



国际电气工程先进技术译丛



# 电力电子中的控制 电路实用设计指南

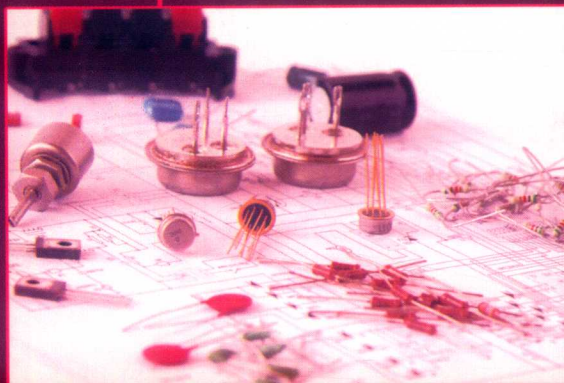
**Control Circuits in Power Electronics:  
Practical Issues in Design and Implementation**

[西班牙] 米格尔·卡斯蒂亚 (Miguel Castilla) 主编  
宁圃奇 李磊 译

非  
外  
借



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

# 电力电子中的控制电路 实用设计指南

Control Circuits in Power Electronics: Practical Issues in Design and Implementation

[西班牙] 米格尔·卡斯蒂亚 (Miguel Castilla) 主编

宁圃奇 李 磊 译



机械工业出版社

本书介绍了电力电子变换器的控制,主要涵盖了滑模控制技术、滞回控制技术和基于 DSP 或 FPGA 的数字控制技术等,以直-直变换器、高强度气体放电灯镇流器、三相单位功率因数整流器、电压源型逆变器等为设计案例,系统阐述了控制原理、电路设计技术和硬件开发技术。本书介绍了当前国际范围内使用最为广泛的控制方案,以及未来电力电子控制电路的发展趋势。本书主要面对电力电子专业的师生,以及从事电力电子变换器的研发人员、生产人员和应用技术人员,既可以作为授课拓展材料或专业参考书,也可作为其他专业的技术人员、管理人员、市场预测人员的参考资料。

Original English Language Edition published by IET.

Copyright © 2016 The Institution of Engineering and Technology, All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from IET. 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 IET 授权机械工业出版社在中国境内地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2017-7111 号。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力电子中的控制电路实用设计指南/(西)米格尔·卡斯蒂亚(Miguel Castilla)主编;宁圃奇,李磊译.—北京:机械工业出版社,2019.5

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Control Circuits in Power Electronics: Practical Issues in Design and Implementation  
ISBN 978-7-111-62262-8

I. ①电… II. ①米… ②宁… ③李… III. ①控制电路-电路设计 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 049458 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:张俊红 责任编辑:阎洪庆

责任校对:肖琳 封面设计:马精明

责任印制:张博

唐山三艺印务有限公司印刷

2019 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18.5 印张·585 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62262-8

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

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

本书针对电力电子变换器，以电力电子热门应用领域，如直-直变换器、高强度气体放电灯镇流器、三相单位功率因数整流器、电压源型逆变器等为设计案例，系统阐述了基于模拟控制电路和数字控制电路的控制技术、电路设计技术和硬件开发技术；涵盖的主题包括滑模控制技术、滞回控制技术和基于 DSP 或 FPGA 的数字控制技术等当前国际范围内使用最为广泛的控制方案。本书还专门介绍了未来电力电子控制电路的发展趋势。本书对电力电子专业的师生，以及从事电力电子变换器的研发人员、生产人员和应用技术人员都有较大帮助。

本书主编 Miguel Castilla 博士是加泰罗尼亚理工大学电子工程系的教授，研究领域包括电力电子技术、可再生能源技术和非线性控制理论，在 IEEE Industrial Electronics Magazine、IEEE Transactions on Industrial Electronics、IEEE Transactions on Power Electronics、IEEE Transactions on Smart Grid 和 IET Power Electronics 等电力电子领域顶级期刊发表论文 50 余篇。

本书由中国科学院电工研究所宁圃奇研究员和在读博士研究生李磊翻译。限于译者水平，书中难免有误译和理解欠妥之处，敬请读者批评指正。

在本书的翻译出版过程中得到了杭州电子科技大学杭丽君教授、中国科学院电工研究所李子欣与温旭辉研究员的支持和指导，在此表示衷心感谢。译者也借此机会对中国科学院电工研究所研究生曹瀚、袁天舒和柴晓光等的协助表示感谢！

译者

# 原书前言 >

电力电子技术是快速且有效转换电能的技术。在电力电子技术中，控制电路是保持功率变换稳定运行和高性能的关键。控制电路对功率变换性能具有决定性影响，例如效率、稳态误差（静态特性）、瞬态响应、系统稳定性和鲁棒性（动态特性）等。控制电路的基本单元包括检测单元、控制算法单元和调制单元三大部分。检测单元用来实时测量变换器当前的状态，以输入信号的形式提供给控制算法单元以进行后续控制；控制算法单元一般会根据设定的控制目标和检测出的当前状态对变换器进行控制；调制单元通过控制功率器件的开关来具体实现控制算法单元的指令。除了这些单元之外，控制电路的硬件开发水平也会对变换器的动静态性能产生影响。例如，变换器瞬态响应的速度和灵活性直接受制于控制电路硬件技术。

