

国家中等职业教育改革发展示范学校建设系列教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主编 / 方 翔

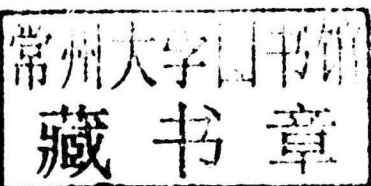


中南大学出版社
www.csupress.com.cn

国家中等职业教育改革发展示范学校建设系列教材

电力电子技术

主 编 方 翔
副主编 王 鹏
参 编 杨 越 黄清锋
何锦军 盛继华
朱智洪 汪 晓
主 审 吴兰娟



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/方翔主编. —长沙: 中南大学出版社, 2014. 7
ISBN 978 - 7 - 5487 - 1101 - 8

I. 电... II. 方... III. 电力电子技术 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014) 第 144544 号

电力电子技术

方 翔 主编

☐责任编辑 刘颖维 刘 灿

☐责任印制 易建国

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731-88876770

传真: 0731-88710482

☐印 装 长沙印通印刷有限公司

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 13 ☐字数 320 千字

☐版 次 2014 年 7 月第 1 版 ☐2014 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 1101 - 8

☐定 价 36.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

国家中等职业教育改革发展示范学校建设系列教材

编 委 会

名誉主任 仇贻鸿

主 任 周金葵

副 主 任 陈爱华

委 员 项 薇 王志泉 兰景贵 鲍国荣
吴 钧 洪在有 石其富 巫惠林
王丁路 何耀明 朱孝平 余晓春
金尚昶 范秀芳

本书编审人员

主 编 方 翔

副主编 王 鹏

参 编 杨 越 黄清锋 何锦军 盛继华
朱智洪 汪 晓

审 稿 吴兰娟

前 言

职业教育是为经济社会发展提供基础性技能型人才的重要阵地,是我国教育体系的重要组成部分。多年以来,我国职业教育培养了大量具有专业理论知识、熟练操作技能和良好教育素质的劳动者,为社会发展做出了重要贡献。国家中等职业教育改革发展示范学校项目建设,将大大加强技能人才培养的力度,加快技能人才培养的步伐,使项目建设单位在我国职业教育发展中发挥更为显著的引领、示范和辐射作用。为了深度推进示范学校项目建设,进一步提升学校综合办学实力、核心竞争力,使学校成为全国中等职业学校教育改革的示范、教学质量的示范、育人的示范,金华市高级技工学校课程体系与教学内容等方面进行了改革。根据维修电工技能鉴定标准,结合学校实际,组织编写了《电力电子技术》教材。

本书分五个模块:模块一是相控整流电路,主要介绍了部分电力电子器件和单相、三相整流电路;模块二是逆变电路,这部分介绍了几种常用全控型电力电子器件、有源逆变电路及无源逆变电路;模块三是一些常见的直流变换电路;模块四介绍了交流电力控制电路的原理及常见应用电路;模块五是PWM控制技术。

本书的编写思路符合高技能人才培养目标,适用于电气类高级技能培训,也可作为相关行业人员的学习参考书。

吴兰娟老师主审了本书,王鹏、杨越、黄清锋、何锦军、盛继华等老师和企业专家朱智洪、汪晓参与了本书的资料整理和校稿等工作,本书编写中还得到了金华市高级技工学校副校长陈爱华老师的热情帮助和指正,在此一并表示感谢。

限于编者水平,书中难免会有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014年6月

目 录

0 绪论	(1)
模块一 相控整流电路	(8)
任务一 电力电子器件的检测	(8)
知识点1 电力二极管	(9)
知识点2 晶闸管及其派生元件	(13)
实操训练	(23)
习题及思考	(24)
任务二 常用的触发电路	(25)
知识点1 单结晶体管触发电路	(26)
知识点2 同步信号为锯齿波的触发电路	(31)
知识点3 电力电子器件的驱动与保护	(35)
知识点4 电力电子器件的串并联使用	(48)
实操训练	(56)
习题及思考	(58)
任务三 单相整流电路的安装与调试	(60)
知识点1 单相半波整流电路	(60)
知识点2 单相桥式整流电路	(64)
实操训练	(70)
习题及思考	(73)
任务四 三相可控整流电路的安装与调试	(74)
知识点1 集成触发电路	(74)
知识点2 三相半波整流电路	(76)
知识点3 三相全控桥式整流电路	(80)
* 知识点4 整流电路的变压器漏感对整流电路的影响	(87)
实操训练	(89)
习题及思考	(93)
模块二 逆变电路	(95)
任务一 有源逆变电路	(95)
知识点1 全控型电力电子器件	(95)
知识点2 整流电路的有源逆变工作状态	(109)
实操训练	(115)

