

控制是电力电子变换器设计的核心问题，  
而数学模型是实现精确控制的基础

电子科学与工程系列图书

# 电力电子变换器 的建模和控制

Power Electronic Converters Modeling  
and Control: with Case Studies

[法]

赛迪克·巴查 (Seddik Bacha) 尤利安·蒙特安努 (Iulian Munteanu)  
安东内拉·尤利安娜·布拉特库 (Antoneta Iuliana Bratcu)

著

袁敏 翟茜 等译

国际知名专家30余年工作经验的完美呈现，内含案例分析和思考  
题，旨在指导读者如何对变换器建立模型并进行分析，进而提升设计与  
控制电力电子变换器的能力



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

电子科学与工程系列图书

# 电力电子变换器的建模和控制

赛迪克·巴查 (Seddik Bacha)

[法]

尤利安·蒙特安努 (Iulian Munteanu) 著

安东内拉·尤利安娜·布拉特库 (Antoneta Iuliana Bratcu)

袁敞 翟茜 等译

机械工业出版社

本书内容立足于电力电子、控制系统和信号处理的学科交叉,覆盖部分工业电子领域。本书分为两部分:第一部分是电力电子变换器建模,涵盖电力电子变换器建模的主要主题,包括开关模型、典型和通用平均模型及降阶模型;第二部分是电力电子变换器控制,探讨电力电子变换器控制方法,涵盖线性和非线性控制方法。书中关于每个问题都将理论和实践相结合,并给出直观的案例。书中案例研究问题源于工程实际,并给出完整的求解过程。本书应用 MATLAB<sup>®</sup> - Simulink<sup>®</sup> 软件,给出了必要的仿真和注解,以便读者深刻理解控制结构运行的要点。

本书可作为电力电子领域硕士研究生教材使用,也可供从事电力电子技术领域研究工作的研究者 and 专业人士参考。

Translation from English language edition:

Power Electronic Converters Modeling and Control

by Seddik Bacha, Iulian Munteanu, Antoneta Iuliana Bratcu

Copyright © 2014 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 Springer 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)出版与发行。未经许可的出口,视为违反著作权法,将受法律制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2014 - 5100 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子变换器的建模和控制/(法)赛迪克·巴查 (Seddik Bacha) 等著;袁敞等译. —北京:机械工业出版社, 2017. 6

(电子科学与工程系列图书)

书名原文: Power Electronic Converters Modeling and Control

ISBN 978-7-111-56915-2

I. ①电… II. ①赛…②袁… III. ①变换器 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 114323 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: 刘星宁

责任校对: 杜雨霏 封面设计: 马精明

责任印制: 常天培

唐山三艺印务有限公司印刷

2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 23.5 印张 · 469 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-56915-2

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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 译 者 序

随着科技的快速进步，影响人类社会的能源系统也在发生深刻变革。从太阳能、风能的高效利用，到电动汽车的快速发展，新型电源和新型负载层出不穷。而电力电子变换器作为新型电源、负载的必要功率处理接口，其重要性日益凸显。为了满足电力电子变换器系统的稳定性、可控性和其他卓越性能指标，国内外相关领域的专家学者投入了大量的时间精力开展深入研究，并获得了系统性的成果。

在这一轮电力电子技术快速发展的浪潮中，中国扮演了一个极其特殊的角色。当前，中国已经成为世界范围内的电力电子装备制造中心，在珠三角、长三角等区域汇聚了大量优秀电力电子装备制造企业和相关上下游供应商。同时，中国还拥有最大的电力电子装备应用市场，无论是快速发展的高速铁路还是蓬勃建设的特高压电网，都对于高性能电力电子装备有着强烈的需求。现阶段，中国正处于从全球制造中心向全球设计中心转变的关键阶段，而这“惊险一跃”并不容易，其中的艰辛、困难不言而喻。