本书介绍了电力电子变换器的控制电路，分为三个部分——模拟控制电路、数字控制电路和电力电子控制电路的新发展趋势。

第1部分概述了当前以模拟电路作为主要控制手段的各类应用，介绍了相关的背景知识，便于从业人员以此设计出相关模拟控制电路，实现优异的性能。本部分针对领域内的热门主题，对控制电路的设计和具体实现方法进行了详细描述。本部分还介绍了直-直变换器、单相单位功率因数整流器、面向光伏应用的三相并网逆变器设计实例。

第2部分介绍了以数字电路作为主要控制手段的解决方案，主要包括：微控制器（MCU）、现场可编程门阵列（FPGA）和数字信号处理器（DSP）等，这些方案都是前沿技术的代表，有着广泛的应用。本部分的重点是，面向可再生能源直-直变换器的数字控制解决方案、用于高强度放电灯的电子镇流器、具有单位功率因数校正功能的三相整流器、三相电压源型逆变器和多电平变换器。本部分主要针对从事数字控制电路设计的相关人员，详述了控制算法和调制方案。

最后一部分介绍了控制电路的最新发展和电力电子控制电路的新趋势，讨论了前沿的研究工作，主要涵盖了开关电容变换器、用于并网控制的双核数字信号处理器（具有控制和通信功能）、能够对开关电源进行高效控制的智能驱动单元，以及使用遗传算法和蚁群优化算法的智能优化设计方法等。

本书的主编再次感谢所有参与者，感谢他们在本书编写过程中的出色工作和充分合作，并感谢 IET 的编辑和印刷人员。

Miguel Castilla  
Vilanova i la Geltrú

# 目 录 >>

译者序

原书前言

## 第 1 部分 模拟控制电路 ..... 1

### 第 1 章 基于 PWM 的直 - 直变换器滑模控制 方法 ..... 3

1.1 简介 ..... 3

1.2 滑模控制理论简述 ..... 3

1.3 基于 PWM 的滑模控制 ..... 5

1.4 基于 PWM 的电压滞回控制 ..... 5

1.5 基于 PWM 的电流滑模滞回控制 ..... 11

1.6 设计经验 ..... 13

1.7 小结 ..... 16

参考文献 ..... 16

### 第 2 章 合成纹波直 - 直变换器的滞回控制 方法 ..... 18

2.1 基于滞回控制器的直 - 直变换器 ..... 18

2.2 组成元件和非理想因素 ..... 19

2.2.1 变换器 ..... 20

2.2.2 载波生成电路 ..... 21

2.2.3 滞回控制器 ..... 22

2.2.4 电压反馈 ..... 23

2.3 合成载波发生电路 ..... 26

2.3.1 利用无源滤波器件的合成载波  
发生电路 ..... 26

2.3.2 利用有源滤波器件的合成载波

发生电路 ..... 29

2.4 负载电流前馈 ..... 30

2.5 线性模型 ..... 30

2.5.1 合成纹波发生器建模 ..... 31

2.5.2 滞回控制器模型 ..... 32

2.6 小结 ..... 32

参考文献 ..... 32

## 第 3 章 单周期控制单相电源逆变器 ..... 33

3.1 简介 ..... 33

3.2 单周期控制的基本原理和应用 ..... 34

3.3 光伏领域应用 ..... 37

3.3.1 单相光伏逆变器中的 OCC ..... 37

3.3.2 三相光伏逆变器中的 OCC ..... 41

3.4 通过庞加莱图进行 OCC 稳定性分析 ..... 43

3.5 小结 ..... 45

参考文献 ..... 45

## 第 2 部分 数字控制电路 ..... 49

### 第 4 章 数字 PWM 控制的直 - 直开关 变换器 ..... 51

4.1 数字控制环 ..... 51

4.1.1 时序图和控制过程 ..... 53

4.1.2 控制环延迟 ..... 53

4.2 动态建模和系统级补偿器设计 ..... 54

|       |                  |    |
|-------|------------------|----|
| 4.2.1 | 控制环小信号建模         | 54 |
| 4.2.2 | 补偿器设计和离散化        | 55 |
| 4.3   | 数字化问题和极限循环期      | 56 |
| 4.3.1 | A/D 数字化问题        | 56 |
| 4.3.2 | 调制器数字化问题         | 57 |
| 4.3.3 | 抑制极限循环期的设计       | 57 |
| 4.4   | 控制器的设计与实现        | 59 |
| 4.4.1 | 模拟 - 数字转换器 (ADC) | 59 |
| 4.4.2 | 数字补偿器            | 61 |
| 4.4.3 | 数字 MPM           | 62 |
| 4.5   | 小结               | 64 |
|       | 参考文献             | 65 |

