

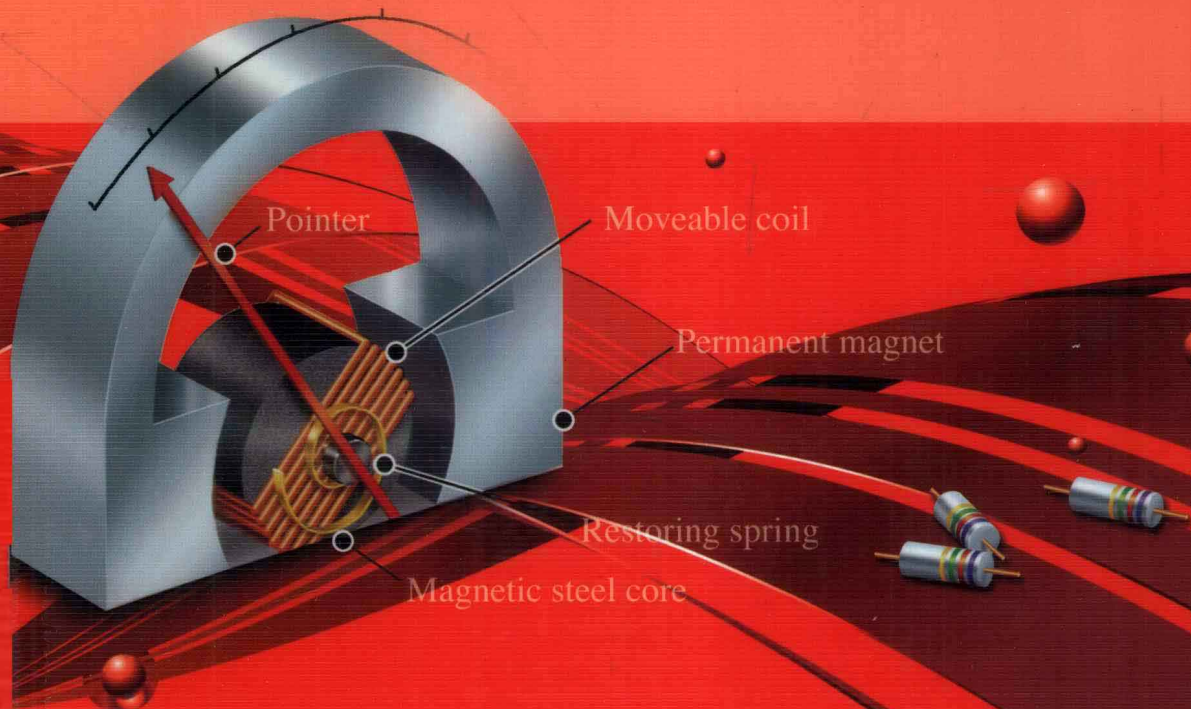


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程及其自动化专业精品教材

电气工程概论

Introduction to Electrical Engineering

◎ 李志民 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气工程及其自动化专业精品教材

电气工程概论

李志民 主 编

白雪峰 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分5章,旨在阐述电气工程学科的基本知识体系,主要内容包括了电机与电器、电力电子与电力传动、电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术等学科的基本知识和应用领域,注重对传统专业课程中的相关内容进行整合。可帮助相关专业学生和工程技术人员学习电气工程的基本知识,掌握电气工程主要技术领域的概貌、发展过程、现状和未来趋势。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化,以及电子信息工程等专业开设相关课程的教材或教学参考书,也可作为高职高专和函授教育相关教材,同时可作为工程技术人员与广大读者了解电气工程学科专门知识的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电气工程概论/李志民主编. —北京:电子工业出版社,2011.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-121-13784-6

I. ①电… II. ①李… III. ①电气工程—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第106156号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:9.75 字数:250千字

版 次:2011年6月第1次印刷

印 数:3000册 定价:25.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

·质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

21 世纪的中国对大学生的知识结构和能力提出了新的要求,随着教育体制改革的不断深化,学生的培养已从以知识传授为中心向身心全面发展转变,从应试教育向素质教育转变,从强调知识积累向注重创新能力培养转变。与这一总体目标相一致,目前高等学校的许多专业实行按大类招生、宽口径培养。其目的是充分利用学校的学科教育资源优势,打通相邻专业的基础课,增大课程覆盖面,加强学生的综合基础,拓宽专业口径,提高人才培养质量。

为拓宽学生视野,使其在进入专业课学习之前,对电气工程学科有一个宏观认识和整体了解,一些院校开设了“电气工程概论”等课程。这是“电气工程及其自动化”宽口径专业必修的专业技术先导课程,具有非常重要的作用。有助于学生根据自身特点和社会需求,选择专业方向,学好后续的专业课程。

为了满足教学需求,经过教改探索及借鉴国内一些大学同类课程的建设经验,作者编写了本书。教材内容覆盖电气工程主要研究领域,注重传统专业课中的相关内容的融合,追求内容新颖,在突出基本问题的基础上,尽量增加新技术,把握专业发展脉搏。

全书共分 5 章。第 1 章阐述电气工程学科的内涵和战略地位,介绍了电气工程及其自动化专业的特色、历史沿革、发展趋势及就业方向。第 2 章为电机与电器技术,介绍了变压器、发电机、电动机和各类高低压电器的基本原理及应用领域。第 3 章为电力系统自动化技术,概要介绍了以下内容:火电厂、水电厂、核电站生产过程,太阳能发电、风力发电及其他新能源发电原理;输、配电系统组成及运行;电力系统分析与控制、电力系统自动化与信息化、电力系统规划与可靠性、电力市场、智能电网。第 4 章为电力电子技术,阐述了电力电子器件的原理,介绍了电力变换电路及应用,论述了电力电子技术在电源领域、电力传动、电力系统中的应用。第 5 章为高电压与绝缘技术,概括论述了气体放电的物理过程、液体和固体介质的电气特性、高电压试验技术、电力系统过电压防护与绝缘配合及高电压新技术应用。

