



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 电力电子技术

(第二版)

张兴 黄海宏 主编

新形态  
教材



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 电力电子技术

(第二版)

张 兴 黄海宏 主编

马铭遥 李 飞 参编

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是作者根据多年从事电力电子技术教学与科研工作的经验,并在学习、研究国内外教材及相关参考文献基础上,对第一版教材进行修订改编而成的。

本书在内容体系的安排上,针对本科生教学的特点,探索采用启发研究型阐述方式,力图避免新技术、新理论的简单罗列。书中在保留一定的晶闸管相控变流内容的同时,较为突出地反映了以全控器件为主的 PWM 理论体系,较为系统地阐述了电力电子器件、DC-DC 变换器、DC-AC 变换器(无源逆变电路)、AC-DC 变换器(整流和有源逆变电路)、AC-AC 变换器以及软开关变换器等基本内容,为电力电子技术的应用与研究提供了理论和技术基础。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化等相关专业的本科生教材,也可供从事电力电子技术和相关研究的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 张兴, 黄海宏主编. —2 版. —北京: 科学出版社, 2018.8  
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
ISBN 978-7-03-058537-0

I. ①电… II. ①张… ②黄… III. ①电力电子技术-高等学校-教材  
IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 187067 号

责任编辑: 余 江 张丽花 / 责任校对: 郭瑞芝  
责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三 河 市 骏 杰 印 刷 有 限 公 司 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 7 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16  
2018 年 8 月 第 二 版 印张: 15 3/4  
2018 年 9 月 第 13 次印刷 字数: 383 000

定 价: 49.80 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 前 言

电力电子技术是在电子、电力与控制技术基础上发展起来的一门新兴交叉学科,被国际电工委员会(IEC)命名为电力电子学(Power Electronics),或称为电力电子技术。自 20 世纪 80 年代以来,电力电子技术已逐步渗透到国民经济各领域,并取得了迅速的发展。作为电气工程及其自动化、自动化或相关本科专业的一门重要的专业基础课,“电力电子技术”课程讲述了电力电子器件、电力电子电路及变流技术的基本理论、基本概念和基本分析方法,为后续专业课程的学习和电力电子技术的研究与应用打下良好的基础。

然而,如何能编好一本适用于本科生课程的电力电子技术教材,编者一直感到是一件非常困难之事。首先,电力电子技术发展日新月异,新内容、新思想、新概念层出不穷,要系统阐述则编者水平远不能及;其次,本科生课程的主要内容应介绍电力电子技术的基础理论,同时也应反映当今电力电子技术的应用,这对于学时少的本科生课程教学来说不能不说是一件难以两全之事;再者,如何通过有限内容的阐述与教学使读者能掌握电力电子技术研究的思路、方法和规律,进而能举一反三,则更是难上加难之事。

本书在介绍电力电子技术基本理论和基本概念的同时,重视对研究对象的问题提出、方案对比、分析思路等研究能力的训练和培养,并在讲授电力电子基础知识的同时,尝试研究型思维的启发与训练。例如,在讨论 DC-DC 变换器时,多数教材通常是首先给出电路拓扑,然后加以分析、推演,最后阐述相关理论。而本书注重电路拓扑构思设计与变换器电路分析两个方面能力的训练:首先从 DC-DC 变换器的特定变换功能的实际需要出发,提出可能实现这一变换功能电路拓扑的构造思路,通过分析、比较、改进,最终推演出变换器的拓扑结构;其次,在介绍变换器的基本理论和分析方法基础上,详细进行变换器的特性分析。这种通过实际需要构建变换器拓扑以及对已有变换器拓扑进行特性分析的内容教学,将有助于读者针对实际问题的研究与创新思维能力的训练。

在内容体系的安排上,本书针对本科生教学的特点,力图避免新技术、新理论的简单罗列,在保留一定的晶闸管相控变流内容的同时,较为突出地反映了以全控器件为主的 PWM 理论体系,较为系统地阐述了电力电子器件、DC-DC 变换器、DC-AC 变换器(无源逆变电路)、AC-DC 变换器(整流和有源逆变电路)、AC-AC 变换器以及软开关变换器等基本内容,为电力电子技术的应用与研究提供了理论和技术基础。

本书第一版于 2010 年出版,2014 年被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,截至 2017 年底,全国有 30 余所高校选用本书作教材。在第一版教材使用过程中,有很多高校授课教师对第一版教材的内容、形式等提出了许多宝贵意见和建议,在此特别表示感谢!

