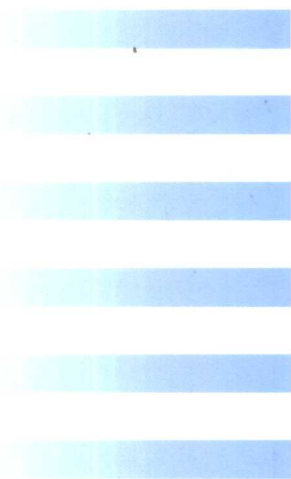


高等学校教材

电力电子学

——电力电子变换和控制技术

陈 坚 编著



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

电力电子学

——电力电子变换和控制技术

陈 坚 编著

高等教育出版社

内容简介

本书是高等工科院校电气工程及其自动化、自动化以及机电一体化等专业学生,面向 21 世纪培养目标所必修的一门专业基础课教材。本书“电力电子学——电力电子变换和控制技术”内容涉及各种电力电子开关器件,DC/DC、DC/AC、AC/DC 和 AC/AC 四类电力变换电路,电力电子变换系统中的辅助元器件和控制系统,软开关变换器,电力电子开关型交流电源和直流电源,以及电力电子技术在电力传输、电力补偿和电力控制中的应用技术。

本书精选和归纳了现代电力电子技术的基本原理和应用技术。全书结构科学合理,层次分明,系统、完整的反映了现代电力电子技术的发展和全貌,重要内容的分析、推证都比较详细,便于读者自学。

本书适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业以及高等学校引导性专业目录中的电气工程与自动化专业及其它相关专业的本科生。部分内容(标有*号者)也可作为相关专业研究生教学参考。对从事电力电子变换和控制技术工作的科技人员也是一本系统、完整的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子学:电力电子变换和控制技术/陈坚编著.
北京:高等教育出版社,2002.1
高等学校电气工程及其自动化专业教材
ISBN 7-04-010491-1

I.电... II.陈... III.电力电子学-高等学校-教材 IV.TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 091314 号

电力电子学——电力电子变换和控制技术
陈 坚 编著

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号 邮政编码 100009
电 话 010-64054588 传 真 010-64014048
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 中国青年出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16 版 次 2002 年 1 月第 1 版
印 张 24.25 印 次 2002 年 1 月第 1 次印刷
字 数 590 000 定 价 23.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

采用半导体电力开关器件构成各种开关电路,按一定的规律,实时、适式地控制开关器件的通、断状态,可以实现电子开关型电力变换和控制。这种电力电子变换和控制技术,被称为电力电子学(Power Electronics),或电力电子技术。本书定名为电力电子学——电力电子变换和控制技术。

电力电子学——电力电子变换和控制技术,是高等学校工科电气信息类电气工程及其自动化专业、自动化专业的学生所必修的一门专业基础课程。

鉴于几乎所有与电力、电子有关的高科技领域都涉及电力电子变换和控制技术,电力电子学也应是专业人员从事相关工作所必须具有的基础知识。

本书共 10 章,第 1 章电力电子变换和控制技术导论,概括性地介绍了电力电子学科的形成,四类基本的开关型电力电子变换电路,二种基本的控制方式(相控和脉冲宽度调制控制),两类应用领域(电力变换电源和电力补偿控制)。这一章还归纳了电力电子变换器的基本特性。学习导论这一章读者可对电力电子变换和控制技术有一个全貌性的认识。第 2 章半导体电力开关器件,介绍各类半导体电力开关器件的基本工作原理和静态特性。随后第 3、4、5、6 四章分别介绍直流—直流(DC/DC),直流—交流(DC/AC),交流—直流(AC/DC),交流—交流(AC/AC)四类电力电子变换的工作原理和特性,学习了四类基本变换电路以后,在第 7 章讲述电力电子变换器中的辅助元器件和系统:驱动器、缓冲器,电感和变压器、滤波器,散热系统和控制系统,这一章在分析开关器件的开通、关断过程之后介绍各种缓冲器。紧接着在第 8 章介绍软开关变换器。第 9、10 两章分别介绍电力电子变换电路的两类应用:多级开关型变压、变频电源,电力电子开关型电力补偿、控制器。第一类应用,电力电子开关型变换电源(通用恒频恒压电源和向交、直流电动机供电的变压、变频电源),是以往 40 年间电力电子技术的主要应用领域;第二类应用,电力电子开关型电力补偿、控制器,今后 10~20 年间,将会在电力系统(发电、输电、配电网路)及负载电能质量控制领域得到广泛应用,并将导致电力系统发生革命性的变革。

