

“十三五”普通高等教育规划教材

电力电子电源 技术及应用

杨贵恒 张颖超 曹均灿 张瑞伟 文武松 等编著



含电子教案



<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材
部级精品课程配套教材

电力电子电源技术及应用

杨贵恒 张颖超 曹均灿 张瑞伟 文武松 等编著



机械工业出版社

本书以通信电源系统中的电力电子电源设备为核心,并兼顾相关原理的讲述。内容包括常用电力电子器件、常用功率变换电路、功率因数校正技术、软开关技术、开关电源系统原理、开关电源实例剖析、UPS 系统原理以及 UPS 实例剖析。重点讲述通信电源系统中的两种典型设备——开关电源和 UPS 的基本组成、工作原理、操作使用和维护管理。

本书内容丰富、语言通俗,具有较强的实用性与可操作性,可供从事电力电子电源设计、生产、调试、使用与维护的工程技术人员阅读,也可供高等院校电气工程、电力工程及其自动化、电力电子与电力传动、发供电技术和通信电源等相关专业的师生学习参考。

为了教师和工程技术人员电子教学和培训的需要,本书免费提供电子课件。欢迎使用该教材的教师登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核后下载,或联系编辑索取(QQ: 6142415, 电话: 88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子电源技术及应用/杨贵恒等编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 7

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-57437-8

I. ①电… II. ①杨… 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(2017)第 154741 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李馨馨 张利萍 责任校对:张艳霞

责任印制:李 昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2017 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·28 印张·686 千字

0001-2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-57437-8

定价:69.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:(010)88379833

读者购书热线:(010)88379649

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

电力电子技术的迅猛发展,有力地推动了电力电子电源设备的更新与换代,如传统的相控整流设备已被高频开关电源代替,早期以 GTR 为功率器件的 UPS 设备已被以 IGBT 为功率器件的 UPS 设备所取代等。与此同时,各种智能化控制技术也已广泛用于电力电子电源设备及系统之中,使得设备的运行更加稳定高效、维护管理更加方便。各种新技术的应用以及各种新设备的投入运行,在提升电力电子电源设备综合性能的同时,也给从事设备使用、维护与管理的技术人员提出了新的更高的要求。

本书以通信电源系统中的电力电子电源设备为核心,并兼顾其相关原理的讲述。内容包括常用电力电子器件(电力二极管、GTR、MOSFET、IGBT)及其驱动电路、常用功率变换电路(整流电路、直流变换电路、逆变电路)、功率因数校正技术(功率因数校正方法概述、单相 PFC 校正技术、三相 PFC 校正技术、三相 PWM 整流)、软开关技术(脉冲频率调制软开关变换器、脉冲宽度调制软开关变换器、移相控制软开关变换器)、开关电源系统原理(开关电源概述、开关变换器的控制、辅助电路、并联均流、数字控制与集中监控)、开关电源实例剖析(TDY-48V/5A 高频开关电源、中兴 ZXDU68 S601/T601 高频开关电源系统)、UPS 系统原理(UPS 概述、逆变器脉冲控制策略、UPS 逆变器控制技术、辅助电路、并联冗余技术)以及 UPS 实例剖析(TDY-500V·A UPS、TDY-3kV·A UPS、CASTLE-C10KS UPS)。重点讲述通信电源系统中两种典型设备——高频开关电源和 UPS 的基本组成、工作原理、操作使用和维护管理。由于目前电力电子电源设备种类繁多,用于人员集中培训的设备类型难以统一,因而在本书中只选取了几种典型的通信用开关电源和 UPS 设备进行编写。目的是通过典型电力电子电源设备的介绍,为从事设备使用和维护管理的技术人员提供相关知识,培养实践技能。

本书由杨贵恒、张颖超、曹均灿、张瑞伟、文武松、詹天文、钱希森、李龙、刘扬、任开春、龚伟和聂金铜等共同编写,杨科目、雷绍英、李光兰、邹洪元、陈昌碧、杨贵文、徐树清、付保良、杨芳、温中珍、余江、蒋王莉、张传富、杨胜、杨蕾、杨楚渝、王涛、吴伟丽等做了大量的资料搜集与整理工作,在编写过程中,中兴通讯股份有限公司的黄富刚先生提供了相关产品的技术资料,在此表示衷心感谢!