为更好地体现启发研究性教学理念,第二版教材在参考多方意见和建议的基础上,从教与学两方面对第一版教材的内容、习题、图文形式及配套资源等进行了全面改版和修订,更正了相关错误,调整并删减了部分内容,一些章节进行了重新撰写,同时也尝试增加二

维码来辅助阅读。相对于第一版,第二版的主要改版和修订工作主要如下。

### 1) 各章内容修订

绪论:补充电力电子发展阶段的重要事件;增加电力电子技术在新能源汽车中的应用;删除电力电子技术在环保系统中的应用。

电力电子器件及应用:删除第一版“2.6 电力晶体管”一节内容,改在“2.8 其他电力电子器件”进行简单介绍;在“2.11.1 电力电子器件的保护”中对 RCD 缓冲电路的拓扑进行启发式推演。

DC-DC 变换器:删除第一版中电流断续时的 DC-DC 变换器基本特性分析相关内容。

DC-AC 变换器:删除第一版第 4.2.1 节“1.电压型单相方波逆变器”中的“对称单脉冲调制”;删除第一版第 4.2.1 节“2.电压型三相桥式方波逆变器”中的“ $120^\circ$  导电方式”;删除第一版第 4.2.2 节中“三个单相电压型逆变器的串联移相叠加”结构描述,增加“采用级联多电平结构的电压型阶梯波逆变器”结构描述;把第一版第 4.2.3 节中“综合优化 SPWM 控制”改称为“断续 SPWM 控制”;改写第一版“4.3 空间矢量 PWM 控制”一节内容,使三相电压型逆变器的空间矢量概念更易理解。

AC-DC 变换器:改变第一版“5.5.3 电压型桥式 PWM 整流电路”中工作原理的描述方法,第二版从能量双向流动工作原理、功率因数可控工作原理、直流侧电压控制工作原理三个方面分析 PWM 整流电路工作原理,使 PWM 整流电路工作的物理概念更为清晰。

AC-AC 变换器:对第一版第 6.2.1 节中“三相相控式交流调压电路”的部分描述进行修订;删除第一版第 6.2.2 节中的“三相斩控式交流调压电路”;简化第一版“6.4.2 矩阵式交-交变频电路”的内容。

软开关变换器:第二版对本章内容进行重新组织和撰写,强化软开关原理电路构建思路的解析。本章以实现零电压、零电流软开关为主线,并分别以 Boost 变换器(零电压软开关)和 Buck 变换器(零电流软开关)为例,详细推演各自的准谐振变换器、零开关变换器、零转换变换器的拓扑构建和演变思路,体现软开关电路的改进和研究过程。

### 2) 习题修订

第二版对第一版的习题进行了修订,主要包括:

在第一版习题基础上进行课后习题的扩充,弥补第一版习题缺少典型计算题等缺陷,同时增加设计题目,旨在培养和引导学生将理论知识主动运用到实际工程实例中的能力与思维逻辑。

对应教材中内容的删减,将课后习题也进行了适当的删减,更有利于明确知识点,有利于帮助学生消化和吸收所学知识。

第二版对课后习题进行了明确的分类,将习题分为简答题、计算题、设计题。这种习题分类更方便授课教师布置课后作业,也更利于学生按照自己的进度和要求主动进行学习与训练。尤其是设计题的设置主要针相关电力电子技术的实际应用,旨在激发和提高学生主动学习与应用理论知识的能力。

### 3) 其他修订

(1) 第二版对各章图文进行了全面修订,更正了原有错误,进一步统一和规范了图文格式,第二版相关图文采用了双色印刷,在提高图文效果美观度的同时,也使图文含义更为

清晰易懂。

(2) 在部分章节中新增二维码链接资源,加深对相关内容的学习和理解。二维码内容采用视频、图片和文献资料等形式,涉及电力电子工程技术与应用、技术背景介绍、难点解析、仿真分析、实验技术等。这部分内容会根据教学积累不断补充和完善,也恳请使用本书的教师和学生提供新资料。

本书由张兴教授、黄海宏教授主编。具体编写分工如下:张兴教授编写了全书大纲、绪论以及第3、4章;黄海宏教授编写了第2、5章,并对第一版第6章进行了改编;李飞副教授编写了第7章,并负责全书图稿的校对;马铭遥教授设计、编写了全书习题,并负责全书文字内容的审阅和校对。全书由张兴教授统稿。

在第二版的编写过程中,得到了安徽省电力电子技术省级教学团队建设项目的支持,尤其是第一版中杜少武教授编写的相关章节内容为第二版相关内容的改编打下了坚实基础;更得到了合肥工业大学电气与自动化工程学院苏建徽教授、茆美琴教授、张国荣教授、杨淑英教授的关心与指导;同时也得到了王佳宁、王金平、杜燕、刘芳、赖继东、许月霞、张毅等老师的帮助,他们提出了很多宝贵的意见和建议。第二版增设的二维码辅助教学资源,其相关内容由编者统一收集整理,除编者提供的相关材料外,还得到了合肥工业大学杨淑英教授、赛米控电子(珠海)有限公司景巍博士、英飞凌科技(中国)有限公司郝欣博士、阳光电源股份有限公司陶磊经理、汪令祥博士、孙龙林经理的大力支持。另外,在第二版的文档整理、绘图等方面得到了相关研究生的协助,他们从读者角度提出了很好的建议,参与协助的研究生主要有:王宝基、李明、赵文广、刘洋、吴凡、宋超、毛旺、郭华越、陈巧地、高帅、王明达、刘晓玺、胡玉华、郭伟生、孙雅蓉、马文婷、刘妮妮、俞佳、李彦君、潘海龙等。在此一并向他们表示衷心的感谢!