## 第5章 基于单片机的高强度气体放电灯

|       |               |    |
|-------|---------------|----|
|       | 镇流器控制         | 67 |
| 5.1   | HID 灯的工作原理和模型 | 67 |
| 5.1.1 | HID 灯         | 67 |
| 5.1.2 | HID 灯运行需求     | 68 |
| 5.1.3 | HID 灯建模       | 69 |
| 5.2   | HID 灯的电子镇流器   | 70 |
| 5.2.1 | 交流应用的电子镇流器    | 70 |
| 5.2.2 | 直流工况下的电子镇流器   | 71 |
| 5.3   | 电子镇流器中的数字控制   | 72 |
| 5.3.1 | HID 灯的常规控制策略  | 72 |
| 5.3.2 | PFC 变换器       | 72 |
| 5.3.3 | 直 - 直变换器      | 72 |
| 5.3.4 | 低频逆变器         | 73 |
| 5.3.5 | 点火器           | 73 |
| 5.3.6 | 保护电路          | 73 |
| 5.4   | 应用实例          | 73 |
| 5.4.1 | HID 灯镇流器      | 73 |
| 5.4.2 | 单片机 PIC16F684 | 74 |
| 5.4.3 | 控制策略          | 75 |
| 5.4.4 | HID 灯启动       | 76 |
| 5.4.5 | 预热过程          | 76 |
| 5.4.6 | 稳定运行状态        | 76 |

|       |      |    |
|-------|------|----|
| 5.4.7 | 保护   | 77 |
| 5.4.8 | 实验结果 | 77 |
| 5.5   | 小结   | 79 |
|       | 参考文献 | 79 |

## 第6章 基于 FPGA 的整流器直接滑模

|       |                   |    |
|-------|-------------------|----|
|       | PWM 控制            | 82 |
| 6.1   | 简介                | 82 |
| 6.2   | 滑模控制：基本理论与变换器应用   | 83 |
| 6.3   | 单相 PWM 整流器的直接滑模控制 | 83 |
| 6.3.1 | 单相 PWM 整流器模型      | 83 |
| 6.3.2 | 稳态工作限制            | 84 |
| 6.3.3 | 直接滑模控制的实现         | 85 |
| 6.3.4 | 基于 FPGA 的控制器      | 87 |
| 6.4   | 三相 PWM 整流器的直接滑模控制 | 89 |
| 6.4.1 | 三相 PWM 整流器模型      | 89 |
| 6.4.2 | 稳态工作限制            | 90 |
| 6.4.3 | 直接滑模控制的具体实施       | 91 |
| 6.4.4 | 基于 FPGA 的控制器      | 94 |
| 6.5   | 小结                | 97 |
|       | 参考文献              | 98 |

## 第7章 基于 DSP 控制的三相单位功率因数

|       |                                             |     |
|-------|---------------------------------------------|-----|
|       | 整流器                                         | 99  |
| 7.1   | 简介                                          | 99  |
| 7.2   | 变换器控制用 DSP 电路                               | 99  |
| 7.3   | 三相单位功率因数整流器拓扑                               | 100 |
| 7.3.1 | 三相整流器：VSR 和 CSR                             | 101 |
| 7.3.2 | 新型拓扑：Y - 整流器、 $\Delta$ - 整流器、<br>VIENNA 整流器 | 103 |
| 7.4   | 锁相环策略                                       | 104 |
| 7.4.1 | 三相系统中具有固定采样<br>周期的 PLL                      | 105 |
| 7.4.2 | 具有固定采样周期的单相 PLL                             | 106 |
| 7.4.3 | 三相系统中具有变采样<br>周期的 PLL                       | 109 |



