



国际电气工程先进技术译丛

IEEE WILEY

新能源接入智能电网 的逆变控制关键技术

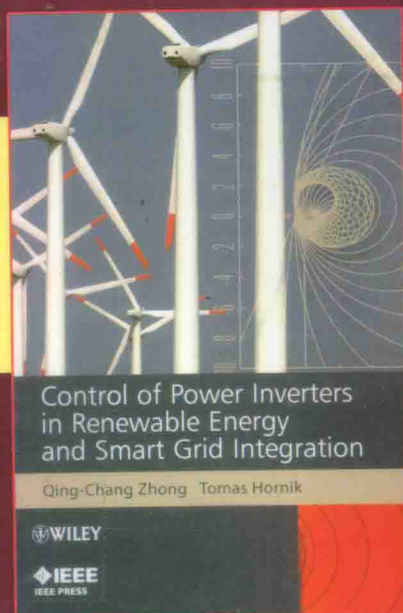
Control of Power Inverters in Renewable
Energy and Smart Grid Integration

[美] 钟庆昌 (Qing-Chang Zhong)

[英] 托马斯·霍尔尼克 (Tomas Hornik)

著

钟庆昌 王晓琳 曹鑫 等译



- ◎ 原著者十多年研究工作的结晶，丰富的创新性理论（比如虚拟同步机）和大量的实验结果；
- ◎ 原英文版荣登亚马逊发配电畅销书排行榜第七，且多次作为国际研讨会的教材；
- ◎ 为数不多的系统介绍并网逆变控制的一本好书！



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

新能源接入智能电网的 逆变控制关键技术

Control of Power Inverters in Renewable Energy and
Smart Grid Integration

[美] 钟庆昌 (Qing - Chang Zhong)

[英] 托马斯·霍尔尼克 (Tomas Hornik) 著

钟庆昌 王晓琳 曹鑫 曾羽 张尧 译
明文龙 蔡骏 吕志鹏 马振宇 李蕊

机械工业出版社

Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd.

All Rights Reserved. This translation is published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled 〈Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration〉, ISBN: 978-0-470-66709-5, by Qing-Chang Zhong, Tomas Hornik, 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: 01-2013-2608 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源接入智能电网的逆变控制关键技术/ (美) 钟庆昌, (英) 托马斯·霍尔尼克 (Tomas Hornik) 著; 钟庆昌等译. —北京: 机械工业出版社, 2016. 6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration
ISBN 978-7-111-54010-6

I. ①新… II. ①钟…②托… III. ①新能源-智能控制-电网-研究
IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 129834 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: 付承桂 责任编辑: 付承桂 阎洪庆

责任校对: 陈延翔 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

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 25 印张 · 483 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-54010-6

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

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

能源危机和可持续发展是当今世界面临的两大难题，可再生的新能源为解决这些问题展示了广阔的前景，如何将新能源接入智能电网已经成为了智能电网发展的最大“前沿阵地”。

本书在简要介绍电能变换以及新能源与智能电网接入等方面的相关知识后，对并网逆变器中的电能质量控制、中线提供、功率控制以及同步技术等方面做了深入、细致的理论分析和实验验证，首次以中文详细阐述了包括模拟同步电机的同步逆变器（也称虚拟同步机）、鲁棒下垂控制器以及C型逆变器等一系列原创关键技术。

本书丰富的创新性理论和大量的实验结果有助于科研工作人员和工程技术人员理解智能电网接入的各种先进控制技术。本书既可作为电力电子、可再生能源、分布式发电、微电网、智能电网与电力系统、柔性交流输电、不间断电源、高速铁路、多电飞机、全电舰船、控制理论与工程等领域的研究与工程应用参考书，也可作为电力系统、电力电子、控制理论与控制工程等专业的研究生教材。



译者序

随着经济的快速发展,当今世界能源短缺、环境污染和气候变暖已经成为影响社会进步的严重问题,经济、清洁、可再生的新能源作为解决这些问题的有效手段备受各国政府和业界的广泛关注。推进新能源和智能电网的融合是未来电网发展的必然趋势,如何确保各种新能源的友好接入、有效调控以及稳定运行是目前的研究热点。新能源一般通过电力电子逆变器接入智能电网,合理的控制策略可以使其接入电力系统时不但不会危及系统的稳定性和性能,反而会为智能电网的其他功能和服务提供坚实的基础。

