



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

(电气运行与控制专业)

许 蓼 主编



43



机械工业出版社



140

1143-4
V781

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

(电气运行与控制专业)

主 编 许 蓼
参 编 苏世军
责任主审 吴锡龙
审 稿 陈立人 高联辉



机械工业出版社

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、电动机的基本控制电路、典型设备的电气控制、交流电梯的电气控制以及组合机床电气控制等。

本书内容丰富、重点突出，集电机、电力拖动基础与工厂常用电气设备于一体，前呼后应，内容进行了筛选和更新，避免了不必要的重复，实用性、应用性强。对工厂电气控制设备的运行、维修、常见故障进行了分析，对电动机、变压器常见故障进行了讨论，全书突出实践技能的培养。

该书为“中等职业教育国家规划教材”，是电气运行与控制专业主干课的教材，也可作为电工培训的教材，亦可供有关专业师生、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/许彥主编. —北京:机械工业出版社, 2002.6

中等职业教育国家规划教材. 电气运行与控制专业

ISBN 7-111-10422-6

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. ①TM3 ②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 041997 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 贡克勤 版式设计: 张世琴 责任校对: 刘志文

封面设计: 姚毅 责任印制: 闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·18.5 印张·459 千字

0 001—4 000 册

定价: 22.00 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) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

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。

全书共九章。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蓼主编。参加本书编写的有河北省机电学校苏世军（编写五、六章），其余由许蓼编写。

