



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

现代电力电子学 中的瞬态分析

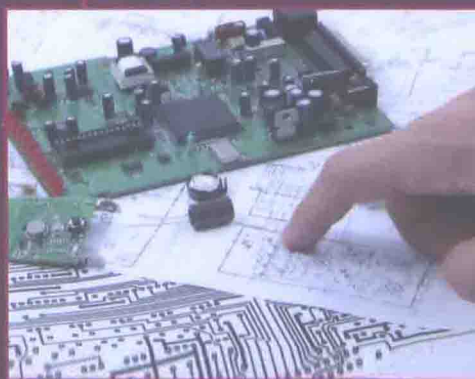
Transients of Modern Power Electronics

[美] Hua Bai 著
Chris Mi

关晓茵 译
张晓强 校



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

现代电力电子学中的 瞬态分析

[美] Hua Bai 著
Chris Mi

关晓菡 译
张晓强 校



机械工业出版社

Copyright © 2011 John Wiley & Sons Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Transients of Modern Power Electronics >, ISBN: 978-0-470-68664-5, by Hua Bai and Chris Mi, 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独家出版。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: 01-2012-1006 号

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电力电子学中的瞬态分析/ (美) 白华, (美) 米春亭著; 关晓菡译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 9

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Transients of modern power electronics

ISBN 978-7-111-47511-8

I. ①现… II. ①白…②米…③关… III. ①电力电子学-瞬态状况-研究 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 170046 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: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧

版式设计: 霍永明 责任校对: 纪 敬

封面设计: 马精明 责任印制: 李 洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 285 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47511-8

定价: 65.00 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

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

本书介绍了关于电力电子系统中瞬态过程的最新研究成果。分析了对系统瞬态过程产生影响的宏观因素和微观因素及其作用机制，以及功率半导体器件与功率集成电路的各种特性对系统瞬态过程的影响。着重介绍了电动车和混合动力电动车系统、可再生能源系统以及电池管理系统中的瞬态过程，并对死区效应、最小脉宽、计算误差等电力电子系统设计中的重要瞬时因素进行了研究。最后对电力电子技术未来的发展趋势进行了展望。

本书可供普通高等学校电气工程、自动化、能源工程等专业的研究生作为相关课程的教材或参考书，也可为相关专业的工程技术人员对电力电子系统的研究设计提供参考。

译 者 序

近年来，电力电子技术飞速发展，在可再生能源、交通、国防、通信、制造、家电等领域得到越来越广泛的应用。本书着重对电力电子系统中的瞬态过程进行了分析，这是由于作者在多年的研究工作中逐渐意识到电力电子技术的发展其根源在于半导体技术的发展，新一代电力电子系统的研发总是伴随着新一代半导体器件的诞生。不仅要关心宏观性能，还要给予微观的半导体物理机制以足够的重视。半导体器件的开关动作所引发的瞬态过程常常危及电力电子系统整体的安全运行，这也是困扰我国电力电子专业领域工作者的一个越来越突出的问题。

为此，作者在书中对一些电力电子系统中常见的瞬态过程从器件级和系统级两个角度进行了分析；着重介绍了相关的最新科研成果，包括电动车和混合动力电动车系统中的瞬态过程、可再生能源系统中的瞬态过程以及电池管理系统中的瞬态过程，并对死区效应、最小脉宽、计算误差等电力电子系统设计中的重要瞬时因素进行了研究。本书对电力电子系统中瞬态过程的研究有助于我国科技工作者更深入地了解国际上的研究现状和最新发展，对我国相关领域的理论分析和技术创新起到积极的推动作用。

全书的翻译工作由关晓菡副教授完成，校对工作由张晓强博士完成。在翻译过程中得到了张卫平教授、张晓强博士、杨兵副教授等人的建议和帮助，在此表示衷心的感谢。机械工业出版社的编辑江婧婧为本书的翻译出版做了大量工作，在此一并表示感谢。

