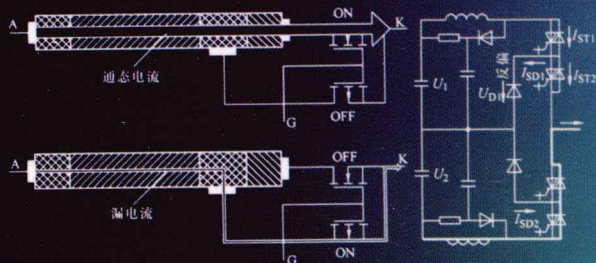


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎袁立强 赵争鸣 宋高升 王正元 编著

电力半导体 器件原理与应用

DIANLI BANDAOTI
QIJIAN YUANLI YU YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子新技术系列图书

电力半导体器件 原理与应用

袁立强 赵争鸣 宋高升 王正元 编著

机械工业出版社

本书力求从电力半导体器件应用的角度来诠释和分析其基本原理和应用特性。全书共分为8章,第1章主要阐述电力半导体器件的基本功能和用途;第2章介绍半导体器件物理基础,包括半导体与导体、绝缘体,原子中的电子能级,晶体中的能带等;第3章阐述双极型电力半导体器件基本原理,包括单PN结器件及多PN结特性;第4章介绍单极型及混合型器件电力半导体器件基本原理,涉及结型场效应器件、静电感应器件、功率MOSFET器件、混合型器件IGBT和混合型器件IGCT等;第5章叙述电力半导体器件的特性和参数,包括双稳态和双瞬态的基本工作状态,通态特性、阻态特性、开通过程、关断过程、触发特性以及系统安全工作区等;第6章重点分析了电力半导体器件应用特性,包括电力半导体器件的串、并联使用、电力半导体器件可靠性和失效分析以及电力半导体器件的保护等;第7章进一步分析了变换器中电力半导体器件应用特性,着重考虑电力半导体器件与变换器中其他因素之间的关系;第8章介绍适用于变换器仿真的电力半导体器件建模,以为变换器主回路优化设计所用。

本书可作为电机系统及其控制、电力电子与电力传动等学科研究生专业课程的参考书,也可供从事电力电子技术应用的科技人员和有关科技管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力半导体器件原理与应用/袁立强等编著. —北京:机械工业出版社, 2011. 8

(电力电子新技术系列图书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-35666-0

I. ①电… II. ①袁… III. ①电力系统-半导体器件 IV. ①TN303

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第172437号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:罗莉 责任编辑:罗莉

版式设计:霍永明 责任校对:李秋荣

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·18.5印张·356千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-35666-0

定价:49.80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

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版



电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主任:王兆安

副主任:白继彬 牛新国 徐德鸿 杨耕

委员:(按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨耕	杨旭	余岳辉	张波
张承慧	张为佐	张卫平	张兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周波	周维维	查晓明

秘书组:陈守良 刘进军 孙流芳 罗莉

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。
2. 理论联系实际，以应用技术为主。
3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

电力电子技术在国民经济领域中得到了广泛的应用，正成为国民经济发展中的关键支撑技术。而电力半导体器件则作为电力电子技术及其应用装置的基础，“一代器件决定一代电力电子技术”。

正是由于电力半导体器件的重要性，作为主要从事电力电子技术应用及装置研制的学者和工程技术人员非常注重对电力半导体器件的学习和理解，关注着电力半导体器件的发展。清华大学电机系电力电子与电机系统研究所在过去的十几年中，一直致力于电力电子技术的教学与科研工作，研究和开发了各种高低压变频器、有源滤波器、高频电源、光伏逆变器、风力发电变换器等电力电子装置并予以推广应用。长期的教学和科研实践使我们深深感到：要掌握和研制好电力电子装置，必须掌握和理解好电力半导体器件的原理与特性。正是基于这一目的，2002年，我们特别邀请了我国电力电子技术领域的前辈王正元先生在清华大学电机系开办了为期三个月的“电力半导体器件原理与应用”的研讨班，特别探讨了从应用的角度如何学习和理解电力半导体器件的原理与应用问题。2006年清华大学电机系与三菱电机机电（上海）有限公司联合成立了“清华-三菱电力电子器件应用教学实验室”，并在清华大学电机系开设了一门由三菱电机公司赞助的研究生选修课程“电力半导体器件及其应用”。开课5年来，仍一直在探讨如何从应用的角度来学习和理解电力半导体器件原理与应用。

