



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电力电子学

——电力电子变换和控制技术

第 二 版

陈 坚 编著



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十五”国家级规划教材

电力电子学

——电力电子变换和控制技术

第 二 版

陈 坚 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材——“电力电子学——电力电子变换和控制技术”(2002年1月由高等教育出版社出版)的修订版。基于三年的试用情况并参考近三年国外出版的相关教材的体系、内容,对本书第一版内容作了增删修订。

本书共10章。第1章电力电子变换和控制技术导论。第2章介绍半导体电力开关器件。随后第3、4、5、6章依次介绍DC/DC、DC/AC、AC/DC、AC/AC四类基本电力电子变换电路。第7章介绍电力电子变换系统中的辅助元器件和控制系统。第8章介绍谐振开关型变换器。最后两章介绍电力电子变换电路的两类典型应用:交流、直流电源变换器和电力电子开关型电力补偿控制器。

本书精选的四个教学实验,也已录入多媒体课件光盘,以供选用。

本书适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业及其他相关专业的本科生并可用作相关专业研究生的参考书,也可供从事电力电子变换和控制的相关工程技术人员使用。

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. 二版. —北京:高等教育出版社,2004.12
ISBN 7-04-015600-8

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(2004)第107413号

策划编辑 金春英 责任编辑 许海平 封面设计 于文燕 责任绘图 朱 静
版式设计 范晓红 责任校对 殷 然 责任印制 孔 源

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京四季青印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 21
字 数 510 000

版 次 2002年1月第1版
2004年12月第2版
印 次 2004年12月第1次印刷
定 价 26.30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

物料号:15600-00

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,周期性地,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,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(第二版)。

电力电子学——电力电子变换和控制技术,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所必修的一门技术基础课程。

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,电力电子学也应是从事相关工作专业人员所必须具有的基础知识。

本书于2002年1月出版后,基于三年的试用情况并参考最近三年国外出版的相关教材的体系、内容,对本书第一版作出了增删修订。第二版教材继承了第一版的体系,但删除了一些可移放至其他选修课的内容,简化了一些开关电路工作情况过程和特性复杂的数学分析,着重于物理过程特性的说明并给出一些简明的结论。

本书第二版内容的选取原则仍是:以电气工程、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,重要内容的分析和重要公式的推证都比较详细。每章最后有小结、复习题及思考题。第二版增加了一些例题,以加深读者的理解。

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、两种基本的控制方式(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。学习导论这一章后,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)四类电力电子变换电路的工作原理和特性。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,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章介绍谐振开关型变换器。第9、10两章分别介绍电力电子变换电路的两类典型应用:多级开关电路组合型交流、直流电源和电力电子开关型电力补偿、控制器。电力电子开关型变换电源,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,在今后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。

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(节的左上角注·号)。书中也介绍了一些超出现在本科学生教学要求的内容(节的左上角注*

号),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。

为了便于本教材的教学,我们正在制作配套的多媒体课件。使用该课件可丰富教师的教学手段,对学生学习和理解教材的精髓都会有帮助。

电力电子技术是一门实践性很强的技术基础课程。在课堂讲授的基础上学生应独立完成一些基本教学实验。本书精选了四个教学实验,由杨莉莎高级工程师等人设计、组装的实验装置及编写的电力电子技术实验指导书也已录入多媒体课件光盘供选用。

在本书长时期的编写过程中得到华中科技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。向为本书第二版制图、书稿计算机录入付出辛勤劳动的博士研究生赵阳、王归新、刘飞、马学军、谭智力等同学表示感谢。

本书初版于2001年7月完成,2002年元月出版。此为修订后的第二版。

上海交通大学陈敏逊教授、东南大学冷增祥教授在审阅本书中提出了许多宝贵的意见,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。