习题及思考	(117)
任务二 无源逆变电路	(118)
知识点1 逆变电路概述	(119)
知识点2 负载谐振式逆变电路	(123)
知识点3 强迫换流式逆变电路	(127)
知识点4 三相电压源型逆变电路	(130)
实操训练	(132)
习题及思考	(134)
模块三 直流斩波电路	(135)
任务 基本直流斩波电路	(135)
知识点1 降压斩波电路	(137)
知识点2 升压斩波电路	(141)
知识点3 升降压斩波电路	(144)
实操训练	(149)
习题及思考	(152)
模块四 交流电力控制电路	(153)
任务 交流调压电路实训	(153)
知识点1 单相交流调压电路	(154)
知识点2 三相交流调压电路	(159)
知识点3 其他交流电力控制电路	(162)
实操训练	(173)
习题及思考	(177)
* 模块五 PWM 控制技术	(178)
任务一 PWM 控制的基本原理	(178)
任务二 PWM 控制技术的应用	(194)
习题及思考	(198)
参考文献	(199)

0 绪 论

什么是电力电子技术？它的发展经历了哪些阶段？目前主要应用在哪些领域？对这些问题的初步说明将使读者对电力电子技术有一个大致的了解。本教材编写指导思想和基本内容的说明有助于读者更好地学习这门课程。

一、电力电子学科的形成

电力电子技术是利用电力电子器件实现工业规模电能变换的技术，有时也称为功率电子技术。一般情况下，它是将一种形式的工业电能转换成另一种形式的工业电能，是建立在电子学、电工原理和自动控制三大学科上的新兴学科。

在人类文明历史中，能源和动力，尤其是电能的开发以及电力和电子技术的应用具有重要意义。从原始社会到机器出现之前漫长的历史时期中，人类利用手工工具直接改造自然，使用工具的主要动力是人力。此后人类逐步学会利用畜力、风力、水力等自然力，进而以机器代替手工工具，技术进步极大地推动了人类社会的发展。

人类近代历史上的第一次技术革命的主要标志是 1769 年瓦特(J. Watt, 1736—1819)发明蒸汽机。蒸汽机取代自然力成为机器制造、采矿、冶金、铁路、纺织等行业的主要动力，蒸汽机的广泛应用大大促进了社会生产力的发展，从此人类开始从农业社会跨入了工业社会。第一次技术革命所引发的产业革命为资本主义社会的发展奠定了物质基础，在不到一百年的时间里所创造的物质财富超过了以往历史时代的总和。

人类近代历史上第二次技术革命起源于 19 世纪初英国物理学家法拉第(M. Faraday, 1791—1867)等人发现的电磁感应现象和发现电磁学基本原理。19 世纪末以后，三相交流发电机、变压器、电动机、远距离输电以及有线电、无线电通信技术的发明和应用，是第二次技术革命的主要标志。发电机、变压器和远距离输电技术的发明，给工业、农业和交通运输提供了全新的廉价动力，电动机取代蒸汽机成为机械的原动力，社会生产力得到更迅猛的发展。电能工农业、交通运输和人类生活中的广泛应用以及电子技术、通信和自动化技术的发展，使人类逐步摆脱了繁重的体力劳动。到 20 世纪中期，各类电子器件(电子管器件、半导体器件、集成电路、微处理器等)、电报、电话、无线电通信、广播、收音机、电视、电子计算机、电子录像机、传真机等一系列与电有关的发明大量涌现，这不仅促进了社会生产力的发展，同时也极大地提高了人类的物质、文化生活水平。第二次技术革命所引发的产业革命使人类的生产能力在半个多世纪期间又提高了 10 倍以上，其主要推动力是电力技术和电子技术。

1. 电力技术

电力技术是一门涉及发电、输电、配电及电力应用的科学技术。发电设备将其他形态的能源变为电能，再通过输电配电网将电能送至用电设备(负载)，用电设备再将电能转变为

其他形态的能源。如照明设备将电能转变为光能,电动机将电能转变为机械能以驱动机械运动,电热设备将电能转变为热能供生活取暖或金属加热冶炼,电化学设备将电能转变为化学能实现电解、电镀或给蓄电池充电等。电能是现代社会最重要的能源,电能可以由自然界中各种一次能源(煤、石油、天然气、风力、水力、核能、太阳光、化学能等)转变得来。电能既可以经济地远距离传输和配送,又可以方便、无污染地转化为其他形态的能源。现代社会中各个领域的技术设备几乎都是用电设备,都需要由一定类型的电源供电。

发电、输配电及电力应用技术的理论基础是电磁学(电路、磁路、电场、磁场的基本原理),利用电磁学基本原理处理发电、输配电及电力应用的技术统称电力技术。

2. 电子技术(电子学)