新能源接入智能电网的技术方兴未艾、日新月异,新技术、新方法、新理念不断涌现,但此方面的技术书籍目前还很缺乏,尤其是系统介绍该领域中并网逆变控制策略的中文书籍更是寥寥无几。而我国从事电力系统、电力电子技术以及控制工程领域的研发人员众多,为了尽快传播相关领域的世界前沿最新发展、积极推进我国建设智能坚强电网和全球能源互联网的步伐,急需一本既具有最新理论研究成果,又能为工程应用实例提供指导的专著。

本书原版是为数不多的系统介绍并网逆变控制技术的一本畅销书,曾经登上了亚马逊发配电畅销书排行榜第七名,且多次被选为国际研讨会和研究生课程的教材。本书不仅简要、清晰地介绍了电能变换以及新能源与智能电网接入等方面的相关基础知识,而且对并网逆变器中的电能质量控制、中线提供、功率控制以及同步技术等关键技术做了深入、细致的系统理论分析和实验验证。本书是原著者十多年研究工作的结晶,其丰富的创新性理论成果和大量的实验结果有助于科研工作人员和工程技术人员理解并网逆变器的各种先进控制策略,并将其应用到相关的工程实际中。更重要的是,通过对本书内容的深入理解,读者还能够从中体会到原著者科学的创新理念和严谨的科研态度,从而使得自身的创新能力和科研思想得以培养和升华。

全书总共23章,除引言和基础知识以外,主体内容分为4个部分。第1部分(第3~9章)针对电能质量控制提出了几种不同机制下的控制策略。第2部分(第10~14章)讨论了提供中线的拓扑结构,给出了保持中线均衡稳定的多种控制策略。第3部分(第15~21章)详细分析了功率控制中的各项关键技术,包括同步逆变器(也就是模拟同步发电机的逆变器,也称虚拟同步机)、鲁棒下垂控制器以及谐波下垂控制器等全新的概念。第4部分(第22、23章)在介绍传统同步方法的基础上,详细介绍了基于同步机运行机制的正弦波锁定和重

IV 新能源接入智能电网的逆变控制关键技术

构的方案。

本书原著者钟庆昌是中国国家电网公司国家级特聘专家、美国伊利诺理工大学 Max McGraw 能源与电力首席教授、英国谢菲尔德大学自动控制与系统工程系研究教授（曾任控制与系统工程终身首席教授），Tomas Hornik 是英国 Turbo Power Systems 公司控制工程师，他们的介绍请参见“原著者简介”，此处不再赘述。

本书既可作为电力电子、可再生能源、分布式发电、微电网、智能电网与电力系统、柔性交流输电、不间断电源、轨道交通、多电飞机、全电舰船、控制理论与工程等领域的研究与工程应用参考书，也可以作为电力系统、电力电子、控制理论与控制工程等专业的研究生教材。

本书由原书第一作者钟庆昌教授领衔翻译，其他译校人员都曾经或现在是钟庆昌教授团队的研究人员。全书的译校经历了翻译、一校、二校、三校和两次统校，最终由钟庆昌教授定稿。虽然大家都竭尽全力以求译文准确，但还是难免存在一些错误和不足之处，译者热切期待各位读者对本书提出宝贵意见、建议和勘误。

本书中文版能够出版发行，要感谢机械工业出版社的慧眼，在原书出版三个月之内就引进了本书的中文版权，并在第一时间与原著者取得了联系。特别要感谢的是本书的策划编辑付承桂女士，她以巨大的热情和高度的责任心为本书的出版做了大量繁琐细致的出版业务工作和联络工作。也要感谢众多的排版与编印人员，是他们的辛勤劳动才得以使本书付梓。在此，译者对为本书的出版做出过贡献的所有人员表示深深的感谢。

译者

原 书 前 言

功率逆变器是新能源和分布式发电系统接入智能电网的通用关键设备，我在很早以前就打算撰写一本有关功率逆变器控制的专著。在 2001 年加盟英国帝国理工学院从事逆变器控制的研究开始，我就意识到这一领域存在很多挑战性的问题，新能源接入电网的研究工作将会在全世界范围内受到密切关注。在此期间，我归纳了四类关键问题，即电能质量问题、中线的提供、功率控制和同步问题。过去 10 年里，虽然经历了几次工作上的变动，但我一直专注于这些问题的研究，有时也与其他合作者或我的博士研究生一起探索。本书的第二作者作为博士研究生于 2007 年加入了我的团队，我们很快搭建了一个原理验证实验平台，从而促进了该项研究的顺利进行，并验证了本书中的很多想法。2009 年，英国皇家工程学院（Royal Academy of Engineering）资助的 Leverhulme 信托基金高级研究员项目使得我有更多的时间来潜心研究，从而大大加快了本书的出版进程。2011 年，英国工程和物理科学研究理事会（EPSRC）资助我到美国进行为期一年的游学访问，最终促成了本书的出版。