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

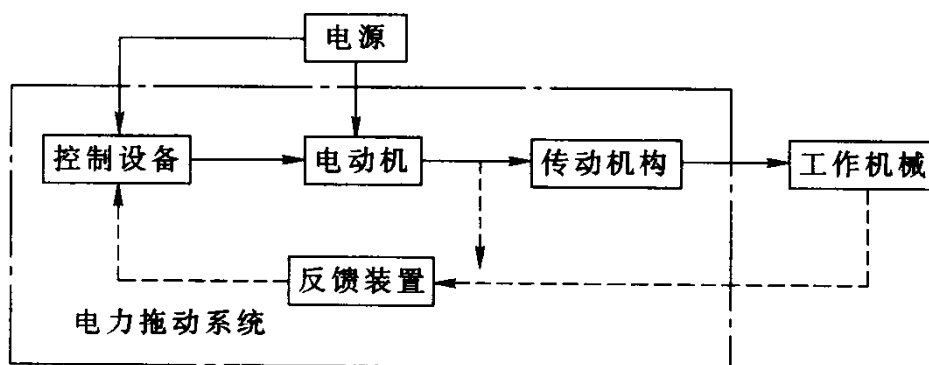
目 录

| | | | |
|------------------------|-----------|------------------------|------------|
| 前言 | | 小结 | 98 |
| 绪论 | 1 | 习题 | 100 |
| 第一章 变压器 | 3 | * 第四章 常用控制电机 | 101 |
| 第一节 变压器基本工作原理和结构 | 3 | 第一节 控制电机概述 | 101 |
| 第二节 单相变压器的空载运行 | 7 | 第二节 伺服电动机 | 101 |
| 第三节 单相变压器的负载运行 | 10 | 第三节 测速发电机 | 104 |
| 第四节 三相变压器 | 13 | 第四节 步进电动机 | 108 |
| 第五节 变压器的常见故障分析 | 19 | 小结 | 110 |
| * 第六节 其他用途的变压器 | 20 | 习题 | 111 |
| 小结 | 24 | 第五章 常用低压电器 | 112 |
| 习题 | 25 | 第一节 常用低压电器基本知识 | 112 |
| 第二章 三相异步电动机 | 27 | 第二节 电磁式接触器 | 118 |
| 第一节 三相异步电动机的结构与工作原理 | 27 | 第三节 电磁式继电器 | 123 |
| 第二节 三相异步电动机的空载运行 | 34 | 第四节 热继电器 | 133 |
| 第三节 三相异步电动机的负载运行 | 35 | 第五节 熔断器 | 136 |
| 第四节 三相异步电动机的工作特性 | 38 | 第六节 低压断路器与主令电器 | 139 |
| 第五节 三相异步电动机的电磁转矩 | 39 | 第七节 速度继电器与转换开关 | 145 |
| 第六节 三相异步电动机的机械特性 | 42 | 小结 | 146 |
| 第七节 电力拖动基本知识 | 45 | 习题 | 147 |
| 第八节 三相异步电动机的起动 | 49 | 第六章 电动机的基本控制电路 | 149 |
| 第九节 三相异步电动机的制动 | 54 | 第一节 电动机的选择与控制原则 | 149 |
| 第十节 三相异步电动机的调速 | 58 | 第二节 电气控制系统图 | 151 |
| 第十一节 三相异步电动机的运行维护与故障分析 | 65 | 第三节 三相笼型异步电动机的全压起动控制电路 | 155 |
| * 第十二节 单相异步电动机 | 69 | 第四节 三相笼型异步电动机的减压起动控制电路 | 160 |
| 小结 | 75 | 第五节 三相绕线转子异步电动机的起动控制电路 | 164 |
| 习题 | 78 | 第六节 三相异步电动机的电气制动控制电路 | 166 |
| 第三章 直流电机 | 80 | 第七节 三相异步电动机的调速电路 | 171 |
| 第一节 直流电机的基本原理与结构 | 80 | 第八节 直流电动机的控制电路 | 172 |
| 第二节 直流电动机的电磁转矩和电枢电动势 | 84 | 第九节 电动机的保护 | 176 |
| 第三节 直流他励电动机的运行原理与机械特性 | 85 | 小结 | 177 |
| 第四节 直流他励电动机的起动和反转 | 89 | 习题 | 178 |
| 第五节 直流他励电动机的制动 | 91 | 第七章 典型设备的电气控制 | 180 |
| 第六节 直流他励电动机的调速 | 96 | 第一节 电气控制电路分析基础 | 180 |

| | | | | | |
|----------------------|-------------------|-----|-------------------------------|------------------|-----|
| 第二节 | M7130 型平面磨床的电气控制 | 184 | 第六节 | 电梯电气设备的安装和调整 | 255 |
| 第三节 | Z3040 型摇臂钻床的电气控制 | 189 | 第七节 | 电梯电气控制系统的常见故障及分析 | 258 |
| 第四节 | XA6132 型卧式铣床的电气控制 | 199 | 小结 | | 260 |
| 第五节 | T68 型卧式镗床的电气控制 | 207 | 习题 | | 261 |
| 第六节 | 交流桥式起重机的电气控制 | 213 | * 第九章 组合机床的电气控制 | | 263 |
| 小结 | | 225 | 第一节 | 组合机床控制电路基本环节 | 263 |
| 习题 | | 226 | 第二节 | 通用部件的控制电路 | 267 |
| 第八章 交流电梯的电气控制 | | 227 | 第三节 | 组合机床的电气控制 | 277 |
| 第一节 | 电梯的基本结构、分类和基本参数 | 227 | 小结 | | 279 |
| 第二节 | 电梯的机械系统与安全防护系统 | 229 | 习题 | | 279 |
| 第三节 | 电梯的主要电器部件 | 232 | 附录 | | 281 |
| 第四节 | 电梯电气控制基本环节 | 235 | 附录 A 低压电器产品型号编制方法 | | 281 |
| 第五节 | 交流双速信号控制电梯的电气控制 | 239 | 附录 B 电气图常用图形及文字符号新旧对照表 | | 283 |
| | | | 参考文献 | | 290 |

绪 论

我们知道，电能是现代工业生产的主要能源和动力，而电动机又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，三者关系如下所示。



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反馈装置，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，而继电器、接触器均为带触点的控制电器，所以又称为有触点系统。为提高系统工作的可靠性，进而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的、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运用，正在不断的完善和提高。

电力拖动具有许多其它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，快速性好且效率高，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。而且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，电力拖动的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，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，而且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，常用的连续控制元件有晶闸管，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。最新发展起来的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运行与控制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，在进行了电工实训的基础上进行讲授的，使学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。本课程是原有的《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的有机结合，加强了电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的分析能力，和对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运行与控制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，培养出合格的中等应用型人才。

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，将某一等级的交流电压和电流转变成同频率另一等级电压和电流的设备。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、电气控制中都具有广泛的应用。