1865年英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1874),系统总结了19世纪中期以前电磁学研究的成果,归纳出完整、严谨的电磁场基本方程,为随后的电气工程,特别是为电子工程技术的发展奠定了理论基础。1887年德国物理学家赫兹(H. R. Hertz, 1857—1894)发表了有关电磁波存在的实验论文,1897年意大利马可尼(G. Marconi, 1874—1937)发明了无线电报并建成世界上第一座无线电台。到20世纪40年代,在民用通信及军事装备需求的推动下,逐步形成了一个与电力技术并行发展的电子技术领域。电子技术又称为电子学,它是与电子器件、电子电路(在 L 、 C 、 R 电路中引入电子器件的电路)以及由各种电子电路所组成的电子设备和系统有关的科学技术。最早期的电子器件是1904年出现的电子管,它能控制电路的通、断和电路中电流的大小。随后发展到晶体管、晶体管集成电路(简称集成电路)和微处理器。

电力技术研究的是发电机、变压器、电动机、输配电线路等电力设备,以及利用电力设备来处理电力电路中电能的产生、传输、分配和应用问题;而电子技术则是研究电子器件,以及利用电子器件来处理电子电路中电信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收问题。研究信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收的电子技术(电子学)又称为信息电子技术或信息电子学。

电力技术的发展依赖于发电机、变压器、电动机、输配电系统,而电子技术的发展依赖于各种电子器件。20世纪50年代以前的电子器件是电子管。1946年,世界上第一台电子计算机就使用了18000个电子管,重30 t,占地167 m²,耗电156 kW,运算速度为每秒5000次加法。1948年,美国贝尔实验室的肖克莱(W. B. Shockley)等人在半导体PN结(二极管)单向导电的基础上,加进了第三个电极——控制极,发明了能放大电信号的晶体管(三极管, NPN或PNP结构),开创了现代电子学——固体电子学或晶体管电子学的新时代。在体积、重量、耗电、可靠性等方面,晶体管比电子管优越得多。1952年,英国雷达研究所的达默提出了一个设想:能否按电子电路功能的要求,将一个电子电路中包含的二极管、晶体管以及电阻、电容、电感等元件全部制作在一块半导体晶片上,从而构成一块具有一定的信号变换、处理功能的完整电路——集成电路?达默的这一设想引发了人类历史上具有划时代意义的微电子技术革命。20世纪50年代占满一个房间的电子电路系统现在已可以由一块拇指大小的集成电路芯片替代。至今,具有各种信息处理功能的集成电路芯片和电子装置系统,其集成密度、运算速度仍在急剧上升,而成本价格则不断下降,使其在任何领域都能广泛应用。微电子技术的成就为现代电子技术的发展和广泛应用奠定了基础。

3. 电力电子技术(电力电子学)

早期的电力技术并不涉及电子器件,也不应用电子技术。例如,20 世纪 20 年代法国建成的一套直流输电系统(125 kV、输送功率 20 MW、输电距离 225 km)。采用交流电动机拖动直流发电机在直流输电线首端实现交流-直流交换(简称整流)。在直流输电线末端采用直流电动机拖动交流发电机实现直流-交流变换(简称逆变),并不像现在的直流输电系统,采用电力电子开关实现整流和逆变。虽然到 20 世纪 40 年代,发电机励磁系统、电动机调速系统以及直流输电系统等领域已出现应用电子管器件的试验研究,但由于电子管器件的固有缺陷,在 20 世纪 60 年代以前,电子技术并未在电力技术领域中得到广泛应用。

1957 年,美国通用电气公司在晶体管的基础上发明了晶体闸流管。晶闸管是一个固态开关器件,它体积小、重量轻,电压电流额定值高,导通时压降小、阻断时漏电流小,开关速度快,控制简便,工作可靠。晶闸管具有可控的单向导电性,因此首先被用于可控整流电路,实现交流-直流变换,又由于使用硅半导体材料,因此初期曾被称为可控硅整流器 SCR(silicon controlled rectifier)。不久,晶闸管的开关功能又被用于逆变(实现直流-交流电源变换)、交流-交流电压调节和直流-直流电压变换。随后国际电工委员会正式将其命名为 thyristor——晶体闸流管,简称晶闸管。