本书内容的选取原则是:以电工、电子学和控制理论最基本的原理为起点,完整、系统地讲述电力电子变换和控制技术的基础知识、新技术的发展和前景。鉴于改进教学方式,例如采用多媒体教学,可以提高电力电子学课程的教学效率,本书所选内容较以往 50 学时课程内容要多一些。为便于自学,重要内容的分析、说明,重要公式的推证都比较详细。每章最后有小结,并给出复习题及思考题。

为便于某些读者的学习,书中也简略地介绍了一些与电力电子学课程内容相关的背景知识。书中介绍的另一些标有 * 号的内容,是为优秀学生自学、扩大知识面提供的,亦可作为相关专业研究生教学参考。这两种内容都不必在本科生课堂上讲授。

在本书长时期的编写过程中得到前华中理工大学教师们的支持和帮助,在此向邹云屏、康

勇、徐至新、熊蕊、李晓帆、杨荫福等教授表示衷心感谢。向为本书制图、书稿计算机录入付出辛勤劳动的博士、硕士研究生李剑、李勋、邓文丹、张军建、邹旭东等同学表示感谢。

上海交通大学陈敏逊教授在审阅本书中提出了许多宝贵的意见,作者在此表示衷心感谢。

作者还要对书末所列参考文献的作者表示衷心感谢。

作者殷切希望采用本书的教师、学生和使用本书的专业技术人员,对本书的内容、结构及疏漏、错误之处给予批评、指正。

编者

华中科技大学

电气与电子工程学院

2001年10月



作者简介

陈坚，1935年生。1958年毕业于华中工学院电机系，留校任教至今，其间于1980~1982年在加拿大多伦多大学做电力电子技术和交流变速传动研究工作。从事电气工程及自动化教学工作近40年，曾为本科生、研究生讲授电子技术、电力传动自动控制、自动调节原理、电力电子学及交流电机变速传动控制基础等十多门基础课和专业课，已培养硕士、博士研究生60多人。从1971年至今，从事电力电子技术及电力传动自动化方面的科研工作，在逆变器控制和交流电机控制方面做过较多的理论研究，在舰船电力电子技术应用领域做过一些开拓性研究工作和十几种装备（整流、逆变、斩波、变频、开关电源、UPS以及电力传动控制系统）研制工作。曾编写3本教材，发表论文90多篇。现为华中科技大学电气及电子工程学院教授，电力电子与传动控制专业博士生导师、电磁兼容性国防科技重点实验室研究员、美国IEEE高级会员、中国电力电子与传动控制学术委员会副主任、中国电源学会副理事长。

责任编辑 金春英
封面设计 王凌波
责任绘图 朱 静
版式设计 马静如
责任校对 胡晓琪
责任印制 韩 刚



目 录

第1章 电力电子变换和控制技术导论	1
1.1 电力电子学科的形成	1
1.2 电力电子变换和控制的技术经济意义	3
1.3 开关型电力电子变换的基本原理及控制方法	5
1.4 开关型电力电子变换器基本特性	16
1.5 开关型电力电子变换器的应用领域	17
小结	20
复习题及思考题	20
第2章 半导体电力开关器件	22
2.1 电力二极管	22
2.2 双极结型电力三极管 BJT	30
2.3 晶闸管及其派生器件	36
2.4 门极可关断晶闸管 GTO	44
2.5 电力场效应晶体管 P-MOSFET	45
2.6 绝缘门极双极型晶体管 IGBT	47
2.7 MOS 控制晶闸管 MCT 和集成门极换流晶闸管 IGCT	49
2.8 静电感应晶体管 SIT 和静电感应晶闸管 SITH	51
2.9 半导体电力开关模块和功率集成电路 PIC	52
小结	54
复习题及思考题	56
第3章 直流—直流变换器	57
3.1 直流—直流降压变换器(Buck 变换器)	57
3.2 直流—直流升压变换器(Boost 变换器)	68
3.3 直流降压—升压变换器(Buck-Boost 变换器)	77
3.4 直流升压—降压变换器(Boost-Buck 变换器或 Cuk 变换器)	79
3.5 两象限、四象限直流—直流变换器	88
3.6 多相、多重直流—直流变换器	90
3.7 带隔离变压器的直流—直流变换器	93
小结	98
复习题及思考题	98
第4章 直流—交流变换器	100
4.1 逆变器的类型和性能指标	100
4.2 电压型单相方波逆变电路工作原理	102
4.3 电压型单相逆变器输出电压和波形控制	105
4.4 三相逆变器工作原理	119