由于译者的水平有限，翻译中难免有错漏和不妥之处，恳请读者指正。

2014年10月

作者简介

Hua (Kevin) Bai (白华), 毕业于清华大学电气工程专业, 2002 年获学士学位, 2007 年获博士学位。2007~2009 年为美国密歇根大学迪尔伯恩分校 (University of Michigan-Dearborn) 博士后研究员, 2009 至 2010 年为该校助理研究员。现为美国密歇根州凯特林大学 (Kettering University) 电气与计算机工程系助教。研究方向为电力电子系统中的动态过程和瞬时脉冲功率现象, 涉及变频传动系统、高压大功率 DC-DC 变换器、可再生能源及混合动力电动车等领域。

Dr. Chris Mi (米春亭), 美国密歇根州密歇根大学迪尔伯恩分校电气与计算机工程专业副教授、DTE 电力电子实验室主任。

Dr. Mi 在电动车和混合动力电动车领域进行了广泛研究, 发表论文 100 余篇, 应邀作报告或作为小组成员主题发言 50 余次。

Dr. Mi 于 2009 年获密歇根大学迪尔伯恩分校“卓越研究奖”, 2007 年获 SAE “卓越环保运输 (也称为 E2T) 奖”, 以表彰其在“电动车、混合动力电动车和燃料电池汽车领域的创新性教育和培训模式”, 2005 年获密歇根大学迪尔伯恩分校“卓越教学奖”、美国电机电子工程师学会 (IEEE) 第四区“杰出工程师奖”和东南密歇根区“杰出专业奖”。Dr. Mi 还是中国国家创新奖 (1992) 的获得者, 享受政府特殊津贴 (1994)。2007 年 12 月, 因其“在教育领域的卓越表现及其模范的道德行为”, Dr. Mi 成为美国电子与计算机工程荣誉学会 (Eta Kappa Nu) 会员。

Dr. Mi 毕业于中国西安的西北工业大学, 获学士、硕士学位, 于加拿大多伦多大学获博士学位。2008 至 2010 年担任 1Power Solutions 公司首席技术官, 2000 至 2001 年曾就职于美国通用电气公司 (General Electric Company)。1988 至 1994 年在西安石油大学任教, 1994 至 1996 年任副教授、自动控制系副主任。

Dr. Mi 现为 IEEE 车辆技术会刊 (IEEE Transactions on Vehicular Technology) 副主编, IEEE 电力电子学会刊-快报 (IEEE Transactions on Power Electronics-Letters) 副主编, 电路、系统及计算机期刊 (Journal of Circuits, Systems, and Computers) 副主编 (2007~2009); 国际电动车及混合动力电动车辆期刊 (International Journal of Electric and Hybrid Vehicles) 编委会成员;

IET 运输电力系统会刊 (IET Transactions on Electrical System in Transportation) 编委会成员; IEEE 车辆技术会刊 (IEEE Transactions on Vehicular Technology) 车辆动力与推进特刊客座编辑 (2009 ~ 2010), 国际电力电子学期刊 (International Journal of Power Electronics) 车辆电力电子学及电气传动特刊客座编辑 (2009 ~ 2010)。曾任 IEEE 东南密歇根区副主席 (2006、2007) 及主席 (2008), 并担任 2009 年 9 月 7 ~ 11 日于密歇根迪尔伯恩举行的第五届 IEEE 车辆动力及推进国际会议主席。曾供职于美国能源部国家科学基金审议小组 (2006 ~ 2010) 及加拿大自然科学与工程研究协会 (2010)。

在 2011 年的 IEEE 国际未来能源挑战赛中 Dr. Mi 为两位主题协调员之一。

前 言

电力电子技术是电气工程的一个主要分支。在过去的几十年里，在电力系统、替代能源和混合动力电动车领域中不断涌现的新用途推动着电力电子技术获得了飞速发展。然而在许多工程师和学者中流行着这样一个观点，认为电力电子技术已经发展成熟了。特别是一些对电力电子系统只有粗略了解的应用人员，很多情况下将电力电子系统视为可以在市场上买到的黑盒子。系统集成被诠释为买来这些黑盒子后，再与其他元器件相连接，组装成系统，然后在与预期的应用环境相似的环境中进行测试。

