



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

可再生能源系统 高级变流技术及应用

Renewable Energy Systems
Advanced Conversion Technologies and Applications

罗方林 著
(新加坡) 叶虹

刘长澍 贺敬 马烁 苏媛媛 王文卓 许晓艳 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

可再生能源系统 高级变流技术及应用

Renewable Energy Systems
Advanced Conversion Technologies and Applications

(新加坡) 罗方林 著
叶虹
刘长浥 贺敬 马烁 译
苏媛媛 王文卓 许晓艳



机械工业出版社

Renewable Energy systems Advanced Conversion Technologies and Applications (1st Edition) /by FangLin Luo, Hong Ye/ISBN: 978 - 1 - 4398 - 9109 - 4

Copyright © 2012 by CRC press.

Authorized translation from English language edition published by CRC press, part of Taylor Francis Group LLC; All rights reserved.

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01 - 2013 - 3813 号

图书在版编目 (CIP) 数据

可再生能源系统高级变流技术及应用 / (新加坡) 罗方林 (新加坡) 叶虹著; 刘长沔等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Renewable energy systems advanced conversion technologies and applications

ISBN 978-7-111-47180-6

I. ①可… II. ①罗…②叶… ③刘… III. ①再生能源 - 能量转换 - 研究 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 140690 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: 赵玲丽 责任编辑: 赵玲丽

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延期

封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 43.25 印张 · 942 千字

0 001—2 500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47180-6

定价: 158.00 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

译 者 序

电力电子学是应用于电力技术领域的电子学，它以大功率电子器件对能量进行控制和变换为主要内容，是电气工程、电子科学与技术、控制理论三大学科的交叉学科。它对大到很多工业分支、小至每个家庭都相当重要。变流技术（Conversion Technology）是电力电子学的首要课题。它的相应基础设备可分为四种：AC/DC 整流器，DC/DC 变流器^①，DC/AC 逆变器，AC/AC 变流器。

本书全面详尽地介绍了适用于工程类学生和相关专业技术人员的高级变流技术，包括由作者开发的 200 多种高级变流器拓扑。近年来，变流技术发展迅速。本书对很多新型变流电路作了详细分析，说明了确定准确解的正确方法，给出了工业用变流器的设计案例。解决了一些历史问题，如准确确定单相整流器导通角和功率因数校正。

由于可再生能源发电输出固有的随机性和间歇性，这些系统安全稳定地接入公共电网需要使用变流器。例如，风力发电系统需要使用 AC/DC/AC 变流器。太阳能发电系统需要使用 DC/AC/DC 变流器。本书也探讨了用于这些场合的变流器。

本书共 18 章，每章的概要内容在“原书前言”中都有具体介绍，此处不再赘述。

本书的两位作者多年从事变流技术领域的研究，是高级变流技术方面的开拓者。他们发明了大量变流器；DC/DC 变流器系列被命名为罗氏变流器（Luo Converter）。超举变流器是他们 25 年研究工作的最著名成就。两位作者的简介请见“作者简介”。

本书的适用读者群是电力电子技术、可再生能源发电方面的研究人员及工程技术人员，也可用作有关专业的大学生、研究生的教学参考资料。

本书内容很丰富详尽，但也存在一些瑕疵，使得本书显得不够严谨。最多见的问题是章节号、图号、公式号的引用、对应关系错误。另外，原书中，2.2 节标题下的 5 段文字与 2.2.1 标题下的文字完全相同（译文删除了 2.2 节标题下的重复文字），也是一个重大疏漏。此外，还有为数不少的各类其他错误。这些问题我们都尽量在译文中改正或调整，或在译者注中标出。

此外，第 2 章“新能源（New Energy Sources）”的实际内容是核能，有文不对题之嫌；而且，这一章的内容与全书其他部分的内容几乎没有任何关联，把它纳入

① “converter”在很多文献中都译为“变换器”。但在本书中，为与“变流技术（conversion technology）”的译法协调，多数情况下都译为“变流器”。——译者注