4.5	三相逆变器输出电压和波形的 SPWM 控制	124
4.6	三相逆变器电压空间矢量 PWM 控制	126
4.7	多电平逆变器	133
4.8	大容量逆变器的复合结构	137
	小结	142
	复习题及思考题	143
第5章	交流一直流变换器	145
5.1	整流器的类型和性能指标	145
5.2	不控整流	147
5.3	单相桥式相控整流电路	158
5.4	三相半波相控整流电路	172
5.5	带平衡电抗器的三相双半波(双反星形)相控整流电路	173
5.6	三相全控桥式 6 脉波和 12 脉波整流电路	179
5.7	整流电路中交流电路电感对整流特性的影响	185
5.8	相控整流电压的谐波分析	189
5.9	相控有源逆变电路	196
5.10	相控整流及有源逆变晶闸管触发控制	202
5.11	含有源功率因数校正环节的单相整流器	204
5.12	三相高频 PWM 整流	208
	小结	215
	复习题及思考题	215
第6章	交流—交流变换器	217
6.1	晶闸管交流电压控制器的类型	217
6.2	单相交流电压控制器	219
6.3	三相交流电压控制器	229
6.4	变压器抽头控制器	234
6.5	晶闸管相控交流—交流直接变频器	236
6.6	矩阵式交流—交流变频器	244
	小结	245
	复习题及思考题	245
第7章	辅助元器件和系统	247
7.1	驱动器	247
7.2	过电流保护和过电压保护	252
7.3	开关器件的开通、关断过程与安全工作区	255
7.4	缓冲器	259
7.5	电感(电抗器)和变压器	270
7.6	滤波器	276
7.7	散热系统	283
7.8	控制系统	285
	小结	287
	复习题及思考题	288

第8章 软开关变换器	289
8.1 软开关的基本特性和类型	289
8.2 电压型串联谐振式逆变器	293
8.3 电流型并联谐振式逆变器	299
8.4 准谐振 DC/DC 变换器	305
8.5 零电流关断(ZCS) PWM DC/DC 变换器	310
8.6 零电压开通(ZVS) PWM DC/DC 变换器	314
8.7 直流环节并联谐振型逆变器 PRDLI	319
小结	327
复习题及思考题	328
第9章 多级开关型变压、变频电源	329
9.1 AC/DC—DC/AC 变压、变频(VVVF)电源	329
9.2 AC/DC—DC/AC 恒压、恒频不间断电源 CVCF—UPS	332
9.3 晶闸管相控整流—有源逆变的直流输电系统	334
9.4 具有中间交流环节(直流—交流—直流变换)的硬开关直流电源	337
9.5 移相全桥零电压开关 DC/AC—AC/DC 直流电源	342
9.6 交流电源供电的 AC/DC—DC/AC—AC/DC 三级变换直流电源	347
小结	349
复习题及思考题	349
第10章 电力电子开关型电力补偿、控制器	350
10.1 晶闸管开关型阻抗补偿控制器	350
10.2 PWM 开关型无功功率发生器	357
10.3 负载谐波电流补偿器 HCC(并联型电力有源滤波器 PAPF)	360
10.4 谐波电压补偿器 HVC(串联型电力有源滤波器 SAPF)	366
10.5 PWM 开关型串联基波电压补偿器	368
10.6 电网瞬态电压补偿、抑制器	370
10.7 晶闸管控制移相器 TCPS(晶闸管控制的相位调节器 TCPR)	371
10.8 超导磁体储能系统 SMES	373
10.9 统一潮流控制器 UPFC	375
10.10 通用用户电力调节器 UCPC(统一电能质量调节器 UPQC)	376
小结	377
复习题及思考题	378
参考文献	379