本书内容丰富、语言通俗、图文并茂,具有较强的实用性与可操作性,可供从事电力电子电源设计、生产、调试、使用与维护的工程技术人员阅读,也可供高等院校电气工程、电力电子与电力传动、发供电技术和通信电源等相关专业的师生学习参考。

随着电力电子电源技术的快速发展,现代电源的新理论与新技术不断涌现,由于时间仓促,加之作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2017 年 6 月

目 录

前言	
绪论	1
一、电力电子电源的基本概念	1
二、电力电子电源的基本类型	2
三、电力电子电源的发展趋势	4
第一章 常用电力电子器件	7
第一节 电力二极管	8
一、工作原理	8
二、伏安特性	9
三、主要参数	9
四、主要类型	10
五、检测方法	11
第二节 电力晶体管 GTR	12
一、工作原理	12
二、基本类型	13
三、特性参数	14
第三节 功率场效应晶体管 MOSFET	18
一、工作原理	18
二、主要特性	19
三、主要参数	20
四、检测方法	22
第四节 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	23
一、工作原理	23
二、基本特性	24
三、擎住效应	26
四、主要参数	26
五、安全工作区	27
六、检测方法	28
第五节 电力电子器件的驱动电路	28
一、电力电子器件对驱动电路的要求	28
二、直接（非隔离）驱动电路	30

三、集成驱动电路	34
四、隔离驱动电路	36
习题与思考题	39
第二章 常用功率变换电路	40
第一节 整流滤波电路	40
一、单相整流电路	40
二、三相整流电路	45
三、同步整流电路	47
第二节 直流变换电路	52
一、非隔离型变换电路	52
二、单端直流变换电路	63
三、双端直流变换电路	71
第三节 逆变电路	81
一、单相逆变电路	81
二、三相逆变电路	84
三、新型逆变电路	88
习题与思考题	94
第三章 功率因数校正技术	95
第一节 功率因数校正方法概述	95
一、功率因数的定义	95
二、传统开关电源所存在的问题	96
三、功率因数校正方法简介	97
四、功率因数控制器举例	102
第二节 单相有源功率因数校正技术	106
一、升电压式 (Boost) APFC 电路	107
二、降电压式 (Buck) APFC 电路	109
三、单端反激型 (Flyback) APFC 电路	110
四、Boost 隔离型 APFC 电路	113
五、有无源钳位的 Boost 反激型 APFC 电路	113
六、并联式单级 APFC 电路	114
第三节 三相有源功率因数校正技术	114
一、三相单开关 APFC 电路	115
二、三相多开关 APFC 电路	126
三、由单相 APFC 组成的三相 APFC 电路	136
第四节 PWM 整流技术	139
一、PWM 整流器概述	139
二、PWM 整流器控制技术	147
三、PWM 整流器设计方法	156
习题与思考题	164

第四章 软开关技术	165
第一节 脉冲频率调制型软开关变换器	165
一、零电流开关准谐振变换器	165
二、零电压开关准谐振变换器	168
三、零电压开关多谐振变换器	170
四、零电压和零电流谐振变换器的比较	171
第二节 脉冲宽度调制型软开关变换器	172
一、零电压开关 PWM 变换器	172
二、零电流开关 PWM 变换器	174
三、零电压转换 PWM 变换器	175
四、零电流转换 PWM 变换器	177
第三节 移相控制软开关变换器	180
一、移相全桥零电压变换器	181
二、带辅助支路的移相全桥零电压变换器	187
三、带饱和电感移相全桥零电压零电流变换器	190
四、串联二极管阻断移相全桥零电压零电流变换器	195
习题与思考题	199
第五章 开关电源系统原理	200
第一节 概述	200
一、开关电源的基本结构	200
二、开关电源的特点	201
三、开关电源的性能指标	202
第二节 开关变换器的控制	205
一、时间比率控制的稳压原理	205
二、时间比率控制方式	206
三、时间比率控制型开关电源工作原理	207
四、常用集成 PWM 控制器举例	208
第三节 开关变换器的辅助电路	228
一、软起动电路	228
二、保护电路	231
三、辅助电源	238
第四节 开关电源的并联均流	242
一、并联均流的概念	243
二、并联均流方法	244
三、常用并联均流控制器举例	249
第五节 开关电源的数字控制与集中监控	257
一、开关电源系统的数字控制技术	257
二、开关电源系统的集中监控	259
习题与思考题	262

第六章 开关电源实例剖析	263
第一节 TDY48V/5A 开关电源	263
一、电路组成	263
二、工作原理	263
三、故障检修	267
第二节 ZXDU68 S601/T601 开关电源系统	277
一、系统概述	277
二、工作原理	279
三、操作使用	291
四、维护管理	310
习题与思考题	333
第七章 UPS 系统原理	335
第一节 UPS 概述	335
一、UPS 的定义与作用	335
二、UPS 的分类	337
三、UPS 的性能指标	343
四、UPS 的发展趋势	348
第二节 逆变器脉冲调制策略	350
一、单脉冲 PWM	350
二、多脉冲 PWM	352
三、正弦脉冲 PWM	352
四、空间电压矢量 PWM	356
第三节 UPS 逆变器控制技术	360
一、单相 UPS 逆变器控制策略	360
二、三相 UPS 逆变器控制策略	362
三、同步锁相控制策略	363
第四节 辅助电路	368
一、转换开关	368
二、保护电路	372
三、充电电路	377
第五节 UPS 并联冗余技术	389
一、UPS 并联冗余基本原理	389
二、UPS 并联冗余控制策略	392
三、UPS 并联均流控制方法	395
习题与思考题	398
第八章 UPS 实例剖析	399
第一节 TDY-500 V·A UPS	399
一、结构框图及工作原理	399
二、逆变器稳压控制电路	400