能源和可持续发展，是当今世界面临的两大问题。可再生能源作为解决这些问题的有效手段具有很好的前景；同时，智能电网也因为提高电力系统的能源使用效率、安全性和灵活性而得到快速发展。可再生能源和其他分布式能源如何接入智能电网已经成为了智能电网发展的最大“前沿阵地”。合理的控制策略可以使其接入电力系统时不但不会危及系统的稳定性和性能，反而会为智能电网的其他功能和服务提供坚实的基础。

逆变器的控制有几个非常重要的问题。比如，在有非线性负载和/或电网电压失真时如何确保输送到电网的电能能量；当某些场合需要中线时，例如当三相负载不对称时，如何确保提供一条平衡的中线；如何确保逆变器可以工作在并网模式或离网模式，以及如何最大限度地减少运行模式切换时的动态变化甚至做到无缝切换；如何实现逆变器的同步并网；逆变器并联时，如何根据各自的容量实现合理的功率分配以免造成不必要的损害；如何实现并网逆变器的友好连接，使其对电网的影响最小等。本书包含作者过去 10 年对这些问题提出的许多原创性想法和控制策略，其中包括用于改善智能电网（或微电网）电能质量的不同控制策略、具有电容输出阻抗的逆变器（C 型逆变器）、逆变器中线的提供、利用模拟同步发电机的逆变器（称为同步逆变器或虚拟同步机）实现友好并网、利用鲁棒下垂控制器实现逆变器并联运行和功率自主分配、可改善电能质量的谐波

下垂控制器,以及不仅可以锁定电网电压的相位,而且还能锁定频率和幅值的正弦波锁定器,等等。这些先进的控制策略,有望大大促进可再生能源大规模接入智能电网的应用。

本书包括:引言(第1章),基础知识(第2章),以及4个部分:电能质量控制(第3~9章)、中线的提供(第10~14章)、功率控制(第15~21章)和同步技术(第22、23章)。在第1章引言中,介绍了一些有关功率变换和逆变器硬件设计的基本知识,并简要描述了风力发电、太阳能发电以及智能电网接入等。在第2章基础知识中,介绍了一些关于电能质量、重复控制和参考坐标系等的基本理论。在第1部分中,根据电能质量恶化的不同机制提出了几种相应的控制策略,以此提高并网逆变器的电压和电流质量。第2部分讨论了提供中线的拓扑结构,并给出了保持中线均衡稳定的几种控制策略,使得逆变器各相具有独立运行的能力。第3部分介绍了多种电流控制和电压控制策略来控制逆变器与电网之间的能量传输,包括同步逆变器(模拟同步发电机的逆变器,也称虚拟同步机)、鲁棒下垂控制器以及谐波下垂控制器等全新概念。第4部分在介绍传统同步方法的基础上,根据同步发电机与电网交换功率的基本原理,介绍了正弦波锁定器来实现与电网的快速同步。

本书既适合于即将进入电力电子、可再生能源和分布式发电、智能电网、柔性交流输电系统、多电飞机和全电舰船电力系统等领域的控制工程师,也适合于一直从事这些领域研究并渴望利用各种先进控制策略来提高逆变器性能的研究人员和工业界朋友。本书系统地探讨了并网逆变器控制的本质和挑战性的问题,充分体现了控制和电力电子技术的完美结合。本书所提及的大多数控制策略均有大量的实验结果,从而为工业界的朋友如何将先进控制策略用于工程应用来提高系统性能提供了非常高的参考价值。本书还为从事该领域的研究生及研究人员提供了一个了解前沿最新发展的极好机会,它可以作为先进控制工程、电力电子技术、可再生能源和智能电网集成等领域的研究生课程教材。

原书致谢

本书系统地总结了本人及其合作者和博士研究生过去 10 年来在可再生能源和智能电网接入的逆变器控制领域的研究成果。虽然无法在此一一列出所有为本书做出贡献的合作者,但非常感谢他们的贡献。目前在以色列特拉维夫大学的 George Weiss 教授是我在英国帝国理工学院的导师以及后来的合作者,他为我提供了进入这个领域的机会,从而为我打开了一个全新的世界,并给我的职业生涯铺平了道路。我以前的博士生 Tomas Hornik 为本书做了很多工作,他作为一名作者代表了他和其他所有对本书做出了贡献的人。我非常感谢 Long Nguyen、马振宇、Shamsul A. Zulkifli、明文龙、曾羽、侯志、王晓琳以及曹鑫等的贡献。我也十分感谢与 Frede Blaabjerg、Chunmei Feng、Tim Green、Joseph M. Guerrero、Leslie Hobson、Marcel G. Jayne、Miroslav Krstic、Jun Liang 和 George Weiss 等人的合作研究。

