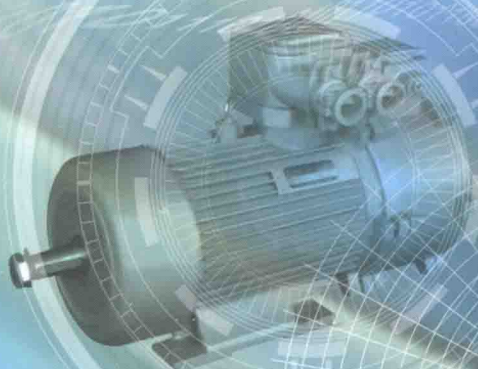


高等职业技术教育机电类系列教材

Gaodeng Zhiye Jishu Jiaoyu Jidianlei Xilie Jiaocai

电机与控制

■ 聂国伦 杨长兴 主编



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

Gaodeng Zhiye Jishu Jiaoyu Jidianlei Xilie Jiaocai

Dianji Yu Kongzhi

China University of Mining and Technology Press

责任编辑 郭 玉 封面设计 肖新生

ISBN 978-7-5646-0984-9



9 787564 609849 >

高等职业技术教育机电类系列教材

电机与控制

主编 聂国伦 杨长兴

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书共六章,内容包括:单相变压器,三相变压器;直流电动机及控制,V—M 直流调速控制系统;交流电动机及控制,交流电动机的变频调速技术;控制电机及应用;机床控制系统,基于 PLC 的矿井提升机变频调速系统。

本书适用于高职高专院校机电一体化技术、煤矿机电、自动化等专业的电机与拖动、电气控制技术类课程,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与控制/聂国伦,杨长兴主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2011.4

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0984 - 9

I. ①电… II. ①聂… ②杨… III. ①电机—控制系统—高等教育—教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第039373号

书 名 电机与控制
主 编 聂国伦 杨长兴
责任编辑 郭 玉
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 淮安市亨达印业有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 16 字数 389 千字
版次印次 2011 年 4 月第 1 版 2011 年 4 月第 1 次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

《电机与控制》教材编写委员会

主 编：聂国伦 杨长兴

副主编：杨 曹

参 编：白生威 胡 楷 成 洋

方章英 张 立 田小涛

前 言

为了配合高职高专的教学改革,培养与我国社会主义现代化建设要求相适应,德、智、体、美全面发展,具有扎实基础知识,掌握专业知识和技能,能够从事生产一线工作的高素质劳动者和技能型人才。本教材力求紧密结合专业需求,重视基础理论和生产技能相结合;做到概念正确、清晰,内容简洁、易懂,突出培养学生的实操能力和应用能力。

本教材遵循循序渐进,逐步提高学习难度的原则。把变压器和直流电动机作为课程学习的入门,以降低初学难度;以交流异步电动机为重点,突出生产实际中的应用;落脚于实际控制系统,使学生掌握复杂继电器—接触器控制系统和 PLC 控制系统的结构、工作原理和系统分析方法。

本教材加强了变频技术、PLC 技术的理论和应用。基于 PLC 控制的矿井提升机变频调速系统的内容丰富,讲解翔实,实用性强,契合矿山提升运输机械技术升级改造的潮流,具有较高的技术参考价值。本教材注重理论教学与实训教学相结合,主要章节都有相应的实训指导,教师可以根据本校的实训实验条件进行实训教学,提高学生的操作技能,加强理论内容的理解和掌握。

本教材采用最新的相关国家标准。根据 GB/T 18891—2009《三相电力系统相导体的钟时序数标识》,把电力变压器的三相相序标注为“A、B、C”。根据 GB/T 4026—2004《人机界面标志标识的基本方法和安全规则—设备端子和特定导体终端标识及字母数字系统的应用通则》,把控制系统电源进线的相序标注为“ L_1 、 L_2 、 L_3 ”,电动机的相序标注为“U、V、W”。

本教材语言通俗、简洁、精炼,尽量避免长句、复杂句和冗余词句。

本教材推荐课时为 70~90 学时。建议配套安排电机拆装与维修实习 1~2 周。

本教材由河南理工大学高等职业学院聂国伦、陕西能源职业技术学院杨长兴任主编;安徽矿业职业技术学院杨曹任副主编;河南理工大学高等职业学院白生威、田小涛,陕西能源职业技术学院胡楷、成洋,安徽矿业职业技术学院方章英、张立参编。编写分工如下:杨曹和方章英编写第一章、杨曹和张立编写第二章,杨长兴和胡楷编写第三章,田小涛编写第四章第一节成洋编写第四章第二节,聂国伦编写第五章和第六章第一节,白生威编写第六章第二节。全书由聂国伦统稿。