在第二版编写过程中,还得到了安徽大学、安徽理工大学、安徽工业大学、安徽工程大学、安徽建筑大学、广西科技大学、合肥学院、合肥师范学院、蚌埠学院、安徽科技学院、淮南师范学院、滁州学院、铜陵学院、安庆师范学院等兄弟院校院系领导和授课老师的大力支持,他们针对书中的不妥之处、内容安排、具体授课内容与讲解方法等诸多方面提出了许多宝贵的意见和建议。另外,本书在编写过程中还参考了同行和前辈编写的专著、教材和其他文献资料。在此也一并向他们表示衷心感谢!

编者

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术的定义	1
1.2 电力电子技术的发展	2
1.3 电力电子技术的应用	5
第 2 章 电力电子器件及应用	16
2.1 电力电子器件的特点与分类	16
2.1.1 电力电子器件的特点	16
2.1.2 电力电子器件的分类	17
2.2 电力电子器件基础	18
2.2.1 PN 结原理	18
2.2.2 电力电子器件的封装	20
2.3 功率二极管	21
2.3.1 结型功率二极管基本结构和工作原理	21
2.3.2 结型功率二极管的基本特性	22
2.3.3 快速功率二极管	23
2.3.4 肖特基势垒二极管	23
2.3.5 功率二极管的主要参数	24
2.3.6 功率二极管的应用特点	25
2.4 晶闸管	25
2.4.1 基本结构和工作原理	26
2.4.2 晶闸管特性及主要参数	27
2.4.3 晶闸管派生器件及应用	30
2.4.4 晶闸管的触发	31
2.4.5 晶闸管的应用特点	32
2.5 可关断晶闸管	33
2.5.1 基本结构和工作原理	33
2.5.2 可关断晶闸管特性	34
2.5.3 可关断晶闸管的驱动	34
2.5.4 可关断晶闸管的应用特点	35
2.6 功率场效应晶体管	35
2.6.1 基本结构和工作原理	35
2.6.2 功率 MOSFET 特性及主要参数	36
2.6.3 功率 MOSFET 的驱动	38

2.6.4	功率 MOSFET 的应用特点	39
2.7	绝缘栅双极晶体管	39
2.7.1	基本结构和工作原理	40
2.7.2	IGBT 特性及主要参数	40
2.7.3	IGBT 的驱动	42
2.7.4	IGBT 的应用特点	43
2.8	其他电力电子器件	43
2.8.1	电力晶体管	43
2.8.2	集成门极换流晶闸管	43
2.8.3	电子注入增强栅晶体管	44
2.9	电力电子集成技术	44
2.10	采用新型半导体材料的电力电子器件	45
2.11	电力电子器件应用共性问题	45
2.11.1	电力电子器件的保护	45
2.11.2	电力电子器件的散热	48
2.11.3	电感和电容	50
	本章小结	52
	思考与练习	53
第 3 章	DC-DC 变换器	54
3.1	DC-DC 变换器的基本结构	55
3.1.1	Buck 型 DC-DC 变换器的基本结构	55
3.1.2	Boost 型 DC-DC 变换器的基本结构	57
3.1.3	Boost-Buck 型 DC-DC 变换器的基本结构	58
3.1.4	Buck-Boost 型 DC-DC 变换器的基本结构	60
3.2	DC-DC 变换器换流及其特性分析	61
3.2.1	开关变换器中电容、电感的基本特性	62
3.2.2	Buck 变换器换流及其特性分析	62
3.2.3	Boost 变换器换流及其特性分析	66
3.2.4	Cuk 变换器换流及其特性分析	69
3.3	复合型 DC-DC 变换器	73
3.3.1	二象限 DC-DC 变换器	74
3.3.2	四象限 DC-DC 变换器	75
3.3.3	多相多重 DC-DC 变换器	75
3.4	变压器隔离型 DC-DC 变换器	77
3.4.1	隔离型 Buck 变换器——单端正激式变换器	77
3.4.2	隔离型 Buck-Boost 变换器——单端反激式变换器	79
3.4.3	隔离型 Cuk 变换器	82
3.4.4	推挽式变换器	83
3.4.5	全桥变换器	85