我更要感谢英国工程和物理科学研究理事会这么多年来对我研究的持续支持。对本书的面世有着直接贡献的资助项目包括 GR/N38190/01、EP/E055877/1、EP/H004351/1、EP/J001333/1、EP/I038586/1,以及两项 Dorothy Hodgkin 博士基金(DHPA)项目,两项前期技术转移(KTA)项目和一项博士培养基金(DTA)项目。

我还要感谢英国皇家工程学院和 Leverhulme 信托基金在 2009~2010 年资助的高级研究员基金,这为我专注于这方面的研究提供了宝贵的时间,使得更多成果能够在本书中体现。

工业界的合作与支持也一直推动着我们的研究。我尤其要感谢 Brett Downen (add2 Ltd)、Nordine Haddjeri (Nheolis, France)、Tony Lakin (Turbo Power Systems)、Robert Owen (Texas Instruments)、Graham Chapman (Power Systems Warehouse) 和 David Doherty (Yokogawa Measurement Technologies Ltd) 等公司和个人对我们研究所提供的非常有价值的直接支持。与劳斯莱斯公司 Phill Cartwright 和 Kevin Daffey、阿尔斯通公司 Roger Critchley 和 Fainan Hassan 以及英国国家电网公司 Damien Culley 等人的讨论也非常令人振奋。

我一直以来都非常愉快地与 John Wiley & Sons 公司和 IEEE 出版社的同仁共事,我非常感谢项目编辑 Liz Wingett、助理编辑 Laura Bell 和出版人 Peter Mitchell 的大力帮助与支持。

最后但同样重要的是,我想正式感谢 L_yX 团队开发了 L_yX 文件处理器,这

使得我在过去 12 年的写作经历是如此愉快，并为我节省了大量的时间。L_yX 作为 L_AT_EX 排版系统的用户界面，作者只需要付出很小的努力就能在不经任何专业排版培训的情况下获得专业的排版效果。L_yX 适用于多种语言的多种操作系统，包括 Windows、Mac OS X、Linux、UNIX、OS/2 和 Haiku，并可以在通用公共许可证的条款下免费从 <http://www.lyx.org> 下载、传播和修改。

英国谢菲尔德大学
自动控制与系统工程系
控制与系统工程首席教授
钟庆昌博士

原著者简介



钟庆昌博士是美国伊利诺理工大学 (Illinois Institute of Technology, IIT) 电气与计算机工程系能源与电力首席教授 (Max McGraw Endowed Chair Professor)、英国谢菲尔德大学控制与系统工程系研究教授、中国国家电网公司国家级特聘专家、IEEE 电力电子学会和 IEEE 控制系统学会双杰出讲员 (Distinguished Lecturer)、国际控制与电力电子领域四大顶级期刊 (*IEEE Trans. on Automatic*

Control, *IEEE Trans. Power Electronics*, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, *IEEE Trans. Control Systems Technology*) 的编委、英国工程技术学会 (IET) 会士、IEEE 高级会员、国际自动控制联合会 (IFAC) 电力与能源系统技术委员会副主席, 曾任欧洲控制协会英国代表、劳斯莱斯大学技术联盟委员和美国 FREEDM 国家工程研究中心科学顾问。他应邀在十多个国际会议作主题报告, 是世界上同时在控制与电力电子领域得到认可的少数专家之一。