IV 可再生能源系统高级变流技术及应用

本书显得有些牵强。

本书的译校人员全部是中国电力科学研究院新能源研究所的科研人员，具体分工为（按工作量排序）：刘长浥翻译辅文、第1、8、10（后半部分）、14、16、17、18章，并负责全书校对及统稿；贺敬翻译第9、12章；马烁翻译第11、13、15章，苏媛媛翻译第4、5、6章；王文卓翻译第2、3、7章；许晓艳翻译第10章（前半部分）。限于译者的英语和专业水平，译文难免存在缺点和错误，欢迎广大读者批评指正。

译者
2014年3月

原书前言

本书的目的是介绍适用于工程类学生和实际专业人员的高级变流技术。它总共约 800 页，含 550 个图表和 50 种算法，介绍了起初是由我们开发的 200 多种高级变流器拓扑，包括现代变流技术的约 150 种最新电路。还讨论了最近发表的某些新拓扑。所有原型都是对现代电力电子学的创新和巨大贡献。近年来，变流技术发展迅速。本书对很多过去没有详细分析的新型变流电路都作了详细分析。本书还说明了确定准确解的正确方法，给出了工业用变流器的设计案例。解决了一些历史问题，如准确确定单相整流器导通角和功率因数校正。

由于世界性能源短缺，我们不得不寻找新的能源。为研究能源，我们必须探索宇宙。本书首先概述了天文学和地球物理学的某些基础知识，研究某些探索性方法，最后回到我们的主课题——可再生能源开发、节能方法和提高供电质量。

电力电子学是把电能从电源变换到用户的技术。它对所有工业分支和每一个家庭都至关重要。电能转换技术是电力电子学的首要课题。相应的设备可分为四种：

- 1) AC/DC 整流器；
- 2) DC/DC 变流器；
- 3) DC/AC 逆变器；
- 4) AC/AC 变流器。

AC/DC 整流器是最早开发的变流器。人们讨论了大部分传统电路。但遗憾的是，某些电路的分析并不正确。典型例子是带 $R-C$ 负荷的单相二极管整流器。AC/DC 整流器的新方法是含功率因数校正 (Power Factor Correction, PFC) 和单位功率因数 (Unity Power Factor, UPF) 的新拓扑。本书介绍了几种实施 PFC 和 UPF 技术的方法。

DC/DC 变流技术近几十年来发展迅速。按照最新数字，现有的 DC/DC 变流器拓扑超过 600 种。每年都有新拓扑被创造出来。从 2000 年以来，大量 DC/DC 变流器被初步划分为 6 代。这种系统性分类对于追踪 DC/DC 变流器的演化和发展非常有用。做出最突出贡献的是电压举升和超举技术。而且我们还创造了新方法，即分裂电容器和分裂电抗器以改进超举技术。本书介绍了 100 多种电压举升和超举变流器的拓扑。DC/DC 变流技术的发展如此成功，以致它们的基础技术也被用于其他类型的变流器。本书讨论了 AC/DC 变流器和 DC 调制的 AC/AC 变流器。这些技术方法可用于实施 UPF。

DC/AC 逆变器可分为两类：脉宽调制 (Pulse - Width - Modulation, PWM) 逆变器和多电平逆变器。人们对电压源逆变器 (Voltage Source Inverter, VSI) 和电流源逆变器 (Current Source Inverter, CSI) 等 PWM 逆变器很熟悉。阻抗网络逆变器

(Impedance Source Inverter, ZSI) 是 2003 年引入的。它吸引了很多电力电子专家的注意, 导致近年来发表了成千上万篇专门针对它的研究和工业应用论文。多电平逆变器是 20 世纪 80 年代早期发明的, 此后它发展迅速。很多多电平逆变器的新拓扑被设计出来并得到工业应用, 尤其是在可再生能源系统上。它的典型电路是二极管钳位逆变器、电容器钳位逆变器和混合型 H 桥式多电平逆变器。我们还创制了一种使用较少器件产生较多电平的新的串联梯次多电平逆变器 (Series - Laddered Multi-level Inverter)。多电平逆变器克服了 PWM 逆变器的缺点, 有更广泛的工业应用。