本书也正是在这样的背景下编写而成的，力求从电力半导体器件应用的角度来诠释和分析其基本原理和应用特性。全书共分为8章，第1章主要阐述电力半导体器件的基本功能和用途；第2章介绍半导体器件物理基础，包括半导体与导体、绝缘体，原子中的电子能级，晶体中的能带等；第3章阐述双极型电力半导体器件基本原理，包括单PN结器件及多PN结特性；第4章介绍单极型及混合型电力半导体器件基本原理，涉及结型场效应器件、静电感应器件、功率MOSFET、混合型器件IGBT和混合型器件IGCT等；第5章叙述电力半导体器件的特性和参数，包括双稳态和双瞬态的基本工作状态，通态特性、阻态特性、开通过程、关断过程、触发特性以及系统安全工作区等；第6章重点分析了电力半导体器件应用特性，包括电力半导体器件的串、并联使用、电力半导体器件可靠性和失效分析以及电力半导体器件的保护等；第7章进一步分析了变换器中电力半导体器件的应用特性，着重考虑电力半导体器件与变换器中其他因素之间的关系；第8章介绍适用于变换器仿真的电力半导体器件建模，以为变换器主回路优化设

VI

计所用。

本书的编写参考了王正元先生当年研讨会讲课提纲，吸收了三菱电机和其他公司的有关电力半导体器件资料，同时参阅了大量的论著文献，并且结合了我们研究室多年来在电力半导体器件应用上的相关研究成果。袁立强具体负责编写第1~4、6~8章，赵争鸣负责编写第5章和前言，并对全书进行了统筹，宋高升负责提供并整编三菱半导体器件有关资料数据。王正元先生在本书前期做了大量的准备工作，不幸于2008年因病仙逝。本书的编写完成也是了却了王正元先生的遗愿，并以此作为对王正元先生的纪念。

本书编写过程中，还得到了作者所在的研究室许多老师和同学的支持和帮助，如孙晓璞、鲁挺、易荣、钟玉林、王雪松、胡斯登、贺凡波、雷一、邹高域、尹璐、陈凯楠、白凌云、胡仙来、姬世奇、鲁思兆、葛俊杰、田琦、于华龙、张艺明、李晶晶和陈治坪等，在此表示感谢。本书部分内容是在国家自然科学基金项目（50737002，50707015）资助下完成的，如基于器件的系统安全工作区、器件并联特性研究、杂散参数分析以及电力半导体器件建模等，在此深表感谢。