三、交流稳压控制电路	402
四、市电 - 逆变器供电切换控制电路	403
五、充电电路及辅助电源	404
六、蓄电池欠电压保护及告警电路	405
第二节 TDY - 3 kV · A 机架式 UPS	406
一、基本工作原理	406
二、功率主电路	408
三、控制单元电路	410
四、其他主要电路	413
第三节 CASTLE - C10KS UPS	418
一、系统简介	418
二、基本结构	420
三、操作使用	421
四、工作原理	427
五、维护维修	431
习题与思考题	438
参考文献	440

绪 论

所谓电源是指能发出电能或进行电能变换可供人们使用的装置。根据能量的来源不同通常将其分为三类：①把其他形式的能转换为电能，如火力、水力、风力、太阳能、核能以及自备内燃发电机组发电等，通常称这种电源为一次电源或发电设备（供电电源，俗称市电电网或备用电站）。②在电能传递过程中，在供电电源与负载之间对电能进行变换或稳定处理，通常称这种电源为二次电源、功率变换电源、电能变换设备或电力电子电源（即对已有的电源进行控制）等。③平时把能量以某种形式存储起来，使用时再将其转换为电能供给负载，目前利用最多的存储形式是化学能，与其对应的装置称为化学电源，其典型装置是各种蓄电池。本书主要讲述第二种形式的电源：电力电子电源。

一、电力电子电源的基本概念

电力电子电源是一种介于供电电源与负载之间的电能加工厂，它不能产生电能，只能起到对电能进行参数变换或稳定处理的作用。通常，在通信领域用到的电能变换设备主要有直流稳定电源和交流稳定电源两大类。人们之所以需要这种设备，主要是人们所使用的各种用电设备对供电保障都有一定要求，这些要求包括供电电源应为交流还是直流、电压额定值及其变化范围、频率额定值及其变化范围、最大功率等，其中对供电电压的要求是最常见的也是最重要的一项要求。例如，有的用电设备要求为之提供额定频率为 50 Hz、额定电压为 220 V 的交流电，而且电压的变化不超过额定值的 $\pm 10\%$ ，即电压应在 198 ~ 242 V 之间，如果超出这个范围，可能导致用电设备工作不正常；采用锂离子电池手机的配套充电电源，要求其输出为直流，电压上限为 4.2 V，且最大输出电流要控制在某额定值以下，否则就有可能导致锂离子电池损坏。对其他用电设备而言，对供电电压保持稳定不变的要求可能比手机充电电源等生活用电设备更严格。

由此可以看出，电能变换设备是一种介于发电设备与用电设备之间的电源设备。仅就用电设备的供电电压这一个参数而言，其值应该具有一定的稳定性，最好是供电的电压稳定不变。但用电设备一经确定之后，为之供电的电压也就确定了，于是为之供电的电源电压能否满足用电设备需求，就成了由供电电源本身决定的事。一般来说，当供电电源电压的稳定性不能满足负载要求时，最简单的办法就是在负载前面加装一个调压器，这个调压器送给负载的可以是直流也可以是交流，通过调压器将供给负载的电压调到符合要求为止。但人工调整不但麻烦，有时甚至是不可能的，于是电压能够自动调整和稳定的稳压电源（稳压器）便应运而生了。这种电源的功能就是自动保持输出电压的稳定，当然，这里所说的“稳定”，是说电压的变化比较小，并不是绝对不变。

要制造这种自动稳压的电能变换设备（包括实现参数变换或稳定处理的其他设备），就必须有相应的技术理论作支撑，这种技术理论就是电力电子（Power Electronics）技术。电力电子技术是以电能控制和变换为研究对象的电子技术，它是一门利用由电力电子器件构成的电能变换电路对电能进行变换和控制的学科，可以认为电力电子技术就是电能处理技术。正是由于

电力电子技术在电能变换设备中的支撑作用，人们通常将利用电力电子技术而制造出的电能变换设备称为电力电子电源设备，简称为电力电子电源或功率变换电源。

二、电力电子电源的基本类型

一般而言，人们总是以两种形式利用电能，即直流和交流，因此电能变换也就围绕着直流电和交流电的相互变换而展开。按照这种观点，电力电子电源就可以根据其在电能变换过程中的功能和作用，按输入和输出的电能形式将其分为交流电变换为直流电（AC/DC）、交流电变换为交流电（AC/AC）、直流电变换为交流电（DC/AC）和直流电变换为直流电（DC/DC）四类；而且将实现交流电变换为直流电的设备称为整流器，将实现一个等级交流电变换为另一个等级交流电的设备称为交流稳压器（稳定输出交流电压而不稳定输出交流电频率）或变频器（既可改变输出交流电压又能改变输出交流电频率），将实现直流电变换为交流电的设备称为逆变器，将实现一个等级直流电变换为另一个等级直流电的设备称为直流变换器。在以上的分类名称中，之所以将各种电能变换设备都称之为“器”，其原因有两个方面，一是器字本身表示了装置的概念，二是用器字表示了装置的相对静止，以此区别于有机械运动类的电源设备。如，内燃机、电动机和发电机等都表示其自身含有机械运动过程或环节，因此这类设备都称之为“××机”。