本章对一般用途的电力变压器工作原理、基本结构、运行情况作一介绍，以便掌握变压器变电压、变电流、变阻抗的三大作用，掌握三相变压器的联接组别；理解变压器铭牌数据涵义；学会正确使用和选择变压器。

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，套上了两个相互独立的、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 。

当在一次绕组中加上交流电压 \dot{U}_1 时，在 \dot{U}_1 的作用下，流过交流电流 I_1 ，并建立交变磁通势，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 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 。二次绕组在感应电动势 \dot{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：

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

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

由于 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ ， $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$ 。则一、二次绕组电压和电动势有效值与匝数的关系为：

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

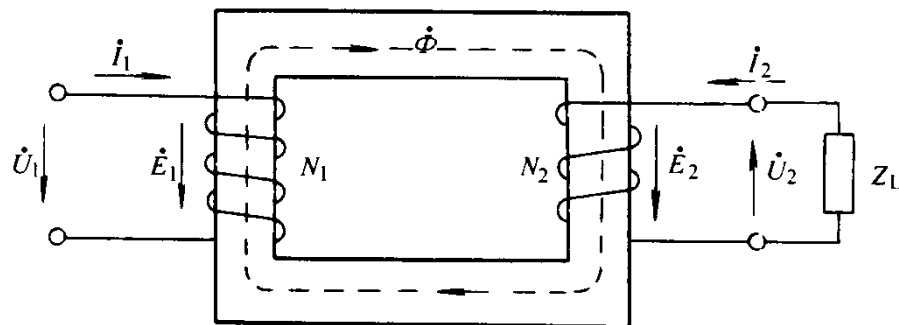


图 1-1 变压器工作原理

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。在磁通势一定的

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 U_2 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、变压器的应用与分类

变压器除了能够变换电压外，在以后的分析中还可以知道，变压器还能够变换电流和阻抗，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，变压器是电能输配电的主要电气设备。从输电方面说，由交流电功率 $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ 可知，如果输电线路输送的电功率 P 及功率因数 $\cos \varphi$ 一定，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将电压升高后再输送。从用电方面说，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电设备的绝缘等级降低以降低制造成本。这就必须经降压变压器，往往经几次降压后再供用户使用。所以，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，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，变压器主要分为：

- (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、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，如图 1-2 所示。其基本结构是：

(一) 铁心

铁心是变压器磁通闭合的路径，又是绕组的支撑骨架。铁心由心柱和铁轭两部分组成，心柱上套装有绕组，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、低压绕组同心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，国产电力变压器均采用此结构。