这种情况的存在有多方面原因。一方面原因是由于电力电子技术缺少指导性的理论体系和设计方法。这个问题直接导致电力电子系统像一个黑盒子一样以经验性的、模糊不清的、不准确的方式被推广普及。实际上，电力电子技术课程是一门涉及半导体物理学、数字信号处理、控制理论、电路理论、计算机、机械设计、热现象和电磁现象等多门学科的交叉学科。理解电力电子技术需要从宏观角度和微观因素两方面进行理解。然而，大多数人仅停留在控制、电路和拓扑的宏观领域里。这样一来，与电力系统和高电压工程等学科相比，电力电子技术的入门知识要求最低，常被认为是一种纯粹的应用工程甚至是一门技术。电力电子系统的设计常常是在经验参数、令人难以信服的仿真、简单的电气和机械概念以及大量测试的指导下进行的。

实际上，电力电子技术发展的根源在于半导体技术的发展。一代电力电子系统总是伴随着一代半导体器件。对功率半导体器件的物理机制缺乏了解导致了研究基础的薄弱。因此，只关心宏观性能而忽视半导体物理机制的实验研究经常遭遇意想不到的失败。半导体器件的开关动作引发的瞬态过程对电力电子系统的安全运行提出了挑战。统计数据表明，几乎70%的电力电子系统失效都发生在瞬态过程而不是稳态运行中。然而，主流的电力电子技术仅局限于对平均的稳态性能进行分析而忽略了重要的瞬态过程。通常只研究拓扑、效率、总谐波畸变率和输出电压纹波，而忽略了电压尖峰、浪涌电流、最小脉宽等性能指标。

作者认为，同时实现高性能、高可靠性和高设计准确度的唯一途径是将对宏观控制的分析和对微观瞬态过程的分析结合起来，这一观点已被以往的研究经验所证实。为了建立一个精确的、有指导意义的理论框架，从各种电力电子拓扑中收集数据是建立宏观与微观相结合的理论框架的第一步。作者参与的开

发工作包括：①6000V, 1.25MW 三电平逆变器；②10kW 双向隔离型 DC-DC 变换器；③10kW 插入式混合动力电动车电池充电器；④SiC JFET 逆变器。可靠性和系统性能之间的矛盾、稳态和瞬态过程的折中、宏观和微观世界的冲突反复出现在每一次研发过程中。在大功率和大功率密度应用中，观察、了解并解决那些瞬态过程是开发过程中最重要的步骤之一。这些问题促使作者写作了本书，并命名为“电力电子技术中的瞬态过程”。作者希望本书能够启发学生与工程人员能从宏观和微观两方面来理解电力电子技术。

本书第1章简要介绍了电力电子技术的发展现状，这有助于读者理解这一领域当前的需求。第2章和第3章分析了一些常见的瞬态过程，从能量回路、能量器件和能量控制的角度对电力电子系统进行了阐述。第4章对混合动力电动车中的电力电子系统的典型瞬态过程进行了详细分析。第5章对替代能源、第6章对电池管理系统的瞬态过程进行了分析。第7章和第8章对死区效应、最小脉宽、计算误差等电力电子系统设计中的重要因素进行了研究。第9章对未来的发展进行了展望。

本书是作者的一次大胆尝试，采样数据采用了数值形式，尽管作者在这一领域工作多年，错误仍在所难免。而且，作者在本书中提出了许多新概念，这些概念很可能还不够严谨，有待进一步完善。作者欢迎读者提出宝贵意见，这将有助于在本书再版时提高内容的质量。