作者殷切希望各校教师、学生和专业技术人员,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

2004年8月

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	19
复习题及思考题	20
第 2 章 半导体电力开关器件 21	
2.1 电力二极管	21
2.1.1 半导体 PN 结	21
2.1.2 二极管基本特性	23
2.1.3 电力二极管	25
2.1.4 电力二极管的主要应用	28
2.2 双极结型电力晶体管 BJT	28
2.2.1 晶体管基极电流对集电极电 流的控制作用	28
2.2.2 静态特性	30
2.2.3 电力晶体管使用参数和特性	32
2.3 晶闸管及其派生器件	34
2.3.1 逆阻型晶闸管 SCR	34
2.3.2 逆导型晶闸管 RCT	39
2.3.3 光控晶闸管 LCT	40
2.3.4 双向晶闸管 TRIAC	40
2.4 门极可关断晶闸管 GTO	41
2.5 电力场效晶体管 P-MOSFET	42
2.6 绝缘门极双极型晶体管 IGBT	45
2.6.1 工作原理	45
2.6.2 静态特性	46
2.6.3 擎住效应	46
2.7 MOS 控制晶闸管 MCT 和集成门极 换流晶闸管 IGCT	47
2.8 静电感应晶体管 SIT 和静电感应 晶闸管 SITH	48
2.9 半导体电力开关模块和功率集成 电路 PIC	49
小结	51
复习题及思考题	53
第 3 章 直流/直流变换器 55	
3.1 直流/直流降压变换器(Buck DC/DC 变换器)	55
3.1.1 电路结构和降压原理	55
3.1.2 电感电流连续时工作特性	57
3.1.3 电感电流断流时工作特性	60
3.2 直流/直流升压变换器(Boost DC/DC 变换器)	65
3.2.1 电路结构和升压原理	65
3.2.2 电感电流连续时工作特性	65
3.2.3 电感电流断流时工作特性	67
3.3 直流升压-降压变换器(Boost-Buck 变换器或 Cuk 变换器)	71
3.3.1 电路结构和工作原理	71
3.3.2 电流断流时工作特性	73
3.3.3 两电感有耦合的 Cuk 变换器	74
3.4 两象限、四象限直流/直流变换器	77
3.4.1 两象限直流/直流变换器	77
3.4.2 四象限直流/直流变换器	78
3.5 多相、多重直流/直流变换器	80
3.6 带隔离变压器的直流/直流变换器	81
3.6.1 隔离型 Buck 变换器——单端正励 变换器(Forward Converter)	82
3.6.2 隔离型 Buck-Boost 变换器——单 端反励变换器(Flyback Converter)	83
3.6.3 隔离型 Cuk 变换器	88
小结	89
复习题及思考题	90
第 4 章 直流/交流变换器(逆变器) 91	

4.1 逆变器的类型和性能指标	91	5.2.5 三相桥式不控整流	142
4.1.1 逆变器的类型	91	5.2.6 电容滤波的不控整流电路	143
4.1.2 逆变器输出波形性能指标	92	5.3 单相桥式晶闸管相控整流电路	148
4.1.3 其他指标	93	5.3.1 单相桥式全控整流电路	148
4.2 电压型单相方波逆变电路工作原理	93	5.3.2 单相桥式半控整流电路	160
4.2.1 电压型单相全桥逆变电路	93	5.4 三相半波相控整流电路	161
4.2.2 电压型单相半桥逆变电路	95	5.5 三相桥式相控整流电路	162
4.2.3 变压器中心抽头推挽式(Push - Pull)单相逆变电路	96	5.5.1 三相桥式全控整流电路	162
4.3 电压型单相逆变器电压和波形控制	96	5.5.2 三相桥式半控整流电路	169
4.3.1 单脉波脉冲宽度调制 PWM 逆变器	97	5.6 交流电路中电感对整流特性的影响	169
4.3.2 正弦脉冲宽度调制 SPWM 基本原理	98	5.7 相控整流电压的谐波分析	173
4.3.3 单极性倍频正弦脉冲宽度调制逆变器	101	5.7.1 m 脉波相控整流电压通用公式	174
4.3.4 双极性正弦脉冲宽度调制 BSPWM 逆变器	106	5.7.2 m 脉波不控整流电压通用公式	176
4.3.5 改进型正弦脉冲宽度调制 MSPWM	108	5.7.3 单相和三相桥式相控整流输出电压谐波特性	177
4.3.6 基波移相控制	109	5.8 带平衡电抗器的双三相桥 12 脉波整流电路	178
4.4 三相逆变电路工作原理	109	5.9 相控有源逆变电路工作原理	182
4.4.1 电压型三相逆变工作原理	109	5.9.1 有源逆变原理	182
4.4.2 电流型三相逆变工作原理	113	5.9.2 有源逆变安全工作条件	184
4.5 三相逆变器输出电压和波形的 SPWM 控制	114	5.9.3 三相全桥相控整流和有源逆变的控制特性	185
4.6 三相逆变器电压空间矢量 PWM 控制	118	5.9.4 晶闸管相控有源逆变的应用	187
4.7 多电平逆变电路	125	5.10 相控整流及有源逆变晶闸管触发控制	188
4.8 大容量逆变器的复合结构	130	5.11 含有源功率因数校正环节(PFC)的单相高频整流	190
4.8.1 12 阶梯波逆变器	131	5.11.1 谐波电流的危害及改善措施	190
4.8.2 24 阶梯波逆变器	133	5.11.2 含升压(Boost)型功率因数校正器的高频整流	192
小结	135	5.11.3 带反励式功率因数校正器的高频整流	193
复习题及思考题	136	5.12 三相高频 PWM 整流	194
第 5 章 交流/直流变换器(整流器)	138	5.12.1 能量可回馈的高频 PWM 整流电路	194
5.1 整流器的类型和性能指标	138	5.12.2 交流/直流双向 PWM 变换器工作原理	195
5.2 不控整流电路	140	5.12.3 三相电压型高频 PWM 整流控制系统	198
5.2.1 单相半波不控整流	140	小结	199
5.2.2 两相半波不控整流(或双半波不控整流)	141	复习题及思考题	200
5.2.3 单相桥式不控整流	141	第 6 章 交流/交流变换器	201
5.2.4 三相半波不控整流	142		