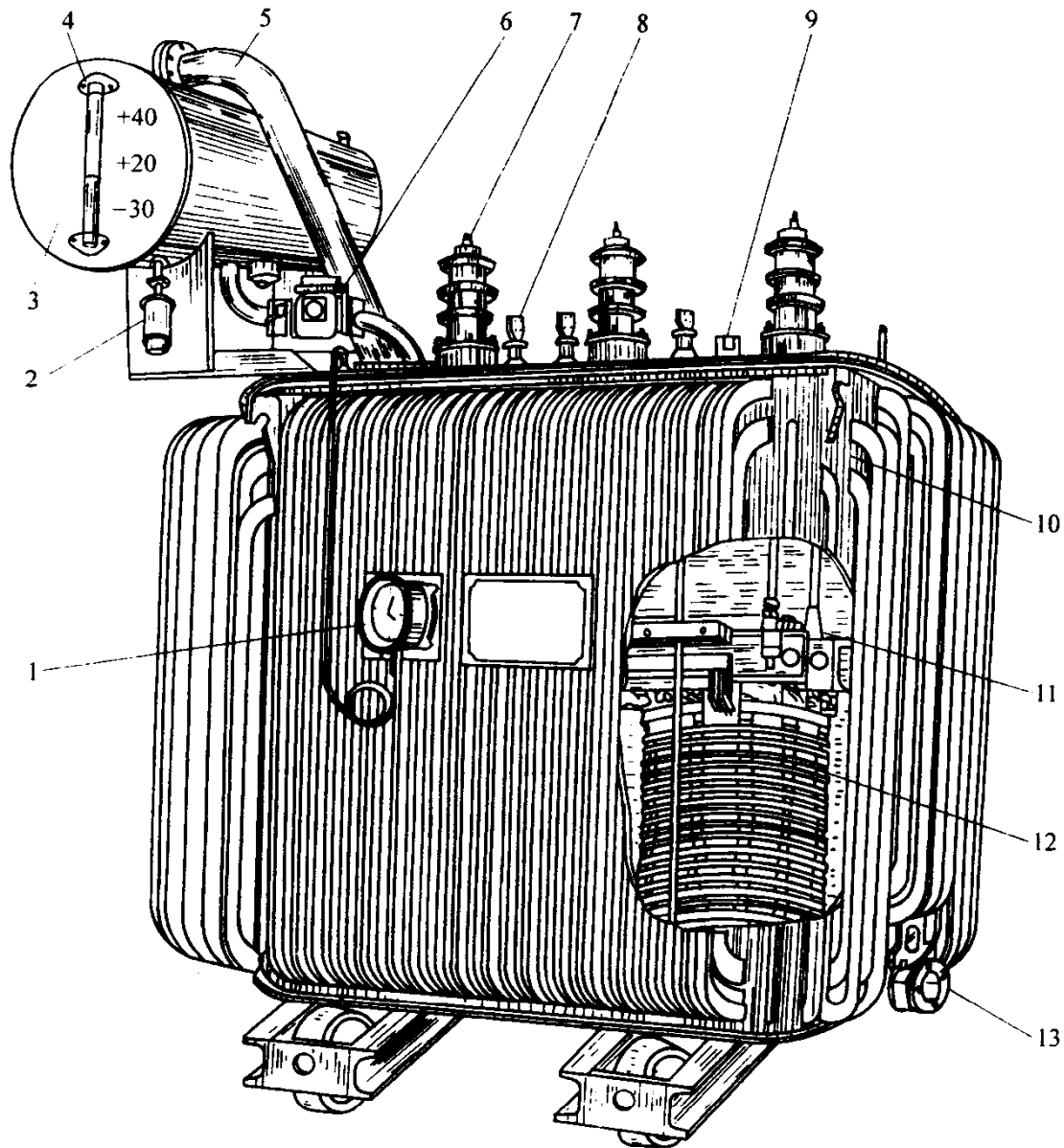


图 1-2 油浸式电力变压器

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

(三) 绝缘套管

绝缘套管是变压器绕组的引出装置，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被潮湿所侵蚀。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。

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。

三、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。

| | | | |
|------|-------------|------|--------|
| 产品型号 | S7_500/10 | 标准号 | |
| 额定容量 | 500 kVA | 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 | 3相 | 油重 | 302kg |
| 联接级别 | Y yno | 总重 | 1753kg |
| 制造厂 | | 生产日期 | |

图 1-3 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 $V \cdot A$ 或 $kV \cdot A$ 。

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容许发热条件所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，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。