3.4.6 半桥变换器	88
本章小结	91
思考与练习	92
第4章 DC-AC 变换器(无源逆变器)	95
4.1 概述	95
4.1.1 逆变器的基本原理	95
4.1.2 逆变器的分类	99
4.1.3 逆变器的性能指标	99
4.2 电压型逆变器	100
4.2.1 电压型方波逆变器	100
4.2.2 电压型阶梯波逆变器	106
4.2.3 电压型正弦波逆变器	113
*4.3 空间矢量 PWM 控制	133
4.3.1 概述	133
4.3.2 三相电压型逆变器空间电压矢量分析	134
4.3.3 空间电压矢量的合成	136
4.4 电流型逆变器	139
4.4.1 电流型方波逆变器	140
4.4.2 电流型阶梯波逆变器	145
本章小结	148
思考与练习	149
第5章 AC-DC 变换器(整流和有源逆变电路)	151
5.1 概述	151
5.2 不控整流电路	152
5.2.1 单相不控整流电路	152
5.2.2 三相不控整流电路	155
5.2.3 整流滤波电路	157
5.2.4 倍压、倍流不控整流电路	159
5.3 相控整流电路	161
5.3.1 移相控制技术	161
5.3.2 三相半波相控整流电路	164
5.3.3 三相桥式相控整流电路	169
5.3.4 桥式半控整流电路	172
5.3.5 变压器漏感对整流电路的影响	174
5.4 相控有源逆变电路	176
5.4.1 相控有源逆变原理及实现条件	176
5.4.2 逆变失败与最小逆变角	178
5.5 PWM 整流电路	180
5.5.1 传统整流电路存在的问题	180

5.5.2	单相 APFC 整流电路	181
5.5.3	电压型桥式 PWM 整流电路	183
5.5.4	电流型桥式 PWM 整流电路	190
5.6	同步整流电路	191
	本章小结	192
	思考与练习	193
第 6 章	AC-AC 变换器	196
6.1	概述	196
6.2	交流调压电路	197
6.2.1	相控式交流调压电路	198
6.2.2	斩控式交流调压电路	203
6.3	交流电力控制电路	205
6.3.1	交流调功电路	205
6.3.2	交流电力电子开关	205
6.4	交-交变频电路	206
6.4.1	单相相控交-交变频电路	207
6.4.2	三相相控交-交变频电路	209
*6.4.3	矩阵式交-交变频电路	210
	本章小结	212
	思考与练习	213
第 7 章	软开关变换器	215
7.1	概述	215
7.1.1	功率电路的开关过程	216
7.1.2	软开关的特征及分类	217
7.2	准谐振变换器	218
7.2.1	零电压开关准谐振变换器	218
*7.2.2	零电流开关准谐振变换器	221
7.3	PWM 软开关变换器	223
7.3.1	零开关 PWM 变换器	223
7.3.2	零转换 PWM 变换器	229
7.3.3	移相控制软开关 PWM 全桥变换器	235
	本章小结	240
	思考与练习	240
	参考文献	242

## 1.1 电力电子技术的定义

电力电子技术是在电子、电力与控制技术基础上发展起来的一门新兴交叉学科,被国际电工委员会(IEE)命名为电力电子学(Power Electronics)或称为电力电子技术<sup>①</sup>。

1955年,美国通用电器公司(General Electric Company)发明第一个大功率 5A 硅整流二极管(Silicon Rectifier),仅在两年后的 1957 年,GE 公司又发明了全世界第一个晶闸管(Thyristor,俗称“可控硅”)。大功率硅整流二极管以及晶闸管的发明标志着现代意义上电力电子技术的诞生。

1974年,在第四届国际电力电子会议上,美国学者 W.Newell 首次提出电力电子技术的定义,并用图 1-1 所示的“倒三角”图形表示。随着电力电子技术的发展,W.Newell 的定义已得到很多学者的认同。而美国电气和电子工程师协会(IEEE)的电力电子学会则将电力电子技术定义为:电力电子技术是有效地使用电力半导体器件、应用电路和设计理论以及分析开发工具,实现对

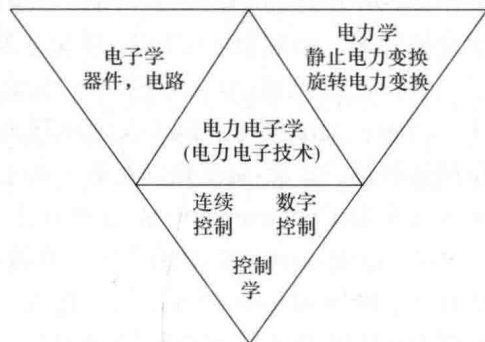


图 1-1 电力电子技术的 Newell 定义

电能的有效变换和控制的技术,包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。为了使电力电子技术定义更加具体化,美国著名学者 B.K.Bose 教授于 1980 年对 W.Newell 的定义进行了拓展,提出了电力电子技术的 Bose 定义,如图 1-2 所示。由于电力电子技术的快速发展,电力电子技术的定义也得到不断地拓展、延伸,因此,至今国际上还没有一个关于电力电子技术的公认的或权威性的定义。

实际上,就其内容而言,电力电子技术主要完成各种电能形式的变换,以电能输入输出变换的形式来分,主要包括以下四种基本变换。

(1) 交流-直流(AC-DC)变换。交流-直流的变换一般称为整流,完成交流-直流变换的电力电子装置称为整流器(Rectifier)。交流-直流的变换常应用于直流电动机调速、家用电器前级直流供电、蓄电池充电、电镀、电解以及其他直流供电电源等。

(2) 直流-交流(DC-AC)变换。直流-交流的变换一般称为逆变,完成直流-交流变换的电

<sup>①</sup> Rashid M H. Power Electronics. 2nd ed. Prentice-Hall, Inc, 1993.