第 1 章 电力电子变换和控制技术导论

本章叙述了现代电力电子学科的形成,说明了电力电子变换和控制的技术经济意义,介绍了开关型电力电子变换电路的基本原理、控制方法和两类开关型电力电子变换器的基本特性,最后归纳了电力电子变换电源和电力电子补偿控制器两类应用。

1.1 电力电子学科的形成

在人类文明的整个历史中,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以 17 世纪建立牛顿力学(Newton, 1642~1727)的科学革命为先导,以 18 世纪下半叶瓦特(J. Watt, 1736~1819)发明蒸汽机(1769 年)为主要标志。蒸汽机取代自然力成为机器制造、采矿、冶金、铁路、化学、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 100 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。

人类近代历史上的第二次技术革命是以 18 世纪末至 19 世纪初发现电磁学基本原理、19 世纪 30 年代英国物理学家法拉第(M. Faraday, 1791~1867)等人发现电磁感应现象为先导的。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,成为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、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、电视机、电子计算机、电子录像机、传真机等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,再通过输配电网络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用以驱动机械运动,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、化学能等等)转变得到。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. 1831~1879)在奥斯特、安培、法拉第等人工作的基础上,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23岁的意大利青年马可尼(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。

电子技术又称电子学,它是与电子器件(最早期的电子器件是电子管,随后发展到晶体管、晶体管集成电路和微处理器)、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。与电力技术一样,电子技术的理论基础也是电磁学。不同的是,电力技术研究的是发电机、变压器、电动机、输配电线路等动力用电设备,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信息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、存储、处理、发送和接收的电子技术(电子学)又称为信息电子技术(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电子器件。电子电路中主要是依靠电子器件来实现电信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收。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吨,占地167m²,耗电156kW,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P-N结(晶体二极管)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三极管(N-P-N或P-N-P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:能否按电子电路的要求,将一个电路中包含的晶体二极管、三极管以及电阻、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,已可以由一块手指大小的集成电路芯片替代。微电子技术的成就为现代电子技术的发展和应用奠定了良好的基础。

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(125kV、输送功率20MW、输电距离225km),采用串联直流发电机和电动机

作为该系统的直流电源和负载,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(在输电线的首端将交流发电机的交流电整流为直流电,经过远距离直流输电后,在输电线末端再将直流电逆变为负载所需的交流电)。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(充气二极管、充气三极管——又称闸流管、汞弧整流器等)的试验研究。由于电子管器件的固有缺陷,在20世纪50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三极管三端(集电极C,发射极E,基极B)、三层半导体(N-P-N)结构的基础上发明了晶体闸流管(Thyristor简称晶闸管)。晶闸管是一个三端(阳极A、阴极K和控制极G)、四层(P-N-P-N)半导体开关器件,与充气三极管(闸流管)相似,可以在控制极加脉冲电流来控制阳极-阴极之间的单向导通电流,但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、截止时漏电流小、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,实现交流一直流变换,又由于使用硅半导体,因此初期曾称为可控硅整流器(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一直流电压变换。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。

晶闸管是从半导体二极管(P-N结)、半导体三极管(N-P-N或P-N-P结构)发展起来的高压、大电流半导体开关器件。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,好几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有望在21世纪初得到广泛应用。利用半导体电力开关器件组成开关电路,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,利用半导体电力开关器件和半导体集成电路、微处理器控制系统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,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1.1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(发电机、变压器等各种电力设备和处理电能的电力网络)、电子技术(各种电子器件和处理信息的电子电路)与控制技术(连续系统和离散系统控制理论)三者结合的交叉学科。