控制是电力电子变换器设计的核心问题，而数学模型是实现精确控制的基础。国内现有关于电力电子变换器的著作偏应用较多，而关于基础理论的讨论较少。这种现象本身与国内电力电子行业应用的快速发展相关，具有其合理性。但是，关于基础理论的思考和研究才是支撑应用发展的动力源泉。知行合一，方得始终。这也是译者考虑翻译本书的初衷。

本书主要作者在电力电子及其相关领域工作 30 余年，理论与实践均积累深厚。书中内容立足于电力电子、控制系统和信号处理的学科交叉，覆盖部分工业电子领域。本书涵盖了电力电子变换器建模的绝大多数方面，以及已经证明有效并广泛使用的控制方法。书中关于每个问题都将理论和实践相结合，并给出直观的案例。书中案例研究问题源于工程实际，并给出完整的求解过程。本书应用 MATLAB<sup>®</sup> - Simulink<sup>®</sup> 软件，给出了必要的仿真和注解，以便读者深刻理解控制结构运行的要点。

本书可作为电力电子领域硕士研究生教材使用，也可供从事电力电子技术领域研究工作的研究者和专业人士参考。

本书的翻译工作主要由袁敞、翟茜等完成，在翻译过程中肖湘宁教授给予了许多技术指导和支 持，研究生赵天扬、丁雨霏、谢佩琳、郝毅等参与了部分章节的翻译工作，特别是赵天扬在文字校正方面投入了大量精力，在此向他们表示感谢。还要特别感谢机械工业出版社刘星宁编辑，没有他的辛劳付出就没有本书的顺利出版。

由于时间紧迫，加之译者水平有限，翻译难免存在许多不妥之处，恳请读者批评指正。

# 原书序一

过去的30年，在关于功率变换器领域的研究过程中，我见证了人们对于电力电子领域产业的日益关注，并看到相应功率变换器的应用呈现指数增长。因此，当前我们可以找到功率变换器林林总总的应用，如移动设备、电池充电器、先进照明系统、交通运输（纯电动或混合动力汽车，火车或飞机）、储能系统，以及可再生能源、电能质量与配电网的融合。

而且，我们可以说上述也仅是少数几个例子，表明功率变换器对于提高系统性能、开拓新兴市场的重要性。而功率变换器对于系统性能的提高涵盖了效率、鲁棒性、通用性、减小体积、易维护和低成本等方面。今天的功率变换器是无处不在的，已经渗透到大多数现代工业的战略部分。

功率变换器的发展需要多领域的专业知识，如半导体、电路设计、高等数学、建模和变换器之间的控制。新兴市场中经常需要应对具有复杂行为的非线性负载，因此需要设计人员对先进技术有深刻的认识，以满足竞争激烈的市场所要求的系统稳定性、可控性和新的性能指标。赢得新兴市场中的挑战，只能通过对于变换器深刻的理解，其中数学模型是实现精确控制的基础。从这个意义上说，我认为编写本书重要而且及时，它能够帮助工程师实现这些目标。本书提供了包含现有建模方法和控制设计技术的全面视角，对新手和专家都很有帮助。同时，本书可以认为是独立完整的，从最基本的技术过渡到最先进的，并给出了许多应用实例，有助于复杂概念的澄清。

本书涵盖了功率变换器建模的绝大多数方面，以及已经证明有效并广泛使用的控制方法。

考虑教学目的，本书提供了从无到有的视角，始于电力基础定律、开关行为，直到可用于控制目的的变换器的动力学模型。同时，它也为读者提供了设计工具，用于设计许多类型开关变换器的各种控制结构（具有直流和交流环节）。