本教材在编写过程中,得到各院校教师的大力支持和帮助,在此表示诚挚的感谢。望各位读者对本书的不足和谬误之处多多指正。

我们的 E-mail 是:jidianjiaocai@126.com。

编 者

2011 年 1 月

目 录

绪 论	1
第一章 变压器	3
第一节 单相变压器	3
实训 1-1 变压器的结构、特性和参数测试	15
第二节 三相变压器	18
实训 1-2 三相变压器的结构和连接组别认识	25
本章小结	27
习 题	28
第二章 直流电动机及其控制	29
第一节 直流电机	29
实训 2-1 直流他励电动机的拆装	50
实训 2-2 直流他励电动机特性测试	51
第二节 电力拖动动力学基础	53
第三节 直流他励电动机的控制	56
实训 2-3 直流他励电动机的起动与调速	67
本章小结	70
习 题	71
第三章 交流电动机及电力拖动	72
第一节 三相交流异步电动机	72
实训 3-1 异步电动机的拆装与修理	94
第二节 三相交流异步电动机的电力拖动	95
第三节 同步电动机和单相电动机	111
本章小结	114
习 题	115
第四章 三相交流电动机的控制	117
第一节 交流异步电动机的继电器—接触器控制电路	117
实训 4-1 三相交流异步电动机点动控制线路安装与调试	149
实训 4-2 三相交流异步电动机长动控制线路安装与调试	150

实训 4-3	三相交流异步电动机点动与长动控制线路安装与调试	151
实训 4-4	三相交流异步电动机可逆控制线路(Ⅰ)安装与调试	151
实训 4-5	三相交流异步电动机可逆控制线路(Ⅱ)的安装与调试	152
实训 4-6	三相交流异步电动机反接制动控制线路安装与调试	153
实训 4-7	三相交流异步电动机能耗制动控制线路安装与调试	154
实训 4-8	两台电动机顺起顺停控制线路安装与调试	155
实训 4-9	两台电动机顺起逆停控制线路安装与调试	156
实训 4-10	交流异步电动机星形—三角形起动控制线路安装与调试	157
第二节	三相交流异步电动机的变频调速	157
实训 4-11	变频器的认识	182
实训 4-12	由变频器的面板设定频率控制电动机工作	182
实训 4-13	由模拟电压设定频率控制电动机工作	182
实训 4-14	由继电器控制变频器的电动机正转运行电路	183
实训 4-15	由继电器控制变频器的电动机正反转运行电路	184
本章小结		185
习 题		185
第五章	控制电机及应用	186
第一节	步进电机	186
第二节	伺服电机	191
第三节	其他控制电机	196
本章小结		200
习 题		200
第六章	典型控制系统	201
第一节	继电器—接触器控制系统	201
实训 6-1	复杂继电器—接触器控制系统的接线和故障检修	211
第二节	矿井提升机 PLC 变频调速控制系统	212
实训 6-2	PLC 控制系统的接线和故障检修	242
本章小结		242
习 题		243
参考文献		245
附 录		246

绪 论

电机是按照电磁感应原理制造而成、用于实现机械能与电能(或电信号)变换与传递的电磁机械装置的统称。

按电机的功能来分类,电机可分为:

- ① 发电机——把机械能转变成电能,分为交流发电机和直流发电机。
- ② 电动机——把电能转变成机械能驱动生产机械运转,分为直流电动机、交流异步电动机、交流同步电动机和单相电动机等。
- ③ 变压器、互感器、调相机等——用于改变电能或电信号的电压、电流、频率及相位。
- ④ 控制电机——在自动控制系统中实现机械量和电气量的相互精确转换的电机,有步进电动机、伺服电动机、旋转变压器、自整角机、直线电动机等。