当然，以上对电能变换类电源进行分类的方法不是唯一的，也就是说对电能变换类电源还有其他分类方法，如，依照其输出是直流还是交流而将其分为直流电源和交流电源，依照所采用的具体技术不同，可将其分为线性、相控及开关型电源等。有时候人们还更习惯于将各种分类方式综合使用，如，通常将采用开关变换技术制造的整流器称为高频开关型整流器或高频开关电源，而将采用线性调整技术制造的整流器称为直流线性稳压（稳流）电源。以下列举了几种常见的电源设备（所使用的名称就是一种综合性名称），同时对其基本功能和技术特点进行了简要介绍。

线性直流稳压电源：一种用功率调整管与负载串联，使输出直流电压或直流电流稳定的设备，也叫作串联调整型直流稳定电源。它有直流稳压型和直流稳流型两种。它一般由电源变压器、二极管整流电路、滤波电路、调整管和控制电路等几部分组成。输入交流电经变压器隔离变压、电力二极管整流、（电容电感）平滑滤波，再经过调整管调整，向负载提供比较稳定的直流电能。当输入端交流电压或负载端电流变化引起输出不稳定时，控制电路根据输出的变化，适时改变调整管的电压降，使输出的直流电压或直流电流保持稳定。线性电源具有电路简单、纹波小、电磁兼容性好、稳压精度高等优点以及体积大、效率低等缺点，通常只宜作为小功率直流电源，尤其适合作微功率直流电源，是通信设备常用的一种小功率直流稳压电源。随着电力电子技术的不断发展，它正向着高效率 and 集成化方向发展。

晶闸管相控整流电源：一种以晶闸管及整流二极管为功率器件，将交流电变换为直流电的设备。按其输入交流电的相数不同，可分为单相和三相两种，按其电路的组成不同，又可分为全控型和半控型两类。它一般由变压器、整流电路、滤波电路和控制电路等组成。交流电经变压器变压隔离、晶闸管整流、（电容电感）平滑滤波，变换成直流电输出。当输入交流电压变化或负载电流变化引起输出不稳时，控制电路适时改变晶闸管的触发脉冲相位，使晶闸管的导通角发生变化，从而使输出量保持稳定。它与高频开关电源相比较，具有主电路结构简单、控制方便等优点以及体积大、瞬态特性差、功率因数低和有可闻噪声等缺点。20 世纪 90 年代以前，以 KGVA 整流器为代表的相控电源曾广泛应用于通信领域，是通信电源系统的重要组成部分，但此后逐渐被性能优良的高频开关电源所取代。目前，在同步发电机励磁、蓄电池充电以及电解电镀等领域仍占有一席之地。

高频开关电源：一种利用工作在高速开关状态的功率半导体器件，将交流或直流电转换成用电设备所需直流电的装置。它分为开关整流器和直流变换器两类。开关整流器通常由工频整流滤波、高频逆变、高频整流滤波、保护、控制和脉冲驱动等电路组成。输入的交流电经直接整流滤波，然后由处于硬开关或软开关条件下的逆变电路进行电气隔离和电压变换，再经高频整流滤波，得到所需的直流电。直流变换器的工作原理与开关整流器基本相同，区别在于直流变换器输入的是直流电，结构中没有工频整流滤波电路。与线性稳压电源和相控整流器相比，高频开关电源具有效率高、体积小、重量轻、稳压范围宽、可靠性好等优点以及输出纹波电压大、控制电路复杂等缺点。高频开关电源问世于 20 世纪 70 年代，是传统的线性电源和相控电源的换代产品，目前广泛应用于通信领域。随着电力电子器件和其他元器件的不断发展，出现了全谐振、准谐振、软开关等多种新的变换模式与方法，使开关电源的发展将更加趋向于小型化、数字化与模块化。

交流稳压电源：一种将电压不稳定的交流电处理成电压稳定的交流电的装置，也称交流稳压器。按其结构的不同，可分为参数调整（谐振）型、自耦电压比调整型、大功率补偿型和开关型；按其电压的相数不同，可分为单相和三相；按其有无机械触点，可分为有触点型和无触点型。参数调整型是利用电感电容串联谐振实现稳压，其特点是稳压精度高、抗干扰能力强、稳压范围宽、寿命长，但体积大、效率低、稳压精度受频率变化的影响大。自耦电压比调整型是利用改变自耦变压器电压比实现稳压，其特点是结构简单、价格低，但其动态特性差、没有抗干扰能力。大功率补偿型是通过改变串联补偿电压的大小实现稳压，其特点是输出功率大、不产生附加相位失真，但动态响应速度慢、抗干扰能力弱。开关型是利用脉宽调制技术产生串联补偿电压实现稳压，其特点是体积小、重量轻、效率高及响应速度快，但控制电路复杂且价格较高。20 世纪 70 年代以前，参数调整型是交流稳压电源的主要代表，其后自耦电压比调整型稳压电源逐步使用。自 20 世纪 90 年代开始，补偿型交流稳压电源大量使用，同时开关型交流稳压电源开始研究并逐渐应用。目前，交流稳压电源在通信系统中的应用逐渐减少，今后的发展趋势是小型化、轻量化、智能化。

