

 IEEE WILEY

基于全新的方法来研究、建模、
设计及分析电力电子变换器


电子科学与工程系列图书

先进电力电子变换器 ——处理交流电压的 PWM变换器

Advanced Power Electronics Converters;
PWM Converters Processing AC Voltages

[巴西] 尤泽利·西波瑞亚诺·多斯·桑托斯 (Euzeli Cipriano dos Santos Jr.) 著
爱迪生·罗伯托·卡布拉尔·达·席尔瓦 (Edison Roberto Cabral da Silva)
雷鑑铭 等译

不同于常规方法，本书采用系统的方法来讲解多电平及背靠背电力电子变换器，内容仅涵盖变换器本身相关的主题，详细介绍了每一个拓扑结构及其概念，可以帮助读者基于传统结构来构建全新的拓扑结构

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电子科学与工程系列图书

先进电力电子 变换器——处理交流 电压的 PWM 变换器

Advanced Power Electronics Converters:
PWM Converters Processing AC Voltages

尤泽利·西波瑞亚诺·多斯·桑托斯
(Euzeli Cipriano dos Santos Jr.)

[巴西]

爱迪·罗伯托·卡布拉尔·达·席尔瓦
(Edison Roberto Cabral da Silva)

著

雷鑑铭 等译

机械工业出版社

本书采用系统的方法来讲解多电平及背靠背电力电子变换器，而不是采用传统的方法分别独立介绍，特别强调电力电子变换器的概念及建模方法。由于本书主要聚焦于连接 AC 电源的 PWM 电力电子变换器，对每一个拓扑结构及其概念都详细展开讲述。本书给出了大量实例，提供了一组全面的仿真结果来帮助理解全书提出的电路，将电力电子变换理论工程化，是一本自成体系的、理论性及实践性较强的专著。

本书内容涵盖基本理论和工程应用细节，适合电气传动、自动化、电机控制及电力电子技术领域的研究人员和技术人员阅读，也可作为高等院校相关专业的教师、研究生及高年级本科生的教材和专业参考书。

Copyright © 2015 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Advanced Power Electronics Converters; PWM Converters Processing AC Voltages, ISBN 978 - 1 - 118 - 88094 - 4, by Euzeli Cipriano dos Santos Jr. , Edison Roberto Cabral da Silva, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01 - 2015 - 5648 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进电力电子变换器：处理交流电压的 PWM 变换器/（巴西）尤泽利·西波瑞亚诺·多斯·桑托斯等著；雷鑑铭等译。—北京：机械工业出版社，2017.12
（电子科学与工程系列图书）

书名原文：Advanced Power Electronics Converters; PWM Converters Processing AC Voltages

ISBN 978-7-111-58315-8

I. ①先… II. ①尤… ②雷… III. ①变换器 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 253797 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：刘星宁 责任编辑：朱林

责任校对：肖琳 封面设计：马精明

责任印制：张博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 20 印张 · 399 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 58315 - 8

定价：99.00 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

服务咨询热线：010 - 88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010 - 68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010 - 88379203

金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

译者序

随着电力电子技术的发展，电力电子器件的应用已经渗透到了人们工作生活中的各个角落。当今电力电子技术及功率变换中，迫切需要具有基于传统电力电子变换架构去构建新的电力电子变换拓扑结构的研发能力。《先进电力电子变换器——处理交流电压的 PWM 变换器》一书提出了一种全新的方法来介绍一种重要的电子器件——电力电子变换器，是专业领域中系统性介绍一种名为功率模块几何结构 (PBG) 的全新方法来研究、建模、设计及分析电力电子变换器的专业书籍。为了推动我国在电力电子技术研究及功率变换领域的发展，使国内更多的设计人员与高等院校学子了解电力电子变换领域，在机械工业出版社的大力支持下，由华中科技大学在电力电子技术领域长期从事一线研究的教师们组织并完成本书的翻译工作，将一本电力电子技术领域的设计参考书籍奉献给读者。

本书采用系统的方法来讲解多电平及背靠背电力电子变换器，而不是采用传统的方法分别独立介绍，特别强调电力电子变换器的概念及建模的方法。由于本书主要聚焦于连接 AC 电源的 PWM 电力电子变换器，对每一个拓扑结构及其概念都详细展开讲述。本书给出了大量实例，提供了一组全面的仿真结果来帮助理解全书提出的电路，将电力电子变换理论工程化，是一本自成体系的、理论性及实践性较强的专著。本书内容涵盖基本理论和工程应用细节，适合电气传动、自动化、电机控制及电力电子技术领域的研究人员和技术人员阅读，也可作为高等院校相关专业的教师、研究生及高年级本科生的教材和专业参考书。