本书得到清华大学电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室、密歇根大学迪尔伯恩分校电气与计算机工程系以及凯特林大学电气与计算机工程系的大力支持。作者对所有帮助本书完成的人表示感谢。特别要指出，书中的大部分资料来源于作者及 Chris Mi 教授和 Hua Bai 教授的科研团队多年来的工作成果，作者对曾为本书做出巨大贡献并提供支撑材料的专职工作人员和研究生表示感谢。Mr. Mariano Filippa 校对了本书的1~3章，作者对此表示感谢。

作者对授权本书使用其资料或图表的各种资料来源表示感谢。为了获得使用这些参考资料的许可，作者已尽了最大努力。如果有任何资料来源被遗漏，作者对此表示诚挚的歉意，若能引起出版商的注意，作者将十分愿意能在新的版本中对这一疏漏加以纠正。

作者对 MathWorks 公司和 ANSYS 公司提供的软件和研究支持表示感谢。

作者还应该感谢他们的家人，感谢他们在本书写作的过程中做出的牺牲和给予的巨大支持。

最后，对 John Wiley & Sons 出版公司及其编辑人员表示衷心的感谢，感谢他们出版本书，感谢他们在各方面给予的帮助！

目 录

译者序

作者简介

前言

| | |
|----------------------------------|----|
| 第1章 电力电子器件、电路、拓扑及控制 | 1 |
| 1.1 电力电子学 | 1 |
| 1.2 功率器件技术的发展 | 2 |
| 1.3 电力电子电路拓扑 | 4 |
| 1.3.1 开关过程 | 4 |
| 1.3.2 基本开关单元 | 5 |
| 1.3.3 电力电子学中的电路拓扑 | 6 |
| 1.4 脉宽调制 | 8 |
| 1.5 典型电力电子变换器及其应用 | 13 |
| 1.6 电力电子学中的瞬态过程及本书结构 | 14 |
| 参考文献 | 14 |
| 第2章 电力电子系统中的宏观和微观因素 | 17 |
| 2.1 引言 | 17 |
| 2.2 微电子技术 with 电力电子技术 | 19 |
| 2.2.1 了解半导体物理学 | 19 |
| 2.2.2 评述半导体器件 | 21 |
| 2.3 短时瞬态过程研究的最新进展 | 23 |
| 2.3.1 脉冲的定义 | 24 |
| 2.3.2 脉冲能量与脉冲功率 | 26 |
| 2.4 典型的影响因素与瞬态过程 | 30 |
| 2.4.1 失效机制 | 30 |
| 2.4.2 主电路的各个部分 | 33 |
| 2.4.3 相互影响的控制模块与功率系统 | 35 |
| 2.5 短时瞬态过程的研究方法 | 35 |
| 2.6 小结 | 36 |
| 参考文献 | 37 |