交流变频电源：一种进行交流电频率变换的装置，也称为交流变频器。它的输入为某固定频率的单相或三相交流电，输出的单相或三相交流电频率可以与输入频率相同，也可以与输入频率相异。按其工作原理分可为动态型和静止型两类。动态型是一种由交流电—交流电动机—交流发电机组成的交流变频电源；其工作原理是，由交流电驱动电动机旋转，进而带动发电机发出所需频率的交流电。静止型是一种由半导体器件制作的交流变频电源；一般由输入整流电路、滤波电路、逆变电路和控制电路等组成；其工作原理是，输入的交流电经输入整流和滤波变为直流，然后经逆变电路变换为某一频率的交流电输出。它与动态型交流变频电源相比，具有体积小、效率高、安装方便、无噪声和维护费用少等优点。交流变频电源的性能指标主要有输入电压、频率、输出电压、波形、输出容量、输入功率因数和变换效率等，在供电频率和电压有严格要求的场合应用广泛。

交流不间断电源：简称 UPS（Uninterruptible Power System），是一种当输入交流电发生异常时，能继续向负载提供符合要求交流电能的设备。它按工作原理可分为动态型和静止型两类。交流不间断电源发展初期，采用的是动态型，20 世纪 60 年代以后，出现了静止型产品，并逐步取代了动态型产品。交流不间断电源主要用于为通信系统或设备提供连续、优质的交流电能供给，今后将进一步向模块化、小型化、轻量化、智能化方向发展。

综上所述，电力电子电源的种类较多，但目前在通信电源领域应用最多的还是高频开关电源和 UPS，本书将以此为重点进行讲述。

三、电力电子电源的发展趋势

如前所述,制造电力电子电源设备的技术理论基础是电力电子技术,也就是说电力电子技术的进步是推动电力电子电源设备发展的前提。有了先进的电能变换技术,就可以使电能的利用更趋合理、高效、精确和方便。从电能变换的发展历程来看,早期主要依靠旋转式的电动机和发电机来实现交流电与直流电之间的变换,现在完全可以依靠电能变换电路来实现交流与直流的变换,历经了由“动”到“静”的过程,电能变换技术主体内容也演变为现代电力电子技术。因此,关注电力电子电源设备的发展趋势,实际上在很大程度上就是关注现代电力电子技术的发展趋势。所以,以下首先简要介绍电力电子技术的发展动态,然后再介绍电力电子电源的发展趋势。

1. 电力电子器件方面

在功率器件的制造与使用方面,目前呈现的态势是:以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的全控型器件逐渐占领舞台,模块化的大功率集成电路即将粉墨登场,晶闸管和大功率晶体管逐渐淡出市场。由于功率器件是电能变换技术发展的基础,所以人们一直在追求制造好、使用好功率器件。功率器件性能的优劣,主要是通过其电压承受能力、最大通流能力、最高开关频率、控制的方便程度等方面进行衡量。早期的功率器件是晶闸管(SCR),后来才有了功率晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。晶闸管虽然具有高耐压、大电流的优点,但开关频率太低,又是一种半控型器件,注定其逐渐淡出的命运;GTR虽然是一种全控型器件,导通电压降也比较低,但驱动控制极为不便,况且在电路中还存在着二次击穿的威胁,注定好景不长;MOSFET是一种电压控制的全控型器件,开关频率可高达兆赫兹,控制和并联使用方便,但目前还存在着耐压不高及导通压降比较大的不足。针对这些不足,人们的研究重点主要在IGBT,它兼顾了功率晶体管和功率场效应晶体管的优点,实现了二者的优缺点互补,因此,自其面世以来便受到人们的青睐,已逐渐成为功率器件的主角。此外,集功率器件、驱动电路、保护电路和接口电路于一身的模块化大功率集成电路(PIC)已有产品问世,它为电力电子电源设备的集成化和模块化奠定了基础,同时也给设备的制造、维护和维修带来了方便。预计全控型功率器件的性能会更加完善,模块化大功率集成电路会大量付诸应用;基于碳化硅等新型材料的功率器件也将逐步走向商业化,并不断推动电能变换电路及其控制技术的创新与发展,那时的电能变换技术又将呈现出新的面貌。

2. 电能变换电路与工作模式方面

由于功率器件的更新换代,早期的晶闸管由门极关断晶闸管(GTO)、MOSFET和IGBT等功率器件所取代,进而出现了与时间比例控制(TRC)相适应的多种电路拓扑,出现了与多电平控制相适应的新型电路拓扑及控制思想,出现了功率因数校正、同步整流、并联均流、软开关等新技术,克服了传统设备网侧功率因数低、谐波严重、体积大、效率低和重量重等缺点,推动了电力电子电源的发展。