额定电压的单位为 V 或 kV 。

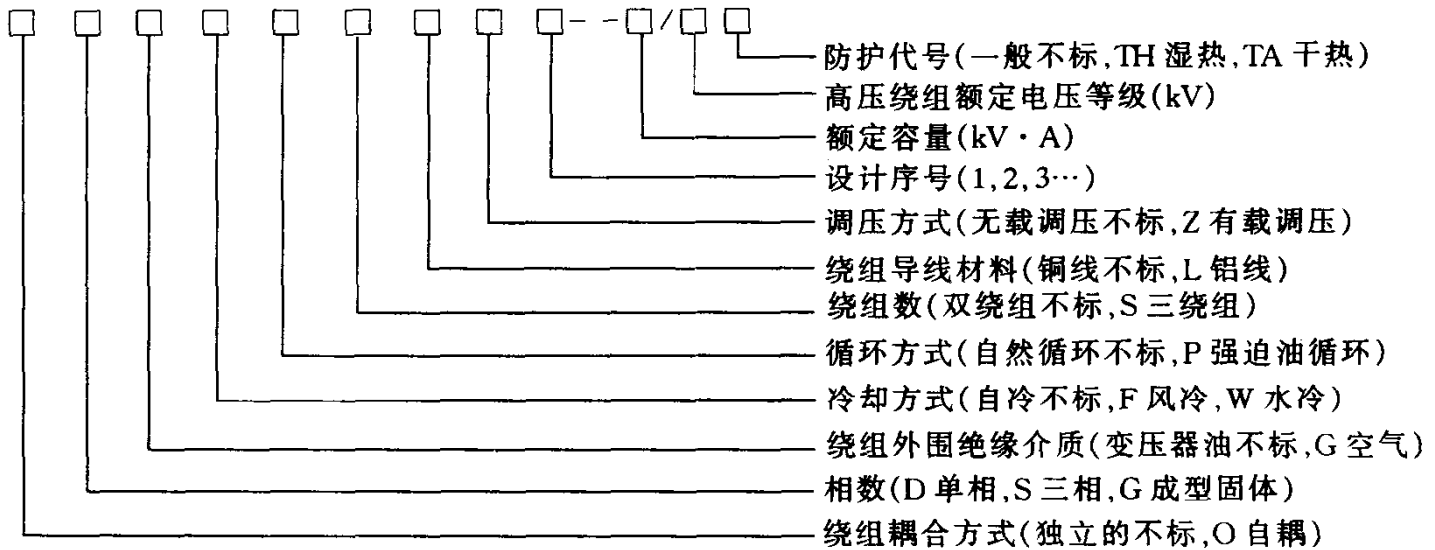
3. 额定电流 I_{N1} 和 I_{N2} 额定电流是根据允许发热条件所规定的绕组长期允许通过的最大电流值，单位是 A 或 kA 。 I_{N1} 是一次绕组的额定电流； I_{N2} 是二次绕组的额定电流。对于三相变压器，额定电流是指线电流。

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：



目前我国生产的变压器系列产品有 SJL1 (三相油浸自冷式铝线电力变压器)、SL7 (三相油浸自冷式铝线电力变压器)、S7 和 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)、SWPO (三相强油水冷自耦电力变压器) 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, 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 $\dot{F}_0 = \dot{I}_{10} N_1$, 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} 。

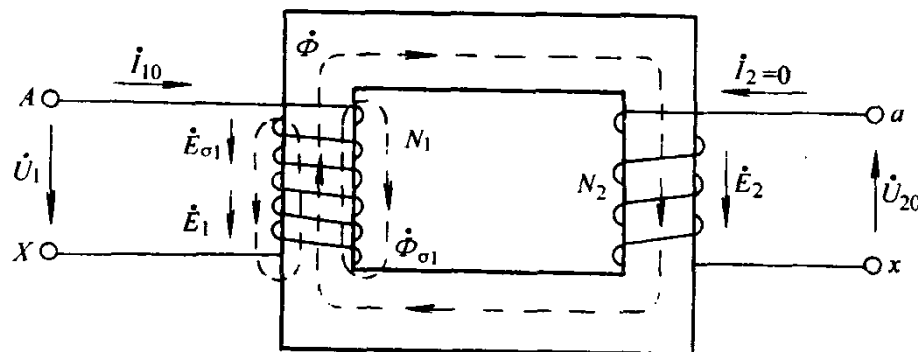


图 1-4 单相变压器空载运行原理图

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 E ，二者的正方向符合右手螺旋定则，即 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

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

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：

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \\ \dot{E}_2 &= -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \end{aligned} \quad (1-6)$$

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 $\phi_{\sigma 1}$ 在一次绕组中产生漏磁感应电动势 $E_{\sigma 1}$ 为：

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

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：

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

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：

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

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 就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 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 I_{10} 分解成两部分，一部分为无功分量 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 I_{10P} ，用来供给变压器铁心损耗，其超前主磁通 90° ，即：

$$I_{10} = I_{10P} + I_{10Q} \quad (1-13)$$

空载电流一般只占额定电流的 $(2 \sim 10)\%$ ，而 $I_{10P} < 10\% I_{10}$ ，因此 $I_{10} \approx I_{10Q}$ ，所以空载电流 I_{10} 主要用来建立主磁通。故近似称作励磁电流。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 $I_{10}^2 R_1$ ，它只占空载损耗的 2% ，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。