上述各种电机中,有些是静止的,如变压器、互感器;多数是旋转的,如发电机、电动机与控制电机等。

本课程主要研究以电动机为主的各种电机的结构、工作原理、参数计算、控制系统和应用。

目前,拖动生产机械运转的动力机械有电动机、内燃机、汽轮机、水轮机和蒸汽机等。电力拖动有其他拖动方式无可比拟的优点:转矩连续恒定、运转平稳、转角和转速控制精度高、响应速度快、效率高、结构简单、体积小等。电动机的类型多,且具有各种不同的运行特性来满足各种类型生产机械的要求;系统参数的检测和信号的变换与传送方便,易于实现最优控制。因此,在工矿企业中,绝大多数生产机械都使用电动机拖动运转,电力拖动已成为现代工农业生产和生活的基础。

电机和电力拖动技术始于19世纪60~70年代的第二次工业技术革命。在法拉第电磁感应定律基础上,一系列电气发明相继出现。1866年,德国工程师西门子制成发电机;1870年比利时人格拉姆发明了电动机,电力开始成为取代蒸汽来拖动机器的新能源。随后,各种用电设备相继出现。1882年法国学者德普勒发明了远距离输电的方法。同年,美国著名发明家爱迪生创建了美国第一个火力发电站,把输电线结成网络,电力作为一种新能源而广泛应用。从此人类社会由蒸汽机时代步入了电气化时代。

现在,古老的电机学已经和电力电子技术、计算机技术、现代控制理论相结合,发展成了一门新的学科。随着自动控制理论不断发展,半导体器件和电力电子技术的采用,以及数控技术和计算机技术的发展与采用,自动控制的电力拖动系统正在不断地完善和提高。

现代电力拖动系统的结构如图0-1所示,主要由电动机、生产机械、控制装置和电源组成。电动机和控制装置是系统的主要和关键部分,也是本课程的研究对象。

《电机与控制》课程是各种机电类、电气类、自动化类专业的一门主干课程。它的主要任务是使学生理解常用的交直流电机、变压器、控制电机等的基本结构与工作原理,会选择电

机的类型、容量;掌握电力拖动系统的运行性能、试验方法、分析计算;理解电机的控制原理,掌握电机的控制方法;学会各种电机控制系统的接线、安装和故障检修等。

本课程的特点是缜密、系统的理论分析和工程实际应用紧密结合。学习本课程应该特别注意理论联系实际。分析电机与电力拖动的工作原理和参数计算要用电磁学和动力学的基础理论;研究各种电机和电力拖动的工程应用问题时,必须结合电机的具体结构,采用工程观点和工程分析方法,需要熟练地实验操作技能和计算能力;学习各种电机控制系统的工作原理时,要结合控制电器、PLC 工作原理,掌握常见控制系统的结构、接线和编程方法。

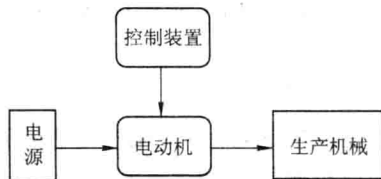


图 0-1 电力拖动系统的组成

学习本课程后,学生应掌握的知识和技能主要有:

- ① 常用的交、直流电机及变压器的基本原理和基本参数计算;
- ② 电动机机械特性以及各种运行状态的基本原理;
- ③ 电力拖动系统中各种电动机的起动、调速和制动的原理与方法;
- ④ 电机与电力拖动系统的基本实验方法与操作技能;
- ⑤ 电力拖动系统参数的计算;电力拖动系统中电动机类型、容量的选择;
- ⑥ 各种控制电机的工作原理、特性及应用;
- ⑦ 继电器—接触器控制系统的工作原理分析,简单故障的分析、排除;
- ⑧ V—M 直流电动机控制系统的工作原理、性能和应用,基于 PLC 控制技术的电动机控制原理、电路接线、程序编制和简单故障排除。

本课程的重点内容是交流异步电动机及其控制。难点是各种电动机的起动、调速和制动的方法和应用、各种电机的控制线路和控制系统的工作原理和故障检修。

电机及其控制技术是现代生产机械能高速度、高精度、高效率运转的关键技术。掌握电机及其控制技术是机电工程技术人员的基本素质和基本技能要求。学好本课程是成为一个具有高素质和高技能机电技术人才的必需。在您未来的职业生涯中,本课程将助您成才,也祝您成才!