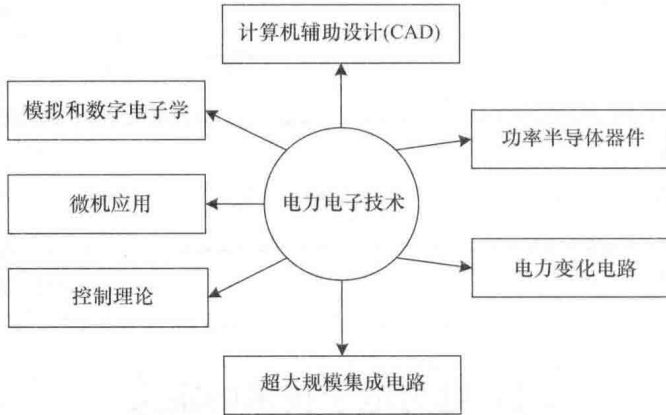


图 1-2 电力电子技术的 Bose 定义

力电子装置通常称为逆变器(Inverter)。当逆变器的交流输出与电网相连时，其直流-交流变换称为有源逆变；当逆变器的交流输出与电机等无源负载连接时，其直流-交流变换则称为无源逆变。有源逆变实际上是整流器的逆运行状态，主要用于电能的连网馈电，如交、直流调速四象限运行中的电能回馈、太阳能、风能等新能源的并网发电等；无源逆变主要用于交流调速、恒频恒压(CFCV)逆变电源、不间断供电电源(UPS)以及中频感应加热电源等。

(3) 交流-交流(AC-AC)变换。交流-交流变换主要有交流调压和交-交变频两种基本形式，其中：交流调压只调节交流电压而频率不变，常应用于调温、调光、交流电动机的调压调速等场合；交-交变频则是频率和电压均可调节，完成交-交变频的电力电子装置也称为周波变换器(Cycloconverter)，主要用于大功率交流变频调速等场合。

(4) 直流-直流(DC-DC)变换。直流-直流变换主要完成直流电压的变换与调节，主要包括升压、降压和升-降压变换等。直流-直流变换器包括隔离和非隔离两种类型，通常采用脉宽调制(PWM)技术实现直流-直流变换。直流-直流变换常应用于开关电源、电动汽车直流电源、电池充放电控制、升降压直流电压控制等。

## 1.2 电力电子技术的发展

随着电力电子技术的迅速发展，电力电子技术也逐步发展成为一门独立的技术、学科领域。电力电子技术的应用已渗透到经济、国防、科技和社会生活的各个方面，并已成为电气工程技术领域最为活跃、最为关键的核心技术之一。相应的电力电子技术产业也是当今世界发展最快、潜力巨大的产业之一，电力电子技术产业发展的成功与否，对一个国家的国民经济整体水平有着重要的影响。电力电子技术将成为 21 世纪国民经济装备技术领域的关键支撑技术。

电力电子技术具有发展迅速、学科交叉、渗透力强等特点。大容量化、高效化、小型化、模块化、智能化和低成本化等则是电力电子技术发展的趋势。可以预见，随着未来高效能、低成本的新型电力电子器件与控制技术的发展，电力电子技术还将产生新的飞跃，并将与计算机信息、运动控制等关键技术一起共同支撑新一代工程技术装备的科技腾飞。

电力电子技术起始于 20 世纪 50 年代末 60 年代初的硅整流器件，其发展先后经历了以

低频技术为传统的电力电子技术时期,以及以高频技术为主的现代电力电子技术时期。低频技术时期的研究与应用主要针对基于整流二极管、晶闸管的变流器(如相控整流器与逆变器),而高频技术时期的研究与应用则主要针对基于可关断器件(如 MOSFET、IGBT、GTO、IGCT 等)的开关变换器(如 PWM 整流器、变频器、直流电源以及其他功率变换器和电源等)。

在 20 世纪 80 年代末 90 年代初发展起来的以功率 MOSFET 和 IGBT 为代表的集高频、高压和大电流于一身的功率半导体复合器件,表明电力电子技术已经进入现代电力电子时代。进入 90 年代以后,电力电子技术进入了一个崭新的快速发展时期。理论分析和实验表明:电力电子产品的体积、重量与供电频率的平方根成反比,因此高频化是今后电力电子技术创新与发展的主导方向;另外为提高电力电子产品的研发速度、生产效率、故障冗余及维护性能,标准模块化、集成化的理念得以提出并加以贯彻;而为进一步提高电力电子产品的系统性能,电力电子智能化技术也得到了发展。因此,电力电子技术已进入高频化、标准化、模块化、集成化和智能化的发展时期。

近年来,随着能源危机的出现,电力电子技术在新能源发电、变频调速与节能等方面得到了快速发展,世界各国对电力电子技术也更加重视。一方面,具有自关断能力的大功率高频新器件及其应用技术取得了显著而快速的发展;另一方面,同微电子技术紧密结合的新一代智能化功率集成电力电子技术初露锋芒。