本书可作为电机系统及其控制、电力电子与电气传动等学科研究生专业课程的参考书，也可供从事电力电子技术应用的科技人员和有关科技管理人员参考。

由于作者水平有限，编写时间仓促，且电力半导体器件仍在快速发展之中，书中难免存在许多的不足，甚至是错误，恳请广大读者批评指正。

作 者

2011年5月于清华园

电力电子新技术系列图书

目 录

- 矩阵式变换器技术及其应用 孙凯、周大宁、梅杨编著（已出版）
- 逆变焊机原理与设计 张光先等编著（已出版）
- 高压直流输电原理与运行 韩民晓、文俊编著（已出版）
- 宽禁带半导体电力电子器件及其应用 陈治明、李守智编著（已出版）
- 开关电源的实用仿真与测试技术 陈亚爱编著（已出版）
- 交流电动机直接转矩控制 周扬忠、胡育文编著（已出版）
- 新能源汽车与电力电子技术 康龙云编著（已出版）
- 电力电子技术在汽车中的应用 王旭东、余腾伟编著（已出版）
- 脉冲功率器件及其应用 余岳辉、梁琳、彭亚斌、邓林峰编著（已出版）
- 开关稳压电源的设计和应用 裴云庆、杨旭、王兆安编著（已出版）
- 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 张兴、曹仁贤、张崇巍编著（已出版）
- 高频开关型逆变器及其并联并网技术 孙孝峰、顾和荣、王立乔、邬伟扬编著（已出版）
- 电力半导体器件原理与应用 袁立强、赵争鸣、宋高升、王正元编著（已出版）
- 有源功率因数校正技术 徐德鸿编著
- 固态感应加热电源技术及其应用 陈辉明、金天均、李胜川编著
- 电能质量控制技术 查晓明、孙建军、宫金武编著
- 机车动车交流传动技术 郭世明编著
- 功率变换器高频磁技术及其应用 陈为编著
- 双馈风力发电交流控制技术 杨淑英、张兴、曹仁贤、张崇巍编著
- 电力电子新器件及其制造技术 王彩琳编著
- 电压源变换器在电力系统中的应用 同向前、伍文俊、任碧莹编著
- 船舶电力推进系统 汤天浩 韩朝珍主编

已出版相关工具书目录

- 光伏技术与工程手册 (西) Antonio Luque, (美) Steven Hegedus 等著
- 风电场工程技术手册 宫靖远主编
- 高压变频器应用手册 仲明振 赵相宾主编
- 低压变频器应用手册 仲明振 赵相宾主编
- 工业自动化实用技术手册 龚顺镒主编
- 电气工程师手册 (第3版) 电气工程师手册第3版编辑委员会
- 电力电子设备设计 and 应用手册 (第3版) 王兆安、张明勋主编
- 最新通用晶闸管置换手册 本书编写组编
- 电力电子设备用器件与集成电路应用指南 李宏编著
 - 第1册 电力半导体器件及其驱动集成电路
 - 第2册 控制用集成电路
 - 第3册 传感、保护用和功率集成电路
 - 第4册 其他配套元器件
- 变频器应用手册 (第3版) 吴忠智、吴加林编著
- 常用变频器功能手册 张燕宾编著
- 软起动器实用手册 余洪明、章克强编著
- 调整用变频器及配套设备选用指南 (第2版) 吴忠智、黄立培、吴加林编著
- 电力电子技术手册 (美) Muhammad H. Rashid 主编
- 开关电源手册 (原书第2版) (日) 原田耕介主编
- 电气传动自动化技术手册 (第3版) 天津电气传动设计研究所编著
- 最新工业自动化测控应用手册 杨帮文编
- 电气工程安装及调试技术手册 (新版) (上、下册) 白玉岷主编
- 电工实用技能手册 (第2版) 白公主编

以上图书由全国各地新华书店经销。也可由中国科技金书网 (www.golden-book.com) 订购, 联系电话: 010-68993821 010-88379639 010-88379641

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力半导体器件的基本功能和用途	1
1.2 电力半导体器件的基本分类和应用	3
1.2.1 按照电力半导体器件控制特性分类	3
1.2.2 按照电力半导体器件发展分类	5
1.2.3 按照电力半导体器件驱动方式分类	5
1.2.4 按照电力半导体器件中载流子性质分类	6
1.3 di/dt 和 du/dt 在电力半导体器件中的特殊意义	8
1.4 电力半导体器件的发展	11
参考文献	16

第 2 章 半导体器件的物理基

础

2.1 半导体与导体、绝缘体	17
2.2 原子中的电子能级	19
2.2.1 孤立原子中的电子能级	19
2.2.2 两个原子之间的共价键	22
2.3 晶体中的能带	24
2.3.1 晶体中的能级——能带	24
2.3.2 晶体中的禁带宽度	27
2.3.3 半导体的晶体结构	28
2.4 本征半导体与杂质半导体	32
2.4.1 电子与空穴	33
2.4.2 费米-狄拉克分布	35
2.4.3 从本征半导体到杂质半	