本书另外一个特点是，首先介绍理论方法，然后给出实际情况下每种建模和控制的方法。每章（除了导言章节外）至少包含一个案例研究，来说明该章节所述的概念。

本书的主要读者是硕士研究生，但它仍然适用于从学术界到工业界相关领域的专家。本书分为两部分，分别致力于电力电子变换器的建模与控制。

第一部分从建模主题的介绍性章节开始。第3章中描述了开关（拓扑）模型——基于微分方程的物理描述和关于理想开关的经典假设。模型成功地捕捉了系统的时变特性，可用于建立其他模型（例如，平均或采样数据模型）或直接用于仿真和/或电磁兼容性分析（例如，开关谐波）。它也可以用于滑模控制律设计。第4章研究了DC-DC变换器经典（状态空间）平均模型的大、小信号行为并评估了其局限性。已知经典模型的局限性之后，继续探索有两种选择：首先，广义平均建模，这拓展到了高阶分量动力学行为（如具有交流环节的功率变换器）；第

二，基于模式分离的降阶模型，适用于描述断续导通模式下的变换器，或者也可用于降阶建模以降低系统复杂度（分别在第5章、第6章论述）。

本书第二部分的论述采用了第一部分获得的结果，即说明不同模型如何应用于控制。在回顾了一些前提条件后，分别在第7章和第10章给出了线性和非线性控制的基础知识。

用于DC-DC功率变换器和具有交流环节的变换器的线性控制方法是分别展开论述的。而对于DC-DC变换器的控制设计主要依赖于第8章的比例-积分和超前滞后控制，对于包含交流环节的变换器，有必要采用一些更复杂的方法，如 $dq$ 或复合 $dq$ 静止坐标系或谐振控制器，详细论述在第9章给出。

非线性控制应用于电力电子变换器则相对较新（20世纪90年代初）。电气工程师不熟悉这些方面有以下几个原因，其中第一个也是最重要的一个是相关方法难以理解。作者们努力以直观的方式来实现这种控制律，同时也给出了相关理论推导，以支撑这种直观的方法。相关非线性控制方法已被分为两大类：连续和不连续。第一类连续非线性控制方法以反馈线性化控制为代表，在第11章论述；还有基于能量的控制方法、稳定控制和无源控制，在第12章讲解。这两类方法的组合显然是可能的。第二类包括变结构控制，也称为滑模控制，在第13章详细介绍。这种控制被广泛使用在电力电子电路以确保系统内在鲁棒性。其局限性主要是由于结构限制、内部动态和开关频率不确定，书中也给出了相关论述。

总之，本书给出了一系列的概念，以协同的方式排布所有内容，借此来帮助读者更好地理解控制设计。本书通过给出有价值、广泛应用的控制策略的有效整合，致力于完善已有的文献。

**Leopoldo García Franquelo**

**西班牙塞维利亚**

## 原书序二

电力电子系统的建模和控制问题的困难之处在于，它们的电路拓扑中包含连续时间元件（如电阻、电感、电容）和具有电子器件接口的电压源、电流源（电子器件包含二极管和电子开关，典型的如晶闸管、晶体管和 MOSFET）。这样便形成了同时涉及连续和离散行为的系统类型。与大多数技术分支一样，对于使用计算机仿真力量的期望首先促成了一系列数学模型的发展。然而，这些设备用于其他系统的控制，已经存在经典的控制解决方案。因此，使用新模型评估并进一步拓展经典控制解决方案，然后尝试在设计中使用先进的控制方法，这些仅只是一小步；关键的挑战是引入更多的解析方法和基于计算机的方法，同时确保不忽视实际的应用和实际工程的局限性以及出现的约束。由 Seddik Bacha、Iulian Munteanu 和 Antoneta Iuliana Bratcu 编写的《电力电子变换器的建模和控制》非常好地实现了这些目标。

本书由两部分构成：

• 第一部分，建模，共 5 章，从最简单的问题：“什么是模型？”开始，通过 4 章专门介绍开关模型、经典平均模型、等效平均电源模型和通用平均模型。建模方法使用状态空间模型的形式，在实际应用和教学时具备许多优点，例如便于直接构建 MATLAB 仿真模型。