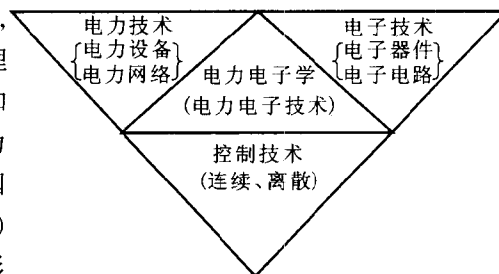


图 1.1 表征电力电子技术的倒三角形

1.2 电力电子变换和控制的技术经济意义

在电力系统中,公用电网提供的电源是固定频率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。普通的白炽灯照明需

要 220 V(或 110 V)50 Hz(或 60 Hz)单相交流电,而机械工业中的感应加热设备必须由中频或高频交流电源供电;化学工业中的电解、电镀由低压直流电源供电;城市地铁要求有可控的高压直流电源对机车供电;通信设备如程控交换机需要 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源供电;许多高技术设备要由恒频、恒压的正弦波交流不间断电源供电 UPS(Uninterruptible Power Supply 设备);而现在已得到广泛应用的交流电机变频调速则是由三相交流变频、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的不同要求。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,可以获得更好的技术特性和更大的经济效益。

以下是几个典型事例:

(1) 带风机、水泵等负载的三相交流异步电动机,每年消耗电厂发电总量的三分之一以上,如果直接由公用交流电网供电,当需要减少风量、水流量时,仅靠利用挡板、阀门加大风阻、水阻以减少风量、水量至 50% 额定值,电能的利用效率将低于 50%。如果采用电力变换装置将 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机供电,通过调节电机速度来改变风量、水量,则电能的利用效率仍可维持在 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,每年节省的能源将超过几千万吨煤燃料,或者可以少兴建几万千瓦的发电站,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。带有电感式镇流器的荧光灯,其发光效率比普通白炽灯高得多,在同样的光通量下其耗电减小到白炽灯的 1/3。如果采用高频电力变换器(又称电子镇流器)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,若获得广泛应用,则节能节电效益十分显著。

(3) 将工频 50 Hz 交流电升频后再给某些负载供电,由于频率的升高,用电设备及变压器、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斩波器等供电时,产品精度、质量、运行快速性、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,为了提高输电效率和确保系统稳定性,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,而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,经远距离传输后再将直流电变换成 50 Hz 或 60 Hz 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,所以尽管增加了电力变换环节,但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,大量需要其他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。2000年末,美国发电站生产的40%以上的电能都是经变换和处理后再供负载使用,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,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,补偿电力网络的阻抗,减小甚至消除电力系统中的谐波,改变电力系统中的有功、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,这将能显著提高输电系统的极限传输功率能力,改善电力系统的运行特性。

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。

1.3 开关型电力电子变换的基本原理及控制方法

用电设备将电能转变为光能、热能、化学能或机械能。光、热、化学反应和机械能的调节和控制,可通过改变用电设备电源电压的大小或频率方便地实现。

电源可分为两类:一是直流电,其频率 $f=0$;二是交流电,其频率 $f\neq 0$ 。电力变换包括电压(电流)的大小、波形及频率的变换。因此电力变换可划分为五类基本变换,相应的有五种电力变换电路或电力变换器。

(1) 交流—直流整流电路或整流器:将频率为 f_1 的交流电压 v_1 变换为频率 $f_2=0$ 的直流电压 v_2 。

(2) 直流—交流逆变电路或逆变器:将频率为 $f_1=0$ 的直流电压 v_1 变换为频率 $f_2\neq 0$ 的交流电压 v_2 。

(3) 直流—直流电压变换电路:将频率为 $f_1=0$ 的直流电压 v_1 变换为频率 $f_2=0$ 的直流电压 v_2 ,直流—直流电压变换电路,又叫直流斩波电路、直流斩波器。