|                                                                  |            |                                                |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------|------------|
| 7.4.4 具有变采样周期的单相 PLL .....                                       | 111        | 9.1 简介 .....                                   | 162        |
| 7.4.5 PLL 总结 .....                                               | 111        | 9.2 基于 FPGA 和 DSP 的多功能数字<br>控制器 .....          | 162        |
| 7.5 UPF 整流器的控制策略 .....                                           | 113        | 9.2.1 控制平台 .....                               | 162        |
| 7.5.1 基于 $dq$ 坐标系的控制 .....                                       | 113        | 9.2.2 DSP 与 FPGA 的同步 .....                     | 164        |
| 7.5.2 基于 $pq$ 理论的控制 .....                                        | 114        | 9.2.3 FPGA 功能的实现 .....                         | 165        |
| 7.5.3 预测控制 .....                                                 | 118        | 9.2.4 触摸屏的实现 .....                             | 165        |
| 7.6 小结 .....                                                     | 122        | 9.3 面向直-直变换器的新拓扑和控制<br>策略开发 .....              | 167        |
| 参考文献 .....                                                       | 122        | 9.3.1 高变比无源钳位电路 .....                          | 167        |
| <b>第 8 章 并网用三相电压源型逆变器的<br/>DSP 控制 .....</b>                      | <b>126</b> | 9.3.2 三相交错并联高变比升压变换器 .....                     | 171        |
| 8.1 简介 .....                                                     | 126        | 9.4 新拓扑在光伏发电中的应用 .....                         | 177        |
| 8.2 并网用三相电压源型逆变器的<br>建模与控制 .....                                 | 127        | 9.5 小结 .....                                   | 177        |
| 8.2.1 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的建模 .....                              | 127        | 参考文献 .....                                     | 178        |
| 8.2.2 同步旋转坐标系下的模型 .....                                          | 132        | <b>第 10 章 多电平变换器的拓扑结构、调制<br/>方法和控制策略 .....</b> | <b>180</b> |
| 8.2.3 通过 LCL 滤波器并网光伏逆变器的<br>控制 .....                             | 137        | 10.1 简介 .....                                  | 180        |
| 8.3 $\alpha\beta$ 静止坐标系下并网光伏逆变器的<br>DSP 控制 .....                 | 140        | 10.2 多电平变换器拓扑结构 .....                          | 181        |
| 8.3.1 $\alpha\beta$ 静止坐标系下电流环的设计和<br>实现 .....                    | 140        | 10.2.1 二极管钳位变换器 (DCC) .....                    | 181        |
| 8.3.2 $\alpha\beta$ 静止坐标系下电压环的设计和<br>实现 .....                    | 145        | 10.2.2 飞跨电容 (FC) 变换器 .....                     | 182        |
| 8.4 $dq$ 坐标系下通过 LCL 滤波器并网光伏逆变<br>器的 DSP 控制 .....                 | 149        | 10.2.3 级联式 H 桥多电平 (CHB)<br>变换器 .....           | 183        |
| 8.4.1 同步旋转坐标系下电流环的设计和<br>实现 .....                                | 149        | 10.2.4 模块化多电平变换器 (MMC) .....                   | 185        |
| 8.4.2 同步旋转坐标系下电压环的设计和<br>实现 .....                                | 154        | 10.3 多电平变换器的调制技术 .....                         | 187        |
| 8.5 测试结果 .....                                                   | 154        | 10.3.1 低开关频率调制技术 .....                         | 187        |
| 8.6 小结 .....                                                     | 160        | 10.3.2 高开关频率调制技术 .....                         | 187        |
| 参考文献 .....                                                       | 160        | 10.3.3 MMC 中环流电流的控制和<br>电容电压平衡 .....           | 193        |
| <b>第 9 章 基于 FPGA 和 DSP 控制的直-直<br/>变换器在可再生能源领域中的<br/>应用 .....</b> | <b>162</b> | 10.3.4 共模电路和差模电路 .....                         | 193        |
|                                                                  |            | 10.4 数字控制器在多电平变换器中的<br>应用 .....                | 197        |
|                                                                  |            | 10.4.1 低电平数变换器使用的集中式<br>数字控制器 .....            | 197        |
|                                                                  |            | 10.4.2 高电平数变换器使用的分布式数字<br>控制器 .....            | 197        |



|               |     |
|---------------|-----|
| 10.5 小结 ..... | 199 |
| 参考文献 .....    | 199 |

### 第3部分 电力电子控制电路的

|           |     |
|-----------|-----|
| 新趋势 ..... | 207 |
|-----------|-----|

### 第11章 IGBT 模块智能驱动发展现状

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 分析——变换器核心的检测、<br>控制、管理 ..... | 209 |
|------------------------------|-----|

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 11.1 门极驱动简介 .....                    | 209 |
| 11.1.1 电力电子系统、IGBT 和门极驱动<br>单元 ..... | 209 |
| 11.1.2 监测和控制系统 .....                 | 213 |
| 11.2 新型门极驱动及其系统构架 .....              | 214 |
| 11.2.1 系统集成 .....                    | 214 |
| 11.2.2 高温运行能力 .....                  | 215 |
| 11.3 集成数据采集方法 .....                  | 216 |
| 11.3.1 电压测量 .....                    | 217 |
| 11.3.2 电流测量 .....                    | 217 |
| 11.3.3 温度测量 .....                    | 219 |
| 11.4 智能控制 .....                      | 219 |
| 11.4.1 状态监测 .....                    | 220 |
| 11.4.2 开关行为控制 .....                  | 220 |
| 11.4.3 功率器件串联 .....                  | 222 |
| 11.4.4 功率器件并联 .....                  | 223 |
| 11.5 小结 .....                        | 224 |
| 参考文献 .....                           | 224 |

### 第12章 集成开关电容变换器的控制 ...

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 12.1 简介 .....              | 227 |
| 12.2 自举电路（充电泵）设计 .....     | 227 |
| 12.3 控制策略 .....            | 229 |
| 12.3.1 两级调制策略 .....        | 230 |
| 12.3.2 电路重构机制 .....        | 232 |
| 12.3.3 脉冲频率调制和脉冲控制策略 ..... | 234 |
| 12.3.4 载波移相 .....          | 236 |

|               |     |
|---------------|-----|
| 12.4 小结 ..... | 237 |
| 参考文献 .....    | 238 |

### 第13章 基于 DSP 的三相单位功率因数整流 器控制策略 .....

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 13.1 简介 .....                | 239 |
| 13.2 变换器模型 .....             | 240 |
| 13.3 三相变换器的常规滑模控制方法 .....    | 240 |
| 13.4 变换器的解耦模型 .....          | 241 |
| 13.4.1 解耦模型的推导 .....         | 242 |
| 13.4.2 模型的可控性和可观性 .....      | 243 |
| 13.5 基于观测器的滑模控制策略 .....      | 243 |
| 13.5.1 直接解耦模型 .....          | 244 |
| 13.5.2 KF 策略 .....           | 244 |
| 13.5.3 $Q$ 与 $R$ 矩阵的选择 ..... | 244 |
| 13.5.4 降低计算量 .....           | 245 |
| 13.6 UPFR 的滑模控制 .....        | 245 |
| 13.6.1 内控制环 .....            | 245 |
| 13.6.2 外控制环 .....            | 245 |
| 13.7 固定开关频率的滑模控制 .....       | 246 |
| 13.7.1 滞回窗口的计算 .....         | 246 |
| 13.7.2 SDA 技术 .....          | 247 |
| 13.7.3 开关频谱分析 .....          | 249 |
| 13.8 实验结果 .....              | 251 |
| 13.9 小结 .....                | 252 |
| 参考文献 .....                   | 253 |