6.1 晶闸管交流电压控制器的类型	201	缓冲电路	241
6.2 单相交流电压控制器	202	7.4.3 P-MOSFET、IGBT 的限幅钳位缓	
6.2.1 电阻负载	202	冲器	241
6.2.2 电阻、电感性负载	206	7.5 电感(电抗器)、方波变压器和	
6.2.3 PWM 交流电压控制器	208	脉冲变压器	246
6.3 三相全波交流电压控制器	209	7.5.1 电感(电抗器)	246
6.3.1 三相星形联结交流电压控制器 ..	209	7.5.2 方波变压器和脉冲变压器	249
6.3.2 三相开口三角形交流电压		7.6 滤波器	251
控制器	212	7.6.1 滤波器基本功能和类型	251
6.4 变压器抽头电压控制器	213	7.6.2 LC 滤波器特性分析	252
6.5 晶闸管相控交流/交流直接		7.6.3 谐振型滤波器	256
变频器	214	7.7 散热系统	257
6.5.1 基本工作原理	214	7.8 控制系统和辅助电源	258
6.5.2 实用电路结构	218	小结	260
6.5.3 交流/交流相控直接变频的		复习题及思考题	260
优缺点	218	第 8 章 谐振开关型变换器	261
6.6 矩阵式交流/交流变频器	220	8.1 硬开关、LC 缓冲软开关和 LC 谐振零	
小结	221	开关基本特性	261
复习题及思考题	222	8.2 谐振开关型变换器的类型	263
第 7 章 辅助元器件和系统	223	8.3 谐振开关型零电压开通(ZVS)	
7.1 触发、驱动器	223	变换器	265
7.1.1 晶闸管 SCR 的触发驱动器	223	8.3.1 零电压开通脉冲宽度调制	
7.1.2 GTO 的触发驱动器	224	(ZVS PWM)变换器工作原理	265
7.1.3 BJT 的驱动器	225	8.3.2 零电压开通脉冲频率调制(ZVS	
7.1.4 P-MOSFET、IGBT 的驱动器	226	PFM)变换器工作原理	267
7.2 过电流保护和过电压保护	227	8.4 谐振开关型零电流关断(ZCS)	
7.2.1 过电流保护	227	变换器	268
7.2.2 过电压保护	228	8.4.1 零电流关断脉冲宽度调制(ZCS	
7.2.3 开关器件串联、并联应用时的		PWM)变换器工作原理	269
均压、均流保护	229	8.4.2 零电流关断脉冲频率调制(ZCS	
7.3 开关器件的开通、关断过程与		PFM)变换器工作原理	272
安全工作区	230	8.5 直流环节并联谐振型逆变器	
7.3.1 线路电感 $L_s = 0$ 时开关器件的		PRDCLI	273
开通、关断过程	231	8.5.1 工作原理	274
7.3.2 线路电感 $L_s \neq 0$ 时开关器件的		8.5.2 参数计算	278
开通、关断过程	233	8.5.3 直流环节并联谐振型逆变器	
7.3.3 安全工作区	234	PRDCLI 的控制策略	280
7.4 缓冲器	235	小结	280
7.4.1 全控型开关管 LCRD 型复合		复习题及思考题	281
缓冲器	235	第 9 章 多级开关电路组合型交流、	
7.4.2 电力二极管、晶闸管的 RC		直流电源	282