• 第二部分，控制，共 7 章。这部分开篇的章节给出了电力电子控制的一般概述。接着的两个章节是关于线性系统控制方法的。这些线性控制章节的第二部分特别关注了 DC-AC 和 AC-DC 功率变换器的控制。然后在 4 章的基础上给出更先进控制与非线性方法。与线性控制章节一样，本组章节从相关的数学方法的一般概述开始，其余 3 章给出具体的非线性控制方法：分别是反馈线性化、基于能量的方法和变结构（滑模）控制设计。

本书的一个显著特点是在每一章中都经常使用案例研究材料。在全书中，不断给出相关实际应用的参考文献，以及所描述的建模和控制方法的优缺点。对于学生读者来说，每一个重要的研究章节都提供了思考题，前几个问题给出了解答，然后读者被邀请去求解一些待解决的问题。

本书的作者已经在一起工作了 10 年左右，有电力电子及相关专业的工作经验。Bacha 教授从 1990 年以来一直从事相关领域的教学和研究工作。最重要的是，他已经为硕士研究生教授了这门高级课程若干年。Munteanu 博士和 Bratcu 博士曾在控制工程领域工作，并且对风能系统进行研究。事实上，他们关于这个话题合著了（与 N-A. Cutululis 和 E. Ceangă）《风能系统优化控制》（书号 978-1-84800-079-7，2008）。

**M. J. Grimble**

**M. A. Johnson**

英国，苏格兰，格拉斯哥

# 原书前言

现代电力电子学开启了电能处理的新时代。在这种背景下，对于正常运行的电力系统，电力电子控制系统已经成为不可或缺的。在过去的几十年，控制系统理论和信号处理技术在电力电子领域中成为了技术创新的前沿。随着这个趋势，本书将控制系统理论应用于电力电子领域，可供从事电力系统领域研究工作的在校学生和专业人士参考。本书为读者提供了工具，可以获取多种类型开关变换器的不同模型和控制结构（直流和交流电路）。这些主题不仅涵盖线性控制技术（该技术源于20世纪80年代，普遍采用比例积分控制器），而且还涵盖了现代非线性连续或变结构控制。

本书来源于 Seddik Bacha 教授 1994 年来为法国格勒诺布尔理工学院和约瑟夫傅里叶大学电气工程硕士和本科生开设的课程——“电力电子拓扑的建模和控制”。法国格勒诺布尔电气工程实验室在开关变换器和可再生能源转换控制方面的研究工作也丰富了本书的内容和案例研究。本书的编写得到法国国立高等工艺学校前校长 Jean - Paul Hautier 教授的支持鼓励。

本书的编写方式与主要内容相呼应，立足于电力电子、控制系统和信号处理的学科交叉，覆盖部分工业电子领域。本书编写时假设读者具备上述学科的基本知识。在书中，每个问题都有理论和实践的方法，并且给出直观的案例。案例研究问题源于实际，并给出最完整的解决途径。本书给出了必要的仿真和注解，以便读者深刻理解开关变换器控制结构闭环运行的要点。

为了便于电力工程师和控制工程师理解，本书做了许多努力，包括丰富的参考书目以提供成熟领域的综合信息、关键术语的归并、完备的案例研究以及统一的表述符号和风格。

本书作者 Iulian Munteanu 博士和 Antoneta Iuliana Bratcu 博士，在罗马尼亚多瑙河下游大学 Emil Ceangă 教授处的求学和共同的工作经历对于本书的论述影响重大。我们感谢 Emil Ceangă 教授提供的宝贵建议，这些建议对于本书许多控制方法的教学演示颇具启发意义。

感谢西班牙塞维利亚大学的 Leopoldo García Franquelo 教授对我们工作的评价和对本书的认可。还要感谢法国格勒诺布尔理工学院的 Jean - Pierre Rognon 教授为提高本书的质量提供的有益意见和建议。