(4) 交流—交流电压变换电路或交流电压变换器(交流斩波器):将频率为 f_1 的交流电压 v_1 变换为同一频率的交流电压 v_2 。

(5) 交流—交流直接变频电路或直接变频器(又被称为周波变换器):将频率为 f_1 的交流电压 v_1 直接变换为频率 f_2 的交流电压 v_2 。

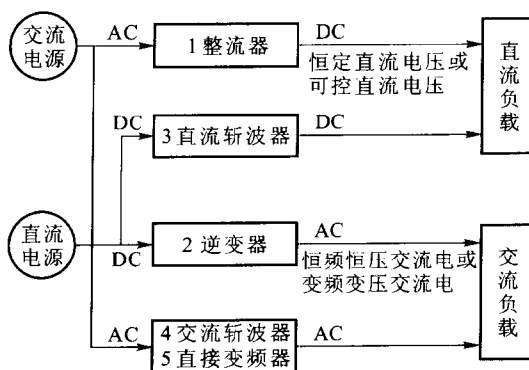


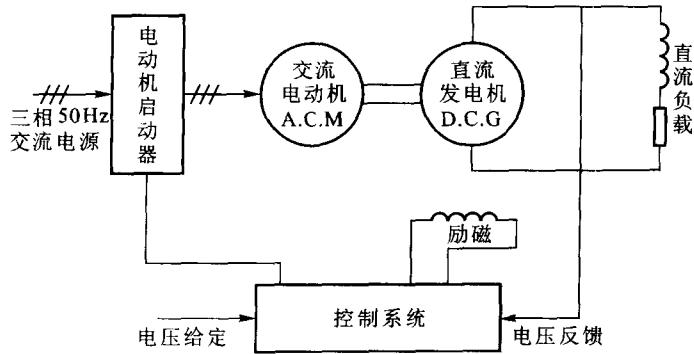
图 1.2 电力变换类型

以上各类电力变换和电力变换器示于图 1.2。例如交流一直流变换由整流器实现,整流器的输入是交流电源,其输出电压的主要成分是一个固定的或可控的直流电压。以上各类电力变换器将在第 3、4、5、6 章及第 8 章详细论述,本节仅简单介绍电力变换的基本原理和控制方法。

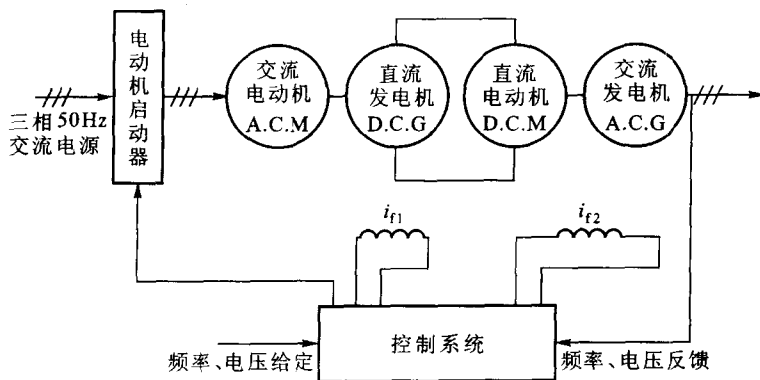
利用以上五类基本变换可以组合成许多复合型电力变换器。例如将 1 和 2 两类变换器先后串联(AC/DC-DC/AC),可复合成有中间直流环节的交流—交流间接变换器(AC—DC—AC);将 2、1 两类变换器先后串联(DC/AC-AC/DC),可复合成有中间交流环节的直流—直流间接变换器(DC—AC—DC)。

20 世纪 60 年代以前,实现电压、频率变换一般只能靠电动机—发电机组即变流机组来实现。

图 1.3(a)所示是交流电变直流电的直流发电机组。三相交流电网的 50 Hz 电源,经启动器给交流异步电动机供电,异步电动机带动直流发电机,发出负载所需的直流电。一个电压闭环控制系统通过检测直流输出电压,并与电压给定值相比较后控制直流发电机的励磁绕组电流,使直流发电机即使在电动机转速波动时和直流负载大小变化时也能保持其输出电压为负载要求的给定值。