本书第 1 章至第 4 章由李志民编写,第 5 章由白雪峰编写,全书由李志民统稿。在编写过程中,哈尔滨工业大学电气工程系的许多同仁提出了不少改进意见,在此表示感谢。对责任编辑陈晓莉女士的热忱鼓励与耐心周到,编者深表谢意。此外,在编写中曾引用若干参考文献及互联网上一些素材,编者在此谨向文献的作者与网络素材提供者致谢。

电气工程学科体系恢弘,知识面宽广。限于作者的能力水平,本书的结构体系和内容取舍不见得完全合理,同时,书中也难免有错漏之处,恳请读者批评指正。

编 者
2011 年 3 月

目 录

第 1 章 电气工程的辉煌与未来	1
1.1 学科内涵与战略地位	1
1.2 专业沿革与发展趋势	2
1.3 本科生培养目标与就业去向	4
第 2 章 电机与电器技术	6
2.1 电机学基础	6
2.1.1 概述	6
2.1.2 电机学的基本电磁定律	7
2.1.3 铁磁材料性质	8
2.1.4 变压器	9
2.1.5 直流电机	13
2.1.6 同步电机	17
2.1.7 异步电机	22
2.1.8 微特电机	26
2.2 高低压电器.....	28
2.2.1 电器学基本理论	28
2.2.2 低压电器	30
2.2.3 高压电器	38
第 3 章 电力系统及其自动化技术	47
3.1 电力工业概况.....	47
3.2 现代发电技术.....	48
3.2.1 火力发电	48
3.2.2 水力发电	52
3.2.3 核能发电	52
3.2.4 新能源发电	55
3.3 现代电网技术.....	61
3.3.1 电能传输与分配	61
3.3.2 变电站	62
3.3.3 输电线路.....	64
3.3.4 高压直流输电	65
3.3.5 灵活交流输电技术	66
3.4 供用电技术.....	67
3.4.1 电力负荷控制与需求侧管理	67
3.4.2 电能质量.....	68
3.4.3 节电技术	71

3.5	电力系系统计算	72
3.6	电力系系统运行与控制	73
3.6.1	概述	73
3.6.2	电力系系统调度管理	75
3.6.3	电力系系统运行控制	76
3.7	电力系系统规划与可靠性	79
3.8	电力系系统继电保护	80
3.9	电力通信与信息化	82
3.10	电力体制改革与电力市场	83
3.11	面向未来的智能电网	85
第4章	电力电子技术	86
4.1	概述	86
4.2	电力电子器件及功率集成电路	87
4.3	电力电子变流技术	93
4.3.1	AC-DC 变换	95
4.3.2	DC-AC 变换	97
4.3.3	DC-DC 变换	100
4.3.4	AC-AC 变换	102
4.4	电力电子技术在电气工程领域的应用	105
4.4.1	电力电子技术在电源领域中的应用	105
4.4.2	电力电子技术在电力系统中的应用	109
4.4.3	电力电子技术在电力传动中的应用	116
第5章	高电压与绝缘技术	120
5.1	概述	120
5.2	电介质的电气强度	121
5.2.1	气体放电的物理过程	122
5.2.2	液体和固体介质的电气特性	124
5.2.3	常用的绝缘材料	126
5.3	高电压试验技术	128
5.3.1	电气设备绝缘的预防性试验	128
5.3.2	电气设备绝缘的耐压试验	131
5.4	电力系统过电压防护与绝缘配合	133
5.4.1	雷电过电压及防护	133
5.4.2	内部过电压与绝缘配合	138
5.4.3	电力系统绝缘配合	141
5.5	高电压新技术及应用	141
5.5.1	等离子体技术及其应用	141
5.5.2	高功率脉冲技术及应用	142
	参考文献	150

第 1 章 电气工程的辉煌与未来

1.1 学科内涵与战略地位

我国高等教育的学科目录分为学科门类、一级学科(本科教育中称为“专业类”)和二级学科(本科专业目录中为“专业”)三个级别。学科门类和一级学科是国家进行学位授权审核与学科管理、学位授予单位开展学位授予与人才培养工作的基本依据,二级学科是学位授予单位实施人才培养的参考依据。学科门类、一级学科和二级学科的代码分别为 2 位、4 位和 6 位阿拉伯数字。

学科门类是对具有一定关联学科的归类。其设置应符合学科发展和人才培养的需要,并兼顾教育统计分类的惯例。

目前高等教育的学科门类划分为 13 类:哲学(01)、经济学(02)、法学(03)、教育学(04)、文学(05)、历史学(06)、理学(07)、工学(08)、农学(09)、医学(10)、军事学(11)、管理学(12)、艺术学(13)。

一级学科是具有共同理论基础或研究领域相对一致的学科集合。具有确定的研究对象,形成了相对独立、自成体系的理论、知识基础和研究方法,已得到学术界的普遍认同。

工学(08)类下属的一级学科共有 38 个,电气工程(0808)属于其中之一,与之关系密切的一级学科主要有电子科学与技术(0809)、信息与通信工程(0810)、控制科学与工程(0811)、计算机科学与技术(0812)等。

二级学科是组成一级学科的基本单元。具有相对独立的专业知识体系,已形成若干明确的研究方向,与所属一级学科下的其他二级学科有相近的理论基础,或是所属一级学科研究对象的不同方面。