推动电力电子电源技术发展最重要的原因是全控型功率器件的出现和TRC技术的应用,基于这两点就可以使电路中的功率器件工作在类似于开关的状态,省去笨重的工频变压器,使设备具有体积小、重量轻、效率高、动态性能好等一系列优点。具体来说,TRC控制方式的具体体现形式有三种,其一是脉冲宽度调制(PWM)方式,这是一种开关周期恒定,通过改变脉冲宽度来改变占空比的方式;其二是脉冲频率调制(PFM)方式,这是一种导通脉冲宽度恒定,通过改变开关工作频率来改变占空比的调制方式;其三是以上两种方式(PWM和PFM)的综合,是一种导通脉冲宽度和开关工作频率均不固定,彼此都能改变的方式。在上述

三种调制方式中,采用最多的还是 PWM 方式。

在 PWM 方式电路中,功率器件在开通、关断及导通三种状态下的损耗均不可忽视,也正是因为损耗的原因,功率器件的工作频率通常限制在几百千赫兹以下。为了减少这些损耗进而提高开关电路的整体效率、进一步提高工作频率、降低设备的体积和重量,人们又在软开关技术方面进行探索。软开关技术是相对于硬开关技术而言的,其根本思想是使功率器件在零电压下开通,零电流条件下关断。其常见的有以下几种基本形式:电压或电流谐振型变换技术、零电流开关式准谐振技术(ZCS-QRC)、零电压开关式准谐振技术(ZVS-QRC)和零电压式多谐振开关技术(ZVS-MRC)等。目前已有一些生产厂家的电力电子电源产品采用了软开关变换技术,其产品的电气性能及其他各项技术指标也有相应的改善与提升。

由于电能变换技术是研制开发电力电子电源设备的技术理论基础,所以可以预期今后一段时间内,将围绕着制造大功率高性能的电力电子器件、有针对性地探索新型电路拓扑、进一步提高变换效率、寻求科学合理的控制模式和方法以及减少变换污染等方面进行研究与实践,定会推动电力电子电源产品的发展。

3. 控制技术方面

当前以模拟控制方式为主,今后一段时期内模拟和数字两种方式交叉应用,未来数字控制方式必定取代模拟控制方式。电力电子电源设备之所以能够实现预定的功能,就是因为有控制电路的实时和精确控制。所以控制技术是电力电子电源设备中必不可少的关键技术之一。目前,在电能变换过程中,特别是在电能变换主电路的控制方面,主要应用的是模拟控制方法。这种控制方式虽然具有响应速度快和实现方便等优点,但存在着抗干扰能力不强和容易畸变失真的弊端。而采用基于数字电路的数字控制方式,便于计算机处理控制,可以在很大程度上避免模拟信号面临的畸变失真问题,显著提高了控制电路的抗干扰能力,便于故障自诊断和容错等技术的植入。但是,目前在电能变换的全过程中实现数字控制还有一定困难,其原因在于市场需求以及数字电路处理信号本身等多个方面。因此,控制技术在向数字化发展过程中,必然有一个时期是模拟与数字综合应用的阶段,待条件具备后才能由数字控制技术取代模拟控制技术,这个过程预计还要一段时间。

4. 电力电子电源设备方面

电力电子电源设备的发展既要受电力电子技术发展的制约,又要受到设备制造技术、市场需求、制造成本与利润等多方面因素的影响,要准确判断其今后的发展趋势并非易事。因此,以下只能基于目前设备和技术现状,结合市场对设备的大致需求,宏观判断一下今后电力电子电源设备的发展趋势。

其一是高频化和小型化。在开关变换技术的发展和推动下,尤其是软开关变换技术的日益成熟与应用,为进一步提高电力电子电源中的功率开关器件工作频率奠定了基础。而功率开关器件工作频率的进一步提高,可使相同功率的电力电子电源设备的体积和重量减小,单位体积的输出功率(功率密度)增加,改善动态响应特性。因此,提高变换电路的工作频率无疑将是电力电子电源设备今后的一种发展趋势。

其二是标准化和模块化。电力电子电源设备的标准化是指设备的产品型号、系列、电气性能和接口的标准化。其中接口的标准化包括:接口的物理结构、接线方式、连接电缆的长度、输出的路数、输入/输出电能形式、交流电的相数、电压等级、电压极性、接地规定、功率等级、频率及其他电性能指标,此外还包括应用软件、监控管理及与各种用电设备的匹配等相关内容的标准化。实现电力电子电源接口标准化的途径就是要综合不同的用户需求,有针对性地制定具体要求,并以法规的形式规范研制和生产。一般而言,实现电力电子电源设备标准化含