传统的 AC/AC 变流器可分为三种: 电压调制 AC/AC 变流器、周波变换器和矩阵变流器。所有传统 AC/AC 变流器都是把高压变换为低压, 电压和频率可调。它们的缺点是输出电压低, 总谐波畸变 (Total Harmonic Distortion, THD) 性能不佳。矩阵变流器是 20 世纪 80 年代引入的。但遗憾的是, 它的高 THD 限制了它的应用。因此人们又开发了新型的 AC/AC 变流器, 如次包络调制 (Sub - Envelope Modulation) AC/AC 变流器和直流调制 AC/AC 变流器。这些技术成功地克服了高 THD 的缺点。直流调制 AC/AC 变流器还有其他优点, 如输出电压高和多相输出等。

可再生能源系统需要使用大量变流器。很多新型变流器是近几十年发明的, 包括 Vienna 整流器和阻抗网络逆变器。风力发电系统需要使用新型 AC/DC/AC 变流器。太阳能板发电系统需要使用 DC/AC/DC 变流器。因此, 本书最后两章探讨这些变流器。

本书共 18 章。第 1 章介绍能源的基本概念。第 2 章论述新能源。3G 和可再生能源在第 3 章介绍。第 4 章介绍电力电子学。第 5 章介绍不可控 AC/DC 变流器。第 6 章介绍可控 AC/DC 变流器。第 7 章和第 8 章分别讨论传统二极管整流器和可控 AC/DC 整流器。第 7 章阐述功率因数校正和单位功率因数技术。第 8 章讨论 DC/DC 变流器。第 9 章和第 10 章分别介绍电压举升和超举技术。第 11 章介绍分裂电容器和分裂电抗器的新方法。第 12 章和第 13 章分别介绍 PWM DC/AC 逆变器和多电平 DC/AC 逆变器。第 14 章介绍高级多级逆变器。第 15 章介绍传统 AC/AC 变流器。第 16 章介绍改进的 AC/AC 变流器。第 17 章介绍可再生能源系统使用的 AC/DC/AC 变流器和 DC/AC/DC 变流器。最后, 第 18 章介绍太阳能光伏发电和风力发电系统设计。

我们是高级变流技术方面的开拓者, 多年从事该领域的研究。我们发明了大量变流器; DC/DC 变流器系列被命名为罗氏变流器 (Luo converter)。它覆盖了所有六代变流器, 并得到世界范围的承认。超举变流器是我们 25 年研究工作的最著名成就。

新加坡 新加坡南洋理工大学
罗方林博士
新加坡 新加坡南洋理工大学
叶虹博士

MATLAB® 是 MathWorks 公司的注册商标。了解该产品信息请联系：

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA, 01760 - 2098 USA

Tel: 508 - 647 - 7000

Fax: 508 - 647 - 7001

E - mail: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

作者简介

罗方林博士是新加坡南洋理工大学（Nanyang Technological University, NTU）电力与电子工程学院的副教授（associate professor）。他在中国成都的四川大学以优异成绩获得无线电电子物理学学士学位，并于1986年获得英国剑桥大学电力工程和计算机科学博士学位。

从四川大学毕业后，罗方林博士供职于北京中国冶金自动化研究所，任高级工程师。然后他转到企业工作，在法国巴黎 Saunier Duval 公司任项目工程师。在获得剑桥大学博士学位后，他先后在英格兰 Hocking NDT 公司、Allen - Bradley IAP 公司和 Simplatroll 公司工作，任高级工程师。罗博士是剑桥理学学会会员和 IEEE 高级会员。他先后出版了12本教科书，并在 IEE/IET 会刊、IEEE 学报以及各种国际会议上发表了308篇科技论文。他的研究兴趣包括电力电子学和电脑化人工智能控制（artificial intelligent control, AIC）交直流电机驱动，数字信号处理，以及 AC/DC、DC/DC 和 AC/AC 变流器及 DC/AC 逆变器，可再生能源系统和电动汽车。