导体	37
2.4.4 杂质半导体的关键参数	41
2.5 半导体中的载流子运动	44
2.5.1 电离与复合	45
2.5.2 布朗运动	45
2.5.3 漂移运动	46
2.5.4 扩散运动	48
参考文献	49

第 3 章 双极型电力半导体器件

基本原理

3.1 单 PN 结器件运行原理	51
3.1.1 PN 结的基本结构	51
3.1.2 平衡条件下的 PN 结	53
3.1.3 偏置条件下的 PN 结	56
3.2 PN 结的运行特性	62
3.2.1 PN 结的击穿与穿通	62
3.2.2 PN 结的电容效应	65
3.2.3 PN 结器件的电路特性	66
3.3 PIN 器件运行原理	67
3.3.1 PIN 二极管基本结构和正偏置下的行为	67
3.3.2 PIN 二极管的恢复特性	70
3.4 三层两结器件运行原理	72
3.4.1 双极晶体管的基本结构	72
3.4.2 双极晶体管中 PN 结的相互作用	74
3.5 四层三结器件运行原理	76
3.5.1 晶闸管的基本结构	77
3.5.2 晶闸管的基本工作原理	78
3.5.3 GTO 的基本结构和基本工作原理	82
参考文献	83

第 4 章 单极型及混合型电力半

导体器件基本原理	85	5.2 通态特性及其参数	129
4.1 肖特基势垒器件	85	5.2.1 单极型器件的通态特性与 参数	129
4.1.1 肖特基势垒	85	5.2.2 双极型和混合型器件的通态 特性与参数	131
4.1.2 肖特基二极管的基本 结构	88	5.2.3 通态中的电阻及并联特 性	133
4.1.3 肖特基二极管的基本工作 原理	89	5.3 阻态特性及其参数	135
4.2 结型场效应器件和静电感应 器件	92	5.3.1 器件的阻态特性及其参 数	135
4.2.1 结型场效应晶体管的基本 结构	93	5.3.2 阴极（阳极）短路发射极 结构	137
4.2.2 结型场效应晶体管的基 本工作原理	94	5.3.3 穿通与击穿	137
4.2.3 静电感应晶体管的基本 结构和工作原理	97	5.4 开通过程及参数	140
4.2.4 静电感应晶闸管的基本 结构和工作原理	99	5.4.1 器件开通的物理过程	140
4.3 功率 MOSFET	102	5.4.2 典型器件的开通过程	142
4.3.1 MOS 结构	102	5.4.3 放大门极结构（AG）	145
4.3.2 MOSFET 的基本结构	104	5.5 关断过程及其参数	146
4.3.3 MOSFET 的基本工作 原理	105	5.5.1 器件关断的物理过程	146
4.3.4 功率 MOSFET	108	5.5.2 典型器件的关断特性	149
4.4 混合型器件 IGBT	110	5.5.3 反向恢复特性	151
4.4.1 IGBT 的基本结构	110	5.6 触发的类型和特性	152
4.4.2 IGBT 的基本开关原理	113	5.6.1 触发过程的物理现象及 参数	152
4.4.3 IGBT 结构的一些演变	115	5.6.2 典型器件的触发特性及其 参数	154
4.5 混合型器件 IGCT	118	5.7 器件特性及系统安全工作区	158
4.5.1 IGCT 的基本结构	118	5.7.1 电力半导体器件特性 对比	158
4.5.2 IGCT 的工作原理	120	5.7.2 变换器系统安全工作区	161
参考文献	122	参考文献	164
第 5 章 电力半导体器件的特性 和参数	124	第 6 章 电力半导体器件应用 特性分析	165
5.1 双稳态和双瞬态的基本工作 状态	124	6.1 电力半导体器件的串、并联 使用	165
5.1.1 特性与参数关系	124	6.1.1 电力半导体器件的并联 使用	166
5.1.2 双稳态与双瞬态	126	6.1.2 电力半导体器件的串联	
5.1.3 额定值与特征值	127		