**Seddik Bacha**  
**Iulian Munteanu**  
**Antoneta Iuliana Bratcu**  
法国格勒诺布尔



# 目 录

译者序

原书序一

原书序二

原书前言

第 1 章 简介	1
1.1 电力系统中电力电子变换器的功能和目标	1
1.2 电力电子变换器建模、仿真和控制需求分析	2
1.3 本书内容的涉及范围和结构	3
参考文献	3

## 第一部分 电力电子变换器建模

第 2 章 电力电子变换器建模简介	5
2.1 模型	5
2.1.1 什么是模型	5
2.1.2 建模的范围	5
2.2 模型的类型	6
2.2.1 开关模型	8
2.2.2 采样数据模型	9
2.2.3 平均模型	10
2.2.4 大信号和小信号模型	10
2.2.5 行为模型	13
2.2.6 示例	14
2.3 模型应用	16
2.3.1 各种模型之间的联系	16
2.3.2 建模和控制之间的联系	16
2.3.3 模型的其他可能用途	16
2.4 本章小结	18
参考文献	18

第3章 开关模型 .....	19
3.1 数学建模 .....	19
3.1.1 通用数学框架 .....	19
3.1.2 双线性形式 .....	21
3.2 建模方法 .....	21
3.2.1 基本假定：状态变量 .....	21
3.2.2 通用算法 .....	22
3.2.3 示例 .....	23
3.3 案例研究：三相电压源型整流器 .....	29
3.4 本章小结 .....	36
思考题 .....	36
参考文献 .....	41
第4章 经典平均模型 .....	42
4.1 本章简介 .....	42
4.2 定义和基础知识 .....	43
4.2.1 滑动平均 .....	43
4.2.2 状态变量平均 .....	44
4.2.3 开关周期平均 .....	44
4.2.4 电力电子电路平均化完整过程 .....	44
4.3 平均方法 .....	45
4.3.1 图形法 .....	45
4.3.2 解析法 .....	46
4.4 平均化误差分析 .....	47
4.4.1 精确采样数据模型 .....	47
4.4.2 精确采样模型和精确平均模型之间的联系 .....	49
4.5 小信号平均模型 .....	51
4.5.1 连续小信号平均模型 .....	51
4.5.2 采样数据小信号模型 .....	52
4.5.3 示例 .....	52
4.6 案例研究：buck - boost 变换器 .....	54
4.7 平均模型的优点和局限性 .....	63
思考题 .....	63
参考文献 .....	75

第5章 通用平均模型 .....	77
5.1 本章简介 .....	77
5.2 原理 .....	78
5.2.1 基础知识 .....	78
5.2.2 与一阶分量模型的联系 .....	79
5.2.3 与经典平均模型的联系 .....	80
5.3 示例 .....	80
5.3.1 状态变量实例 .....	81
5.3.2 无源电路实例 .....	81
5.3.3 耦合电路实例 .....	81
5.3.4 开关函数 .....	83
5.4 平均方法 .....	84
5.4.1 解析法 .....	84
5.4.2 图形法 .....	85
5.5 通用平均模型和实际波形之间的联系 .....	86
5.5.1 从通用平均模型中提取时变信号 .....	86
5.5.2 从时变信号中提取通用平均模型 .....	87
5.6 采用通用平均模型表示交流变量中有功和无功分量 .....	89
5.7 案例研究 .....	92
5.7.1 感应加热电流源型逆变器 .....	92
5.7.2 串联谐振变换器 .....	96
5.7.3 通用平均模型的局限性：示例 .....	98
5.7.4 PWM 变换器 .....	100
5.8 本章小结 .....	110
思考题 .....	110
附录 .....	115
参考文献 .....	116
第6章 降阶平均模型 .....	118
6.1 本章简介 .....	118
6.2 原理 .....	119
6.3 通用方法 .....	120
6.3.1 交流变量示例：感应加热电流源型逆变器 .....	121
6.3.2 断续导通模式示例：buck - boost 变换器 .....	124
6.4 案例研究 .....	127