国务院学位委员会颁布的 1997 版《授予博士、硕士学位和培养研究生的学科、专业目录》中,电气工程(0808)一级学科下属的二级学科有 5 个:

电机与电器(080801):主要研究方向为电机电器的理论分析、优化设计、建模仿真、研制开发、驱动控制、机电一体化、实验测试、故障诊断、可靠性分析等。

电力系统及其自动化(080802):主要研究电能的生产、变换、输送、分配、控制、应用、管理、存储的理论和新技术,研究方向包括:电力系统分析与仿真、电力系统运行与控制、电力系统规划与设计、电力系统可靠性、电力系统测量、电力系统继电保护、新型输配电技术、分布式发电技术、电力经济与电力市场、能量管理系统与配电网自动化、电力系统信息化与数字化、电能质量分析与监控、电力系统节能与储能、智能电网技术等。

高电压与绝缘技术(080803):主要研究方向为放电与绝缘击穿、绝缘老化与诊断、工程电介质、电磁暂态特征分析、新型高压电气设备研制、高电压试验技术和试验设备开发、过电压与绝缘配合、高压电气设备在线监测与状态维修、雷电与防雷保护、电力系统电磁兼容、高电压技术在非电力系统中的应用等。

电力电子与电力传动(080804):主要研究方向为新型电力电子器件及功率集成电路、电力电子变流技术、电力电子控制技术、电力电子建模与仿真、现代电源技术、电能质量治理、电

力电子系统集成、电力电子装备可靠性评估与故障诊断、电力传动及其自动化技术等。

电工理论与新技术(080805):新理论、新原理、新材料、新技术、新工艺在电气工程领域的应用,其特点是电气工程学科内各分支间以及电气工程学科与其他学科间的交叉与融合。主要研究方向:电磁场与电磁波理论及其新技术、电网络理论及应用、新型电能变换技术、放电等离子体技术、脉冲功率技术、超导电工技术、磁流体发电技术、生物电磁技术等。

电气工程学科的理论基础是物理学中的电学和磁学,电能是电气工程学科的研究对象。广义的电气工程包括研究电磁领域客观规律及其应用的科学技术的学科体系、电力生产和电气装备制造两大工业生产体系,以及培养相关专业人才的教育体系。

与电气工程关系密切的其他学科主要是电子信息科学和能源科学。电气工程研究的主要是电能,而信息科学则是研究如何利用电磁能量来处理信息,计算机、通信网和无线电等无不以电作为信息的载体。两者同根同源,学科基础都是电磁学。从应用领域看,电气工程又和能源科学密切相关。电能由一次能源转换而来,又可方便地转换为其他能量形式,是使用、输送和控制最为方便的终端能源。

100多年前,电能的发明利用,开创了人类文明的新纪元,引发了第二次产业革命,使人类进入了电气时代。创造了电力、电气装备、汽车、石油化工等一大批新兴产业,同时大幅提升了机械、冶金等产业的发展水平,工业文明成为世界发展的主流。电气化被美国工程院评为20世纪20项最伟大的工程技术成就之首。

电力工业是国民经济中重要的基础产业与支柱产业,是国民经济的先行官。在全球经济高速发展的今天,能源安全、能源与环境问题已上升到世界各国国家战略的高度,电气工程学科在保障国家能源安全、促进节能减排、推进可持续发展等战略层面必将发挥不可替代的重要作用。

随着工业化和信息化进程的推进和高新技术的不断应用,许多专业需要的电气知识越来越多,理工科院校几乎所有的非电类专业都开设电工学等课程,电气化、自动化、数字化、智能化的生产流程、工作模式及基础装备是各行各业必然的选择。

电气工程经过一个多世纪的持续高速发展,已成长为重要的技术科学与工程领域,当代高新技术都与电能密切相关,从探索物质的粒子加速器到发射宇宙飞船和卫星,从研究微型电机、机器人到可作为未来能源技术的受控核聚变装置,都需要电气科学与技术的支撑。电气工程技术广泛用于国民经济、国防建设、科学实验、日常生活的方方面面,其水平已成为衡量一个国家现代化程度的重要标志。

近几十年来,电气学科与信息科学、生命科学、物理学、材料科学、化学、环境科学、军事科学等学科领域存在广泛的交叉,形成了诸多新的学科生长点。学科交叉和相互渗透是电气科学保持长期生命力的重要因素,例如,新型电磁材料的开发、电机的控制、电力系统的分析与控制、电力电子系统与装置、新能源的利用等几乎所有的电气新技术都势必涉及大量的电子技术、计算机及其网络通信技术、自动控制技术的一些相关知识。可以说,当今的电气工程是一个现代高科技综合应用的、多学科交叉的前沿学科专业,具有广阔的应用前景。

1.2 专业沿革与发展趋势

电气工程学科大约起始于19世纪的中、后期,经历了一个半世纪的发展,已壮大成为有众多分支学科的重要技术科学领域。19世纪上半叶,安培发现电流的磁效应、法拉第发现电磁

感应定律。19世纪下半叶,麦克斯韦的电磁理论为电气工程奠定了理论基础。

电气工程是理工科院校历史最悠久的专业之一,1878年英国帝国理工学院率先设立了电气工程专业。19世纪末到20世纪初,西方国家的大学陆续设置了电气工程专业。最初的专业学习都是从研究电能的产生、传输和利用开始的,而电报作为通信的主要形式,在电气工程专业高等教育中也占有一席之地。

电气工程学科具有很强的学科交叉和派生能力,如今的通信工程专业、电子信息工程专业、自动化专业、计算机科学与技术专业乃至生物医学工程专业都是从电气工程专业派生或再派生而形成,这些专业统称为电子与信息类专业,而它们和电气工程专业一起又被统称为电类专业。