9.1 AC/DC - DC/AC 变压、变频(VVVF) 电源	282	控制器	300
9.2 AC/DC - DC/AC 恒压、恒频(CVCF) 不间断电源 UPS	284	10.1 晶闸管开关型并联电抗补偿器	300
9.2.1 典型在线双变换式 UPS	285	10.1.1 晶闸管投、切并联电容器 TSC	300
9.2.2 典型后备式 UPS	286	10.1.2 晶闸管相控并联电抗器 TCR	302
9.2.3 在线互动式 UPS	286	10.2 晶闸管开关型串联电抗补偿器	304
9.3 晶闸管相控整流-有源逆变的直流 输电系统	287	10.2.1 晶闸管控制的串联电容补偿器 TCSC	304
9.4 具有中间交流环节(直流/交流/ 直流变换)的直流电源	288	10.2.2 可关断晶闸管 GTO 控制的串 联电容补偿器 GCSC	305
9.4.1 半桥型 DC/AC - AC/DC 直流 电源	289	10.3 PWM 开关型并联无功功率发生器 STATCOM	306
9.4.2 全桥型 DC/AC - AC/DC 直流 电源	291	10.4 谐波电流补偿器 HCC(或并联型电力 有源滤波器 PAPP)	308
9.5 移相全桥零电压开关 DC/AC - AC/DC 变换器	291	10.5 谐波电压补偿器 HVC(或串联型电 力有源滤波器 SAPF)	309
9.5.1 电路特点	291	10.6 PWM 开关型串联同步电压补偿器 SSSC	310
9.5.2 一个周期的开关过程	292	10.7 统一潮流控制器 UPFC	311
9.5.3 开关器件零电压开通条件	296	10.8 超导磁体储能系统 SMES	313
9.5.4 变压器二次绕组及二极管导 电情况	297	小结	315
9.6 交流电源、直流负载时电力电子变换 系统方案比较	297	复习题及思考题	316
小结	299	附录 A 傅里叶级数	317
复习题及思考题	299	附录 B 常系数线性二阶微分方程的 通解	323
第 10 章 电力电子开关型电力补偿、		参考文献	325

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,简介了开关型电力电子变换电路的基本原理、控制方法和基本特性,最后归纳了开关型电力电子变换电路的两类应用领域:电力电子变换电源和电力电子补偿控制器。

1.1 电力电子学科的形成

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。电能在工农业、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等。电能是现代最重要的能源,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—1873)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18 000个电子管,重30 t,占地 167m^2 ,耗电 156kW ,运算速度为每秒5 000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(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,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大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(125kV、输送功率20MW、输电距离225km),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(Thyristor 简称晶闸管)。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(P-N 结)、晶体管(N-P-N 或 P-N-P 结构)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 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、电子技术与控制技术三者结合的交叉学科。

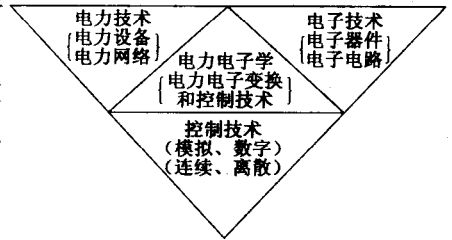


图 1.1 表征电力电子技术的倒三角形

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 48V 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需由三相交流变频、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三分之一以上。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 50Hz 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 1820 万千瓦),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 50Hz 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 20kHz 的变压器,其重量、体积比普通 50Hz 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 50Hz 或 60Hz 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 50Hz 或 60Hz 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,这将能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。