6.4.1 晶闸管控制电抗器建模 .....	127
6.4.2 DC - DC boost 变换器工作在断续导通模式 .....	129
6.5 本章小结 .....	134
思考题 .....	134
参考文献 .....	138

## 第二部分 电力电子变换器控制

第7章 电力电子变换器通用控制理论 .....	140
7.1 电力电子变换器控制目标 .....	140
7.2 电力电子变换器特殊的控制问题 .....	142
7.3 不同控制方法 .....	144
7.4 本章小结 .....	145
参考文献 .....	146
第8章 DC - DC 功率变换器线性控制方法 .....	147
8.1 线性化平均模型, 控制目标和相关的设计方法 .....	147
8.2 直接输出控制 .....	148
8.2.1 假设和算法设计 .....	148
8.2.2 buck - boost 变换器示例 .....	150
8.3 间接输出控制: 双环级联控制结构 .....	153
8.3.1 假设和算法设计 .....	154
8.3.2 双向 DC - DC 变换器示例 .....	157
8.3.3 带有非最小相位行为的 DC - DC 变换器双环级联控制结构 .....	160
8.4 通过极点配置调整系统动态的变换器控制方法 .....	164
8.4.1 假设和算法设计 .....	164
8.4.2 buck 变换器示例 .....	167
8.5 数字控制问题 .....	169
8.5.1 数字控制方法设计 .....	169
8.5.2 光伏应用中 boost DC - DC 变换器获取数字控制律示例 .....	171
8.6 案例研究 .....	173
8.6.1 用超前 - 滞后控制实现的 boost 变换器输出电压直接控制 .....	173
8.6.2 通过极点配置实现的 boost 变换器输出电压直接控制 .....	177
8.7 本章小结 .....	182
思考题 .....	183

参考文献	188
<b>第9章 DC-AC 和 AC-DC 功率变换器线性控制方法</b>	<b>190</b>
9.1 背景	190
9.2 旋转 $dq$ 坐标下控制方法	191
9.2.1 单相并网逆变器示例	195
9.3 谐振控制器	199
9.3.1 谐振控制的必要性	199
9.3.2 比例谐振控制的基础	200
9.3.3 设计方法	204
9.3.4 具体实现时的若干问题	209
9.3.5 复合 $dq$ 静止坐标系中谐振控制器的使用	212
9.3.6 三相并网逆变器示例	213
9.4 全波变换器控制	217
9.5 案例研究: PWM 三相并网逆变器 $dq$ 控制	223
9.5.1 系统建模	223
9.5.2 所采用控制结构的评述	224
9.5.3 内环(电流)控制器设计	225
9.5.4 内环仿真结果	226
9.5.5 外环(电压)控制器设计	228
9.5.6 外环仿真结果	229
9.6 本章小结	231
思考题	232
参考文献	239
<b>第10章 非线性控制数学工具概述</b>	<b>241</b>
10.1 问题和基本概念	241
10.1.1 微分几何要素	241
10.1.2 相对阶数和零动态	243
10.1.3 李雅普诺夫方法	245
10.2 电力电子变换器非线性控制方法概述	246
参考文献	247
<b>第11章 电力电子变换器反馈线性化控制</b>	<b>249</b>
11.1 反馈线性化基础知识	249
11.1.1 问题描述	249