有使这类设备通用化的意思，因此电力电子电源设备走标准化的道路，是实现单一设备或其中单元的基本结构、功能和指标统一的一种途径，是力求减少产品品种并使其在功能和结构上通用的一种方法，是实现电源系统与单一设备之间、单一设备与其组成单元之间、电源系统与用户之间结构匹配协调的有效措施，可以使科研、生产和使用三者之间关系更协调，容易实现系统的效费比合理和指标最优。

电力电子电源的模块化是指将具有特定功能和结构的独立单元按系统集成原则组合在一起，以求最大限度地发挥设备效能，提升供电保障的可靠性，改善装（设）备维修性的一种设计方法。实现电力电子电源模块化的途径就是将电力电子电源的功能块划分出来，单独做成通用模块，使之具有标准化的结构和接口，而整个设备本身就是各个功能模块的系统集成或“积木式”叠加。目前，某些类别的电力电子电源设备已经在走模块化的发展道路，如通信用高频开关电源、交流不间断电源（UPS）等。实现电力电子电源设备模块化，不但方便了用户使用，提高了设备的维修性能，还可以使设备的扩容更加方便，尤其是便于实现系统的冗余供电模式，从而提升供电系统的可靠性。因此，电力电子电源设备走标准化和模块化的道路也是其发展方向之一。

其三是数字化和智能化。电力电子电源设备的数字化是指利用数字技术，以数字信号代替传统的模拟信号，完成指定操作和预定功能的过程。实现电力电子电源设备数字化的主要方法是“附加”和“嵌入”，前者是在已有设备中附加某些硬件，使其具有数字化功能；后者是先研制数字化新系统，而后将其嵌入设备之中。如：数字控制的开关电源，可以通过单片机对开关电源的工作实行间接控制而实现数字化，也可以通过高性能数字控制集成电路对开关电源实现直接控制而实现数字化。可以预期，电力电子电源的模拟控制与数字控制这两种不同的技术将在今后多年内长期共存，但数字化的发展趋势毋庸置疑。

电力电子电源设备或系统的智能化是指在单一的电力电子电源设备或系统中，借助传感器采集信息，网络传递信息，计算机分析、判断和处理信息，自动化执行机构执行规定的动作，其整个过程是封闭的并且是智能化的。随着计算机技术和人工智能技术的深入研究，使得电力电子电源设备或系统的智能化呈现强劲的发展势头。如：在电力电子电源设备或系统中实现故障自诊断、预先报警管理，在通信局（站）供电系统中实现网络化的集中监控与管理，对设备生产、储运、配送和维修的全过程实现智能化精确管理等。

其四是绿色化和隐身化。电力电子电源设备的绿色化是指设备的发展要向全寿命物质利用率高、浪费资源少、污染环境小及与环境相协调的方向发展。要达到这一目标，首先是要研究实现设备绿色化的技术，包括高效能量变换技术、传导及辐射干扰控制技术、有源功率因数校正技术等；其次是要利用绿色化技术和绿色化理念实施电力电子电源的设计，使设计出的产品方便拆卸、分解，零部件可以翻新、重复使用，这样既保护了环境，避免了资源的浪费，减少了垃圾数量，也增强了设备的可维修性。

隐身化一词多用于军事装备，是指采取必要的多谱隐身技术与措施，最大限度地消除装备可见光的反射、自身的红外辐射、反射雷达波、反射激光、自身的电磁特征信号和声振特征信号，达到与环境的融合、协调，提高装备的战场生存能力。如果将电力电子电源设备用于军事领域，其设备自身的隐身性能就是一个必须考虑的课题，而从欧美等军事强国的装备发展过程来看，军用电力电子电源装备的隐身化也是一个必然的趋势。

当然，电力电子电源设备的发展，往往受社会政治制度、国家战略方针、市场需求、基础工业水平等多种因素的综合制约与影响。但是，我们有理由相信，电力电子电源设备必将朝着“结构模块化、系统数字化、控制智能化、接口标准化、应用绿色化、特征隐身化”的轨道发展，以满足现代信息社会的各种需求。

第一章 常用电力电子器件

在电气设备或电力系统中，直接承担电能变换或控制任务的电路称为主电路（Power Circuit）。电力电子器件（Power Electronic Device）是指可直接用于处理电能的主电路中，实现电能变换或控制的电子器件。电力电子器件往往专指电力半导体器件，与普通半导体器件一样，目前电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。由于电力电子器件直接用于处理电能的主电路，因而同处理信息的电子器件相比，它一般具有如下的特征。

1) 电力电子器件所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，一般都远大于处理信息的电子器件。

2) 因为处理的电功率较大，所以为了减小本身的损耗，提高效率，电力电子器件一般都工作在开关状态。导通时（通态）其阻抗较小，接近于短路，管压降接近于零，而电流由外电路决定；阻断时（断态）其阻抗较大，接近于断路，电流几乎为零，而管子两端电压由外电路决定；就像普通晶体管的饱和与截止状态一样。

3) 在实际应用中，电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。由于电力电子器件所处理的电功率较大，因此普通的信息电子电路信号一般不能直接控制其导通或关断，需要一定的中间电路对这些信号进行适当放大，这就是所谓的电力电子器件驱动电路。