| | |
|---|-----|
| 第3章 功率半导体器件、功率集成电路及其短时瞬态分析 | 40 |
| 3.1 半导体器件的主要特点 | 40 |
| 3.2 半导体器件建模方法 | 41 |
| 3.2.1 二极管混合模型 | 41 |
| 3.3 IGBT | 42 |
| 3.4 IGCT | 44 |
| 3.5 碳化硅结型场效应晶体管 | 45 |
| 3.6 系统级 SOA (安全工作区) | 49 |
| 3.6.1 实例 1: 三电平 DC-AC 逆变器的系统级 SOA | 49 |
| 3.6.2 实例 2: 双向 DC-DC 变换器的系统级 SOA | 51 |
| 3.6.3 实例 3: EV 电池充电器的系统级 SOA | 51 |
| 3.7 软开关控制及其在大功率变换器中的应用 | 55 |
| 3.7.1 实例 4: 双移相控制中的 ZCS | 55 |
| 3.7.2 实例 5: EV 充电器中的软开关与硬开关控制 | 56 |
| 参考文献 | 57 |
| 第4章 电力电子学在电动车与混合动力电动车中的应用 | 60 |
| 4.1 电动车与混合动力电动车简介 | 60 |
| 4.2 HEV 的结构与控制 | 61 |
| 4.3 HEV 中的电力电子技术 | 62 |
| 4.3.1 HEV 中的整流器 | 63 |
| 4.3.2 HEV 用 Buck 变换器 | 67 |
| 4.3.3 非隔离型双向 DC-DC 变换器 | 69 |
| 4.3.4 交流异步电动机控制 | 73 |
| 4.4 EV 和 PHEV 中的电池充电器 | 79 |
| 4.4.1 单向充电器 | 79 |
| 4.4.2 感应充电器 | 90 |
| 4.4.3 无线充电器 | 94 |
| 4.4.4 PHEV 电池充电器的优化 | 96 |
| 4.4.5 双向充电器及其控制 | 99 |
| 参考文献 | 108 |
| 第5章 电力电子学在替代能源和先进电力系统中的应用 | 111 |
| 5.1 典型替代能源系统 | 111 |
| 5.2 替代能源系统中的瞬态过程 | 111 |
| 5.2.1 动态过程 1: 太阳能发电系统的 MPPT 控制 | 112 |
| 5.2.2 并网系统的动态过程 | 114 |

X 现代电力电子学中的瞬态分析

| | |
|------------------------------------|------------|
| 5.2.3 风力发电系统 | 118 |
| 5.3 电力电子技术、替代能源和未来的微网系统 | 121 |
| 5.4 多能源系统中的动态过程 | 125 |
| 5.5 替代能源系统的分析方法与控制特点 | 128 |
| 5.6 电力电子技术在先进电力系统中的应用 | 129 |
| 5.6.1 静止无功补偿器和静止同步补偿器 | 130 |
| 5.6.2 超导磁储能系统 | 131 |
| 参考文献 | 133 |
| 第6章 电力电子学在电池管理系统中的应用 | 136 |
| 6.1 电力电子学在可充电电池系统中的应用 | 136 |
| 6.2 电池充电管理 | 137 |
| 6.2.1 脉冲充电 | 137 |
| 6.2.2 反射式快速充电 | 138 |
| 6.2.3 变电流间歇充电 | 139 |
| 6.2.4 变电压间歇充电 | 139 |
| 6.2.5 先进间歇充电 | 140 |
| 6.2.6 实用充电方案 | 140 |
| 6.3 电池单元均衡 | 144 |
| 6.3.1 为电池组增加均衡充电阶段 | 146 |
| 6.3.2 分流法——耗散均衡法 | 147 |
| 6.3.3 电抗器切换法 | 147 |
| 6.3.4 飞跨电容法 | 148 |
| 6.3.5 感性（多绕组变压器）平衡法 | 148 |
| 6.3.6 专用集成电路充电平衡法 | 149 |
| 6.3.7 DC-DC 变换器平衡法 | 149 |
| 6.4 电池电力电子系统中的 SOA | 151 |
| 6.4.1 考虑电池阻抗和温度，改善系统级 SOA | 151 |
| 6.4.2 不同温度下与其他元件的相互作用 | 153 |
| 参考文献 | 156 |
| 第7章 死区效应与最小脉宽 | 158 |
| 7.1 DC-AC 逆变器中的死区效应 | 159 |
| 7.1.1 死区效应 | 160 |
| 7.2 DC-DC 变换器中的死区效应 | 163 |
| 7.2.1 移相式双重有源桥式双向 DC-DC 变换器 | 163 |
| 7.2.2 DAB 双向 DC-DC 变换器中的死区效应 | 166 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 7.3 死区补偿控制策略 | 174 |
| 7.4 最小脉宽 | 179 |
| 7.4.1 MPW 的设置 | 182 |
| 7.5 小结 | 184 |
| 参考文献 | 185 |
| 第 8 章 电力电子系统中的调制误差 | 187 |
| 8.1 信息流与功率流之间的调制误差 | 187 |
| 8.2 功率半导体器件在开关过程中的调制误差 | 188 |
| 8.2.1 串联半导体开关的电压平衡电路 | 189 |
| 8.2.2 伴随发生的短时瞬态过程 | 194 |
| 8.3 DC-AC 逆变器中的调制误差 | 201 |
| 8.4 DC-DC 变换器中的调制误差 | 204 |
| 8.5 小结 | 214 |
| 参考文献 | 214 |
| 第 9 章 电力电子技术未来发展趋势 | 216 |
| 9.1 新材料与新器件 | 216 |
| 9.2 电路拓扑、系统及应用 | 221 |
| 9.3 无源元件 | 224 |
| 9.4 电力电子封装技术 | 226 |
| 9.5 电力载波通信 | 229 |
| 9.6 未来电力电子系统中的瞬态过程 | 229 |
| 参考文献 | 230 |