11.1.2	主要结论	249
11.2	电力电子变换器的应用	252
11.2.1	反馈线性化控制律计算	252
11.2.2	实用设计方法	254
11.2.3	示例: boost DC - DC 变换器和 buck DC - DC 变换器	255
11.2.4	参数不确定性处理	258
11.3	案例研究: 反激式变换器反馈线性化控制	258
11.3.1	线性反馈设计	259
11.3.2	外环分析	262
11.3.3	不考虑右半平面零点的外环 PI 设计	262
11.3.4	考虑右半平面零点的外环 PI 设计	264
11.4	本章小结	266
	思考题	267
	参考文献	273
<b>第 12 章</b>	<b>基于能量的电力电子变换器控制方法</b>	<b>274</b>
12.1	基本定义	274
12.2	电力电子变换器稳定控制	275
12.2.1	通用非线性实例	276
12.2.2	线性化实例	277
12.2.3	稳定控制设计方法	278
12.2.4	示例: boost DC - DC 变换器稳定控制设计	278
12.3	无源控制方法, 动态系统的欧拉 - 拉格朗日通用表示	285
12.3.1	机械系统欧拉 - 拉格朗日原型	285
12.3.2	适用于电力电子变换器的欧拉 - 拉格朗日形式	286
12.3.3	电力电子变换器作为无源动态系统的通用表示	287
12.3.4	欧拉 - 拉格朗日形式的变换器建模示例	288
12.4	电力电子变换器无源控制	290
12.4.1	理论背景	290
12.4.2	无源控制的局限性	292
12.4.3	参数估计: 自适应无源控制	292
12.4.4	无源控制设计算法	292
12.4.5	示例: boost DC - DC 变换器无源控制	293
12.5	案例研究: boost DC - DC 变换器无源控制	298
12.5.1	基本无源控制设计	299
12.5.2	阻尼注入调整	300

12.5.3	闭环小信号稳定性研究	302
12.5.4	自适应无源控制设计	305
12.5.5	数值仿真结果	306
12.6	本章小结	311
	思考题	312
	参考文献	317
<b>第 13 章</b>	<b>电力电子变换器变结构控制</b>	<b>319</b>
13.1	本章简介	319
13.2	滑模曲面	320
13.3	通用理论结论	322
13.3.1	滑模曲面的可达性: 横截条件	322
13.3.2	等效控制	324
13.3.3	滑模曲面上的动态	324
13.4	变结构控制设计	325
13.4.1	通用算法	325
13.4.2	应用实例	325
13.4.3	实用设计方法	327
13.5	补充事项	329
13.5.1	时变开关曲面案例	329
13.5.2	开关曲面的选择	330
13.5.3	开关函数的选择	331
13.5.4	开关频率的局限性	332
13.6	案例分析	335
13.6.1	单相 boost 功率因数校正变换器变结构控制	335
13.6.2	作为 MIMO 系统的三相整流器变结构控制	342
13.7	本章小结	350
	思考题	350
	参考文献	359
<b>本书总结</b>		<b>361</b>
	参考文献	362

# 第1章 简介

简介部分给出本书在电力电子和控制系统学科交叉领域的定位。概述了电力电子变换器作为电力系统功率处理单元的功能和目标，并强调了其中控制系统的重要性；之后，对开关变换器建模和仿真的必要性进行了评估；最后阐述了本书涉及的范畴及内容组织方式，并给出了内容概要。

## 1.1 电力系统中电力电子变换器的功能和目标

电力电子领域主要关注通过可控电子器件对电能进行处理。其核心是采用电力电子（开关）变换器来控制功率结构内的电能流动，总的目的是结合应用需求进行输出功率调节，这个目标显然决定了原始输入功率的处理方式。考虑其具体实现时，一种控制结构随之产生：生成相应的控制输入，有效地作用于变换器，从而改变其行为（Erikson 和 Maksimović, 2001）。

功率结构和变换器之间的密切联系，催生了新的电力环境，使功率结构变得更加多样、灵活、高效。基于微处理器的控制设备和高品质开关设备的有力结合，显著提高的功率处理能力和输出电能质量，均有力促进了上述变革的发展（Bose, 2001）。