晶闸管是从二极管、晶体管发展起来的高压、大电流半导体电力开关器件。20 世纪 60 年代以后,以晶闸管为代表的各类高电压、大电流半导体开关器件(简称半导体电力开关器件)相继研制成功并得到广泛应用。最近十几年,以微电子技术精细加工为基础的高频、高压、大电流、全控型半导体电力开关器件的研制工作发展很快,多种新器件都已得到广泛应用。电压、电流额定值更高,特性更优良,开关速度更快的新器件在 21 世纪初得到广泛应用。利用半导体电力开关器件组成电力开关电路,利用晶体管集成电路和微处理器芯片构成信号处理和控制系统,对电力开关电路进行实时、适式的控制,可以经济有效地实现开关模式的电力变换和电力控制,包括电压(电流)的大小、频率、相位和波形的变换和控制。将现代电子技术和控制技术引入传统的电力技术领域实现电力变换和控制,即电力电子变换和控制技术,是一门综合了电子技术、控制技术和电力技术的新兴交叉学科。这种电力电子变换和控制技术,被国际电工委员会命名为电力电子学(Power Electronics),或称为电力电子技术。可以用图 0-1 所示的倒三角形来表征电力电子技术学科的构成:电力电子学,即电力电子变换和控制技术是电力技术、电子技术与控制技术三者结合的交叉学科。

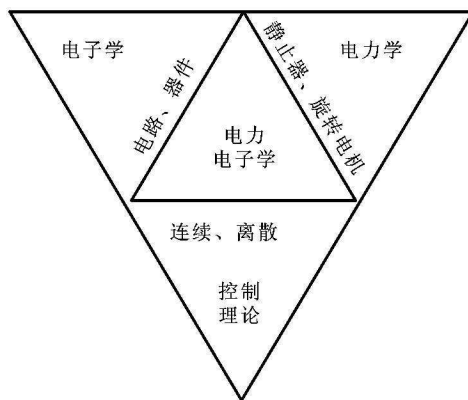


图 0-1 描述电力电子学的倒三角形

二、电力技术的经济意义

在电力系统中,公用电网提供的电源是频率固定的某一标准等级的单相或三相交流电源。但是用电设备的类型、功能千差万别,对电能的电压、频率要求各不相同。机械加工中的感应加热设备适宜用中频或高频交流电源供电;化学工业中的电解、电镀需要低压直流电

源供电;通信设备大都需要 48 V 低压直流电源;而要求调速的直流电动机则需要由可变直流电压供电;许多高技术设备要由恒频、恒压的正弦波交流不间断电源 UPS(uninterruptible power supply) 供电;而现在已得到广泛应用的交流电机变频调速则应由三相交流变频、变压电源供电。有的设备要求电源是非常好的正弦波,而发射机、快速充电设备等则要求有大功率脉冲电源。为了满足一定的生产工艺和流程的要求,确保产品质量,提高劳动生产率,降低能源消耗,提高经济效益,供电电源的电压、频率甚至波形都必须满足各种用电设备不同要求。凡此种种,都要求能将发电厂生产的单一频率和电压的电能变换为各个用电设备最佳工作情况所需要的另一种特性和参数(频率、电压、相位和波形)的电能,再供负载使用。公用电网的恒频、恒压电能经过适当的变换、控制和处理后再供负载使用,可使用电设备获得更好的技术特性和更大的经济效益。

例如:

(1) 驱动风机、水泵的三相交流异步电动机总计消耗电厂发电总量的 1/3 以上。在直接由公用交流电网恒频、恒压供电时,当需要减少风量、水流量时,以往是利用挡板、阀门加大风阻、水阻来减少风量、水量,电能的利用效率很低。如果采用电力变换装置,将公用电网 50 Hz 恒频、恒压交流电源变换成变频、变压电源后,再对风机、水泵电动机供电,通过改变供电频率调节电动机速度来改变风量、水量,则电能的利用效率可维持在 90% 左右,这将节省大量的能源。如果风机、水泵全都采用这种先进的变频调速技术,每年全国节省的能源将超过几千万吨煤燃料,或者可以少兴建上千万千瓦的发电站(历经十多年建成的我国三峡水电站总发电容量为 1.82×10^6 kW),经济效益极为可观。

(2) 电厂发电总量的 10% ~ 15% 消耗在电气照明上。如果采用高频电力变换器(又称为电子镇流器)对荧光灯供电,不仅电-光转换效率进一步提高,光质显著改善,灯管寿命延长 3 ~ 5 倍,可节电 50%,而且其重量仅为工频电感式镇流器的 10%。电子镇流器的技术关键就是高频电力电子变换器。

(3) 将工频 50 Hz 交流电升频后,再给用电设备中的变压器、电抗器供电,则变压器、电抗器的重量、体积将大大减小。例如频率为 20 kHz 的变压器,其重量、体积比普通 50 Hz 的变压器小 10 ~ 20 倍,钢、铜原材料的消耗量也大大减小。

(4) 精密机械加工以及造纸机、高速高性能轧钢机、高速电力机车等电力传动,由变频器或高性能直流-直流变换器等供电时,产品精度、质量、运行速度、稳定性都能得到保证,劳动生产率也可大幅提高,效益十分突出。