钟教授 1990 年毕业于湘潭机电专科学校 (现湖南工程学院), 1997 年获得湖南大学控制理论与控制工程专业硕士学位, 2000 年获得上海交通大学控制理论与控制工程专业博士学位后前往以色列理工大学从事一年的博士后研究, 2004 年获得英国帝国理工学院控制与电力工程专业博士学位后在英国格兰摩根大学开始了他的学术生涯, 六年后从英国利物浦大学高级讲师直接受聘为英国拉夫堡大学终身首席教授、控制与可靠性研究组主任, 2012 年受聘为英国谢菲尔德大学控制与系统工程系控制与系统工程终身首席教授。他在不到三年的时间内在谢菲尔德大学建立起了价值五百万美元的控制与电力系统实验室, 得到了劳斯莱斯、西门子、阿尔斯通、国家仪器、德州仪器、横河电机等国际一流大公司的支持。钟教授的研究横跨控制理论、电力电子与电力系统三大学科, 主要方向包括新能源与分布式发电、电力电子变换器、智能电网、微电网、电动汽车、高速铁路供电与驱动系统、时间滞后系统、鲁棒控制理论、化工过程控制等相关领域。他主要解决了关于时间滞后系统鲁棒控制的一系列基础理论问题, 将逆变器与同步发电机从数学上等价了起来, 提出了同步逆变器的思想, 是虚拟同步机的主要发明人, 提出了以同步机的同步机制来统一各种发电设备和用电设备接入电网的接口, 并以此为基础来构建下一代智能电网, 从而实现电力系统的自主运行, 解决了新能源接入电网和逆变器并联运行的系列关键问题, 取得了一系列原创性的研

究成果。他出版了三部英文专著：《新能源与智能电网接入中电力电子逆变器的控制》《时间滞后系统的鲁棒控制》《积分时滞系统的控制》。他的第四部英文专著《下一代智能电网——基于电力电子的自主电力系统》和第五部英文专著《先进电力电子变换器——电解电容、纹波与共模电压的减小》将于2017年由Wiley-IEEE出版社出版。



Tomas Hornik 博士 1991 年毕业于捷克布拉格Uzlabine 技术学院电气工程系，分别于2007年和2010年获英国利物浦大学电气电子工程专业硕士和博士学位。2010~2011年，留任该校作博士后研究员。2011年进入英国Turbo Power Systems公司任控制工程师，他的研究兴趣涉及电力电子技术、先进的控制理论和基于DSP的应用工程。他曾经在工业界担任过十多年的系统工程师，负责中央供暖系统和楼宇管理系统的发配电及控制系统的软件设计和调试。他是IEEE和IET的会员。

缩 略 语

<i>abc</i> frame	自然坐标系 Natural Frame
$\alpha\beta$ frame	静止参考坐标系 Stationary Reference Frame
<i>dq</i> frame	同步旋转参考坐标系 Synchronously Rotating Reference Frame
AC	交流 Alternating Current
ADC	模 - 数转换器 Analog - to - Digital Converter
APC	有功补偿器 Active Power Compensator
APF	有源电力滤波器 Active Power Filter
APFM	幅相频率模型 Amplitude Phase Frequency Model
APM	幅相模型 Amplitude Phase Model
C - inverters	C 型逆变器 (具有容性输出阻抗的逆变器) Inverters with Capacitive Output Impedances
CHP	热电联产 Combined Heat and Power
CPU	中央处理器 Central Processing Unit
CSI	电流源型逆变器 Current Source Inverter
CSP	聚光太阳能发电 Concentrated Solar Power
CVCF	恒压恒频 Constant - Voltage Constant - Frequency
DAC	数 - 模转换器 Digital - to - Analog Converter
DB	无差拍 Dead - Beat
DC	直流 Direct Current
DDSRF - PLL	解耦的双同步参考坐标系的锁相环 Decoupled Double SRF - PLL
DFIG	双馈感应发电机 Doubly - Fed Induction Generator
DESC	数字信号控制器 Digital Signal Controller
DSP	数字信号处理器 Digital Signal Processing

XII 新能源接入智能电网的逆变控制关键技术

EKF	扩展卡尔曼滤波器 Extended Kalman Filter
EMI	电磁干扰 Electromagnetic Interference
EPLL	改进型锁相环 Enhanced PLL
ESR	等效串联电阻 Equivalent Series Resistance
FRF - PLL	定参考坐标系锁相环 Fixed - Reference Frame PLL
GTO	可关断 (晶闸管) Gate - Turn Off (Thyristor)
HAPF	混合型有源电力滤波器 Hybrid Active Power Filter
HB	滞环环宽 Hysteresis Band
HC	谐波补偿器 Harmonics Compensator
HCS	爬坡搜索算法 Hill - Climb Search
IGBT	绝缘栅双极型晶体管 Insulated Gate Bipolar Transistor
IPM	智能功率模块 Intelligent Power Module
KCL	基尔霍夫电流定律 Kirchhoff's Current Law
KVL	基尔霍夫电压定律 Kirchhoff's Voltage Law
LF	环路滤波器 Loop Filter
L - inverters	L 型逆变器 (具有感性输出阻抗的逆变器) Inverters with Inductive Output Impedances
LPF	低通滤波器 Low - Pass Filter
MIMO	多输入多输出 multiple - input multiple - output
MOSFET	金属氧化物半导体场效应晶体管 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPP	最大功率点 Maximum Power Point
MPPT	最大功率点跟踪 Maximum Power Point Tracking
P controller	比例控制器 Proportional controller
PD unit	鉴相器 Phase - error Detection unit
PI controller	比例积分控制器 Proportional - Integral controller
PLL	锁相环 Phase - Locked Loops
PMSG	永磁同步发电机 Permanent Magnet Synchronous Generators
PPF	无源电力滤波器 Passive Power Filter
PR controller	比例谐振控制器 Proportional - Resonant controller

