-14) 表明变压器负载运行时, 一、二次电流紧密地联系在一起, 二次电流的变化同时引起一次电流的变化。从功率角度分析, 二次侧输出功率的变化, 也必然会引起一次侧从电网吸取功率的变化。

二、变压器负载运行时的基本方程式

(一) 磁通势平衡方程式

负载运行时, 一次绕组磁通势 $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$ 和二次绕组磁通势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 共同作用, 产生铁心中的主磁通, 而且基本维持空载时的主磁通, 则变压器负载运行时磁通势平衡方程式为

$$\begin{aligned} \dot{F}_1 + \dot{F}_2 &= \dot{F}_{10} \\ \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 &= \dot{I}_{10} N_1 \end{aligned} \quad (1-15)$$

两边同时除以 N_1 , 则电流平衡方程式为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \right) = \dot{I}_{10} + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k} \right) = \dot{I}_{10} + \dot{I}_{1L} \quad (1-16)$$

上式表明, 变压器负载运行时, 一次电流 \dot{I}_1 有两个分量: 一个是空载电流 \dot{I}_{10} , 用以产生负载时铁心中的主磁通; 另一个是负载分量 \dot{I}_{1L} , 起到抵消二次绕组磁通势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 的去磁作用, 以保持主磁通基本不变。

由于 $I_{10} \ll I_1$, 在忽略 I_{10} 时, 一、二次绕组电流关系为 $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2/k$, 其有效值为

$$I_1 = I_2/k \quad (1-17)$$

(二) 电动势平衡方程式

二次绕组接上负载 Z_L , 流过负载电流 \dot{I}_2 , 建立了 \dot{F}_2 , 而 \dot{F}_2 除了与一次绕组磁通势共同建立主磁通外, 还有一小部分漏磁通 $\dot{\Phi}_{\sigma 2}$ 只与二次绕组交链, 在二次绕组中产生相应的漏磁电动势 $\dot{E}_{\sigma 2}$, 且类似于 $\dot{E}_{\sigma 1}$ 的计算。 $\dot{E}_{\sigma 2}$ 也可用漏抗压降表示, 即

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\omega L_2 \dot{I}_2 = -j\dot{I}_2 X_2 \quad (1-18)$$

参照图 1-6 所示各物理量正方向规定, 负载运行时的一、二次绕组的电动势平衡方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-19)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-20)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L \quad (1-21)$$

式中 R_2 ——二次绕组的电阻;

X_2 ——二次绕组的漏电抗;