罗方林博士目前是 IEEE 电力电子学报和 IEEE 工业电子学学报的副主编。他还是国际杂志电力工程和能源高级技术的编辑，在1998~2003年曾任国际杂志电源技术及应用的主编。他还曾担任 IEEE 工业电子学及应用第一次大会（ICIEA2006）和第三次大会（ICIEA2008）的会议主席。



叶虹博士 1995 年以优异成绩获中国西安交通大学学士学位，1999 年获西安交通大学工程硕士学位，2005 年获新加坡南洋理工大学博士学位。

她从 1995 年到 1997 年在中国 XIYI 公司研发部任研发工程师，2003 ~ 2004 年在 NTU 任副研究员 (research associate)，从 2005 年起任研究员 (research fellow)。

叶虹博士是 IEEE 会员，与他人合著 12 本书。她在 IEEE 学报、IEEE 会议和其他国际杂志，以及各种国际会议上发表过 80 多篇科技论文。她的研究兴趣主要是电力电子学和变流技术、信号处理、运筹学和结构生物学。



能量转换技术是电力电子学的关键，对于需要大量变流器的可再生能源系统更是如此。本书描述了高级变流技术并提供了可再生能源系统（包括风电机组及太阳能板发电系统）使用的变流器及逆变器的设计案例。

作为预备性内容，本书首先回顾了天文学和地球物理学的基本知识，然后系统介绍了200多种最初由作者开发的高级变流器拓扑，包括150多种现代变流技术的更新电路。本书还讨论了新近发表的拓扑，并详尽分析了新型变流器电路。这些创新方法包括可应用于超举变流器和其他变流器的分裂电容器和分裂电抗器技术。

除了介绍很多前沿技术之外，作者还解决了一些历史问题，如准确确定单相整流器导通角和功率因数校正。他们还介绍了一种新级数梯次多电平逆变器。这种逆变器可使用很少器件来产生更多电平，克服了脉宽调制（PWM）逆变器的缺点，开辟了更广阔的工业应用领域。

本书两作者是高级变流技术的开拓者。他们创建了大量变流器，包括世界著名的DC/DC罗氏变流器和超举罗氏变流器。本书包含了大量案例和图表，可以指导读者设计可再生能源系统使用的高级变流器。

本书可供从事电力电子技术的科研和工程技术人员阅读，也可供高等院校相关专业师生参考。

目 录

译者序

原书前言

作者简介

第 1 章 引言	1
1.1 宇宙中的恒星	2
1.2 银河系, 星云和黑洞	4
1.3 红移和宇宙大爆炸	7
1.4 太阳系	8
1.5 地球	12
1.5.1 地球是圆的	13
1.5.2 公转和自转	13
1.5.3 地球是太阳系的行星	14
1.5.4 地层	15
1.5.5 地壳的化学构成	16
1.5.6 地球上的水	16
1.5.7 地壳构造板块	17
1.5.8 地球是非常脆弱的	17
1.5.9 地球的地质年龄	18
1.5.10 保护地球	18
参考文献	18
第 2 章 新能源	19
2.1 核裂变	19
2.1.1 裂变过程	19
2.1.2 链式反应	20
2.2 核聚变	21
2.2.1 聚变过程	21
2.2.2 氢元素	22
2.2.3 聚变反应	23
2.2.4 热核聚变	23

2.3 微中子的捕获	24
2.3.1 微中子	24
2.3.2 微中子的来源	25
2.3.3 微中子探测	28
2.4 小结	29
参考文献	29
第3章 3G 和可再生能源	30
3.1 分布式发电	30
3.1.1 规模经济性	30
3.1.2 就地发电	30
3.1.3 分布式能源	31
3.1.4 成本因素	31
3.2 微电网	32
3.3 智能电网	33
3.4 太阳能	35
3.5 可再生能源	36
参考文献	37
第4章 电力电子学	38
4.1 本书使用的符号和因数	38
4.1.1 电力系统使用的符号	38
4.1.2 AC 系统使用的因数和符号	40
4.1.3 DC 系统使用的因数和符号	42
4.1.4 功率开关系统使用的因数和符号	43
4.1.5 其他因数和符号	45
4.1.6 快速傅里叶变换	49
4.2 AC/DC 整流器	55
4.2.1 历史问题	56
4.2.2 现代化电路	56
4.2.3 功率因数校正方法	56
4.3 DC/DC 变流器	56
4.3.1 现代化变流器	57
4.3.2 新概念和数学建模	57
4.3.3 功率比较核	57
4.4 DC/AC 逆变器	57