使用	171	特性相互影响	238
6.2 电力半导体器件可靠性和失效分析	178	参考文献	242
6.2.1 电力半导体器件可靠性概述	178	第8章 适用于变换器仿真的电力半导体器件建模	244
6.2.2 电力半导体器件失效分析	180	8.1 变换器仿真中的电力半导体器件建模	244
6.2.3 IGBT 的失效分析	182	8.1.1 对变换器仿真的基本理解	244
6.2.4 IGCT 的失效分析	187	8.1.2 变换器中器件建模分类	246
6.3 电力半导体器件的保护	194	8.1.3 半导体器件的基本物理现象	247
6.3.1 电力半导体器件保护简述	194	8.1.4 半导体器件的基本仿真方法	249
6.3.2 IGBT 的保护	195	8.2 适用于变换器仿真的 IGBT 模型	250
6.3.3 IGCT 的保护	199	8.2.1 IGBT 工作机理数学描述	251
参考文献	203	8.2.2 IGBT 模型的参数提取和模型实现	254
第7章 变换器中电力半导体器件应用特性分析	205	8.2.3 实验和仿真	256
7.1 电力电子变换器的基本换流行为	205	8.2.4 IGBT 模型的应用	257
7.1.1 变换器的常用拓扑结构	206	8.3 适用于变换器仿真的 IGCT 模型	260
7.1.2 理想基本拓扑单元及换流行为	210	8.3.1 IGCT 功能型模型简述	260
7.1.3 基于电力半导体特性的变换器换流行为	214	8.3.2 IGCT 模型结构和参数求解	260
7.2 吸收电路关键参数设计及优化	219	8.3.3 IGCT 仿真与实验对比	264
7.2.1 线性吸收电路的假设和定义	219	8.3.4 IGCT 模型的应用	266
7.2.2 线性吸收电路的参数优化和分析	222	8.4 变换器中的开关器件损耗计算以及热路分析	270
7.2.3 IGBT 吸收电路	226	8.4.1 器件损耗及热阻模型	270
7.2.4 IGCT 吸收电路	229	8.4.2 基于 IGBT 的两电平变换器损耗分析范例	273
7.3 电力半导体器件特性的相互影响范例分析	232	8.4.3 基于 IGCT 的三电平变换器损耗分析范例	277
7.3.1 基于 IGCT 的三电平逆变器基本换流方式	233	8.4.4 不同封装器件热路分析对比	280
7.3.2 三电平逆变器中器件稳态特性相互影响	235	参考文献	282
7.3.3 三电平逆变器中器件暂态			

第1章 绪 论

电力半导体器件是电力电子技术及其应用装置的基础，一代器件带动一代整机。

1.1 电力半导体器件的基本功能和用途

电力半导体器件 (Power Semiconductor Devices), 也可以叫做功率半导体器件, 或者电力电子器件, 属于电力电子技术范畴。现代电力电子器件有时包括介电材料和磁性材料等构成的电容、电感元件, 但在此一般特指电力半导体器件。根据 IEEE 的一般定义, 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方法工具, 实现对电能的高效变换和控制的一门技术。其于 20 世纪 70 年代形成, 经过 40 年的发展历程, 已成为现代工业社会的支撑技术之一。从电气角度说, 已经涉及发电、输电、配电和用电的各个领域, 在大型发电机的励磁调节、再生能源发电、柔性输电系统、电机节能中, 处处可见其踪影。从社会角度说, 几乎进入社会的各个方面: 汽车、飞机、无线电与电视、农业机械化、计算机、铁路电气化牵引、航天、互联网、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造、不间断电源、通信电源、电子照明、计算机电源、打印机电源、充电器、变频空调等各种家用电器等。电力电子技术对于节能、减小环境污染、改善工作条件、节省原材料、降低成本和提高产量等方面均起着十分重要的作用。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。