(5) 在幅员辽阔的国家里大功率远距离输电是不可避免的,为了提高输电能力、效率,确保系统稳定性,现今各国广泛采用远距离直流输电。发电站的发电机是三相交流同步发电机,产生频率固定为 50 Hz 或 60 Hz 的交流电,用电设备也大多是交流电负载。这就需要在发电站处先将交流电变换为直流电,经远距离直流传输后再将直流电变换成 50 Hz 或 60 Hz 的交流电。电力经过交流变直流,又经过直流变交流,当然要增加变流设备投资。但采用高压直流输电时,输电线路造价低,线路只有较小的电阻压降而无电抗压降,同时直流输电又不存在电力系统的稳定问题而能增大输电功率。所以尽管增加了电力变换环节,但远距离高压直流输电在技术经济上仍是当今远距离输电的最佳方案。

在现代工业、交通、国防、生活等领域中,除变比固定的交流变压器以外,大量需要的是各种类型的电力变换装置和变换系统,将一种频率、电压、波形的电能变换为另一种频率、

电压、波形的电能,使用电设备处于各自理想的最佳工作情况,或满足用电负载的特殊工作情况要求,以获得最大的技术经济效益。经过变换处理后再供用户使用的电能,占全国总发电量的百分比值的高低,已成为衡量一个国家技术进步的主要标志之一。预计到 21 世纪二三十年代,美国发电站生产的全部电能都将经变换和处理后再供负载使用。

当今世界环境保护问题日趋严重,应用高频电力电子技术可以使电气设备重量减轻、体积变小,节省大量铜、钢等原材料。广泛采用电力电子技术以后,还可以节省大量的电力,这就可以节约大量资源和一次能源,从而改善人类的生活环境。

此外,如果在电力系统的适当位置设置电力变换器或电力补偿控制器,并进行实时、适式的控制,就可以改变电力系统中节点电压的大小和相位,补偿电力网路的阻抗,减小甚至消除电力系统中的谐波,优化电力系统中的有功、无功潮流,并对正常运行和故障时电力系统的功率平衡要求予以快速补偿,这将会显著提高输电系统的极限传输功率能力,改善电力系统运行的技术特性、安全可靠性和经济性。

因此,电力电子技术——电力电子变换和控制技术具有巨大的技术、经济意义。

三、电力电子技术的应用

1. 优化电能使用

电力电子技术对电能的处理,使电能的使用达到合理、高效和节约,实现了电能使用最佳化。例如,在节电方面,针对风机水泵、电力牵引、轧机冶炼、轻工造纸、工业窑炉、感应加热、电焊、化工、电解等 14 个方面的调查,潜在节电总量相当于 1990 年全国发电量的 16%,所以推广应用电力电子技术是节能的一项战略措施,一般节能效果可达 10% ~ 40%,我国已将许多装置列入节能的推广应用项目。

2. 改造传统产业和发展机电一体化等新兴产业

据发达国家预测,今后将有 95% 的电能要经电力电子技术处理后再使用,即工业和民用的各种机电设备中,有 95% 与电力电子产业有关,特别是,电力电子技术是弱电控制强电的媒体,是机电设备与计算机之间的重要接口,它为传统产业和新兴产业采用微电子技术创造了条件,成为发挥计算机作用的保证和基础。

3. 突破传统

电力电子技术高频化和变频技术的发展,将使机电设备突破工频传统,向高频化方向发展。实现最佳工作效率,将使机电设备的体积减小几倍、几十倍,响应速度达到高速化,并能适应任何基准信号,实现无噪音且具有全新的功能和用途。

4. 电力电子智能化

电力电子智能化的进展,在一定程度上将信息处理与功率处理合一,使微电子技术 with 电力电子技术一体化,其发展有可能引起电子技术的重大改革。

有人甚至提出,电子学的下一项革命将发生在以工业设备和电网为对象的电子技术应用领域,电力电子技术将把人们带到第二次电子革命的边缘。

四、电力电子技术的发展

1. 电力电子器件

电力电子技术的发展离不开电力电子器件的发展,可以说电力电子器件的发展史也就是

电力电子技术的发展史。

1902 年出现了第一个玻璃的汞弧整流器, 1910 年出现了铁壳汞弧整流器, 用汞弧整流器代替机械式开关和换流器, 这是电力电子技术的发端。

1920 年试制出氧化铜整流器, 1923 年出现了硒整流器。20 世纪 30 年代, 这些整流器开始大量用于电力整流装置中, 40 年代末出现了晶体管。

20 世纪 50 年代初, 晶体管向大功率化发展, 同时用半导体单晶材料制成的大功率二极管也得到发展。1954 年, 瑞典通用电机公司 (ASEA 公司) 首先将汞弧管用于高压整流和逆变, 并在 ± 100 kV 直流输电线路路上应用, 传输 20 MW 的电力。1956 年, 美国人 J. 莫尔制成晶闸管雏形。