自20世纪中叶以来,欧美传统的以电力工程为主的电气工程专业已发生了很大的变化,电子技术和计算机技术等新兴技术逐渐占据了“电气工程”专业的核心地位,而传统的电力工程伴随电气时代的高速发展渐趋成熟,只是众多的研究方向之一。从近年来世界各地赴美留学生所青睐的热门专业来看,美国一些著名高校的电气工程系或电气及计算机工程系的主要专业方向是通信与网络、信号处理、电子与集成电路、计算机工程与科学、图像处理、系统控制、光学与光子学、电力技术、等离子体物理学、电磁学、微/纳米系统、固体材料与设备及生物医学工程等,其学科交叉和融合程度日益提高。

我国电气工程高等教育历经了百年风雨,生生不息。1908年,时任邮传部上海高等实业学堂(交通大学)唐文治校长,对系科设置进行了调整。先后增设了铁路专科、电机专科,学制三年,中国的电气工程高等教育由此发端。随着电力的发展和社会分工的需要,交通大学1913年将电机科改为电气机械科,1917年电气机械科开始设无线电门,1928年改为电机工程学院,1937年又改学院为系,分“电力门”和“电讯门”,即“强电”和“弱电”。1912年,同济医工学堂(同济大学)设立电机科;1920年,公立工业专门学校(浙江大学)设立电机科;1920年筹建的哈尔滨中俄工业学校(哈尔滨工业大学),当时设有电气机械工程和铁路建筑两个科,学生通过毕业答辩可授予电气工程师、机械工程师及交通工程师称号;1923年,中央大学(东南大学)设立电机工程系;1932年,清华大学设立电机工程系,是清华的学术重镇,校园流传“土木系太老、电机系难考”之说。现仍坚守历史荣耀,称为电机工程与应用电子技术系;1933年,北洋大学(天津大学)设立电机工程系。1952年,我国进行大规模的院系调整,出现了一大批以工科为主的多科性大学,也出现了一批机电类学院,这些院校基本上都有电机工程系或电力工程系。

在我国,电气工程专业最初几十年中以电力系统为背景,以强电专业为支柱,被称为电机工程专业,可见历史上电机曾在其中占有着中心地位。随着电气工程的发展,专业的范围逐渐拓宽,弱电技术在其中的作用越来越重要,电力电子技术、计算机技术、信息技术的迅速发展也使电气工程的面貌发生了很大的变化。1977年我国恢复高考制度后,大部分高校的“电机工程系”或“电力工程系”陆续改为“电气工程系”。

1978年以来,我国迈入了改革开放和现代化建设的新时期,经济社会快速发展,科技进步日新月异,高等教育实现了历史性跨越。社会环境和高等教育自身发生的巨大变化,对我国高等教育人才培养提出了更高的要求,改革本科专业设置势在必行。

我国在1984年、1993年和1998年先后3次对本科专业目录进行了重要调整,专业总数逐步减少,拓宽了专业口径和业务范围。

通过本科专业目录的调整,改变了过去过分强调“专业对口”的本科教育观念,确立了知

识、能力、素质全面发展的人才观,对引导高等学校拓宽专业口径,增强适应性,加强专业建设和管理,加快与世界高等教育接轨,提高办学水平和人才培养质量,发挥了积极作用。新一轮的专业目录修订工作将在 2011 年完成。

1993 年,在教育部颁布的本科专业目录中,工学(08)门类中与电有关的专业被分为两个分支:电工类(0806)下设电机电器及其控制、电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、工业自动化、电气技术等 5 个专业;电子信息类(0807)共有 14 个专业。

1998 年,专业目录调整时,把电工类(0806)和电子信息类(0807)合并为电气信息类(0806)。原来的 19 个专业合并为 7 个,其中原电工类的电机电器及其控制、电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电气技术专业合并为目前的电气工程及其自动化(080601)专业。原电工类的工业自动化专业和电子信息类的自动控制等专业合并为自动化(080602)专业。合并后的其他 5 个专业是:电子信息工程(080603)、通信工程(080604)、计算机科学与技术(080605)、电子科学与技术(080606)、生物医学工程(080607)。

在同时颁布的工科引导性专业目录中,又把电气工程及其自动化专业和自动化专业中的部分(主要是原工业自动化专业部分)合并为电气工程与自动化专业,大体相当原来电工类的 5 个专业的总和。

专业名称的演变,反映了科技的进步和时代的变迁。电气工程及其自动化的研究对象是电能,而电信息的检测、处理、控制等技术在电能从产生到利用的各个环节中都起着越来越重要的作用。因此,有关电信息的研究也成了电气工程及其自动化专业的重要组成部分,专业名称中的“及其自动化”,就反映了这种变革。

目前,在我国的普通高等学校中,开设电气工程及其自动化或电气工程与自动化专业的院校有 200 多所。

新中国成立后的 60 多年来,我国电力工业以持续年均 10% 以上的速度发展,为世界电力发展史所罕见。截至 2010 年底,我国发电装机容量 9.62 亿千瓦。而在 1949 年,我国发电装机容量仅 185 万千瓦。预计到 2020 年,我国的发电装机容量和发电量都将超越美国,位居世界第一。

展望未来,我国电力工业和电工制造业将持续高速度发展,城乡电网改造、西电东送、南北互供和全国电网互联工程等向纵深发展,特高压输电、智能电网、高端装备制造、新能源、电动汽车等战略性新兴产业稳步推进,高等学校的电气工程教育和学科建设也将迎来跨越式发展的机遇。我国电气工程领域集聚了一大批最优秀的人才,我国必将成为世界电气工程高等教育、科学研究和技术开发的中心。