第 1 章 电力电子器件、电路、拓扑及控制

1.1 电力电子学

电力电子学是工程的一个分支，它通过电子技术手段将电能的生产、传输和分配结合起来。1974 年，W. Newell 将电力电子学描述为电气工程、电子学和控制理论的交叉学科，这一观点在今天已得到普遍认可^[1]。

电力电子学已经渗透到家居、商业和工业的各个领域。电力电子学的应用涵盖了可再生能源、交通、国防、通信、制造、公用设施和家电行业。在可再生能源领域，电力电子学涉及分布式发电、电能质量的控制、风力发电和太阳能转换。现代电力电子学包括对新型电力电子半导体器件、新型拓扑结构和新的控制算法的研究和开发。电力电子学是一个涉及传统的电气工程、电磁学、微电子学、控制理论、热流体动力学和计算机科学的交叉学科。

更具体地讲，电力电子学的研究包括但不限于以下领域：

1. 电力电子半导体器件的理论、制造及应用。
2. 电力电子电路、器件、系统及其建模、仿真和计算机辅助设计。
3. 系统可靠性的预测和可靠性的提高。
4. 电动机驱动设计、电力传动及自动控制。
5. 电磁设计和电磁测量技术。
6. 基于电力电子学的柔性交流输电系统（FACTS）。
7. 先进控制技术。

功率半导体器件的研究是现代电力电子学的基础，起源于上世纪 50 年代后期晶闸管的引入。目前已有多种功率半导体器件可供电力电子学在应用中选择，包括门极可关断晶闸管（GTO）、电力达灵顿晶体管、电力金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET）、绝缘门极双极型晶体管（IGBT）、集成门极换流晶闸管（IGCT）。近来，具有宽能带间隙的新型材料，如碳化硅（SiC）和砷化镓（GaS），正在引领新一代功率半导体器件的发展方向。

随着计算机科学和控制理论的发展，电力电子学开始应用于工业领域，比

如在电动机驱动和电力传动中的应用。为感应电动机和永磁电动机的驱动研发了各种先进的控制算法，如磁场定向控制（FOC）和直接转矩控制（DTC）^[2-5]。

随着电力电子技术的发展，特别是高压大功率半导体器件的发展成熟，电力电子学开始在电力系统中发挥积极的作用，改善系统性能、降低成本、提高可控性。FACTS 就是电力电子学在电力系统中的典型应用。静止无功补偿器（STATCOM）可以消除系统中多余的无功功率，从而使本地的电力系统更加健全、环保和灵活^[6-8]。