有别于电力电子技术的简单描述, 本书使用电力电子技术的应用装置及电力电子变换器的概念, 来更加明确电力半导体器件的功能和用途。电力电子变换器是进行电力特征形式变换的电力电子电路和装置的总称, 整流器、逆变器或者变频器等都是其中的一种形式。一般来说, 电力电子变换器实现的是电力变换中的直接变换, 其特点为变换过程中不需要经过非电能形式的转换。

电力电子变换器有 4 种基本模式, 即直-交 (DC/AC) 逆变模式、交-交 (AC/AC) 变频模式、交-直 (AC/DC) 整流模式和直-直 (DC/DC) 变换模式。它们的基本特点是:

1) 无论哪种形式的电力电子变换器都要求产生目标波形, 即期望输出, 来达到由一种电力形式到另一种电力形式的变换, 这些电力特征可以包括电压或者

电流的波形、幅值、相位、频率、相数以及周期性等。

2) 共同的基本组成形式, 即器件、拓扑和控制, 称之为“三要素”。电力半导体器件是电力电子变换器的核心和基础, 但是仅有电力半导体器件是不能组成电力电子变换器的, 变换器还应包括拓扑、控制以及其他元素, 这些元素相互作用, 共同影响变换器的性质。

3) 相同的变换规则, 即变换器的输出和输入存在一定的约束关系。电力电子变换器是在规定的条件下输出所需要的电力特征量。

虽然电力电子变换器的形式多种多样, 但一般以电力半导体器件、不同拓扑形式的电路和不同的控制策略作为基本组成元素, 图 1-1 是一个典型的电力电子变换器示意图, 变换器的基本组成元素都在其中得到明显的体现。其中电源、吸收电路和检测电路等都是实施有效变换的外部条件和辅助元素。由此可以这样理解, 在电力电子变换器中, 电力半导体器件是基础, 变换器拓扑是条件, 变换器的控制是关键。

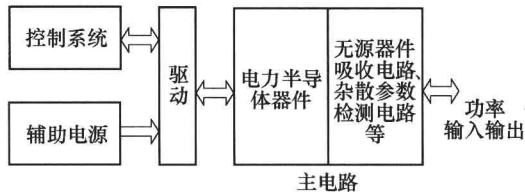


图 1-1 一个典型的电力电子变换器结构示意图

电力半导体器件是电力电子技术及其应用装置的基础, 一代器件带动一代整机, 即电力半导体器件一直是推动电力电子变换器发展的主要源泉, 一代新型器件的出现, 总是带来一场变换器的革命。因为电力半导体器件处于现代电力电子变换器的核心地位, 它对装置的可靠性、成本和性能起着十分重要的作用。40 年来, 普通晶闸管 (Thyristor, SCR)^①、门极关断晶闸管 (GTO)^② 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 先后成为电力半导体器件的发展平台, 为世人瞩目。所谓“平台”者, 满足了以下几个特点: ①有较长生命周期 (长寿性); ②有广阔应用领域 (渗透性); ③能派生出相关新器件家族 (派生性)。

至今, 电力电子变换器的应用领域越来越广泛, 电力半导体器件的水平还远不能满足人们的要求。虽然目前的电力半导体器件仍处在高速发展中, 出现了集成门极换流晶闸管 (IGCT)、电子注入增强型栅极晶体管 (IEGT)、碳化硅

① 普通晶闸管曾称为硅可控整流器 (Silicon Controlled Rectifier, SCR), 为方便起见, 人们往往用 SCR 代表普通晶闸管。

② 门极关断晶闸管也称为 GTO 晶闸管 (Gate Turn-off (GTO) Thyristor), 为方便起见, 人们往往用 GTO 代表门极关断晶闸管。