1.3 本科生培养目标与就业去向

21 世纪高等教育的一个突出特征是从人的个性出发,充分调动人的创造力和潜能,才能适应知识经济时代对人才的要求。

为拓宽专业口径,增强人才的适应性,本科生是按一级学科电气工程招生的,在本科专业目录里称为电气工程及其自动化专业,在引导性专业目录中称为电气工程与自动化专业。两者通常可简称为电气工程专业。

电气工程专业主要特点是强电与弱电结合、电力技术与电子技术结合、元件与系统结合、计算机软件与硬件结合。

依照教育部电气工程及其自动化专业教学指导分委员会的建议,电气工程专业本科生的培养目标为:

本专业培养能够从事与电气工程有关的电气装备制造、系统运行、自动控制、电力电子技术、信息处理、试验分析、研制开发、经济管理,以及电子与计算机技术应用等领域工作的宽口径、复合型高级工程技术人才。

业务培养要求:本专业学生主要学习电工技术、电子技术、信息控制、计算机技术等方面较宽广的工程技术基础和一定的专业知识。

通过4年的学习,毕业生应获得以下几方面的知识和能力:

(1) 掌握较扎实的数学、物理、化学等自然科学的基础知识,具有较好的人文社会科学和管理科学基础和外语综合能力。

(2) 系统地掌握本专业领域所必需的较宽技术基础理论知识,主要包括电工理论、电子技术、信息处理、控制理论、计算机软硬件基本原理与应用等。

(3) 获得较好的工程实践训练,具有较熟练的计算机应用能力。

(4) 具有本专业领域内1~2个专业方向的专业知识与技能,了解本专业学科前沿的发展趋势。

(5) 具有较强的工作适应能力,具备一定的科学研究、科技开发和组织管理的实际工作能力。

电气工程专业具有鲜明的行业特色,立足于电力系统和电气装备制造,面向全社会,服务千家万户,培养德、智、体全面发展的高级专业人才。毕业生适应性强,就业面宽广。不但能够从事电力、电气设备制造行业内电气工程及其自动化领域相关的工程设计、生产制造、系统运行、系统分析、技术开发、教育科研、经济管理等方面工作,而且能够从事其他行业电气工程及其自动化领域相关工作。并且,作为一门宽口径的基础性专业,具有该专业背景的学生可以轻松向电子信息、自动控制等相关行业转行,职业发展空间广阔。就业范畴举例如下:

(1) 从事电力系统的设计、研发和运行管理等工作,这些单位主要有:国家电网、南方电网两大电网公司下属的各级电力公司和国家五大发电集团及中核集团、中广核集团等下属的各类发电厂;各级电力设计院、电力规划院;电力建设公司;各类电力技术专业公司;新能源发电企业;能源、航空、航天、冶金、有色、石化、船舶、电子、医药、机械、建筑等大中型企业的供电部门或自备电厂;

(2) 在电气设备制造企业、电力自动化设备公司、电力电子、通信等高新技术企业从事技术研发、管理和运营工作;

(3) 在科研院所和大专院校从事科研和教学工作。

第2章 电机与电器技术

2.1 电机学基础

2.1.1 概述

在人类使用能源的历史上,无论哪一种技术上的发明和应用,都不能与电的发明及应用相比拟。在电能所能达到的一切领域,都使得那里的技术发生根本性的变化。发电机产生的电能通过高压远距离输电送到它所需要的地方作为动力加以应用,改变了整个社会的能源动力的结构和生产生活方式。

在电能的生产、传输、变换、分配和应用中,电机是主要的机电能量转换装置。广义的电机包括旋转电机、直线电机和静止电机。旋转电机和直线电机是根据电磁感应原理实现电能与机械能之间相互转换的一种能量转换装置。静止电机是根据电磁感应定律和磁势平衡原理实现电压变化与电能传递的一种电磁装置,也称为变压器。电机的一般分类如图 2-1 所示。

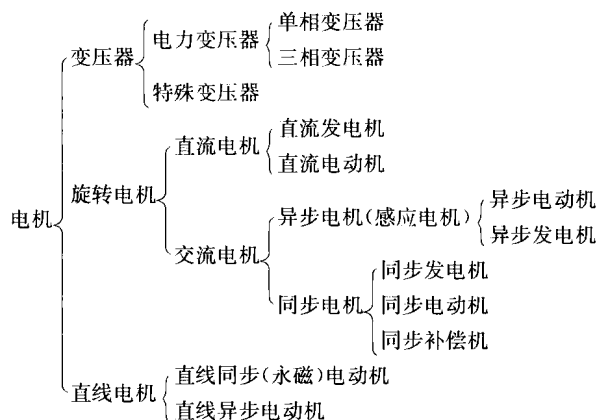


图 2-1 电机分类

电机学主要研究电机的工作原理、主要结构、基础理论、设计制造、运行特性、控制策略及试验方法。以电路理论和电磁场理论为基础,结合电子技术、自动控制理论和计算机技术,应用现代分析和测试技术,研究电机设计、制造及其控制等方面出现的新的理论及实际问题。发展新的品种,研究各种电机新的控制方法,实现电机的机电一体化。电机中各种电、磁、力、热等方面的定律同时起作用,互相影响又互相制约,故分析时既有理论又有实际,且具有一定的复杂性和综合性。