电力电子变换器可以实现各种基本功能。DC - DC 变换器输入侧为直流电压，可以输出不同幅值和极性的直流电压。DC - AC 变换器（逆变器）将直流电压转换为幅值和频率可变的双极性交流电压。AC - DC 变换器整流交流电压，输出主要包含直流分量的单极电压。上述设备的输入电流波形和输出电压直流值都是可控的。流经这些系统的功率是可逆的，也就是说，变换器是双向的——因此输入端口和输出端口可以互换（Mohan 等, 2002）。同时，对应于实际应用需求，某些情况下需要增加滤波环节及输入和输出间的隔离。

电力电子变换器有大量的应用，如电机运动控制、开关电源（SMPS）、照明驱动、储能、分布式发电、有源电力滤波器、柔性交流输电系统（FACTS）、可再生能源变换、车辆应用和嵌入式技术。

在这些系统中，功率变换器的控制是无处不在的，它负责系统的正常运行（Kassakian 等, 1991）。从变换器的作用来看，控制目标可能包括众多功能目标，导致控制结构相应复杂，但又不能对变换器功率效率和输出电能质量产生不利影响。由于硬开关过程和高频调制，变换器控制系统可能在污染最严重的（噪声）环境中工作（Tan 等, 2011）。本质上的非线性、边界性、参数和负载变化（后者



在大多数情况下是随机变化)让变换器运行控制变得复杂(Sira - Ramírez 和 Silva - Ortigoza, 2006)。然而,控制总是可以让功率变换器运行在更优状态下。

因此,为确保电力电子变换器合理运行,其控制至关重要,需要针对每个应用进行细致分析,精心选择最合适的系统参数和最恰当的控制设计方法。

## 1.2 电力电子变换器建模、仿真和控制需求分析

由于要实现多个控制目标,开关变换器的设计是一项重要的任务。在设计过程中确定优化目标时,成本、规格、效率、电能质量和整体可靠性都必须考虑。运行和能源效率的良好表现取决于选择合适的拓扑结构和器件类型、电压和电流处理能力所决定的尺寸以及开关频率。电压和电流滤波器是影响电能质量和变换器响应时间的关键。门级驱动的选择和设计,包括调制(如PWM)环节、电气绝缘等,这些都影响控制输入传递的准确性。传感器的插入增加了功率转换结构的复杂性并会对可靠性产生负面影响。

对于一组给定规格的变换器,设计工程师必须执行上述操作,还需要考虑在整个功率变换器运行中控制器和控制回路的存在和影响,这通常增加了设计过程的迭代次数。

总之,电力电子变换器的分析和设计存在重大挑战(Maksimović等,2001)。电力电子变换器的建模与仿真及其相关的控制结构可以减轻困难,并且帮助设计工程师更好地理解变换器的运行。有了这些知识,设计师可能预测电路的性能指标在变化的运行条件下是否满足规格要求。

电路工作在高频开关状态,通过仿真获得电路行为所需的计算能力是重要的。在这方面,电路模型的类型和精度在仿真和计算机辅助设计中至关重要。过于简单的模型可能无法表现正确的变换器行为;相反地,模型过于复杂可能导致仿真太过缓慢,以至于不具实用价值。

建模是变换器控制设计中的一个重要步骤。传统的控制方法总是使用某种形式的模型,以操纵变换器低频(平均)特性,使之符合设定的动态性能要求(Sun和Grotstollen,1992;Blasko和Kaura,1997)。用于控制目的的模型和用于电路设计或者仿真的模型可以是不同的(通常更简单)。

根据变换器在特定应用中的作用设置控制目标,整合控制方法,确定所使用模型的合理性。一般来说,良好的设计与输出电能质量相关,必须满足特定标准。以开关电源为例,控制的目的在于给直流负载提供恒定的直流电压(电压变化必须限定在围绕额定值的一定范围内),而不受负载变化的影响。对于整流器,可能会强调双重目标:调节输出电压,同时控制吸收的无功功率。独立运行的逆变器必须输出与负载无关的恒压恒频电压波形。有源电力滤波器处理电能质量问题,控制的目标是减少高阶谐波,同时维持功率结构各部分之间的功率平衡(Kannan和Al-