由空载运行时的电动势平衡方程式 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_{10}R_1 + j\dot{I}_{10}X_1$ 与 $\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$ 和 $I_{10} = I_{10P} + I_{10Q}$ 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 $\dot{\Phi}_m$ 作参考相量，画在水平线上；再由 $\dot{E}_1 = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m$ 、 $\dot{E}_2 = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m$ 画出滞后 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ 的 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 相量；然后根据 I_{10Q} 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相位， I_{10P} 超前 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ ，和 $I_{10P} + I_{10Q} = I_{10}$ 画出 I_{10} 相量， 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 I_{10} 相位差角 $\varphi_0 \approx 90^\circ$ ，一般 $\cos\varphi = 0.1 \sim 0.2$ ，变压器空载运行时的功率因数很低。

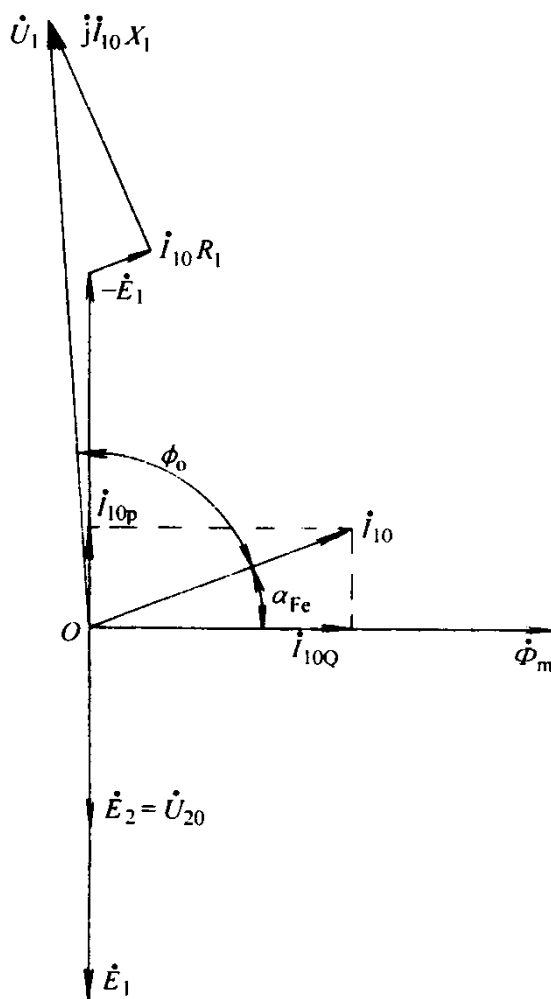


图 1-5 变压器空载运行时的相量图

第三节 单相变压器的负载运行

变压器的负载运行是指一次绕组加上额定正弦交流电压，二次绕组接负载 Z_L 时的运行，如图 1-6 所示。

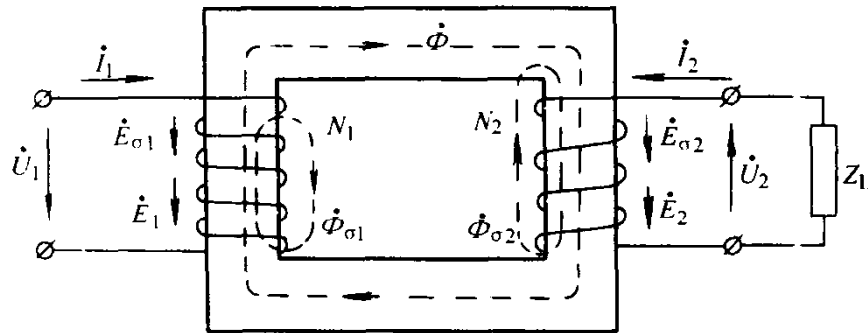


图 1-6 变压器负载运行示意图

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 E_2 作用下，二次绕组中流过电流 I_2 ， I_2 随负载的变化而变化。 I_2 流过二次绕组 N_2 时建立磁通势 $F_2 = I_2 N_2$ ，此时铁心中的主磁通 Φ 不再单由一次绕组的磁通势 F_1 决定，而是由一次和二次绕组的磁通势 F_1 、 F_2 共同产生。 F_2 的出现将使主磁通最大值 Φ_m 趋于减小，随之感应电动势 E_1 也将减小。由于电源电压 U_1 不变， E_1 的减小将导致一次电流 I_1 增加，即由空载电流 I_{10} 变为负载电流 I_1 ，其增加的磁通势以抵消 $I_2 N_2$ 磁通势对空载主磁通的去磁影响，使负载时的主磁通基本回升到空载时的值。这也就是说，一次电流增加量 $\Delta I_1 = I_1 - I_{10}$ 所产生的磁通势 $\Delta I_1 N_1$ 基本上与二次绕组电流 I_2 产生的磁通势 $I_2 N_2$ 相抵消，以维持主磁通基本不变。若忽略空载与负载时主磁通的微小变化 $\Delta I_1 N_1 + I_2 N_2 = 0$ 。

$$\Delta I_1 = -\frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (1-14)$$

上式表明，变压器负载运行时，通过上述电磁关系，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。从功率上分析，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 $F_1 = I_1 N_1$ 和二次绕组磁通势 $F_2 = I_2 N_2$ 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：