电机中所用的材料主要有以下几种。

(1) 导电材料:作为电机中的电路系统,常用紫铜或铝。

(2) 导磁材料:为了在一定的励磁电流下产生较强的磁场,电机和变压器的磁路都采用导磁性能良好的铁磁材料制成,如硅钢片、钢板及铸钢。

(3) 绝缘材料:作为带电体之间及带电体与铁心之间的电气隔离,常用聚酯漆、环氧树脂、玻璃丝带、电工纸、云母片等。

(4) 结构材料:使各部分构成整体、支撑和连接其他机械,常用铸铁、铸钢、钢板、铝合金及工程塑料。

2.1.2 电机学的基本电磁定律

电机及许多电器都是利用电磁现象及规律制造的,电能的传递与机电能量转换是利用电磁耦合作用来实现的。机电能量转换的媒介是磁场,在工程中,通常将磁场问题简化为磁路问题。大量的电机与电气设备都含有线圈和铁心。当绕在铁心上的线圈通电后,铁心就会被磁化而形成铁心磁路,磁路又会影响线圈的电路。因此,电机电器技术不仅有电路问题,同时也有磁路问题。

1. 电路基本定律

由电路理论我们知道,电路基本定律遵循:基尔霍夫第一定律: $\sum i = 0$ 和基尔霍夫第二定律: $\sum e = \sum u$ 。

2. 磁路基本定律

磁路是由铁心与线圈构成的让磁通集中通过的闭合回路,如图 2-2 所示的磁路可看成均匀磁路,即材料相同截面相等的磁路。该磁路中各点的磁场强度 H 大小相等。由物理学可知,描述磁路及磁场的基本物理量有磁感应强度 B 、磁场强度 H 、磁通量 Φ 及磁导率 μ 。下面简要回顾磁路的基本定律。

(1) 安培环路定律

在磁路中,沿任意闭合路径,磁场强度的线积分等于与该闭合路径交链的电流的代数和。即

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H \oint_l dl = \sum I = NI \quad (2-1)$$

式中 N 为线圈匝数。

计算电流代数和时,与绕行方向符合右手螺旋定则的电流取正号,反之取负号。

(2) 磁路的基尔霍夫第一定律

$$\sum \Phi = 0 \quad (2-2)$$

(3) 磁路欧姆定律

设均匀磁路长为 l ,磁路面积为 S ,则 B 、 H 与 μ 之间的关系为: $H = \frac{B}{\mu}$, $B = \frac{\Phi}{S}$ 。由安培环路定律,知 $H = \frac{NI}{l}$,而 $\Phi = BS = \mu HS = \mu S \frac{NI}{l}$,令 $R_m = \frac{l}{\mu S}$,则磁路欧姆定律为

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} = \frac{F}{R_m} \quad (2-3)$$

式中, R_m 与 Φ 成反比,反映对磁通的阻碍作用,称为磁阻。其与磁路的几何尺寸、磁介质的磁导率有关,单位: H^{-1} 。 $F = NI$ 是产生 Φ 的原因,称为磁动势,单位: A 。

式(2-3)与电路欧姆定律形式相似。但电路中的电阻是耗电能的,而磁阻 R_m 是不耗电能的。铁磁材料的 R_m 不为常数,式(2-3)用来对磁路做定性的分析,一般不用来做定量分析。

3. 电磁感应定律

线圈磁链变化将在线圈中感应电动势,分两种情况:

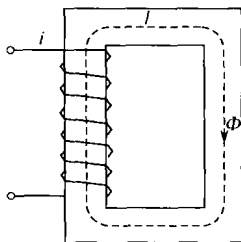


图 2-2 磁路

(1) 磁场相对静止,线圈中磁通本身随时间交变引起的感应电动势称为变压器电动势,即

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-4)$$

规定电动势正方向与磁通正方向符合右手螺旋法则。

(2) 磁场大小恒定,导体以匀速运动切割磁力线而在导体产生切割电动势称为速率电动势,即

$$e = Blv \quad (2-5)$$

判断速率电动势方向遵循右手定则。

4. 电磁力定律

载流导体在磁场中受力为

$$f = Bil \quad (2-6)$$

受力方向由左手定则确定,在电机学中主要用于分析旋转电机的电磁转矩。

5. 能量守恒定理

电机、变压器在能量传递、转换过程中,应符合能量守恒定律:

$$\text{输入能量 } W_{\text{in}} = \text{磁场储能增量 } \Delta W_e + \text{输出能量 } W_{\text{out}} + \text{内部损耗 } W_{\text{loss}} \quad (2-7)$$

2.1.3 铁磁材料性质

铸钢、硅钢片、铁及其与钴镍的合金、铁氧体等铁磁物质是一类性能特异、用途广泛的材料,高导磁性、磁饱和性和磁滞性是铁磁性材料的三大主要性能。

铁磁材料具有高导磁性能,是因为其内部存在着强烈磁化过的自发磁化单元,称为磁畴。在正常情况下,磁畴是杂乱无章地排列着,因而对外不显示磁性。但在外磁场的作用下,磁畴沿着外磁场的方向做出有规则的排列,从而形成了一个附加磁场叠加在外磁场上。由于铁磁材料的每个磁畴原来都是强烈磁化了的,它们所产生的附加磁场的强度,要比非铁磁物质在同一外磁场作用下所产生的磁场强得多。非铁磁材料的导磁系数都接近于真空的导磁系数。而铁磁材料的导磁系数远远大于真空的导磁系数。因此,在同样的电流下,铁心线圈的磁通比空心线圈的磁通大得多。

在非铁磁材料中,磁感应强度 B 与磁场强度 H 成正比,它们之间呈线性关系。铁磁物质的磁化过程很复杂,一般都是通过测量磁化场的磁场强度 H 和磁感应强度 B 之间的关系来研究其磁化规律,用 $B=f(H)$ 描述的关系曲线称为磁化曲线。磁饱和性即磁性材料的磁化磁场 B 随着外磁场 H 的增强,但并非无限制增强,而是当全部磁畴的磁场方向都转向与外磁场一致时,它们所产生的附加磁场已接近最大值,此时即使 H 再增大, B 的增加也很有限。即铁磁性材料的磁化曲线是非线性的,如图 2-3 所示。