PSF	功率信号反馈 Power Signal Feedback
PV	光伏 Photovoltaic
PWM	脉宽调制 Pulse - width modulation
R - inverters	R 型逆变器 (具有阻性输出阻抗的逆变器) Inverters with Resistive Output Impedances
RMS	方均根 (有效值) Root Mean Square
RPC	铁路静态功率调理器 Railway Static Power Conditioner
SCIG	笼型感应发电机 Squirrel - Cage Induction Generator
SISO	单输入单输出 Single - Input Single - Output
SLL	正弦波锁定器 Sinusoid - Locked Loops
SOA	安全工作区域 Safe Operating Area
SOGI - PLL	二阶广义积分型锁相环 Second - Order Generalised Integrator - based PLL
SOGI - QSG	二阶广义积分型正交信号发生器 SOGI - based Quadrature - Signal Generator
SPC	静态功率调节器 Static Power Conditioner
SPWM	正弦脉宽调制 Sinusoidal Pulse - Width Modulation
SRF - PLL	同步旋转参考坐标系锁相环 PLL in the Synchronously Rotating Reference Frame
SSM	单相同步电机 Single - phase Synchronous Machine
STA	正弦跟踪算法 Sinusoidal Tracking Algorithm
SVC	静态无功补偿器 Static Var Compensators
SVF	空间矢量滤波器 Space Vector Filter
SVPWM	空间矢量脉宽调制 Space Vector Pulse - width Modulation
THD	总谐波畸变 Total Harmonic Distortion
TSR	叶尖速度比 Tip Speed Ratio
UPS	不间断电源 Uninterruptible Power Supply
VCO	压控振荡器 Voltage Controlled Oscillator
VSI	电压源型逆变器 Voltage Source Inverter
ZOH	零阶保持器 Zero Order Hold
符号规范	
$\mathbb{Z}$, $\mathbb{R}$ and $\mathbb{C}$	整数、实数和复数集合 fields of integral, real and complex numbers

$j\mathbb{R}$	虚轴 imaginary axis
$\operatorname{Re} s$ and $\operatorname{Im} s$	复数 s 的实部和虚部 real and imaginary parts of $s \in \mathbb{C}$
$\in$	属于 belong to
$\cap$	交集 intersection
$\subset$	子集 subset
A^T and A^*	A 的转置和复共轭转置 transpose and complex conjugate transpose of A
A^{-1} and A^{-*}	A 的逆和 $(A^{-1})^*$ 的简化表达式 inverse of A and shorthand for $(A^{-1})^*$
$\det(A)$	A 的行列式 determinant of A
$G(s) = \left[\begin{array}{c c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right]$	$G(s) = D + C(sI - A)^{-1}B$ 的简化表达式 shorthand for $G(s) = D + C(sI - A)^{-1}B$

目 录

译者序

原书前言

原书致谢

原著者简介

缩略语

第1章 引言	1
1.1 章节安排	1
1.2 电能变换的基本知识	4
1.2.1 交直变换	4
1.2.2 直直变换	12
1.2.3 直交变换	17
1.2.4 交交变换	22
1.3 硬件设计	23
1.3.1 隔离	24
1.3.2 功率电路	24
1.3.3 输出滤波器	30
1.3.4 电压和电流检测	32
1.3.5 信号处理	34
1.3.6 保护	35
1.3.7 中央控制器	36
1.3.8 测试设备	40
1.4 风力发电系统	41
1.4.1 基本知识	41
1.4.2 风力机	42
1.4.3 发电机和拓扑结构	43
1.4.4 风力机系统的控制	47
1.5 太阳能发电系统	49
1.5.1 太阳能发电简介	49
1.5.2 对太阳能电力的处理	50
1.6 智能电网接入	51
1.6.1 电力系统的运行模式	51