### 第14章 基于双核 DSP 的交流微网控制和 通信 .....

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 14.1 简介 .....          | 255 |
| 14.2 交流微网的控制 .....     | 255 |
| 14.2.1 交流微网的架构 .....   | 255 |
| 14.2.2 交流微网中的变换器 ..... | 256 |
| 14.2.3 微网应用场景 .....    | 257 |
| 14.3 电网支撑型变换器的控制 ..... | 257 |
| 14.3.1 第一层控制 .....     | 257 |



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 14.3.2 第二层控制 .....          | 259 |
| 14.3.3 第三层控制 .....          | 260 |
| 14.4 交流微网的通信 .....          | 260 |
| 14.4.1 通信协议 .....           | 260 |
| 14.4.2 实验室规模的微网示例 .....     | 261 |
| 14.5 基于双核 DSP 的控制和通信 .....  | 262 |
| 14.5.1 DSP 的控制和通信技术 .....   | 262 |
| 14.5.2 双核系统架构 .....         | 262 |
| 14.5.3 基于 C28 的控制实现方法 ..... | 264 |
| 14.5.4 基于 M3 的通信实现方法 .....  | 264 |
| 14.5.5 交流微网中控制和通信的扩展 .....  | 265 |
| 14.6 实验室规模微网测试结果 .....      | 266 |
| 14.6.1 第一层控制的性能验证 .....     | 266 |
| 14.6.2 第二层控制的性能验证 .....     | 268 |
| 14.6.3 通信网络中丢包的影响 .....     | 269 |
| 14.7 小结 .....               | 270 |
| 参考文献 .....                  | 270 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第 15 章 电力电子变换器智能优化设计 ..... | 272 |
| 15.1 简介 .....              | 272 |
| 15.2 评估函数 .....            | 273 |
| 15.2.1 第一类评估函数 .....       | 273 |
| 15.2.2 第二类评估函数 .....       | 273 |
| 15.2.3 主回路的评估函数 .....      | 273 |
| 15.2.4 FN 的评估函数 .....      | 275 |
| 15.3 GA 的实现 .....          | 276 |
| 15.4 ACO 搜索过程 .....        | 278 |
| 15.4.1 eACO 数据结构 .....     | 278 |
| 15.4.2 eACO 搜索过程 .....     | 279 |
| 15.5 优化设计实例 .....          | 280 |
| 15.5.1 设计目标 .....          | 280 |
| 15.5.2 基于 GA 的设计 .....     | 281 |
| 15.5.3 基于 ACO 的设计 .....    | 283 |
| 15.6 小结 .....              | 284 |
| 参考文献 .....                 | 285 |

# 第 1 部分 模拟控制电路



# 第 1 章

## 基于PWM的直-直变换器滑模控制方法

Siew - Chong Tan<sup>1</sup>, Chi Kong Michael Tse<sup>2</sup>

1. 香港大学 2. 香港理工大学

### 1.1 简介

近些年来,直-直变换器的控制多使用脉宽调制(PWM)方法,普遍工作在较高的开关频率下,该类系统的波形具有循环变化的特点。这种系统本质上是非线性的,其控制单元的输出会实时变化<sup>[1]</sup>。该类变换器普遍基于线性小信号模型进行设计,采用电压控制模式或电流控制模式,只有当变换器在相对狭窄的参数变化范围内运行时,才能保证系统的输出性能和瞬态响应,以及系统稳定性<sup>[2]</sup>。该类变换器通常无法匹配高度非线性或参数大范围变化的电源和负载,当工况明显偏离小信号模型允许的运行范围时,控制器将无法保证其性能<sup>[3]</sup>。

滑模(Slide Mode, SM)控制是一种非线性控制方法,非常适合于电源和负载变化范围较大且呈现非线性的直-直变换器<sup>[4,5]</sup>。滑模控制可用于控制具有不连续开关特性的系统,在应用于直-直变换器时,具有可靠性高和通用性强等特点,可以提供快速的响应和稳定的控制性能<sup>[6,7]</sup>。在常见的非线性控制技术中,滑模控制对于变换器来说最为实用,具有实施简单、易于设计和低成本等特点。

近年出现了基于PWM的固定开关频率滑模控制器——类滑模(QSM)控制器,其工作方式与常规的滑模控制器相似,但开关频率固定,非常适合于实际应用<sup>[7]</sup>。以恒定开关频率工作的变换器能够采用简单的滤波器设计,适于实现变换器的小型化。此外,这种基于固定开关频率PWM的滑模控制器,可以使用较为低端廉价的数字微控制器(MCU)、数字信号处理器(DSP)、现场可编程门阵列(FPGA),或采用分立模拟器件构成的简单控制组件。相对于数字电路的实现方法,通过模拟器件实现的滑模控制在快速瞬态响应方面更加具有优势,特别是在变换器开关频率非常高的情况下,不会因离散化失效引起相关问题。对于商业化产品来说,基于PWM滑模控制器的模拟集成芯片,相对于现有的PWM控制器来说,在成本方面有较高的竞争力。