1957 年, 美国人 R. A. 约克制成实用的晶闸管。20 世纪 50 年代末晶闸管被用于电力电子装置, 60 年代以来得到迅速推广, 并开发出一系列派生器件, 拓展了电力电子技术的应用领域。

2. 电力电子电路

随着晶闸管应用的推广, 开发出许多电力电子电路, 按其功能可分为: ①将交流电能转换成直流电能的整流电路; ②将直流电能转换成交流电能的逆变电路; ③将一种形式的交流电能转换成另一种形式的交流电能的交流变换电路; ④将一种形式的直流电能转换成另一种形式的直流电能的直流变换电路。

这些电路都包含晶闸管, 而每个晶闸管都需要相应的触发器。于是配合这些电力电子电路出现了许多的触发控制电路。根据所用的器件, 这些控制电路大体上可以分为 3 代。第一代的控制电路主要由分立的电子元件 (如晶体管、二极管) 组成。直到 20 世纪 80 年代后期, 还用得不少。第二代由集成电路组成。自从 1958 年美国出现了世界上第一个集成电路以来, 发展异常迅速。它应用到电力电子装置的控制电路中, 使其结构紧凑, 功能和可靠性得到提高。第三代由微机进行控制。

20 世纪 70 年代以来, 由于微机的发展使电力电子装置进一步朝实现智能化的方向进步。

3. 电力电子装置

随着电力电子电路的发展和完善, 由晶闸管组成的许多类型的电力电子装置不断出现, 如大功率的电解电源、焊接电源、电镀用的直流电源; 直流和交流牵引、直传动、交流串级调速、变频调速等传动用电源; 励磁、无功静止补偿、谐波补偿等电力系统用的电力电子装置; 低频、中频、高频电源等各种非工频电源, 尤其是感应加热的高频电源; 不停电电源、交流稳压电源等各种工业用电力电子电源; 各种调压器等。这些电力电子装置, 与传统的电动机—发电机组比, 有较高的电效率 (以容量 10 kW 至数百千瓦、频率为 1000 Hz 的电动机—发电机组为例, 在额定负载下, 效率 $\eta = 80\%$, 并随负载减小而显著降低, 若用晶闸管电源, $\eta \geq 92\%$, 且随负载变化不大), 因此, 有明显的节能效果。电力电子装置是静止式装置, 占地面积小, 重量轻, 安装方便 (以焊接电源为例, 与旋转焊机相比, 重量减轻 80%, 节能 15%)。同时, 电力电子装置往往对频率、电压等的调节比较容易, 响应快, 功能多, 自动化程度高, 因此在工业应用上不但明显节能, 还往往能提高生产率和产品质量, 节省原材料, 并常能改善工作环境。但电力电子装置大多为电子开关式装置, 它往往对电网和负载产生谐波干扰, 有时还对周围环境引起一定的高频干扰, 这是在设计这些装置和系统时必须妥善解决的 (见高次谐波抑制)。

4. 电力电子技术的发展前景

从 20 世纪 50 年代中到 70 年代末, 以大功率硅二极管、双极型功率晶体管和晶闸管应用为基础(尤其是晶闸管)的电力电子技术发展比较成熟。

20 世纪 70 年代末以来, 两个方面的发展对电力电子技术引起了巨大的冲击。其一为微机的发展对电力电子装置的控制系统、故障检测、信息处理等起了重大作用, 今后还将继续发展; 其二为微电子技术、光纤技术等渗透到电力电子器件中, 开发出更多的新一代电力电子器件。其中除普通晶闸管向更大容量(6500 V、3500 A)发展外, 门极可关断晶闸管(GTO)电压已达 4500 V, 电流已达 2500 ~ 3000 A; 双极型晶体管也向着更大容量发展, 80 年代中后期其工业产品最高电压达 1400 V, 最大电流达 400 A, 工作频率比晶闸管高得多, 采用达林顿结构时电流增益可达 75 ~ 200。

随着光纤技术的发展, 美国和日本于 1981—1982 年间相继研制成功光控晶闸管并用于直流输电系统。这种光控管与电触发的晶闸管相比, 简化了触发电路, 提高了绝缘水平和抗干扰能力, 可使变流设备向小型、轻量方向发展, 既降低了造价, 又提高运行的可靠性。