第一章 变压器

主要内容：变压器的运行原理；变压器的运行参数、运行性能及分析方法；变压器的使用和日常维护检查。三相变压器的结构、参数、接线组别和应用。电流互感器和电压互感器的基本原理和应用。

教学目标：理解变压器的原理；掌握变压器参数的测定和计算的方法；能正确使用和维护变压器。学会判别三相变压器绕组的极性，掌握三相变压器接线组别的识别和接线方法，熟知变压器的正确使用和日常维护。

变压器是一种利用电磁感应原理变换交流电电压、电流的静止电器。它广泛应用于电力系统、电子线路、电气控制系统等，进行电能传输和信号变换。

变压器按照用途分，有电力变压器、互感器、供特殊电源用的变压器（如整流变压器、电炉变压器、电焊变压器、脉冲变压器）和电子电路变压器（信号耦合、变换）等。

按照绕组数目分，有双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器等。

按照相数分，有单相变压器、三相变压器和多相变压器等。

按照冷却方式分，有油浸自冷变压器、风冷变压器和干式变压器等。

本章介绍一般用途的电力变压器和互感器。

第一节 单相变压器

一、变压器的基本工作原理

图 1-1 是单相变压器的结构和基本工作原理图。单相变压器由一个闭合的铁芯和套在铁芯上的两个绕组构成。与电源连接的绕组称为原绕组，也称为一次绕组或原边；与负载连接的绕组称为副绕组，也称为二次绕组或副边。我们在表示原绕组电磁量的符号加下标“1”，在表示副绕组电磁量的符号加下标“2”，以示区别。例如， $\dot{U}_1$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{E}_1$ 分别表示原绕组的电压、电流、感应电动势相量； $\dot{U}_2$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{E}_2$ 分别表示副绕组的电压、电流、感应电动势相量。

将原绕组的两个出线端与单相交流电源连接，原绕组中便流过交流电流，该电流在铁芯中生成与电源频率相同的交变磁通，此交变磁通同时交链原、副绕组。根据电磁感应原理，原、副绕组中将分别感应出交变电动势。将副绕组的两个出线端与负载连接，负载就有交流电流通过。在这个过程中，电能从电源经变压器变换电压和电流后传递到负载。

单相变压器中各物理量的参考方向如图 1-1(c) 所示。

二、变压器空载运行

变压器空载运行指变压器一次绕组接额定频率、额定电压的交流电源，二次绕组开路的

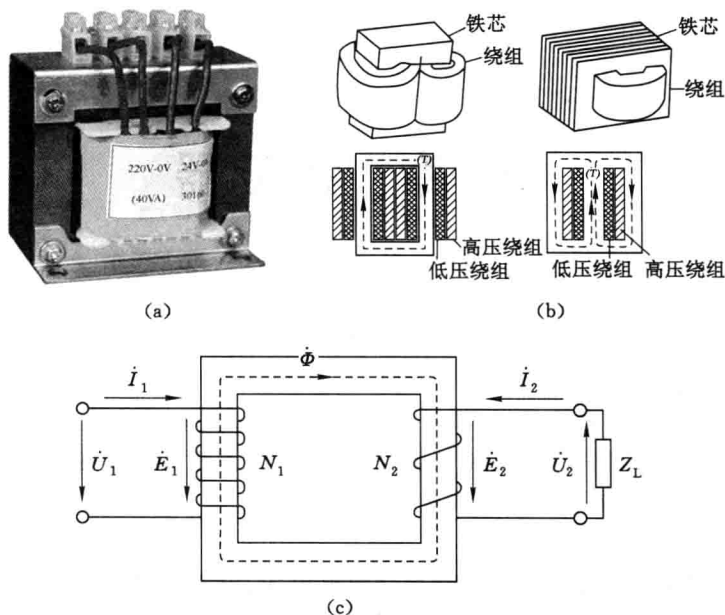


图 1-1 变压器结构与工作原理

(a) 小型单相变压器外形图; (b) 小型单相变压器结构图; (c) 变压器工作原理示意图

运行状态。

(一) 空载运行时的电磁过程

图 1-2 是单相变压器空载运行原理图。变压器空载运行时的电磁过程如下：

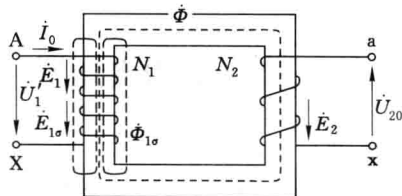


图 1-2 单相变压器空载运行原理

① 在变压器一次绕组施加电源电压 $\dot{U}_1$ ，在一次绕组中产生空载电流 $\dot{I}_0$ （取参考正方向与 $\dot{U}_1$ 正方向一致）。