本章将首先介绍滑模控制的基本原理、基于PWM的滑模控制,以及如何将常规PWM控制中的调制比等参数转化应用于滑模控制中;然后介绍基于PWM滑模控制方法的相关推导、数学建模,分析其固有控制特性;最后详细说明该类控制器在实际应用中的设计方法,以及介绍如何实现变换器的特定控制目标。

### 1.2 滑模控制理论简述

滑模控制系统的“结构”并不固定,而是在动态过程中根据系统当前的状态(如偏差及其各阶导数等),有目的地不断变化,迫使系统按照预设的“滑动模式”状态轨迹运动<sup>[4,5]</sup>,这个状态轨迹被称

为滑动平面。用于单开关电路的直 - 直变换器如图 1.1 所示，本章以此说明如何设计滑模控制器，变换器遵守以下方程：

$$u = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}(S)) \tag{1.1a}$$

$$S = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \tag{1.1b}$$

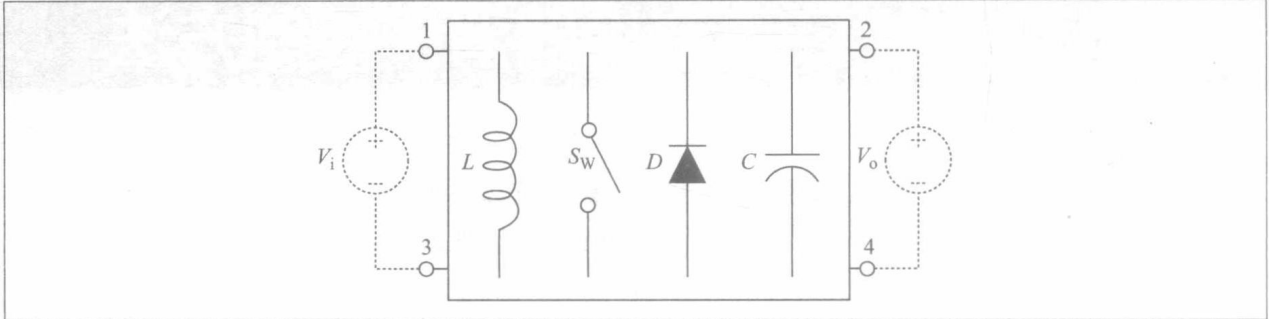


图 1.1 单开关直 - 直变换器的介绍

在以上公式中， $u$  是变换器中开关  $S_w$  的控制状态量， $S$  是计算出的状态变量的轨迹。 $x_i$  是目标变量，比如输出电压或输出电流等<sup>[7]</sup>。在控制算法的严格限制下，状态变量的轨迹将被强制限定在  $S=0$  附近的很小范围内。变量  $\alpha_i$  是滑模参数，可以定义变量轨迹的平面。

为了便于讨论，本书采用二阶控制器：

$$u = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}(S)) \tag{1.2a}$$

$$S = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 = \mathbf{J}\mathbf{x} \tag{1.2b}$$

在以上公式中，向量  $\mathbf{J} = [\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3]$ ， $\mathbf{x} = [x_1 x_2 x_3]^T$ 。如果设定  $S = 0$ ，则轨迹平面如图 1.2 所示。

滑模控制的过程一般可以分为两个阶段，第一步是到达阶段，控制器将会沿着一定的轨迹到达滑模面，如图 1.2a 所示。在这一步中需要遵守相关的约束<sup>[4,5]</sup>，而能够使轨迹达到滑动平面的条件是，控制指令  $u$  以及受它影响的变量  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  满足：