1.3 开关型电力电子变换的基本原理及控制方法

1. 电力变换的类型

用电设备将电能转变为光能、热能、化学能或机械能。光、热、化学反应和机械转速、转矩的调节和控制,都可以通过改变用电设备电源电压、电流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,电力变换可划分为四类基本变换,相应的有四种电力变换电路或电力变换器。

(1) 交流(AC)/直流(DC)整流电路或整流器:将频率为 f_1 、电压为 v_1 的交流电能变换为频率 $f_2=0$ 、电压为 v_2 的直流电能。

(2) 直流(DC)/交流(AC)逆变电路或逆变器:将频率 $f_1=0$ 、电压为 v_1 的直流电能变换为频率 $f_2 \neq 0$ 、电压为 v_2 的交流电能。

(3) 直流(DC)/直流(DC)电压变换电路:将频率 $f_1=0$ 、直流电压为 v_1 的直流电能变换为频率 $f_2=0$ 、直流电压为 v_2 的直流电能。又称为直流斩波电路、直流斩波器。

(4) 交流(AC)/交流(AC)电压和/或频率变换电路:将频率 f_1 的交流电压 v_1 变换为频率 f_2 的交流电压 v_2 。如果频率不变($f_1=f_2$),仅改变电压,则称为交流电压变换器或交流斩波器。如果频率、电压均改变,则称为直接变频器。

以上四类电力变换示于图 1.2。这四类电力变换将在第 3、4、5、6 章详细论述,本节仅简单介绍电力变换的基本原理。

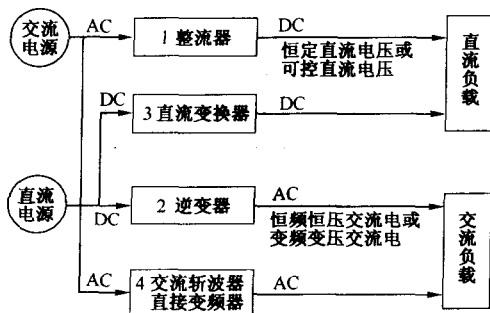


图 1.2 电力变换类型

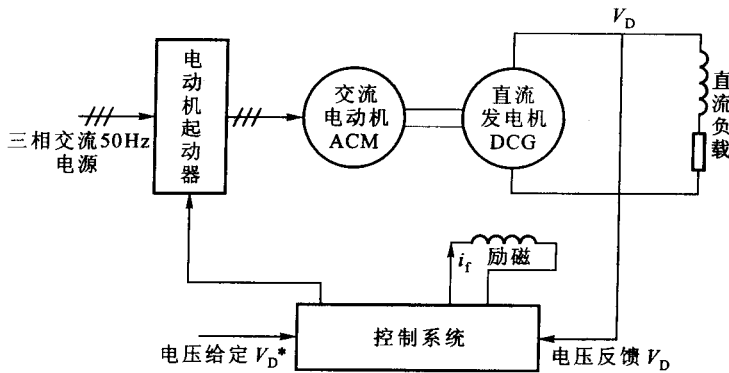
利用以上四类基本变换可以组合成许多复合型电力变换器。例如将(1)和(2)两类变换器先

后串联(AC/DC-DC/AC),可复合成有中间直流环节的交流-交流间接变频器(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-直流间接变压器(DC-AC-DC)。