本书由华中科技大学光学与电子信息学院及武汉国际微电子学院雷鑑铭博士负责组织并完成全书翻译工作，参与本书翻译工作的还有徐明、谭和苗及高煜程等。本书在翻译过程中得到了华中科技大学光学与电子信息学院邹雪城教授、邹志革副教授、郑朝霞副教授和余国义高级工程师的帮助及支持，在此表示感谢，同时特别感谢文华学院外国语学院英语系肖艳梅老师的审校。

电力电子变换器涉及的专业面广，鉴于译者水平有限，书中难免有不足及疏漏之处，敬请广大读者批评指正和谅解，在此表示衷心的感谢。

译者

2017 年 10 月于华中科技大学喻园

原书前言

本书介绍的是用一种全新的方法论来描述一种重要的电子器件——电力电子变换器。常规的变换器教学方法是采用分立的或者孤立的方式分别考虑每一种类型。其直接的结果是，由于所提及的电力电子变换架构没有考虑其起源及发展而导致学习进程非常被动。由于教学进程是基于其自身结构的，学生们就没有基于传统结构去构建新的拓扑结构的开发能力。

本书采用系统的方法来讲解多电平及背靠背变换器，而不是采用传统的方法分别独立地介绍它们。本书的另一个特点是内容仅仅涵盖变换器本身相关的主题，这样就能有更多的空间来探讨每一种拓扑结构的细节及其概念。这样，适当地强调了电力电子变换器的概念建模的方法。

在第2章中讲述电源器件基础以及主要功率变换器的拓扑结构，本书主要聚焦于通过直流侧处理交流电压的结构。本章非常适合于那些已经修读了电力电子学导论课程的学生们。本书也可以作为电子工程领域课程的高年级本科生和研究生的参考书。然而，鉴于第2章的内容，可望那些即使缺乏电力器件知识及变换器基本概念的学生们也能理解该主题。尽管本书的主要市场是偏向于学术，而工作于电力电子学、电机驱动系统、电力系统以及可再生能源系统领域的电气工程师们也能发现本书的用处所在。

本书的组织如下：第1章为引言。第2章讲述了电源器件基础以及主要功率变换器的拓扑结构。第3章简单回顾了处理交流电压的主要电力电子变换器；此外，还介绍功率模块几何结构（PBG），用来描述本书所述的功率变换器。事实上，本章提出了贯穿全书的拓扑结构总汇。通常而言只介绍开发电力电子变换器用的PBG基础及其相互关系。第4~7章介绍多电平架构。第4~7章中将依次介绍中点箝位、级联、飞跨电容以及其他多电平结构。考虑到极点电压值比负载要求的电压值高的现实情况，第8章内容涉及脉宽调制（PWM）的优化技术。在第2~7章着重于电路本身叙述了许多拓扑结构以及第8章介绍了PWM策略后，为了保持特定的变换器变频可控，第9章处理控制操作。由于电气变频调节的需要，策略性地将第9章放于背靠背变换器（第10~11章）之前。单相-单相背靠背变换器在第10章中介绍，而最后一章讨论了三相-三相及其他背靠背变换器。

Euzeli Cipriano dos Santos Jr.
Edison Roberto Cabral da Silva

目 录

译者序

原书前言

第1章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 背景	2
1.3 功率开关和功率变换器的历史	3
1.4 电力电子变换器的应用	5
1.5 小结	8
参考文献	8
第2章 功率开关与基本功率变换器概况	9
2.1 引言	9
2.2 理想开关用电力电子器件	9
2.2.1 静态特性	10
2.2.2 动态特性	11
2.3 主要具体的功率半导体器件	13
2.3.1 自发传导/自发阻断	14
2.3.2 可控传导/自发阻断器件	15
2.3.3 可控传导/可控阻断器件	16
2.3.4 自发传导/可控阻断器件	19
2.3.5 主要的功率开关发明者列表	20
2.4 基本变换器	21
2.4.1 dc - dc 变换	24
2.4.2 dc - ac 变换	28
2.4.3 ac - dc 变换	36
2.4.4 ac - ac 变换	42
2.5 小结	45
参考文献	45
第3章 适用于交流电压的电力电子变换器和功率模块几何结构	49
3.1 引言	49
3.2 功率模块几何结构基础	50