展望未来,随着具有高可靠性的集成电力电子模块(Integrated Power Electronic Modules, IPEM)技术以及具有导通损耗小、耐压高、高结温等特点的硅等新一代宽禁带器件的应用,电力电子技术将会发生新一轮革命性的变化,从而带动国民经济及其装备技术水平的飞速发展。

电力电子学发展过程中的重要事件如下:

- 1803 年 整流器的发明。
- 1876 年 硒整流器的发明。
- 1896 年 单相桥式整流电路的发明。
- 1897 年 三相桥式整流电路的发明。
- 1902 年 水银整流器的发明。
- 1903 年 相控整流原理的提出。
- 1911 年 金属封装水银整流器的发明。
- 1922 年 周波变换器原理的提出。
- 1923 年 电子晶闸管的发明。
- 1924 年 斩波器原理的提出。
- 1925 年 逆变器换流原理的提出。
- 1926 年 热阴极电子晶闸管的发明。
- 1931 年 铁路牵引用周波变换器的发明。
- 1933 年 引燃管的发明。
- 1935 年 高压直流输电系统的提出。
- 1939 年 电机驱动概念的引入。

- 1942年 20MW 25/60Hz 功率变换器的发明。
- 1953年 100A 锗功率二极管的发明。
- 1954年 硅功率二极管的发明。
- 1957年 半导体晶闸管的发明。
- 1958年 半导体晶闸管的商业化。
- 1961年 小功率可关断晶闸管(GTO)的发明。
- 1964年 三端双向可控开关元件用于直流电机驱动理论的提出。
- 1965年 光激硅可控整流器的发明。
- 1967年 用于高压直流输电系统的晶闸管的发明。
- 1970年 500V/20A 硅双极型晶体管(BJT)的发明。
- 1971年 磁场定向原理的提出(矢量控制)。
- 1973年 用周波变换器实现的无齿轮传动球磨机的发明。
- 1975年 300V/400A 巨型晶体管(GTR)的发明。
- 1978年 100V/25A 功率场效应管(MOSFET)的发明。
- 1979年 采用微处理器实现矢量控制的晶体管逆变器(LEONHARD)的发明。
- 1980年 矩阵变换器的发明;  
4kV/1.5kA 光触发晶闸管的发明;  
开关磁阻电机的发明。
- 1981年 2500V/1000A GTO 的发明;  
周波变换器实现的球磨机驱动的成功。
- 1982年 CUK 变换器的发明。
- 1983年 IGBT 变换器的发明;  
谐振链 DC-DC 变换器的发明。
- 1986年 柔性输电概念的提出。
- 1987年 双向 PWM RECTIFIER-INVERTER 系统的实现。
- 1987年 场控晶闸管(MCT)的发明;  
电力系统有功功率控制器(APLC)的发明;  
直接转矩控制理论的提出。
- 1989年 85MW 变速泵储能系统的完成;  
准谐振变换器的发明。
- 1990年 SMART 功率驱动的实现。
- 1991年 80Mvar(1var=1W)静止无功功率补偿器(SVC)的发明。
- 1992年 6kV/2.5kA, 300MW 直流输电的成功。
- 1993年 模糊逻辑神经网络在电力电子学及电力传动上的应用。
- 1994年 1MV·A IGBT 不停电电源(UPS)的发明;  
38MV·A GTO 牵引逆变器的发明;  
400MW 变速泵储能系统的完成。
- 1995年 3 电平 GTO/IGBT 逆变器在球磨机传动中的应用(15/1.5MV·A);

- 100Mvar 静止无功补偿装置(TVA)的发明。
- 1997年 IGCT 概念的提出和商业化。
- 1998年 5MW 3 电平直接转矩控制变换器的实现;  
1MW 50kHz 电流型感应加热逆变器的运行。
- 1998年 300MW GTO 高压输电变换系统的完成;  
6.5kV 双向晶闸管(BCT)的发明。
- 1999年 6.5kV/600A IGBT 模块在 3000V 直流系统中成功替代 GTO;  
双向 MOS 开关(MBS)的发明。
- 2000年 反向阻断性 IGBT 的发明;  
用 3 电平 IGCT 逆变器实现的 45MV · A 动态电压补偿器(DVR)的完成;  
矩阵变换器模块的发明。
- 2001年 英飞凌公司推出首个商业化的碳化硅肖特基二极管。
- 2003年 碳化硅 GCT(SICGT)高压模块的成功研制。
- 2006年 中国株洲中车电气成功研制出世界上第一只 6 英寸 8500V 商用 HVDC 晶闸管。
- 2009年 中国成功投运世界首个 $\pm 800$ kV 高压直流输电工程——云南至广东直流工程。
- 2013年 ABB 推出 6.5kV 等级的 IGCT(集成门极换流晶闸管)。
- 2013年 中国许继集团研制出世界首个额定电流 6250A 的特高压直流输电换流阀组件。
- 2016年 美国 Cree 半导体器件商推出 1700V 电压等级的碳化硅肖特基二极管。
- 2017年 ABB 宣布轻型高压直流领域的最新进展,传输能力达到 3000MW。
- 2017年 中国研制出世界首套 $\pm 1100$ kV/5500A 换流阀样机。
- 2018年 ABB 推出了全球首台集成了数字化解决方案的电力变压器——ABB Ability™ 数字化电力变压器。