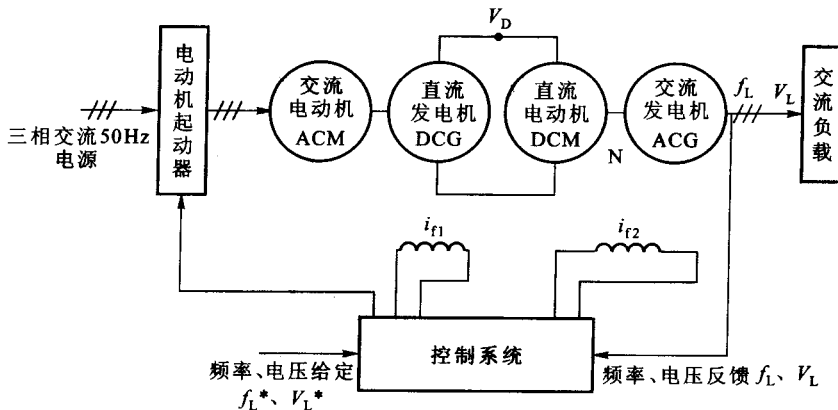
2. 变流机组实现电力变换

20世纪60年代以前,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50Hz电源,经起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监测直流输出电压 V_D ,并与电压给定值 V_D^* 相比较后控制直流发电机的励磁绕组电流 i_f ,使直流发电机即使在交流电动机转速波动时和直流负载大小变化时也能使其输出电压 V_D 保持为负载要求的给定值 V_D^* 。



(a) 交流电动机、直流发电机组实现交流-直流变换



(b) 直流发电机组和交流发电机组实现交流-交流电压、频率变换

图 1.3 利用变流机组实现电力变换

图1.3(b)所示是将公用电网50Hz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50Hz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 f_L ,反馈控制直流发电机的励磁电流 i_{f1} ,可以改变直流发电机的输出电压(也是直流电动

机的输入电压),从而改变直流电动机的转速 N ,即可控制交流发电机的频率 f_L ;同时,检测交流发电机的输出电压 V_L ,反馈控制其励磁电流 i_L ,可控制交流发电机的输出电压 V_L 为给定值 V_L^* 。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(ACM) - 直流发电机(DCG)的直流发电机组,将交流电变成直流电;第二个是直流电动机(DCM) - 交流发电机(ACG)的交流发电机组,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,如电动机 - 发电机组耗费的钢、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,但是由于没有快速通、断电路的大功率开关器件,这种开关型电力变换技术直到最近30多年有了半导体电力开关器件才得到实际应用。

3. 利用开关器件实现电力变换的基本原理

以往电路中设置电路开关只是为了将用电负载接通电源或者切断电源,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_s 经开关直接接至负载,负载电压 $v_o = v_s$ 。当开关 S_1 、 S_2 断开时, $v_o = 0$,负载失电,停止工作。如果不仅要求电源电压正向加至负载,使负载电压 $v_o = v_s$,而且还要求电源电压能反向加至负载,使 $v_o = -v_s$,则可采用如图 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_s 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:

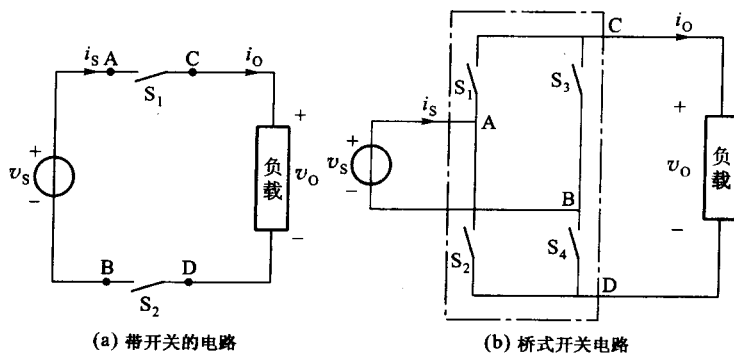


图 1.4 基本开关电路

(1) 当 S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 阻断(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 $v_o = +v_s$,负载电流 i_o 也就是电源电流, $i_o = i_s$ 。

(2) 当 S_2 、 S_3 导通, S_1 、 S_4 阻断(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 与负载负、正端交叉连接,这时开关电路输出至负载的电压 $v_o = -v_s$,输出电流 $i_o = -i_s$ 。

(3) 当 S_1 、 S_2 导通(S_3 、 S_4 阻断)时或 S_3 、 S_4 导通(S_1 、 S_2 阻断)时,开关电路输出至负载的电压 $v_o = 0$,这时负载与电源脱离,如果负载电流是感性电流则可经 S_1 、 S_2 或经 S_3 、 S_4 继续流动。

假定 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 均为全控型(其导通和阻断都是可控的)、可双向导电的理想开关,它们具

有以下理想特性:

- ① 导通时开关两端的等效电阻为零,电压降为零,开关导通时功耗为零。
- ② 阻断时开关两端的等效电阻为无限大,漏电流为零,开关阻断时功耗为零。
- ③ 从导通状态转变为阻断状态或从阻断状态转变为导通状态都是瞬时完成的,即过渡时间为零。

那么,在任意瞬间,开关电路的输入电压 v_s 与开关电路的输出电压 v_o 有以下函数关系:

$$v_o = Sv_s \quad (1-1)$$

式中 S 被称为开关状态变量,其值取决于开关电路中四个开关的通、断状态:

- ① S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 阻断期间: $S = 1$, $v_o = v_s$, 电源经开关电路与负载直接连接。
- ② S_2 、 S_3 导通, S_1 、 S_4 阻断期间: $S = -1$, $v_o = -v_s$, 电源经开关电路与负载交叉连接。
- ③ S_1 、 S_2 导通, S_3 、 S_4 阻断或反之 S_3 、 S_4 导通, S_1 、 S_2 阻断期间: $S = 0$, $v_o = 0$, 负载与电源脱离。

如果令 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 4 个开关按一定的时间顺序,周期性地处于导通→阻断→导通→阻断交变状态,且每次导通和阻断的持续时间都恰如其分,那么图 1.4(b)所示的开关电路就成为一个电压变换器。开关状态变换时,电源电压的瞬时值或被直接引至负载,或被反向引至负载,或者使负载脱离电源而使负载电压的瞬时值为 0。这时,在一个完整的开关电路通、断控制周期中,开关电路输出电压 v_o 的波形,不仅取决于该周期中电源电压的瞬时值,而且与整个周期中开关变量 S 的变化规律有关,控制开关变量 $S(t)$ ($S = +1, -1$ 或 0),即可通过开关电路将一定的电源输入电压 $v_s(t)$ 变为负载所需的另一种电压 $v_o(t)$ 。

图 1.4(b)所示开关电路,原理上可以实现各类电源变换。例如:

1) AC/DC 基本整流电路

在讨论电路中的开关状态之前,首先定义几个术语:当开关处于导通状态(等效电阻为零)接通电路时,称为“通态”;当开关处于阻断(或截止)状态(等效电阻为无限大)断开电路时,称为“断态”;开关器件从断态转变为通态的过程称为“开通”;从通态转变为断态的过程称为“关断”。

图 1.5(a)是一个利用电路开关 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 的通、断控制实现将交流电变为直流电的整流电路。 $S_1 \sim S_4$ 组成一个单相桥式电路,交流电源接至开关电路的输入端 A、B,开关电路的输出端 C、D 经 LC 滤波器接至负载。在交流电源 v_s 的正半波期间,令 S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 阻断(截止),则交流电源正半波经 S_1 、 S_4 从 C、D 输出正电压,经 LC 滤波后送至负载端;在交流电源 v_s 的负半波期间,令 S_3 、 S_2 导通, S_1 、 S_4 阻断(截止),则交流电源负半波经 S_3 、 S_2 从 C、D 输出正电压,经 LC 滤波后送至负载。开关电路输出电压 v_o [即图 1.5(a)中的 v_{CD}] 如图 1.5(b)所示,开关电路将正弦波交流输入电压 $v_s = V_m \sin \omega t$ 变为 $v_o = |V_m \sin \omega t|$, v_o 可用下式表达:

$$v_o(t) = v_{CD} = |V_m \sin \omega t| = \frac{2}{\pi} V_m \left\{ 1 - \frac{2}{1 \times 3} \cos 2\omega t - \frac{2}{3 \times 5} \cos 4\omega t - \frac{2}{5 \times 7} \cos 6\omega t - \dots \right\} \quad (1-2)$$

v_o 中除负载所需的直流电压平均值 $V_{D0} = \frac{2}{\pi} V_m$ 外,还含有不希望出现在负载上的 2、4、6 等次谐波电压,为此图 1.5(a)设置了 LC 滤波器,经 LC 滤波器滤去高次谐波后,在负载端可以得到直流电压平均值 V_{D0} , (1-2)式中 v_o 的直流电压平均值 V_{D0} 亦可用下式求得:

$$V_{D0} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2}{\pi} V_m \quad (1-3)$$