3.3	功率模块说明	54
3.4	多电平结构中 PBG 的应用	57
3.4.1	中点箝位结构	58
3.4.2	级联结构	61
3.4.3	飞跨电容结构	64
3.4.4	其他多电平结构	68
3.5	ac-dc-ac 结构中 PBG 的应用	70
3.5.1	三相-三相结构	71
3.5.2	单相-单相结构	73
3.6	小结	75
	参考文献	75
第 4 章 中点箝位结构		77
4.1	引言	77
4.2	三电平结构	77
4.3	PWM 方案 (半桥拓扑结构)	81
4.4	全桥拓扑结构	84
4.5	三相 NPC 变换器	86
4.6	采用三电平桥臂的非常规结构	89
4.7	非平衡电容电压	95
4.8	四电平结构	97
4.9	PWM 方案 (四电平结构)	100
4.10	全桥和其他电路 (四电平结构)	104
4.11	五电平结构	106
4.12	小结	110
	参考文献	110
第 5 章 级联结构		111
5.1	引言	111
5.2	单 H 桥变换器	111
5.3	单 H 桥变换器的 PWM 方案	114
5.4	三相变换器——每相单 H 桥变换器	123
5.5	双 H 桥变换器	127
5.6	两级联 H 桥变换器的 PWM 方案	129
5.7	三相变换器——每相两级联 H 桥结构	133
5.8	双 H 桥变换器 (七电平与九电平拓扑结构)	144
5.9	三 H 桥变换器	145
5.10	三 H 桥变换器及推广	150
5.11	小结	151

参考文献	151
第 6 章 飞跨电容结构	153
6.1 引言	153
6.2 三电平结构	153
6.3 PMW 方案 (半桥拓扑结构)	157
6.4 飞跨电容电压控制	159
6.5 全桥拓扑结构	162
6.6 三相飞跨电容变换器	164
6.7 具有三电平桥臂的非常规 FC 变换器	166
6.8 四电平结构	169
6.9 通用结构	176
6.10 小结	176
参考文献	177
第 7 章 其他多电平结构	178
7.1 引言	178
7.2 嵌套结构	178
7.3 输出端带磁性元件的拓扑结构	183
7.4 有源中点箝位变换器	189
7.5 更多的多电平变换器	191
7.6 小结	195
参考文献	196
第 8 章 最佳的脉冲宽度调制方法	197
8.1 引言	197
8.2 双桥臂变换器	198
8.2.1 模型	198
8.2.2 PWM 的实现	199
8.2.3 模拟和数字实现	203
8.2.4 μ 对 PWM 实现方案的影响	205
8.3 三桥臂变换器和三相负载	207
8.3.1 模型	207
8.3.2 PWM 实现方案	209
8.3.3 模拟和数字的实现	210
8.3.4 三桥臂变换器中 μ 对 PWM 实现方案的影响	210
8.3.5 逆变器变量中三相电动机互连的影响	212
8.4 空间矢量调制 (SVPWM)	216

8.5 带 CPWM 的其他结构	221
8.5.1 三桥臂变换器——两相电动机	221
8.5.2 四桥臂变换器	222
8.6 带 CPWM 的非常规拓扑结构	224
8.6.1 带中间抽头耦合电感的逆变器	224
8.6.2 Z 源变换器	226
8.6.3 开放式绕组电动机驱动系统	230
8.7 小结	232
参考文献	233
第 9 章 电力电子变换器的控制策略	235
9.1 引言	235
9.2 基本控制原理	235
9.3 滞环控制	241
9.3.1 直流电动机驱动滞环控制的应用	244
9.3.2 调制交流变频的滞环控制	247
9.4 线性控制——直流变量	249
9.4.1 比例控制器: RL 负载	249
9.4.2 比例控制器: 直流电动机驱动系统	249
9.4.3 比例-积分控制器: RL 负载	252
9.4.4 比例-积分控制器: 直流电动机	254
9.4.5 比例-积分-微分控制器: 直流电动机	255
9.5 线性控制——交流变量	256
9.6 级联控制策略	257
9.6.1 整流电路: 电压-电流控制	257
9.6.2 电动机驱动: 转速-电流控制	258
9.7 小结	261
参考文献	261
第 10 章 单相-单相背靠背变换器	263
10.1 引言	263
10.2 全桥变换器	263
10.2.1 模型	263
10.2.2 PWM 策略	265
10.2.3 控制方法	266
10.2.4 功率分析	267
10.2.5 直流侧电容电压	268
10.2.6 电容器组设计	271

10.3 器件数量减少的拓扑结构	273
10.3.1 模型	273
10.3.2 PWM 策略	274
10.3.3 直流侧电压要求	275
10.3.4 半桥变换器	275
10.4 增加开关数量的拓扑结构 (变换器并联)	276
10.4.1 模型	277
10.4.2 PWM 策略	280
10.4.3 控制策略	282
10.5 增加开关数量的拓扑结构 (变换器串联)	283
10.6 小结	286
参考文献	286