当磁化电流为交变电流使铁磁物质被反复磁化时,在电流变化一次时,磁感应强度 B 随磁场强度 H 而变化的关系如图 2-4 所示,是一条对称于原点的闭合曲线,称为磁滞回线, B_m 为饱和磁感应强度。由图可见,当 H 已减到零值时, B 并未回到零值,有剩磁 B_r 。这种磁感应强度 B 滞后于磁场强度 H 变化的性质称为铁磁物质的磁滞性。为消除剩磁,必须加反向磁场 H_c ,称为矫顽磁力。

由于存在磁滞现象,铁磁材料的磁化过程是不可逆的。产生磁滞现象的原因是铁磁材料中磁分子在磁化过程中彼此具有摩擦力而互相牵制。由此引起的损耗称为磁滞损耗,它是导

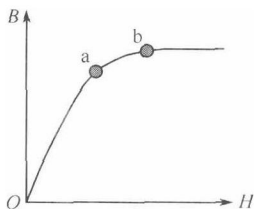


图 2-3 铁磁材料磁化曲线

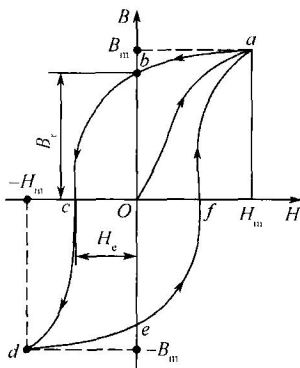


图 2-4 铁磁材料磁滞回线

致铁磁性材料发热的原因之一。铁心内部由于涡流在铁心电阻上产生的热能损耗称为涡流损耗。磁滞损耗、涡流损耗统称铁心损耗。

对同一铁磁材料,选择不同的 H_m 反复磁化,得到不同的磁滞回线。将各条回线的顶点连接起来,所得曲线称为基本磁化曲线。不同的铁磁材料,其磁化曲线和磁滞回线都不一样。

电机中常用的铁磁材料分为软磁材料和硬磁材料。软磁材料矫顽力较小,磁滞回线较窄。具有磁导率很高、易磁化、易去磁等显著特点,一般用来制造电机、电器及变压器等的铁心。常用的有铸铁、硅钢、坡莫合金及铁氧体等;硬磁材料也称永磁材料,具有较大的矫顽力,磁滞回线较宽。磁导率不太高,但一经磁化能保留很大剩磁且不易去磁,一般用来制造永久磁铁。常用的有碳钢、钴钢及铁镍铝钴合金等。此外,矩磁材料具有较小的矫顽磁力和较大的剩磁,磁滞回线接近矩形,稳定性良好。在计算机和控制系统中用作记忆元件、开关元件和逻辑元件。常用的有镁锰铁氧体等。

2.1.4 变压器

1. 变压器原理

变压器是一种静止的电气设备,它利用电磁感应原理,把一种电压等级的交流电能转换成频率相同的另一种电压等级的交流电能。变压器具有变换交变电压、变换交变电流、变换阻抗的作用。它对电能的远距离传输、灵活分配和经济安全使用具有重要的意义。同时,它在电气领域的测试、控制和特殊用电设备上也有广泛的应用。基本结构如图 2-5 所示,两个相互绝缘的绕组套在一个共同的铁心上,它们之间只有磁的耦合,没有电的联系。电源侧的线圈称为原边绕组或一次绕组,负载侧的线圈称为副边绕组或二次绕组。

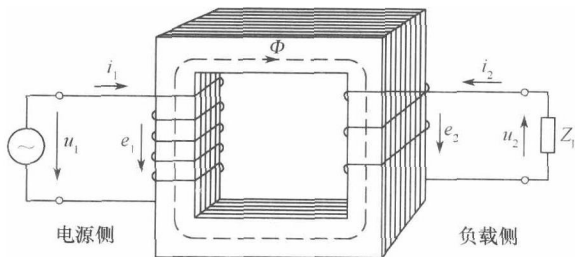


图 2-5 变压器基本工作原理

当原边绕组接到交流电源时,绕组中便有交流电流流过,并在铁心中产生与外加电压频率相同的磁通。这个交变磁通同时交链原边绕组和副边绕组。原、副绕组的感应电势分别为

$$u_1 = -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad u_2 = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-8)$$

假定变压器两边绕组的电压和电动势的瞬时值都按正弦规律变化,由(2-8)式可得一次、二次绕组中电压和电动势的有效值与匝数的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (2-9)$$

式中 k 称为变压器的变比,它等于原、副绕组的匝数比,也称电压比。

如果忽略铁磁损耗,根据能量守恒原理,变压器的输入与输出电能相等,即 $U_1 I_1 = U_2 I_2$,由此可得变压器一次、二次绕组中电压和电流有效值的关系为

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2-10)$$

亦即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{k} \quad (2-11)$$

由此可见,只要改变变压器的变比 k ,就能改变副边电压或副边电流的大小。这就是变压器利用电磁感应原理,将一种电压等级的交流电源转换成同频率的另一种电压等级的交流电源的基本工作原理。

2. 变压器的额定参数和型号

(1) 额定电压 U_{1N} 和 U_{2N} :一次绕组的额定电压 U_{1N} 是根据变压器的绝缘强度和允许发热条件规定的一次绕组正常工作电压值。二次绕组的额定电压 U_{2N} 指一次绕组加上额定电压,分接开关位于额定分接头时,二次绕组的空载电压值。对三相变压器,额定电压指线电压。