电力电子学另一个最常用的领域是电源。从几毫瓦的超小功率到几兆瓦的超大功率，从几伏到千伏以上，涵盖了宽泛的功率范围，采用电力电子技术的电源占据了大量的市场份额。DC-DC 变换器^[9]、DC-AC 逆变器^[10]、AC-DC 整流器^[11]以及 AC-AC 变频器^[12]是这一领域的典型应用。在这些领域中对电力电子技术的研究使得拓扑结构和控制方法越来越多样化。而且，所有这些拓扑结构都可以用数学方法进行描述、建模和仿真。例如，为了减少硬开关变换器中由开关损耗引起的发热，研发了软开关技术，几乎所有利用软开关技术的电路都有自己独特的拓扑结构，并根据各自的运行模式建立了数学模型^[13-17]。所有先进的控制算法和各种各样的拓扑结构都可以借助一些先进的解析方法和数值分析工具进行验证，而这类工具的可行性和精确性已在消费领域和工业应用中得到广泛证实。

1.2 功率器件技术的发展

功率半导体技术是电力电子学的基本组成部分。每一代半导体器件决定了采用这些器件的相应的电力电子技术。有史以来的第一个电力电子器件是诞生于 1900 年的汞弧整流器，随后又出现了栅控真空整流管、引燃管和闸流管。直到 1950 年，这些器件在工业电力控制中得到许多应用。在此期间，于 1948 年发明的晶体管标志着电力电子学领域的一场革命。这也为 1957 年通用电气公司发明可控硅铺平了道路，可控硅目前常被称为晶闸管。

所有的半导体器件可以划分为以下三类：

1. 不可控器件：这类器件不需要任何触发信号控制其导通/关断，如整流二极管；
2. 半控器件：这类器件可以被触发导通，但无法通过控制信号使其关断。晶闸管是一个典型例子，使晶闸管关断的唯一方法是改变其端电压的极性，并等待电流下降到零；
3. 全控器件：也称为自控器件，这类器件可以通过门极信号控制导通或者关断。典型的全控器件有双极结型晶体管（BJT）、IGBT、MOSFET、GTO 和

IGCT。

晶闸管和 GTO 的共同特点是额定功率高（最新已达到 6000V/6000A 以上），但开关速度慢。在 IGCT 出现之前一直是高压大功率逆变器（电压源或电流源逆变器）的首选。由于开关速度慢，晶闸管和 GTO 的开关频率不能太高，否则较大的开关损耗最终将对器件造成损坏。在中等电压的应用场合中，晶闸管和 GTO 已被高压 IGBT 或 IGCT 所取代，但在高压直流应用中晶闸管和 GTO 仍然占据主导地位。

在 20 世纪 70 年代后期，BJT 和 MOSFET 被同时研制出来，BJT 是流控器件而 MOSFET 是压控器件。随着 MOSFET 和 IGBT 在电力电子技术特别是在小功率到中功率的应用场合中开始起主导作用，功率 BJT 逐渐被淘汰。与 BJT 相比，MOSFET 可以工作在更高的开关频率，而产生的开关损耗更低。与 IGBT 相比，MOSFET 唯一的缺点是其通态压降较高。

IGBT 本质上是 BJT 和 MOSFET 相结合的产物^[18]，它是功率半导体器件发展史上的一个重要里程碑。其开关频率远高于 BJT，电学性能远高于 MOSFET。目前，IGBT 已能达到 6000V/600A 或 3500V/1200A。有关 IGBT 的工作细节将在接下来的几章里作深入的阐述。

1997 年由 ABB 公司推出了 IGCT^[19]，目前已达到 4500V/4000A。一个门极控制晶闸管（GCT）本质上是一个四层晶闸管，易于导通而难以关断。然而通过引入“集成门极”，在关断过程中将所有的电流从 GCT 转移到门极，加速了关断过程，因此 IGCT 在关断过程就类似于一个晶体管。与 GTO 相比，IGCT 具有开关速度快，结内温度分布均匀，无需缓冲电路等优点。IGCT 的缺点之一是当元件失效时，在其端子间会形成一个短路，这在大多数电力电子学应用中是不希望发生的。