② 空载电流在一次绕组的电阻 r_1 上产生压降 $\dot{I}_0 r_1$ ，在变压器铁芯中建立空载磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ ，产生交变磁通；铁芯磁导率远大于空气磁导率，绝大部分磁通沿铁芯闭合，同时交链一、二次绕组，称为主磁通 $\dot{\Phi}$ （取参考正方向与电流正方向符合“右手螺旋定则”）。另外有很少一部分磁通只交链一次绕组，主要沿非铁磁材料闭合，称为一次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 。

主磁通与漏磁通的区别：

a. 作用不同。主磁通同时交链一、二次绕组，起一、二次绕组间的耦合作用，是变压器实现电能传递的媒介；漏磁通仅交链一次绕组，表现为电感，在一次电路中产生漏感电动势。

b. 路径不同。主磁通沿铁磁材料闭合,铁磁材料磁阻小,但存在饱和性,磁化曲线是非线性的;漏磁通主要沿非铁磁材料闭合,非铁磁材料磁阻大,但不存在饱和性,磁化曲线是线性的。

③ 根据电磁感应定律,主磁通在一、二次绕组中分别产生感应电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ (取电动势参考正方向与磁通正方向符合“右手螺旋定则”),漏磁通只在一次绕组中产生感应漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 。

④ 二次绕组开路,二次绕组电流 I_2 等于零,二次绕组开路电压为 $\dot{U}_{20}$ 。当一次侧电源电压为额定电压 U_{1N} 时,把二次侧的开路电压 U_{20} 定义为变压器的二次侧额定电压 U_{2N} 。

(二) 空载运行时的主要物理量

1. 电源电压

空载运行时,一次绕组接额定频率、额定电压的正弦交流电,其相量表示为 $\dot{U}_1$ 。在变压器运行中,可认为 $\dot{U}_1$ 基本不变。

2. 空载电流

空载电流又称为激磁电流,空载电流 I_0 建立空载磁动势 $\dot{F}_0$,该磁动势在铁芯中产生交链一、二次绕组的主磁通 $\dot{\Phi}$,还在铁芯中产生涡流和磁滞损耗。因此,空载电流包含两个分量:一个分量是产生主磁通的无功分量,又称磁化电流,起激磁作用,与主磁通同相位,用 $\dot{I}_\mu$ 表示;另一个分量是对应变压器铁芯损耗的有功分量,又称铁损电流,超前主磁通 90° ,用 $\dot{I}_{Fe}$ 表示。

空载电流的数值很小,一般仅占额定电流的 $1\% \sim 10\%$,变压器容量愈大,空载电流占额定电流的百分数愈小。在空载电流的两个分量中,有功分量所占比重极小,仅为无功分量的 10% 左右,因此空载电流基本上属于无功性质,滞后电源电压 $\dot{U}_1$ 约 90° 。

3. 感应电动势

(1) 主磁通感应电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$,根据电磁感应定律,一次绕组的感应电动势为:

$$\begin{aligned} e &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \\ &= -N_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t + 90^\circ) = -E_{1m} \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-1)$$

有效值为:

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

相量表达式为:

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-3)$$

同理,二次绕组感应电动势为:

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-4)$$

(2) 一次绕组漏磁通感应电动势

由上述分析可知,一次绕组漏磁通在一次绕组的感应电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 为:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad (1-5)$$

由于一次绕组漏磁通主要通过非铁磁材料闭合,其磁导率近似为常数,所以漏磁通的大小与产生漏磁通的电流成正比,且相位相同。采用绕组漏电感 $L_{1\sigma}$ 来表示二者之间的关系,即:

$$L_{1\sigma} = \frac{\Psi_{1\sigma}}{I_0} = \frac{N_1\Phi_{1\sigma}}{I_0} = \frac{N_1\Phi_{1\sigma m}}{\sqrt{2}I_0} \quad (1-6)$$

式中 $L_{1\sigma}$ ——一次绕组漏电感。

将式(1-6)代入式(1-5),可得漏磁通感应电动势为:

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_0\omega L_{1\sigma} = -j\dot{I}_0x_{1\sigma} \quad (1-7)$$

式中 $x_{1\sigma}$ ——一次绕组的漏抗, Ω 。

4. 空载损耗

变压器空载运行时的有功损耗称为空载损耗,主要包括空载电流流过一次绕组时在电阻中产生的损耗(铜损)和交变磁通在铁芯中产生的损耗(铁损),铁损由涡流损耗和磁滞损耗组成。铁损占空载损耗的主要部分,可认为空载损耗约等于铁损。

(三) 空载运行时各物理量的关系

1. 一次绕组电动势平衡方程式

根据基尔霍夫第二定律,参照图 1-1 所示的参考正方向和图 1-2 所示的空载运行时各物理量的关系,可得一、二次绕组的电动势平衡方程式:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-8)$$

式中 Z_1 ——一次绕组漏阻抗, $Z_1 = r_1 + jx_{1\sigma}$ 。

忽略一次绕组漏阻抗压降不计时, $\dot{U}_1$ 和 $\dot{E}_1$ 两者大小相同,波形相同,但方向相反,因此 $\dot{E}_1$ 称为反电动势。

忽略一次绕组漏阻抗压降不计时,根据式(1-3)可得重要结论:当电源频率和绕组匝数不变时,主磁通的大小主要由电源电压 $\dot{U}_1$ 的大小决定,即当电源电压不变时,主磁通基本不变。这是分析变压器负载运行的重要依据。

2. 二次绕组电动势平衡方程式

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-9)$$

即变压器空载运行时二次端电压与二次电动势平衡。

3. 变压比

变压比定义为一、二次绕组电动势之比,简称变比,用 k_v 表示,即:

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

实际变压器的变压比通常用变压器一、二次侧额定电压之比表示。

(四) 空载运行的等效电路

在变压器中,既有电路和磁路问题,又有电和磁之间的相互关系。用一个等效电路来表征,就可使分析简化。等效电路在 $\dot{U}_1$ 和 f 不变的条件下,与变压器实际电磁关系等效。

由式(1-8)可知,漏磁通感应电动势可用漏抗压降的形式表示,主磁通感应的电动势 $\dot{E}_1$

也可用压降的形式来表示。引入一个激磁阻抗 Z_m , $\dot{E}_1$ 就可以用空载电流 $\dot{I}_0$ 在激磁阻抗 Z_m 上的压降来表示。即:

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m \quad (1-11)$$

式(1-11)中 Z_m 为激磁阻抗, $Z_m = r_m + jx_m$ 。其中 r_m 为励磁电阻, 是铁芯损耗的等效电阻; x_m 为激磁电抗, 是与主磁通对应的电抗, $x_m = \frac{2\pi f N_1^2}{R_m}$; R_m 是主磁通所经磁路的磁阻。

将式(1-11)代入式(1-8)可得:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 Z_m + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (Z_m + Z_1) \quad (1-12)$$

式(1-12)对应的电路即为变压器空载运行时的等效电路, 如图 1-3 所示。

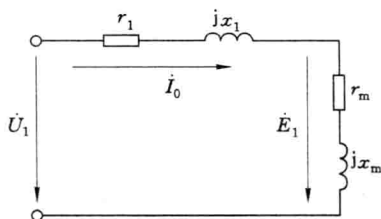


图 1-3 变压器空载运行时的等效电路

图 1-3 所示等效电路中的激磁阻抗参数 Z_m 随电源电压变化, 即随铁芯的饱和程度变化。但通常电源电压基本不变(为额定电压), 所以等效电路中的激磁阻抗参数一般取额定电压时的值, 且认为是常量。另外, 由于主磁通沿铁芯闭合, 所遇磁阻远小于漏磁通所遇磁阻, 因此 $Z_m \gg Z_1$ 。

(五) 空载运行时的相量图

根据前述变压器空载运行时各物理量之间的关系式可作出空载运行的相量图, 如图 1-4 所示。作图步骤如下:

- ① 以主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 作为参考相量。
- ② 根据 $\dot{E}_2 = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m$ 和 $\dot{E}_1 = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m$, 可画出 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$, 它们滞后主磁通 90° , 且 $\dot{E}_2 = \dot{U}_{20}$ 。
- ③ 根据空载电流的组成, 先画出与主磁通同相位的空载电流无功分量 $\dot{I}_\mu$, 再画出超前主磁通 90° 的空载电流有功分量 $\dot{I}_{Fe}$, 最后合成空载电流 $\dot{I}_0$ 。

- ④ 根据 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$ 作出 $\dot{U}_1$ 。先画出 $-\dot{E}_1$, 依次叠加 $\dot{I}_0 r_1$ (与 $\dot{I}_0$ 平行) 和 $j\dot{I}_0 x_1$ (比 $\dot{I}_0$ 超前 90°), 最后合成得出 $\dot{U}_1$ 相量图。 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_0$ 的夹角为变压器空载运行时的功率因数角, 用 φ_0 表示。由于 $\dot{I}_{Fe}$ 只有 $\dot{I}_\mu$ 的 10% 左右, 故 φ_0 接近 90° , 所以变压器空载运行时的功率因数很低, 一般 $\cos \varphi_0 = 0.1 \sim 0.2$ 。

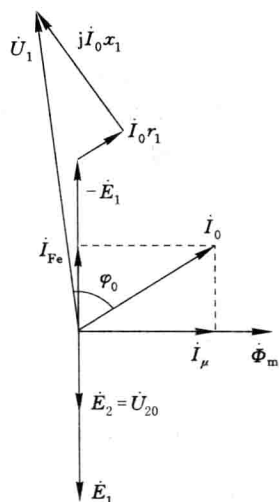


图 1-4 变压器空载运行相量图

三、变压器的负载运行

变压器的负载运行是指变压器一次绕组接额定频率、额定电压的交流电源,二次绕组接负载阻抗 Z_L 的运行状态。变压器的负载运行原理如图 1-5 所示。

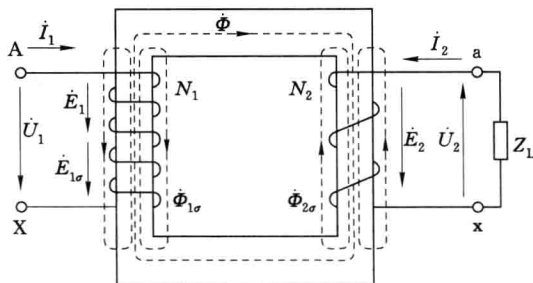


图 1-5 变压器负载运行原理

(一) 负载运行时的电磁过程

负载运行时,变压器以同时与原、副绕组相交链的主磁通为媒介,将原绕组从电源吸收的电能传送到副绕组,向负载供电。负载运行时,副绕组中有电流 $\dot{I}_2$ 流过,副绕组中产生相应的磁动势 $\dot{I}_2 N_2$,与原绕组中产生的磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 共同作用,产生铁芯中的主磁通。

(二) 负载运行时的基本方程式

1. 磁动势平衡方程式

铁芯中的磁动势由原边磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 和副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 合成,为 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2$ 。由于电压不变,主磁通不变,即磁动势仍然为 $\dot{I}_0 N_1$,有:

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-13)$$

可见,负载运行时的原边磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 有两种作用:一是产生铁芯中的励磁磁动势 $\dot{I}_0 N_1$,以产生主磁通 $\dot{\Phi}$;二是产生一个与副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 大小相等、方向相反的磁动势,抵消副边磁动势的作用,以维持铁芯中的主磁通不变。式(1-13)称为磁动势平衡方程式。将式(1-13)两边除以 N_1 ,可得:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0 \quad (1-14)$$

式中 $\dot{I}_2'$ ——二次绕组电流折算值, $\dot{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_v}$ 。

负载运行时的原边电流 $\dot{I}_1$ 大于变压器空载运行时的原边电流 $\dot{I}_0$,它由反映主磁通大小的励磁电流分量 $\dot{I}_0$ 和负载电流分量 $\dot{I}_2'$ 组成。当负载增大时, $\dot{I}_2$ 增加,副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 增加,原边电流的负载电流分量 $\dot{I}_2'$ 也相应增大。可见,虽然变压器的原、副边没有直接的电路联系,但负载电流的变化也会使原边电流相应地改变。

若忽略 $\dot{I}_0$ 不计,则:

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{\dot{I}_2}{k_v} \quad (1-15)$$