第 11 章 三相-三相及其他背靠背变换器

11.1 引言	289
11.2 全桥变换器	289
11.2.1 模型	289
11.2.2 脉宽调制策略	291
11.2.3 控制方法	292
11.3 器件数量减少的拓扑结构	294
11.3.1 模型	294
11.3.2 PWM 策略	295
11.3.3 直流侧电压需求	296
11.3.4 半桥变换器	296
11.4 增加开关数量的拓扑结构 (变换器并联)	297
11.4.1 模型	297
11.4.2 PWM 策略	302
11.4.3 控制策略	302
11.5 增加开关数量的拓扑结构 (变换器串联)	303
11.6 其他背靠背变换器	304
11.7 小结	307
参考文献	307

第 1 章 概 述

1.1 引言

由于在电力电子学发展过程中对其获得新的见解，电力电子学可能被视为是电子工程领域的一大革命。这种情况实际上从汞弧整流器和闸流管被应用于栅极控制电路中时就开始存在了。在第一代电力设备和变换器之后，硅功率二极管和晶闸管中所用到的电力电子学发展起来，用于克服许多第一代设备中存在的问题，比如工作效率低下。如本章参考文献 [1] 中所述，所谓的电力电子学和气体管以及玻璃壳电子学都是以工业电子学为人所知晓的，并且应用了电力电子学的晶闸管也于 20 世纪 60 年代在市场中兴起。

对电力电子学的不同定义获得了同样的概念或观点：在一个提供电能的设备和另一个需求电能的设备之间进行功率流的控制。例如，在本章参考文献 [2] 和 [3] 中给出的定义分别是这样说的：“……电力电子学涉及旨在控制电能流的电子电路的研究。这些电路可以处理远高于单个设备等级的功率流……”以及“……电力电子学在电子开关设备的帮助下处理电功率的转换和控制。”

电力电子学涉及由许多学科共同创建的一个复杂的系统，这些学科包括半导体物理学、控制理论、电子学、电力系统以及电路原理。电力电子学的全面性使得陈述它的内容变得十分困难。电力电子学的多学科特性要求对所涉及的学科进行集中的练习和假设，与此同时也是要求学生参加该课程的重要先决条件。图 1.1 通过类比阐释了电力电子学的多学科特性，电力电子学课程所必须具备的技能被展示在树的根部，各式各样的电力电子学设备构成了树干，还有由此产生的技术以及应用（电能质量、可再生能源系统等）构成了树的分支。

从固态电力电子学新时代的开始，对于驱动电源处理器，半导体器件的应用已经成为其主要技术。通过对比从前应用于可控整流器中的半导体器件与现在的新技术，这个发展显得尤为突出。除了改进电源开关之外，在电路拓扑结构方面的创新也变得十分活跃。

电力电子变换器是许多电子系统的核心部分。常见的电力电子变换器应用包括（但不仅限于）：电动机驱动系统、可再生能源、机器人、混合动力汽车和电能质量改进电路。这些应用需要相当大的全球范围的研究来开发半导体器件、处理交流和直流变量的配置、控制和诊断以及容错系统等。

除了已经提到的技术方面，电力电子学在教育方面也很重要。电力电子学的跨

学科性质往往会使得学生们认为电力电子学课程特别难。激发学生的学习动力也是电力电子学领域的教育者的基本任务。

基于以上背景，本书讨论了一种新颖的方法来呈现一组非常重要的电力电子变换器，即处理交流电压的拓扑结构。常见的变换器教学是以分离和孤立的方式来单独考虑每一种变换器类型。这样导致的直接后果就是学习的过程变成消极地、被动地来思考每一种变换器的起源和发展。与传统的教学方式不同，本书中教学的过程是基于拓扑结构本身展开的，对于培养学生构建新的拓扑结构并没有帮助。1.2 节中具体讲述了这种新的方法。

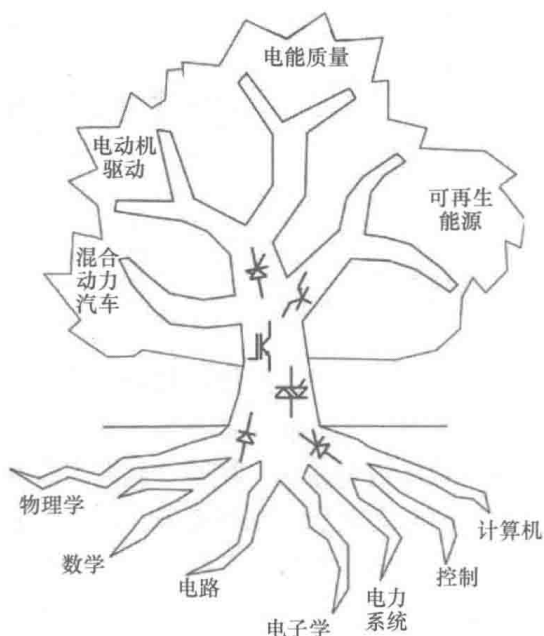


图 1.1 电力电子学的跨学科性质及其新的见解

1.2 背景

尽管在第 2 章展示的是电力器件基础以及主要功率变换器的拓扑结构，但本书主要关注的是通过一直流链路级来处理交流电压的架构。本书非常适合那些已经学习了电力电子学入门课程的学生，它也可以作为高年级本科生以及研究生在电子工程课程中的参考书籍。然而，即使缺少电力器件知识和变换器的基本概念，学生们仍可以轻松地掌握，因为这些知识将在第 2 章中具体讲解。