(2) 额定电流 I_{1N} 和 I_{2N} :是根据允许发热条件而规定的绕组长期允许通过的最大电流值。对三相变压器,额定电流指的是线电流。

(3) 额定容量 S_N :指额定工作条件下变压器输出能力(视在功率)的保证值。三相变压器的额定容量是指三相容量之和。

此外,还有额定频率、额定效率、温升等额定值。

变压器型号表示一台变压器的结构、额定容量、电压等级、冷却方式等内容,型号的命名方法如图 2-6 所示。例如,SL—500/10 表示三相油浸自冷双线圈铝线,额定容量为 500kVA,高压侧额定电压为 10kV 级的电力变压器;OSFPSZ—250000/220 表示自耦三相强迫油循环风冷三绕组铜线有载调压,额定容量 250000kVA,高压侧额定电压为 220kV 的电力变压器。

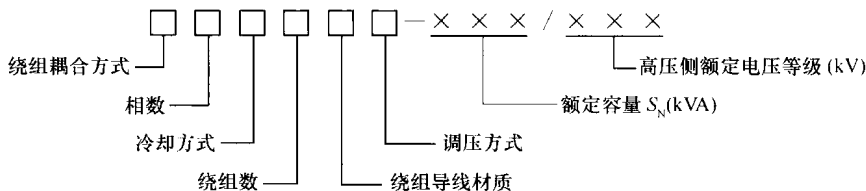


图 2-6 变压器型号含义

变压器按用途可以分为电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器主要用于电力系统。特种变压器根据不同系统和部门的要求,提供各种特殊电源和用途,如电炉变压器、整流

变压器、电焊变压器、牵引变压器、矿用变压器、仪用互感器、试验用高压变压器和调压变压器等,以及用于电子信息产业的变压器等。

3. 电力变压器

电力变压器是电力系统中的重要电气设备,数量众多,变压器有单相变压器和三相变压器,按其用途和安装地点可分为升压变压器、降压变压器、联络变压器、厂用变压器和配电变压器。常见的有双线圈变压器,也有少量的三线圈变压器和自耦变压器。有的变压器有自动调整分接头装置,称为有载调压变压器。变压器的冷却方式可分为:干式自然冷却或风冷;油浸自然冷却;油浸风冷,带有吹风装置;油浸强迫油循环冷却,即用油泵强迫油循环,把油抽出送到冷却器冷却后送回油箱。中小型电力变压器大都采用油浸自然冷却式,变压器油是从石油中提炼出来的绝缘油,既是绝缘介质,又是散热媒介,通过油的对流作用把线圈及铁心上的热量带到油箱表面,散发到空气中。图 2-7 是几种电力变压器的实物图。

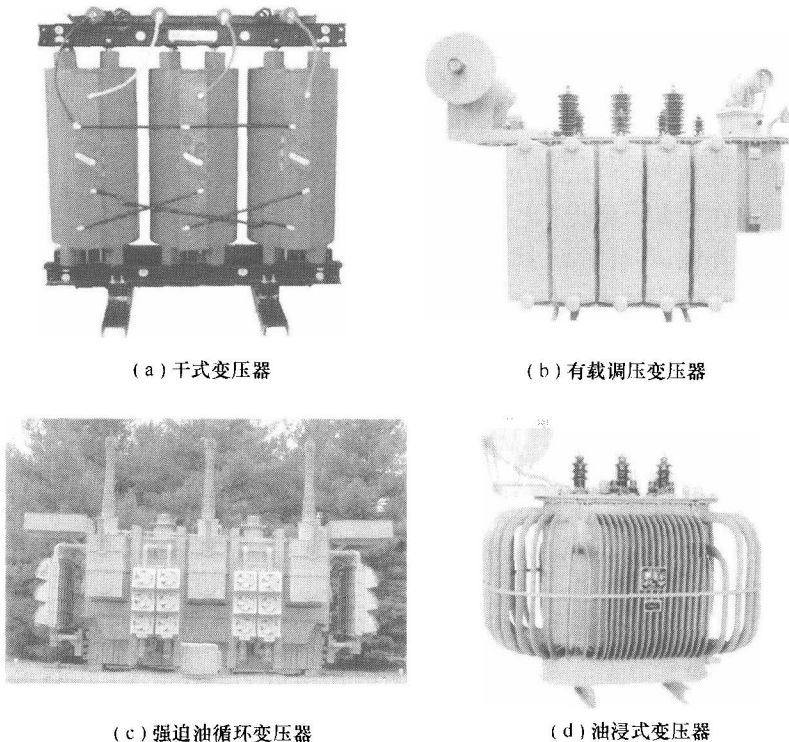


图 2-7 几种电力变压器

从铁心与绕组的相对位置看,变压器两大基本结构形式有心式和壳式两种。绕组包着铁心的叫心式变压器、铁心包着绕组的叫壳式变压器。单相或三相电力变压器多为心式,小容量的单相变压器常制成壳式。无论壳式变压器还是心式变压器其电磁原理是完全相同的。

变压器的主要组成是铁心和绕组。铁心是变压器的磁路,又作为绕组的支撑骨架。铁心分铁心柱和铁轭两部分,铁心柱上装有绕组,铁轭连接两个铁心柱,其作用是使磁路闭合;绕组是变压器的电路部分,常用绝缘铜线或铝线绕制而成,近年来还有用铝箔绕制的。为了使绕组便于制造和在电磁力作用下受力均匀,以及机械性能良好,一般电力变压器都把绕组绕制成圆形。