(a) 交流电动、直流发电机组实现交流—直流变换



(b) 交流变频、变压发电机组实现交流—交流电压、频率变换

图 1.3 利用交流机组实现电力变换

图 1.3(b)所示是将公用电网 50 Hz 恒频、恒压交流电变为频率、电压都可变的交流电的交流变流机组。交流异步电动机带动直流发电机,将 50 Hz 交流电变为直流电,再将直流电供给直流电动机,直流电动机再带动交流发电机,发出电压、频率都可控的交流电。检测交流发电机输出的频率,反馈控制直流发电机的励磁电流 i_f ,改变直流发电机的输出电压,从而改变直流电动机的转速,即可控制交流发电机的频率;同时,检测交流发电机的输出电压,反馈控制其励磁电流 i_m ,可控制交流发电机的输出电压为给定值。图 1.3(b)实际上是两个电动发电机组的串联使用,第一个是交流电动机 A.C.M→直流发电机 D.C.G,将交流变直流;第二个是直流电动机 D.C.M→交流发电机 A.C.G,将直流电变为交流电。

采用变流机组实现频率、电压变换是已有近百年历史的老技术,缺点很多:电动机-发电机组耗费钢、铜材料多,重量、体积大,环节多,维护工作量大,效率低,噪音大,控制精度和响应速度都不甚理想。为了从根本上改进电力变换技术,20 世纪 30 年代就提出了利用电路开关的通、断控制实现电力变换的控制思想,只是由于长期找不到能迅速通、断电路的大功率电路开关,这种开关型电力变换技术直到最近 30 多年才得到广泛应用。

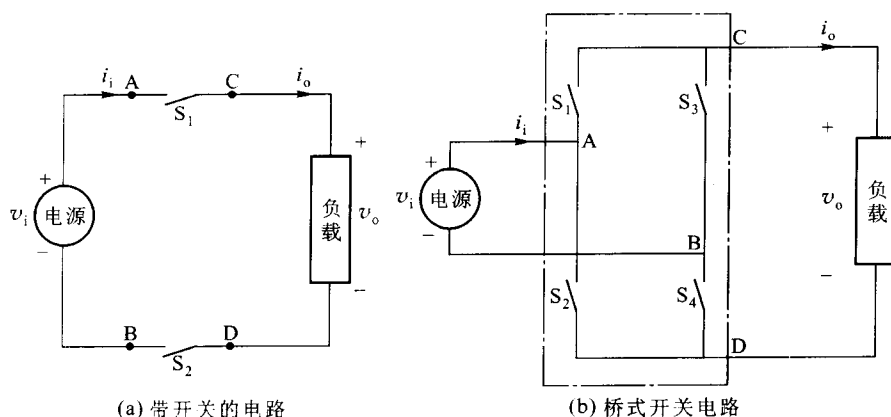


图 1.4 基本开关电路

以往电路中设置开关只是为了将用电负载接通电源或者断开电源,开关仅用于控制负载是否得电工作,如图 1.4(a)所示。当需要负载工作时,接通开关 S_1 、 S_2 ,则电源电压 v_i 经开关直接接至负载,负载电压 $v_o = v_i$ 。当开关 S_1 、 S_2 断开时,负载失电,停止工作, $v_o = 0$ 。如果不仅要求电源电压正向加至负载,使负载电压 $v_o = v_i$;而且还要求电源电压能反向加至负载,使 $v_o = -v_i$,则可采用图 1.4(b)所示由四个开关 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 所组成的桥式开关电路。电源 v_i 接至开关电路的输入端 A、B,开关电路的输出端 C、D 接负载,这时开关电路有三种工作情况:

(1) 当 S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 断开时,电源正端 A 经 S_1 接至负载正端 C,电源负端 B 经 S_4 接至负载负端 D,即电源正、负端经开关 S_1 、 S_4 与负载正、负端 C、D 直接连接。这时经开关电路输出至负载的电压 $v_o = +v_i$,负载电流 i_o 也就是电源电流, $i_o = i_i$ 。

(2) 当 S_2 、 S_3 导通, S_1 、 S_4 断开时,电源正端 A 经 S_2 接至负载负端 D,电源负端 B 经 S_3 接至负载正端 C,即电源正、负端经开关 S_2 、 S_3 与负载正、负端交叉连接,这时开关电路输出电压、即