包含了电力电子变换器的系统已经被用来保证电网和负荷在可控性和电能效率要求方面的需求，尤其是在工业应用中。电力电子学拓扑结构可以将能量从一个基本源转换到一个需要任何级别的处理过的能量的负载（或者另一个源）上。

电力电子学拓扑结构可以通过各种控制条件（也就是直流或交流）来进行分类，也可以通过使用的电力转换阶段的数量来进行分类，以上分类方式如图 1.2 中所示。如图 1.2a 所示，一般而言许多可能性都与能量变换相关。图 1.2b 用阴影方式标示了一个直接的交流 - 交流变换，该变换将一个特定频率 (f_1) 的交流电压 (v_1) 变换成了另一个电压 (v_2) 和频率 (f_2) 不同（或相同）的交流电压，这种变换器一般被称为周期变换器。图 1.2c 则是描述了交流 - 直流或是直流 - 交流的变换过程，而图 1.2d 则是展示了一个直流 - 直流变换器。图 1.2e 和 1.2f 可以被认为是之前情况的扩展版本。这些变换系统（交流 - 直流 - 交流和直流 - 交流 -

直流) 由于在不同应用中的大规模使用, 也被展示在了图 1.2 中。

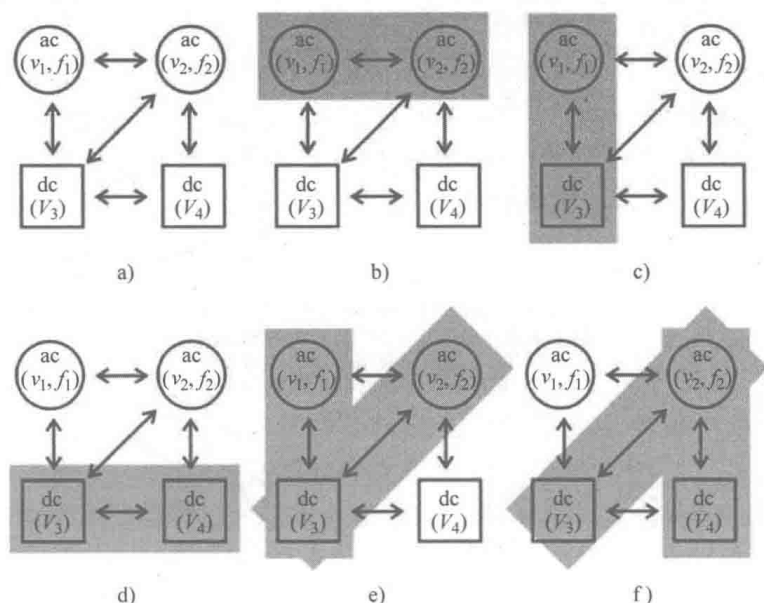


图 1.2 电力变换过程: a) 所有变换的可能性; b) 周期变换器; c) 整流器或变换器;
d) 斩波器; e) 交流-直流-交流; f) 直流-交流-直流

需要特别注意的是图 1.2c 和 1.2e 中所示的变换系统, 这两个变换系统解决了在直流级处理交流电压 (在一个输入和/或输出变换器方面) 的架构。系统化的方法是展示它们的架构, 而不是像传统的展示方法一样对它们进行分开展示。本书的另一个特点是只有与变换器本身相关的科目才会被考虑, 这意味着与交流滤波器及变压器相关的内容会被略过。这将会给探索每个拓扑结构及其概念的细节留出更多的空间。这样, 电力电子变换器概念化的理论可以适当加强。

1.3 功率开关和功率变换器的历史

考虑到变换过程中可以接受的能量损失水平以及可靠性的提升, 电力电子变换器的配置为那些需要能量处理的应用提供了一个具有吸引力的替代品。正如前文中所提到的那样, 电力电子变换器必须控制功率流, 这就意味着被用于这些变换器中的器件的发展对于保证预期的功能至关重要。在本节中, 会提到一个关于电力电子变换器的历史性观点, 突出了那些对当前发展有影响的主要事件。