## 1.3 电力电子技术的应用

### 1. 电力电子技术在电源中的应用

现代电力电子技术在高质量、高效、高可靠性的电源中起着关键作用,电力电子技术使电源技术更加成熟、经济、实用。高速发展的计算机技术在带领人类进入信息社会的同时也促进了电源技术的迅速发展。20 世纪 80 年代,计算机采用了开关电源,率先完成了电源的换代,接着开关电源技术相继进入通信设备、机房供电、家电、电器供电以及其他商用电子设备领域。

(1) 通信电源。通信业的迅速发展极大地推动了通信电源的发展。高频小型化的开关电源已成为现代通信供电系统的主流。在通信领域中,通常将实现 AC-DC 变换的整流器称为一次电源,它的作用是将单相或三相交流电源变换成标称值一定的(如 48V)直流电源。目前在程控交换机用的一次电源中,传统的相控式稳压电源已被高频开关型整流器取代。由于通信设备中所用电源电压各不相同,因此需要在一次电源基础上,通过 DC-DC 变换器构成二次电源,以变换成所需的各种直流电压。目前通信电源中二次电源的 DC-DC 变换器已实

现高频化、模块化、小型化,随着软开关技术的应用,二次电源模块的功率密度有较大幅度的提高。

(2) 不间断电源。不间断电源是一种广泛应用于计算机、通信系统以及要求不间断供电场合的一种高可靠、高性能的恒压恒频(CVCF)电源。不间断电源主要由整流器、逆变器、蓄电池及控制单元组成,其中:整流器将交流电变成直流电,而直流输出中一部分能量给蓄电池组充电,另一部分能量经逆变器变成交流,并经转换开关送到负载。为了在逆变器发生故障时仍能向负载提供能量,增加可用旁路电源系统使得负载供电可靠性进一步提高。由于现代不间断电源普遍采用了脉宽调制技术和功率 MOSFET、IGBT 等现代电力电子器件,电源的噪声得以降低,而效率和可靠性得以提高。

(3) 变频器电源。变频器电源主要用于交流电机的变频调速,是一种高性能的变频变压(VVVF)电源。变频器电源广泛应用于大型风机、水泵的节能运行以及工业装备、电力交通、家电等交流调速等方面。变频器电源在电气传动系统中占据的地位日益重要,已带来巨大的节能效应。变频器电源主电路一般采用交流-直流-交流方案,即首先由 AC-DC 变换器(如二极管整流器)将工频电源整流转换成固定的直流电压,然后由 DC-AC 变换器将直流电压逆变成电压、频率可变的交流输出,进而驱动交流电动机实现无级调速。

总之,电源技术与电力电子技术密不可分,电力电子技术的发展将促进电源产品高频化、模块化和数字化的实现。同时,电源技术也因电源性能要求的不断提高而不断向前发展,新技术的出现又会促使电源产品更新换代,并开拓更多更新的应用领域。

## 2. 电力电子技术在电力系统中的应用

电力是关系到国计民生的重要能源,在国民经济中发挥着巨大的作用。如今,全球性的能源短缺问题迫在眉睫,而电力系统的规模和容量却在不断变大,同时各行各业对电力供应的可靠性及稳定性的要求越来越高,因此输送大功率、高效、清洁、稳定的电能成为今后输电系统中的关键问题。电力系统这些关键问题的解决离不开电力电子技术,随着大功率电力电子器件技术的不断发展,电力电子技术也将在电力系统的应用领域得到前所未有的扩展。

(1) 发电机的静止励磁控制。发电机的静止励磁就是采用先进的电力电子励磁系统取代原有的旋转励磁机组,例如目前大型发电机的励磁采用了晶闸管整流自并励方式,这种基于晶闸管整流的发电机静止励磁系统有效地克服了传统励磁机的不足,提高了大型发电机的励磁控制响应性能。另外,在水力发电上,由于水力发电的有效功率取决于水头压力和流量,为了获得最大有效功率,当水头的变化幅度较大时(尤其是抽水蓄能机组),可使机组变速运行,并通过调整转子励磁电流的频率,使其与转子转速叠加后保持定子频率即输出频率恒定,这与变速恒频风力发电的励磁控制类似。

(2) 高压直流输电(HVDC)技术。由于直流输电技术具有输送容量大、受控能力强、稳定性好以及与不同频率电网之间易联络等众多优势,现已成为交流输电技术的有力补充,并在全球范围内得到越来越广泛的推广。高压直流输电系统中的关键设备是换流器,通过换流器实现电能的交-直-直-交变换与传输。1970年,世界上第一个晶闸管换流器的运行标志着电力电子技术正式应用于直流输电。直到20世纪末,这一时期直流输电技术主要是基于晶闸管电网换流的交-直-直-交变换技术。目前,强迫换流技术占高压直流输电的主导地