(SiC)、氮化镓 (GaN) 等器件, 但仍不能完全满足电力电子变换器的要求, 目前电力半导体器件用于变换器中的根本问题是其功率承受能力和开关频率之间的矛盾, 而目前电力半导体器件工艺水平并不能很好地解决该问题, 往往功率越大, 耐压越高, 开关频率越低。从电力半导体器件个体来说, 大功率和高频化仍是现阶段电力半导体器件发展的两个重要方向。新型电力半导体器件及其相关新型半导体材料的研究, 一直是电力电子技术领域极为活跃的主题之一, 新型的电力半导体器件的应用特性, 即其在电力变换器中与其他元素之间的相互影响, 也一直是电力变换器领域研究中的重要问题之一。

电力电子变换器的功率等级覆盖范围非常广泛, 包括在小功率范围 (几 W 到几 kW), 如笔记本电脑、洗衣机、空调等; 中功率范围 (10kW 到几 MW), 如发电或者冶金领域的电气传动; 大功率范围 (甚至可以达到几 GW), 如高压直流 (HVDC) 输电系统。在这些电力电子变换器中, 可以看到不同功率等级的电力半导体器件。相似地, 在微电子领域也存在大量的半导体器件。微电子领域的半导体器件与电力电子领域的电力半导体器件存在很多联系和区别。简单地说, 一般将额定电流超过 1A 的半导体器件归类为电力半导体器件, 而这类器件的阻断电压分布在几 V 到 10kV 以上的范围。从器件的物理本质上讲, 电力半导体器件与集成电路 (IC) 芯片非常类似, 它们都由 PN 结、双极型晶体管、MOS (金属氧化物半导体) 结构构成, 因此基本的半导体器件物理学理论可以用于这两类器件。但是从器件的制作和应用角度讲, 两类器件存在明显的差异, 电力半导体器件应用中需要考虑很多大功率电路应用的特性, 如绝缘、大电流能力等, 在实际应用中, 以开关模型为运行特征, 一般不运行在放大状态。但其所在的电力电子变换器实施的是电磁能量变换, 而不是单纯的数字逻辑, 或者简单的开/关状态, 电力半导体器件的很多非理想应用特性在电力电子变换器中的作用尤为重要, 其中有两个关键点:

- 1) 认识半导体器件内部结之间的关系是掌握电力半导体器件特性的关键;
- 2) 认识电力半导体器件的连接关系是了解变换器拓扑性质的基础。

在本书后面的很多分析中都是基于此两点。

1.2 电力半导体器件的基本分类和应用

根据器件所用半导体材料、制造工艺、工作机理及器件开通和关断的控制方式的不同, 电力半导体器件有许多不同的分类方式。

1.2.1 按照电力半导体器件控制特性分类

按照电力半导体器件控制特性来分类, 习惯上根据器件的开通、关断控制特

性的不同，可分为不控型、半控型和全控型 3 大类：

1. 不控型器件

不控型器件主要为各种不同类型的功率二极管，比如大功率二极管、快速恢复二极管和肖特基二极管等。这类器件一般为两端器件，其中一端为阳极，另一端为阴极。其开关操作仅取决于施加于器件阳、阴极间的电压，正向导通，反向阻断，流过其中的电流是单方向的。由于其开通和关断不能通过器件本身进行控制，故这类器件称为不控型器件。不控型器件主要使用其非线性特性，二极管的正向导通和反向阻断特性十分显著，因此常用来控制电流的方向，比如只用二极管来构成的 AC/DC 整流电路、二极管与其他类型器件配合构成的 DC/DC 或者 DC/AC 变换电路等。有时，也会使用二极管反向阻断过程的特殊特性，比如稳压特性，有此功能的二极管一般称为稳压管，可以用于电路中抑制电压的幅值。不控型器件（即二极管）是电力半导体器件中最基本的、用途最广的器件。