同时, 场控电力电子器件也得到发展, 如功率场效应晶体管(power MOSFET)和功率静电感应晶体管(SIT)已达千伏级和数十至数百安级的电压、电流等级, 中小容量的工作频率可达兆赫兹级。由场控和双极型合成的新一代电力电子器件, 如绝缘栅双极型晶体管(IGT 或 IGBT)和 MOS 控制晶闸管(MCT)也正在兴起, 容量也已相当大。这些新器件均具有门极关断能力, 且工作频率可以大大提高, 使电力电子电路更加简单, 电力电子装置的体积、重量、效率、性能等各方面指标不断提高, 它将使电力电子技术发展到一个更新的阶段。与此同时, 电力电子器件、电力电子电路和电力电子装置的计算机模拟和仿真技术也在不断发展。

模块一 相控整流电路

任务一 电力电子器件的检测

在电力电子变换和控制电路中,各种电力半导体器件,例如电力二极管、晶闸管、电力晶体管、P-MOSFET管和IGBT等,都只是作为电路中的开关使用,这种由半导体电力开关器件构成的实现电力变换和控制的电路被称为半导体电力开关电路。半导体电力开关电路连同其输出、输入滤波器等辅助元件和控制系统,就构成了电力电子变换器,也被称为变流器。本章以半导体PN结基本原理为基础,介绍各类半导体开关器件最基本的工作原理、外部特性和使用中的一些问题。

广义上电力电子器件可分为电真空器件和半导体器件两类。

两类中,自20世纪50年代以来,真空管仅在频率很高(如微波)的大功率高频电源中还在使用,而电力半导体器件已取代了汞弧整流器、闸流管等电真空器件,成为绝对主力。因此,电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。

电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。

1. 电力电子器件与传统电子器件的比较

同处理信息的电子器件相比,电力电子器件的一般特征:

(1) 能处理电功率的大小,即承受电压和电流的能力是最重要的参数。其处理电功率的能力小至毫瓦级,大至兆瓦级,大多都远大于处理信息的电子器件。

(2) 电力电子器件一般都工作在开关状态。

电力电子器件一般导通时阻抗很小,接近于短路,管压降接近于零,而电流由外电路决定。阻断时阻抗很大,接近于断路,电流几乎为零,而管子两端电压由外电路决定。电力电子器件的动态特性(开关特性)和参数,也是电力电子器件特性很重要的方面,有些时候甚至上升为第一位的重要问题。作电路分析时,为简单起见往往用理想开关来代替。

(3) 电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。

在主电路和控制电路之间,需要一定的中间电路对控制电路的信号进行放大,这就是电力电子器件的驱动电路。

(4) 为保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上讲究散热设计,在其工作时一般都要安装散热器。

导通时器件上有一定的通态压降,形成通态损耗。阻断时器件上有微小的断态漏电流流过,形成断态损耗。在器件开通或关断的转换过程中产生开通损耗和关断损耗,总称开关损耗。对某些器件来讲,驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。通常电力电子器件的断态漏电流极小,因而通态损耗是器件功率损耗的主要成因。器件开关频率较高时,开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

2. 电力电子器件的分类

按照器件能够被控制电路信号所控制的程度,分为以下三类:

- (1) 半控型器件——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断。
- (2) 全控型器件——通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断,又称自关断器件。
- (3) 不可控器件——不能用控制信号来控制其通断,因此也就不需要驱动电路。

知识点 1 电力二极管

在电力电子装置中,常使用不可控的电力二极管。这种电力电子器件常被用于为不可控整流、感性负载回路的续流、电压源型逆变电路提供无功路径以及电流源型逆变电路换流电容与反电势负载的隔离等场合。由于电力二极管的基本工作原理和特性与一般电子线路中使用的二极管相同,本节着重在大功率、快恢复等特点上进行阐述。

一、PN 结与功率二极管的工作原理

1. 半导体 PN 结

自然界中的物质按其导电性能可分为三大类:

(1) 导体:铜、银、铝等金属物质,其原子模型外层电子受束缚力较弱,在外电场的作用下可自由运动形成电流,因此这类金属材料都是良好的导体,具有很强的导电能力。

(2) 绝缘体:橡皮、陶瓷、塑料和石英等物质其原子模型外层没有自由电子,因而其导电能力很差,都是很好的绝缘体。

(3) 半导体:半导体材料,如硅、锗等,其导电性能介于导体和绝缘体之间。纯净的硅(或锗)原子构成的晶体称为本征半导体。半导体材料虽既不能像导体材料那样用于传导电流,又不能像绝缘材料那样隔离带电体,但由于它具有一些宝贵的特性而获得了广泛应用。例如:现已广泛应用的半导体材料大都是由掺入了微量杂质的硅元素(或锗元素)材料研制得到的。硅(或锗)在化学元素周期表中属第Ⅳ族元素,其原子结构模型的最外层有4个电子,每个电子都与邻近的另一个硅原子的外层电子形成共价键电子对结构,这种处于共价键结构中的价电子受共价键的束缚而不易自由运动。因此纯净的硅(或锗),即本征半导体由于缺乏能自由运动的带电粒子——载流子,其导电性并不好。