电力电子学的历史要早于现在使用的半导体器件的发展历史。第一个变换器的构想是在 20 世纪早期汞弧整流器被推出时提出的。直到 20 世纪 50 年代, 那些用来构建电力电子变换器的器件还是栅控真空管整流器、引燃管、热阴极充气二极管整流管和闸流管。当时在电力电子学发展方面有两个重要事件: ①在 1948 年, 贝尔电话实验室发明硅晶体管并应用于低功耗设备比如便携式收音机; ②在 1958 年,

通用电气公司开发出了晶闸管或可控硅整流器，前者使用的锗元素，后者使用的硅元素。它便是世界上第一个半导体功率器件。

除了这两个事件，许多开关发展方面的研发也获得了进展。如图 1.3 所示，在 1967 年到 1977 年之间，发明了门极关断 (GTO) 晶闸管、门辅助可关断 (GATT) 晶闸管。功率晶体管、MOSFET (金属氧化物半导体场效应晶体管)、MCT (MOS 控制晶闸管) 和 IGBT (绝缘栅双极型晶体管) 也在 20 世纪 70 年代末被发明了出来。此外，值得一提的是，电力电子学领域的发展被微电子的发展深深影响。与此

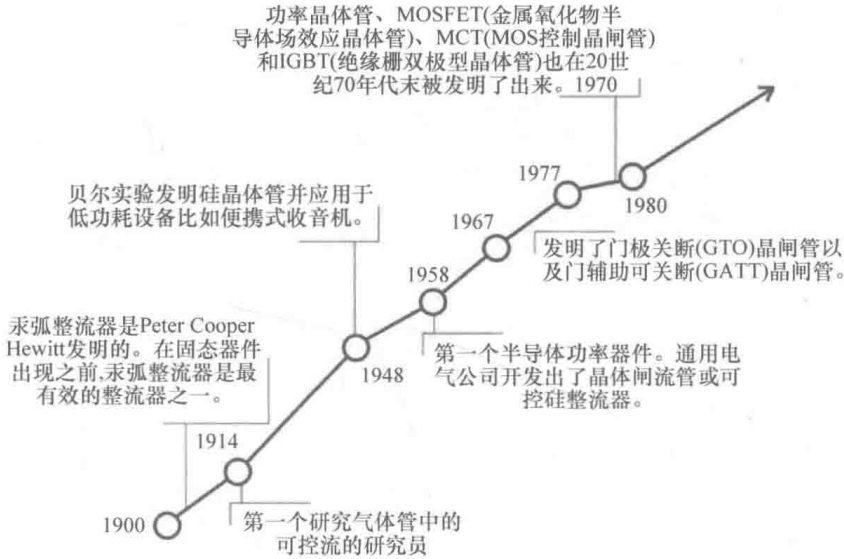


图 1.3 电力电子器件进化过程中的重要事件时间线

同时，电力电子学的历史也即电力电子变换器历史中的重要一章就是开关电源的发展。在 1958 年，被开发用于大规模计算的 IBM704 计算机使用了功率开关电源 (原始真空座开关式稳压器)。但是电源的革命性概念在 20 世纪 60 年代晚期才被提出，也就在那时，开关电源取代了线性电源。在一个线性电源中，规定了直流电压是通过以下顺序的步骤从交流电网中获取的：① 60Hz 的电源变压器，用在主变压器侧的 120V 的交流电压转换成激励变压器侧的低电压；② 这样的电压通过一个简单的二极管整流器被转换成了直流电压；③ 线性稳压器将电压降至需要的值。实际上，我们可以识别出许多与这个技术有关的问题，比如效率低下 (50% ~ 65% 的能量由于转换成了热量而被浪费)、体积和重量都很大 (主要是由于低频变压器、散热器和用来散热的风扇)。它的优点在于它有一个十分稳定的输出电压并且它有一个无噪声的转换系统。

为了克服线性稳压器的缺点，通用电气公司于 1959 年发表了一份关于早期的开关电源设计文章。

开关电源的概念和线性稳压器的概念区别非常大。开关和无源器件被连接在一

起用来快速地打开或者关闭电源，而不是 100% 的时间都用来传输电力（即将多余的能量转化为热能）。不像线性稳压器，交流电网电压被直接转换成直流电压，与此同时门极信号控制着开关时间，在输出转换结束之后调整所需的平均电压。

另一个电力电子学配置的重要发展是可控硅整流器，特别是那些可控硅整流器（半导体控制整流器或半导体闸流管）的生产。这样的器件允许仅仅通过改变应用于门电路的高频信号来控制高功率而不是像旧的技术那样使用一个汞弧整流器。

1.4 电力电子变换器的应用

电力电子变换器的应用范围很广以至于从低功率住宅应用到大功率输电线路都有使用。这些应用许多都可以被认为是传统的应用（比如整流电路和电动机驱动系统）。另一方面，一些新兴应用也引发了人们广泛的兴趣（比如可再生能源系统）。一个与电力电子变换器的这些应用相关的简短的讨论将会在本章稍做介绍。这些应用的细节也会在整章中展示。