4) 尽管电力电子器件通常工作在开关状态，但是其自身的功率损耗仍远大于信息电子器件，因而为了保证不至于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏，不仅在器件封装上比较讲究散热设计，而且在其工作时，一般都还需要安装散热器。

按照电力电子器件能够被控制电路信号所控制的程度不同，通常将电力电子器件分为以下三种类型。

1) 通过控制信号可控制其导通，而不能控制其关断的电力电子器件称为半控型器件，这类器件主要是指晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件，器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

2) 通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断的电力电子器件称为全控型器件，与半控型器件相比，由于可以由控制信号控制其关断，因此又称其为自关断器件。这类器件品种很多，目前较常用的全控型器件有电力晶体管（Giant Transistor, GTR）、电力场效应晶体管（Power Metal Oxide Semiconductor Effect Transistor, Power MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（Insulated - Gate Bipolar Transistor, IGBT）等。

3) 也有不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件，这类器件不需要驱动电路，这就是电力二极管（Power Diode），电力二极管又称为不可控功率器件。这种器件只有两个端子，其基本特性与信息电子电路中的普通二极管一样，器件的导通和关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

电力电子器件是电力电子电路的基础，掌握好常用电力电子器件的工作原理和正确使用方法是学好开关电源技术的前提。本章将重点介绍电力电子电源中要经常用到的电力电子器

件——电力二极管、电力晶体管、电力场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管的工作原理、基本特性、主要参数以及选择与使用过程中应注意的问题。

第一节 电力二极管

电力二极管 (Power Diode) 自 20 世纪 50 年代初期就获得了应用, 当时也被称为半导体整流器 (Semiconductor Rectifier, SR), 并开始逐步取代以前的汞弧整流器。虽然是不可控器件, 但其结构和原理简单, 工作可靠, 所以, 直到现在电力二极管仍然大量应用于许多电气设备中, 特别是快恢复二极管和肖特基二极管, 仍分别在中、高频整流和逆变以及低压高频整流的场合具有不可替代的地位。

一、工作原理

电力二极管的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管是一样的, 都是以半导体 PN 结为基础的。电力二极管实际上是由一个面积较大的 PN 结和两根引线封装组成的。图 1-1a、b 和 c 所示分别为电力二极管的外形、结构和电气图形符号。二极管有两个极, 分别称为阳极 (或正极) A 和阴极 (或负极) K。

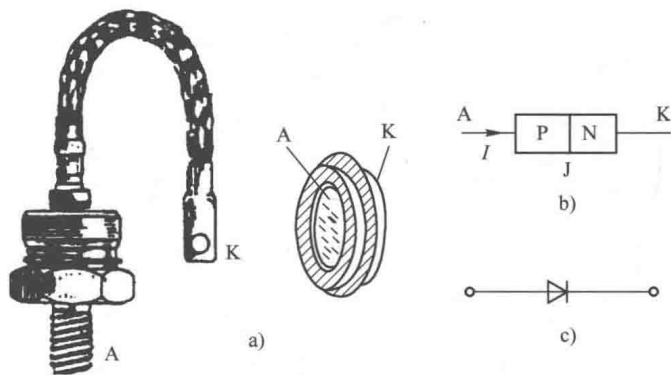


图 1-1 电力二极管的外形、结构和电气图形符号
a) 外形 b) 结构 c) 电气图形符号

在电力电子器件中, 半导体材料用得最多的是硅和锗。纯净的硅和锗被称为本征半导体, 其导电性能很不好。如果给本征半导体掺入 3 价的杂质 (如硼或铟), 就会在半导体中产生大量的带正电荷的空穴, 其导电能力则会大大增强, 这种半导体称为 P 型半导体。如果给本征半导体掺入 5 价的杂质 (如磷或砷), 就会在半导体中产生大量的带负电荷的电子, 其导电能力也会大大增强, 这种半导体称为 N 型半导体。在 P 型半导体中, 有大量的带正电的空穴, 称为多数载流子, 带负电的自由电子称为少数载流子。在 N 型半导体中有大量的带负电的自由电子, 称为多数载流子, 带正电的空穴称为少数载流子。

将一块 N 型半导体和一块 P 型半导体接触, 就会在接触面上产生一个带电区域, 如图 1-2a 所示, 它是由空穴和电子扩散而形成的。P 型半导体区域 (简称 P 区) 的多数载流子 (空穴) 会扩散到 N 型半导体区域 (简称 N 区), N 区的多数载流子 (电子) 会扩散到 P 区 (扩散运动是由浓度高的地方向浓度低的地方运动)。这样, 在 P 型半导体和 N 型半导体接触面上形成了一个带电区域, 称其为 PN 结或阻挡层。PN 结内的电场是由 N 区指向 P 区, 扩散运动并不能无休止地进行, PN 结形成的电场 (也叫内电场) 对扩散运动形成了阻力, 所以扩散到一定的程度, 就会达到电场力的平衡, 扩散运动就会停止。