$$S \frac{dS}{dt} < 0 \tag{1.3}$$

以上方程可以看成是稳定性方程李雅普诺夫 (Lyapunov) 第二定律的一部分<sup>[4,5]</sup>，李雅普诺夫函数的解为

$$V(S) = \frac{1}{2}S^2 \tag{1.4}$$

式 (1.3) 表示，如果初始位置距离滑动平面较远，状态轨迹将会持续向滑动平面靠拢。当状态轨

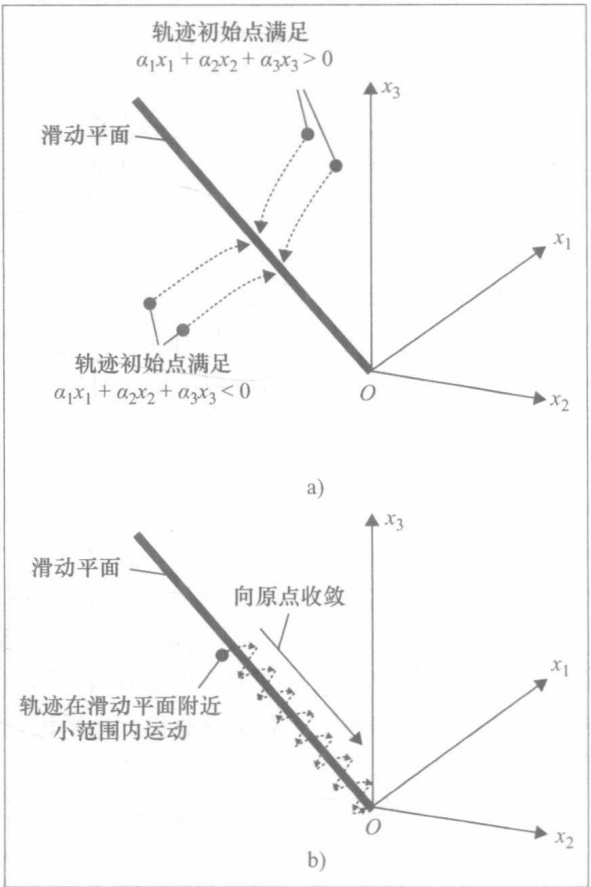


图 1.2 滑模控制中状态变量轨迹。a) 第一步，轨迹向滑动平面靠拢，与初始值无关。b) 第二步，轨迹保持在滑动平面附近很小的范围内变化，并向原点方向收敛。© 2005 IEEE 已获得参考文献 [8] 的再次印刷许可



迹达到滑动平面附近时,系统进入第二个步骤,即滑动步骤,将保持轨迹运行在滑动平面附近。在零点附近轨迹与参考值不断接近实现稳态运行,如图 1.2b 所示。这一部分需要满足存在性条件和稳定性条件,存在性条件可以通过检测以下公式<sup>[4,5]</sup>,而滑模相的存在性条件可以通过检查局部可达性条件来确定。

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{dS}{dt} < 0 \quad (1.5)$$

除此之外,必须设计控制动作和滑模导致满足稳定性条件,否则将导致系统不稳定。系统的稳定性可以通过求解系统稳态的雅克比(Jacobian)矩阵获得,当所有解都位于负半平面时系统稳定。

### 1.3 基于 PWM 的滑模控制

通常,滑模控制器是基于式(1.1)的控制规则来实现的,其中式(1.1a)可以使用简单的继电器来实现,该类滑模控制的本质是滞回比较控制。通过式(1.1b)可以计算实时状态变量的轨迹平面 $S$ ,使用模拟芯片或数字芯片来具体实现。该公式描述的控制方法会导致变换器工作在很高的开关频率,且开关频率不固定。将滑模控制方法稍微改变,就可以实现像 PWM 一样的固定开关频率控制方法,并且可以通过较为廉价的硬件实现。

图 1.3 给出了基于 PWM 的滑模控制器,采用 PWM 方式实现了滞回比较器,并不改变滑模控制的基本原则。应用时需要分析两种控制方法的异同,把两者有机地在联系在一起,其中有两个转换关键。第一点是把滑模控制中离散的控制指令 $u$ ,用 PWM 中连续的等效开关指令 $u_{eq}$ 来表示,一般将状态轨迹 $S$ 的时间导数设为零来实现<sup>[4]</sup>。第二点是将高开关频率下的滑模控制表示为对占空比的控制<sup>[6,7,9,10]</sup>,通过把滑模控制参数有效地映射到占空比函数中,得到基于 PWM 的滑模控制器。

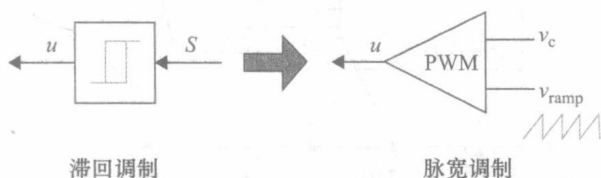


图 1.3 简化的滞回比较和 PWM 原理图。© 2005 IEEE 已获得参考文献 [8] 的再次印刷许可

下一节将分别介绍基于 PWM 的滑模控制实现方法,包括电压控制模式和电流控制模式两种。

### 1.4 基于 PWM 的电压滞回控制

本节的 PWM 控制器是由滞回控制转换过来的,需要首先推导滞回控制器的数学模型。设计的过程中,第一步是准确地描述滞回控制器的目标状态变量,之后针对连续工作模式下的三类直-直变换器进行二阶 PID 控制。

图 1.4 分别描绘了面向升压变换器、降压变换器、升降压变换器的滞回滑模控制原理图。其中 $C$ 、 $L$ 和 $r_L$ 分别表示电容值、电感值和实时负载阻抗; $i_c$ 、 $i_L$ 和 $i_r$ 分别表示电容电流、电感电流和负载电流; $V_{ref}$ 、 $v_i$ 和 $v_o$ 分别表示电压设定值、实时输入电压和实时输出电压; $\beta$ 表示反馈网络的比例参数; $u$ 是开关状态指令。

图 1.4 描绘了电压控制模式下基于 PID 的传统滞回控制器。此时控制状态变量 $\mathbf{x}$ 可以表示为

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} - \beta v_o \\ \frac{d[V_{ref} - \beta v_o]}{dt} \\ \int [V_{ref} - \beta v_o] dt \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