图 1.4 和图 1.5 总结了一些例子来阐释电力电子学的广泛应用。图 1.4a 所示的示意图展示了电力电子学在混合动力/电动汽车中的应用。从电力电子学的角度来看，混合动力和全电动汽车两者是不同的。其区别主要是由变换器的功率等级造成的。一辆纯电动汽车的变换器功率等级大概为 200kW，而一辆混合动力汽车的变换器典型功率大概为 50kW。将能量传输给传动系统的变频电动机驱动系统是迄今为止最重要的用于这类应用的电力电子系统，但是电池的充电以及其他外围系统也是至关重要的。这个应用的主要预期功能有高效率的性能、紧凑的车载储能和用来与传统热机汽车市场竞争的低制造成本。

台式机和笔记本电脑可以被认为是需要不同直流总线电压的板上分配方案的系统。在这些设备中可以找到许多电力电子变换器，如图 1.4b 所示。一个交流 - 直流变换器从一个交流电网中产生一个直流电压总线，这个直流电压总线会被不同的直流 - 直流变换器所使用来保证微处理器、磁盘驱动、内存等的正常运行。至于笔记本电脑，一个电池充电器被附加了一个电源管理系统来控制睡眠模式，减少能耗以保证延长电池寿命。

图 1.4c 显示了电力电子变换器在可再生能源系统中的应用。现如今，可再生能源系统在许多工业化国家的政治议程中都已经是一个热门的话题。其主要原因是由于环境问题和作为替代方式建立的分散式发电系统。值得一提的是，除了可再生能源的优点，这种系统的能源成本非常高，特别是相对于常规的水电和煤炭等资源来说。从这个意义上来说，电力电子变换器必须解决效率、可靠性和降低成本的问题，从而使得这些替代能源更加具有竞争力。

图 1.4d 展示的是电车。它是一个能通过使用弹簧承载的集电杆直接从头顶的电线（一般悬挂在路边的杆子上）接收电能的电动公共汽车。

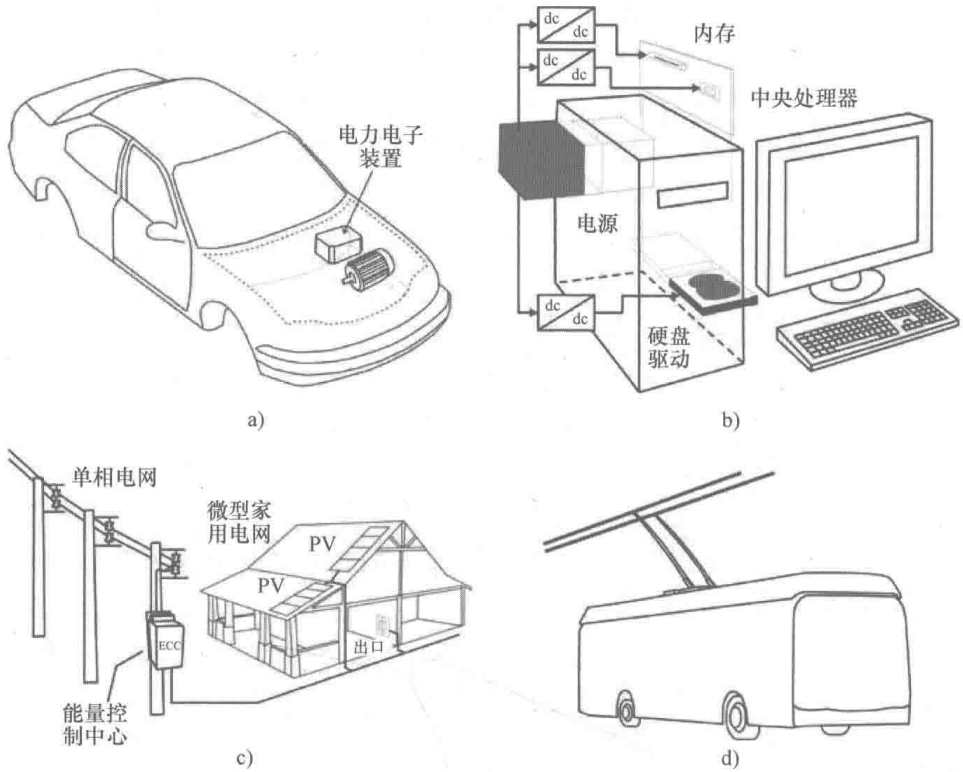


图 1.4 用来处理交流电压的电力电子变换器的应用

一个定义明确的传统配电系统由一个径向拓扑结构和单向功率流来满足末端用户。然而，在过去的几年里，有许多的研究和发展致力于使用一种具有主动功能和双向功率流能力的新的复杂的多源系统替代以前的模式。在这个新的方案中，电网应该保证负载管理和需求侧管理，同时能源价格采用电力的市场价格以及预测能源的量（基于风力和太阳能的可再生能源）来将整个分配系统优化至一个整体。