本征半导体中处于共价键上的某些价电子在接受外界能量激发后也可能脱离共价键的束缚成为自由电子。由于原子的正负电荷是相等的,价电子脱离束缚成为自由电子(电子带负电荷)的同时,又出现一个带正电、可运动的粒子“空穴”。在本征半导体内,自由电子和空穴是成对出现的。自由电子带负电,空穴带正电,二者所带电量相等,符号相反。自由电子和空穴都是运载电荷的粒子,称为载流子,它们在电场力作用下的运动称为漂移运动,载流子定向的漂移运动就形成了电流。本征半导体内价电子要挣脱共价键束缚是很困难的,因此载流子(自由电子、空穴)漂移运动形成的电流很小。

如果在Ⅳ族元素本征半导体硅中掺入一个Ⅴ族元素(原子结构最外层有5个电子,比硅原子多一个电子)砷(或磷)原子,砷取代硅原子位置后,其5个外层电子中有4个与邻近的硅原子外层电子组成共价键电子对,则半导体硅中就出现未被组成共价键电子对的一个自由电子。自由电子移开后,Ⅴ族的掺杂元素砷原子就变成一个不能移动的带正电的离子。只要

掺入少量的 V 族杂质元素砷, 即可使硅半导体中产生大量的在电场作用下能形成电流的带负电的载流子——自由电子, 显著地增强半导体的导电性, 这种主要靠带负电的 (negative) 电子导电的半导体被称为 N 型半导体。N 型半导体中主要的导电载流子是电子, 其中只有很少的受光、热激发而产生的空穴, 因此 N 型半导体中电子是多数载流子 (简称多子), 空穴是少数载流子 (简称少子)。

如果在 IV 族元素本征半导体硅中掺入一个 III 族元素 (原子结构最外层只有 3 个电子, 比硅原子少一个) 硼 (或铝) 原子, 硼原子的外层电子与硅原子外层电子组成共价键时缺少一个电子, 即多了一个空位——空穴。邻近硅原子的价电子填补掺杂原子硼的这个空位后, 掺杂元素硼原子的外层就多一个电子而成为负离子, 同时又使邻近原子处有了一个带正电的空穴, 因此, 半导体硅中就出现一个可运动的带正电的空穴粒子和一个不能移动带负电的硼离子。只要掺入少量的 III 族杂质元素硼即可使硅半导体中产生大量的在电场作用下可形成电流的带正电的载流子——空穴粒子, 显著地增强半导体的导电性。这种主要靠带正电 (positive) 空穴导电的半导体被称为 P 型半导体。P 型半导体中主要的导电载流子是空穴, 其中只有很少的受光、热激发而产生的自由电子, 因此 P 型半导体中空穴是多数载流子 (简称多子), 自由电子是少数载流子 (简称少子)。

电力二极管基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样, 由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成的。

2. 电力二极管的结构

电力二极管的内部结构是一个具有 P 型及 N 型两层半导体、一个 PN 结和阳极 A、阴极 K 的两层两端半导体器件, 其外形如图 1-1 所示, 其符号表示如图 1-2 所示。从外部构成看, 可分成管芯和散热器两部分。这是由于二极管工作时管芯中要通过强大的电流, 而 PN 结又有一定的正向电阻, 管芯会因损能而发热。为了管芯的冷却, 必须配备散热器。一般情况下, 200 A 以下的管芯采用螺旋式, 200 A 以上则采用平板式。

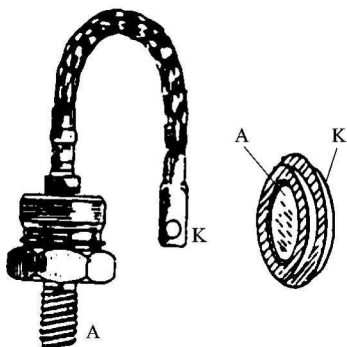


图 1-1 电力二极管外形

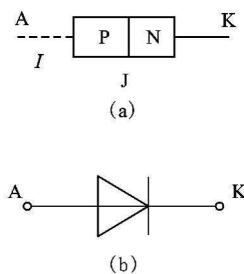


图 1-2 电力二极管符号

二、电力二极管的特性

1. 电力二极管的伏安特性

二极管阳极和阴极间的电压 U_{ak} 与阳极电流 i_a 间的关系称为伏安特性, 如图 1-3 所示。