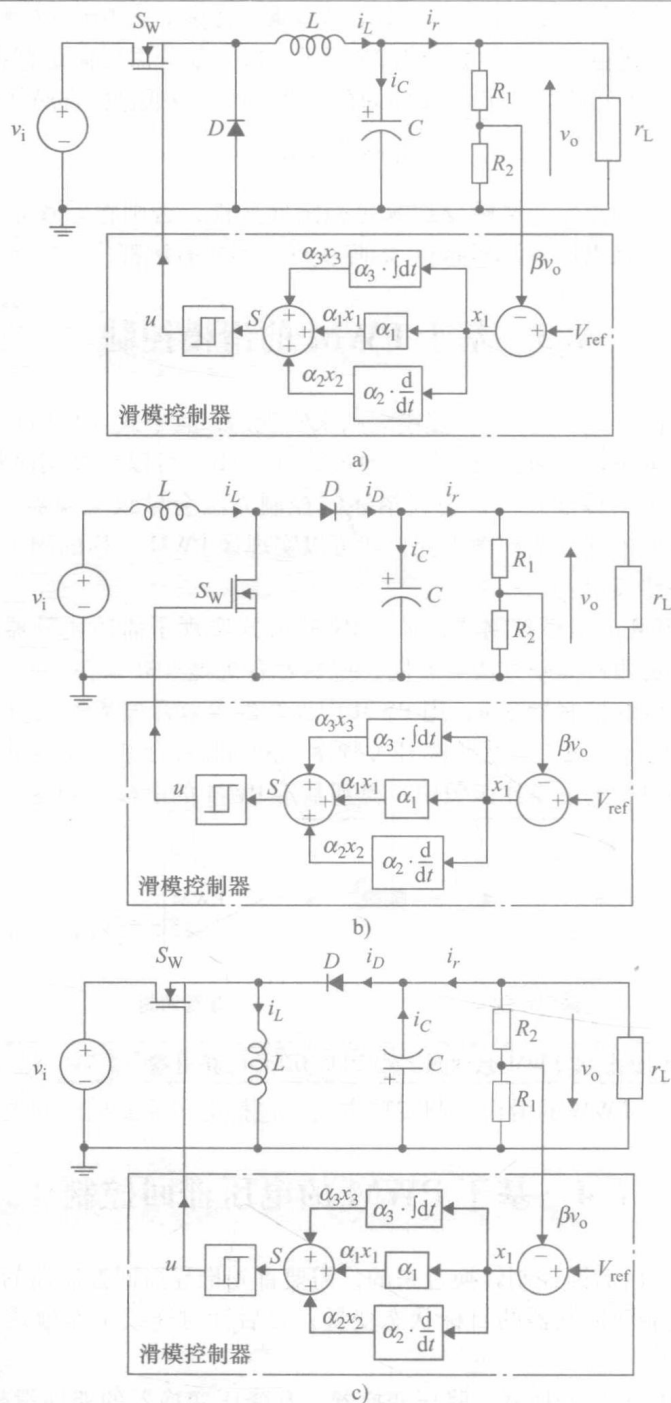


图 1.4 基于传统滞回滑模控制的 SMVC 变换器电路图。a) SMVC 降压变换器；b) SMVC 升压变换器；c) SMVC 升降压变换器。© 2005 IEEE 已获得参考文献 [11] 的再次印刷许可

式中， $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$  分别是电压误差、电压误差的时间微分值、电压误差的时间积分值。进一步推导三类变换器在持续电流模式下的状态变量可得

$$\mathbf{x}_{\text{buck}} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\text{ref}} - \beta v_o \\ \frac{\beta v_o}{r_L C} + \int \frac{\beta(v_o - v_i u)}{LC} dt \\ \int x_1 dt \end{bmatrix} \quad (1.7)$$



$$\mathbf{x}_{\text{boost}} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\text{ref}} - \beta v_o \\ \frac{\beta v_o}{r_L C} + \int \frac{\beta(v_o - v_i) \bar{u}}{LC} dt \\ \int x_1 dt \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{x}_{\text{buck-boost}} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\text{ref}} - \beta v_o \\ \frac{\beta v_o}{r_L C} + \int \frac{\beta v_o \bar{u}}{LC} dt \\ \int x_1 dt \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

式中,  $\bar{u} = (1 - u)$  是  $u$  的等效变量, 适合于升压变换器和升降压变换器。通过对时间求导, 状态变量的微分值可以列写为如下公式:

对于降压变换器:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\beta v_i}{LC} \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

对于升压变换器:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} - \frac{\beta v_i}{LC} \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} \quad (1.11)$$

对于升降压变换器:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} \\ 0 \end{bmatrix} \bar{u} \quad (1.12)$$

整理以上公式可得

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}v + \mathbf{D} \quad (1.13)$$

式中,  $v$  等于  $u$  或  $\bar{u}$ 。其他的变量总结在表 1.1 中。

表 1.1 在 CCM 模式下的 SMVC 降压变换器、SMVC 升压变换器、SMVC 升降压变换器

| 变换器种类 | $\mathbf{A}$                                                                       | $\mathbf{B}$                                                                          | $\mathbf{D}$                                                   | $v$       |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 降压    | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\beta v_i}{LC} \\ 0 \end{bmatrix}$                       | $\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} \\ 0 \end{bmatrix}$ | $u$       |
| 升压    | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} - \frac{\beta v_i}{LC} \\ 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$                    | $\bar{u}$ |
| 升降压   | $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_L C} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta v_o}{LC} \\ 0 \end{bmatrix}$                        | $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$                    | $\bar{u}$ |