一个微电网可以被定义为局部分组的发电、存储能量以及通常连接至传统集中化电网的负载（宏观网络），如图 1.5 所示。含一直流总线的微电网如图 1.5 所示，在直流总线上功率变换器（一般用字母 C 表示）连接着分布式源和负载。微电网与宏观电网之间的公共连接点可以断开，这就意味着微电网可以自主运作。在这种情况下，一个孤岛检测系统就是必需的。它可以安全地断开微电网。微电网与大电网之间的连接可能是由于电力电子学的进步。

在这种方案中的一个重要设备就是能量控制中心（ECC），它包含了一个双向交流-直流（或直流-交流）功率变换器用于连接交流电网和直流总线。多个分散的发电源和将微电网从一个更大的网络中隔离出来的能力将提供高度可靠的电力。

电力电子学在另一个重要领域——航空航天领域中也变得越来越常见。许多负载

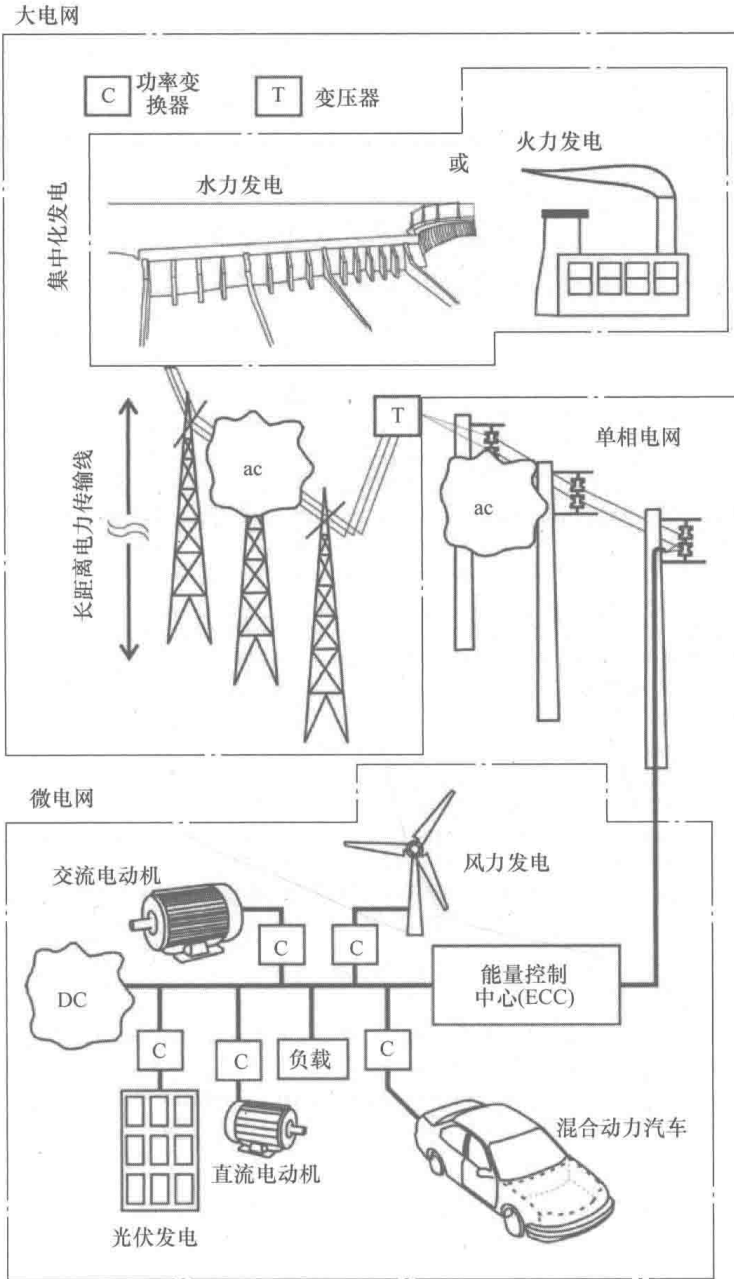


图 1.5 电力电子学在分布式发电系统中的应用

从前是由液压网络提供能量的，现在都被电力负载（比如泵和制动系统）所替代。除了面对共同的挑战，电力电子变换器还必须解决温度、低压、湿度和振动方面的恶劣环境的限制。