位,其结构如图 1-3(a)所示。而在中低电压直流输电领域里,基于 PWM 电压源换流器(VSC)的轻型直流输电系统开始高速发展,并开始应用于数十至数百公里的小型直流输电系统中(如海上风电场输电等),其结构如图 1-3(b)所示。

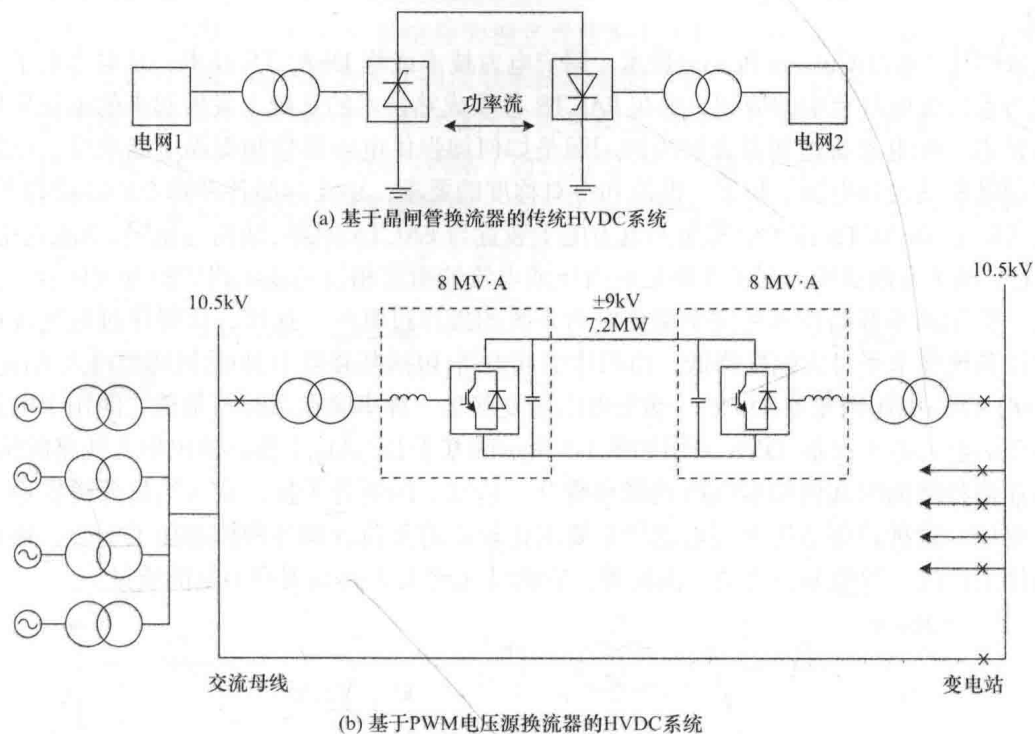


图 1-3 高压直流输电(HVDC)系统

(3) 柔性交流输电(FACTS)技术。FACTS 技术的概念问世于 20 世纪 80 年代后期,是一项基于电力电子技术与现代控制技术的对交流输电系统的阻抗、电压及相位实施灵活快速调节的输电技术,可实现对交流输电功率潮流的灵活控制,因此能大幅度提高电力系统的稳定水平。根据电力电子变换器的换相类型、与被控交流输电电网的连接方式及作用,FACTS 控制器可分成多种类型,其中静止同步补偿器(STATCOM)、静止同步串联补偿器(SSSC)以及统一潮流控制器(UPFC)是 FACTS 控制器中最关键的电力电子设备。图 1-4 为统

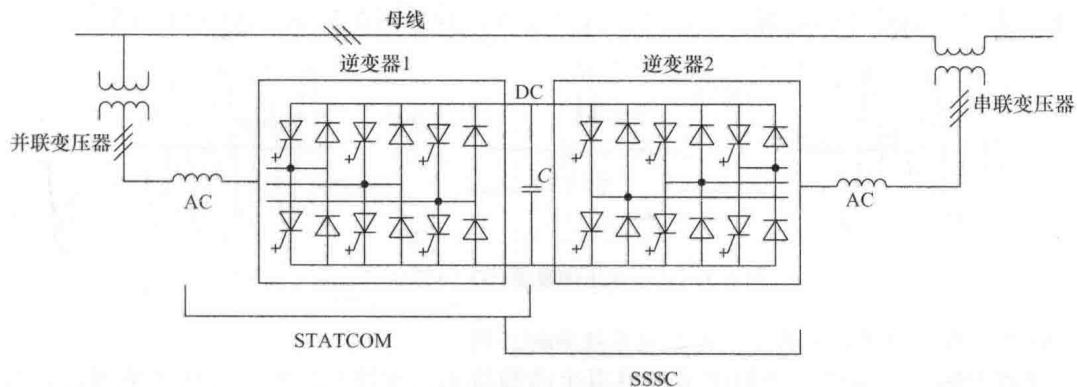


图 1-4 统一潮流控制器(UPFC)