2. 半控型器件

半控型器件主要指晶闸管及其派生器件，如双向晶闸管、逆导晶闸管等。这类器件一般是三端器件，除阳极和阴极外，还增加了一个控制用门极。半控型器件也具有单向导电性，其开通不仅需在其阳、阴极间施加正向电压，而且必须在门极和阴极间输入正向可控功率，称之为“开通可控”。然而这类器件一旦开通，就不能再通过门极控制关断，只能从外部改变加在阳、阴极间的电压极性或强制阳极电流变成零，所以把它们称为半控型器件。晶闸管制造工艺相对简单，是最早生产的可控电力半导体开关器件。在其诞生后，被大量用于工业电力控制装置中。其最大特点是价格低廉、可靠性高，但由其组成的变换器的性能一般，尤其在谐波抑制性能上较弱。目前在许多大容量变换器领域，仍无可替代的其他器件，还得到广泛使用，如大功率电力系统的无功补偿、大型同步电机调速等设备中均有采用。

3. 全控型器件

全控型器件种类较多，工作机理也不尽相同，包括 BJT、GTO、功率 MOSFET、IGBT 等。这一类器件也是带有控制端的三端器件，其控制端不仅可控制其开通，而且也能控制其关断，故称为全控型器件。由于不需要外部提供关断条件，仅靠自身控制即可关断，所以这类器件常被称为自关断器件。与半控型器件相比，其性能比较完善，应用上也更灵活，但其器件制造工艺相对复杂。相对地，在实现电力电子变换器过程中，采用全控型器件的变换器拓扑和控制均比半控型器件的简单，可以方便地实现斩波调压、脉宽调制（PWM）。随着容量等级的不断增长，全控型器件正在逐渐取代晶闸管，广泛用于各种电力电子变换器中，如基于 IGBT 的电机变频调速变频器、基于大容量 IGCT 的轻型 HVDC 输电线路、光伏并网逆变器等。

1.2.2 按照电力半导体器件发展分类

电力半导体器件发展经历了几十年的历程，也可以按照电力半导体器件发展来对其进行分类，从中可以看出，器件的发展几乎就标志着电力电子技术的发展。从1957年美国通用电气公司开发出世界上第一只晶闸管至今，电力半导体器件经历了不同标志性器件的发展历程，区分如下：

1. 第一代器件

主要以功率二极管和晶闸管为代表，是电力电子技术发展早期的主要器件，是传统电力电子技术的标志。

2. 第二代器件

主要以门极关断（GTO）晶闸管、双极型晶体管 [BJT，也称为大功率晶体管（GTR）] 和功率场效应晶体管（Power MOSFET）为代表。随着电力电子技术的发展，对器件的可控性提出了更高的要求，这些器件相对于第一代器件最明显的区别是能够进行可控关断，这也是现代电力电子技术的标志。

3. 第三代器件

主要以高性能的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、集成门极换流晶闸管（IGCT）等器件为代表。其中，IGBT成为第三代电力半导体器件的典型代表。

比较电力半导体器件发展分类和器件控制方式分类，可以看出，第一代电力半导体器件主要是不控型和半控型，第二、三代器件以全控型为主。

1.2.3 按照电力半导体器件驱动方式分类

按电力半导体器件的驱动方式可以将器件分为电压控制型、电流控制型和光控型3类。

1. 电流控制型器件

电流控制型器件有SCR、BJT、GTO等，这类器件必须有足够的驱动电流才能使器件导通或者关断，本质上是通过控制（对晶闸管为门极，对BJT为基极，对MOSFET、IGBT为栅极）极电流来直接影响器件的行为，随着器件容量的增加，一般需要更大的驱动功率。对于GTO和SCR来说，一般需要脉冲电流控制，而对于BJT一般需要采用持续的电流控制，前者的驱动电路相对复杂，但不需要持续的功率消耗。

2. 电压控制型器件

电压控制型器件有IGBT、MOSFET等，这类器件的开关行为只需要有一定的电压和很小的驱动电流就可以，因而电压控制型器件只需很小的驱动功率，驱动电路也比电流控制驱动型的简单，已经有很多专用集成驱动芯片可以直接使用。另外，采用电压控制驱动的器件开关动作一致性相对较好。