目前功率半导体器件的研发已经超越了半导体设计的范畴。随着各种电力电子学应用的不断增加，越来越多的功率器件倾向于将门极驱动电路、过电流保护电路及其他附加功能集成在一个模块内，因此出现了已达到数百千瓦的 IGBT 智能功率模块（IPM）^[20]。IGCT 就是典型的 IPM，它是将门极与一个 GCT 集成而成。某些型号的 IGCT 甚至具有自诊断功能，能将器件的状态反馈给微控制器。

上述半导体器件都是利用硅材料制造的，预计在未来硅器件仍将占据主导地位。然而，其他材料也显现出了自己的应用前景，比如，碳化硅（SiC）半导体材料具有更宽的能带间隙（6H-SiC 为 3.0eV）、更高的饱和速度（ 2×10^7 cm/s）、更高的热导率 [$3.3 \sim 4.9$ W/(cm·K)]、更低的导通电阻（ 1 m Ω /cm²）以及更高的击穿电场强度（ 2.4 MV/cm）^[21]。因此，应用 SiC 材料的功率器件有望比传统的硅功率开关器件具有更优越的性能。由于 SiC 器件可以工作在更高的开关频率，在采用 SiC 器件的电力电子变换器中，无源元件（电感和电容）的体积

将大幅度减小。由于 SiC 器件与传统的电力电子变换器相比损耗更低，相应的散热器的尺寸也将减小。更高的结温将使冷却机制更加简化。可以预测 SiC 器件将对下一代电力电子系统产生重要的影响。

1.3 电力电子电路拓扑

功率半导体开关器件是电力电子变换器的基本组成部分。开关过程是电力电子变换器的核心工作过程。

1.3.1 开关过程

开关器件是电力电子电路中负责控制能量流动的器件。以 IGBT 为例，当给门极施加一个高于开启阈值的电压时，集电极和发射极的端子之间将呈现低阻抗，因此器件处于“导通状态”，等效于一个闭合的开关；当门极电压低于开启阈值时，集电极和发射极之间呈现高阻抗，阻止电流流过并过渡到“关断状态”。开关过程就是将半导体开关从导通状态转换到关断状态，再从关断状态转换到导通状态的重复工作过程。通过控制功率开关的工作状态可以控制能量流过不同的路径。

图 1-1 是一个典型的 Buck 变换器的拓扑结构。Buck 变换器是具有降压拓扑结构的变换器，它将输入的直流电压转换为一个低于输入的直流电压输出。通过控制主开关器件，变换能量流通的路径，实现将一个较高的电压变换成一个较低的电压。

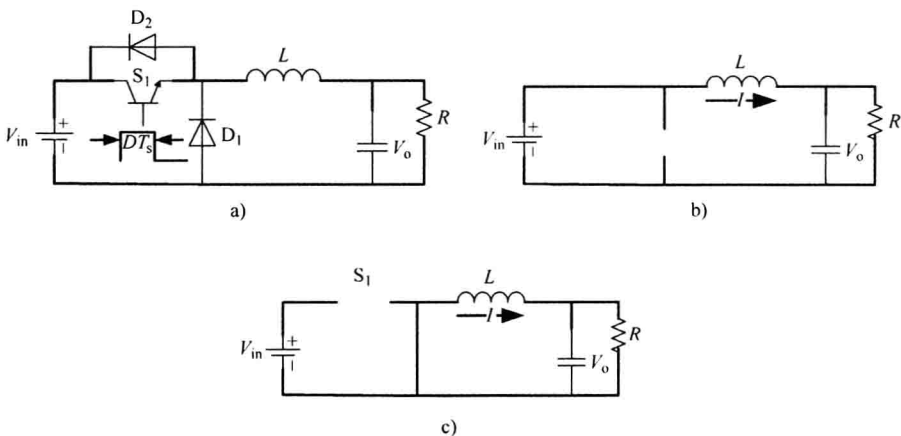


图 1-1 Buck 电路及其在不同工作模式下的电路拓扑

a) Buck 变换器 b) S_1 导通时的电路拓扑 c) S_1 关断时的电路拓扑