$$\begin{aligned} F_1 + F_2 &= F_{10} \\ I_1 N_1 + I_2 N_2 &= I_{10} N_1 \end{aligned} \quad (1-15)$$

两边除以 N_1 ，则得电流平衡方程式为：

$$I_1 = I_{10} + \left(-\frac{N_2}{N_1} I_2\right) = I_{10} + \left(-\frac{I_2}{k}\right) = I_{10} + I_{1L} \quad (1-16)$$

上式表明，变压器负载运行时，一次电流 I_1 有两个分量，一个是空载电流 I_{10} ，用以产生负载时铁心中的主磁通；另一个是负载分量 I_{1L} ，用来抵消二次绕组磁通势 $F_2 = I_2 N_2$ 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 $I_1 = -I_2/k$ ，其有效值为：

$$I_1 = \frac{I_2}{k} \quad (1-17)$$

(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 I_2 ，除建立二次绕组磁通势，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 Φ_{e2} 只与二次绕组交链，相应地在二次绕组中产生漏磁电动势 \dot{E}_{e2} 。且类似于 \dot{E}_{e1} 的计算， \dot{E}_{e2} 也可用漏抗压降表示，即：

$$\begin{aligned} \dot{E}_{e1} &= -j\omega L_1 \dot{I}_1 = -j\dot{I}_1 X_1 \\ \dot{E}_{e2} &= -j\omega L_2 \dot{I}_2 = -j\dot{I}_2 X_2 \end{aligned} \quad (1-18)$$

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；

Z_2 ——二次绕组的漏阻抗；

Z_L ——二次侧负载阻抗。

综上所述，变压器负载运行时的基本方程式有：

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 &= \dot{I}_{10} N_1 \\ \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ E_1 &= kE_2 \\ I_1 &= \frac{I_2}{k} \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 Z_L \end{aligned}$$

三、变压器负载运行时的相量图

变压器负载运行时的电磁关系，除用基本方程表示外，还可以用相量图直观地表达出变压器运行时各物理量的大小关系和相位关系。

当已知负载情况 $Z_L = R_L + jX_L$ （常为感性负载）和变压器参数 k 、 R_2 、 X_2 、 R_1 、 X_1 和 U_{1N} 时，可按下列步骤作相量图：

- 1) 在图 1-5 变压器空载运行时的相量图已作出 $\dot{\phi}_m$ 、 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 、 \dot{I}_{10} 等相量基础上进行。
- 2) 计算 $\dot{I}_2 = \dot{E}_2 / (Z_2 + Z_L)$ ，其中 $Z_2 = R_2 + jX_2$ ， $Z_L = R_L + jX_L$ ，计算 $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2/k + \dot{I}_{10}$ ，并在相量图中作出 \dot{i}_2 与 \dot{i}_1 。
- 3) 计算 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$ 作出 \dot{U}_2 相量。
- 4) 计算 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ 作出 \dot{U}_1 相量。

由上述步骤作出如图 1-7 感性负载时变压器相量图。