4.4.1	现有逆变器分类	58
4.4.2	现代化电路	58
4.4.3	软开关方法	58
4.5	AC/AC 变流器	58
4.6	AC/DC/AC 和 DC/AC/DC 变流器	59
	参考文献	60
第 5 章	不可控 AC/DC 变流器	61
5.1	引言	61
5.2	单相半波变流器	62
5.2.1	R 负荷	62
5.2.2	$R-L$ 负荷	62
5.2.3	带续流二极管的 $R-L$ 电路	68
5.2.4	带反电动势的 $R-L$ 负荷电路	69
5.2.5	带电容滤波器的单相半波整流器	73
5.3	单相全波变流器	77
5.3.1	R 负荷	78
5.3.2	$R-C$ 负荷	79
5.3.3	$R-L$ 负荷	81
5.4	三相半波变流器	83
5.4.1	R 负荷	83
5.4.2	$R-L$ 负荷	84
5.5	六相半波变流器	86
5.5.1	带中性线的六相电路	86
5.5.2	平衡扼流双反星电路	87
5.6	三相全波变流器	87
5.7	多相全波变流器	90
5.7.1	六相全波二极管整流器	90
5.7.2	六相双桥式全波二极管整流器	91
5.7.3	六相双变压器双桥全波二极管整流器	91
5.7.4	六相三变压器双桥全波二极管整流器	91
	参考文献	93
第 6 章	可控 AC/DC 变流器	94
6.1	引言	94
6.2	单相半波可控变流器	94

6.2.1	R 负荷	94
6.2.2	$R-L$ 负荷	96
6.2.3	$R-L$ 负荷加反电动势 V_c	98
6.3	单相全波可控变流器	99
6.3.1	$\alpha > \varphi$, 断续负荷电流	101
6.3.2	$\alpha = \varphi$, 连续负荷电流的边缘状态	102
6.3.3	$\alpha < \varphi$, 连续负荷电流	102
6.4	三相半波可控整流器	103
6.4.1	R 负荷电路	104
6.4.2	$R-L$ 负荷电路	105
6.5	六相半波可控整流器	106
6.5.1	带中性线六相电路	106
6.5.2	平衡扼流双反星电路	108
6.6	三相全波可控变流器	109
6.7	多相全波可控变流器	111
6.8	线路电感对输出电压的影响 (重叠)	114
	参考文献	116
第7章	AC/DC 变流器的功率因数校正	118
7.1	引言	118
7.2	DC/DC 变换整流器	118
7.3	PWM 升压型整流器	125
7.3.1	直流侧的 PWM 升压型整流器	125
7.3.2	电源侧 PWM 升压型整流器	127
7.4	抽头变压器型整流器	129
7.5	单级功率因数校正 AC/DC 整流器	133
7.5.1	工作原理	134
7.5.2	数学模型推导	135
7.5.3	仿真结果	139
7.5.4	试验结果	139
7.6	VIENNA 整流器	142
7.6.1	电路分析与工作原理	144
7.6.2	提议的控制算法	146
7.6.3	提议的 VIENNA 整流器的控制器框图	148
7.6.4	变流器的设计与仿真结果	148

7.6.5 试验结果	152
参考文献	157
第8章 经典DC/DC变流器	159
8.1 引言	159
8.2 基本变流器	161
8.2.1 降压变流器	162
8.2.2 升压变流器	165
8.2.3 升降压变流器	167
8.3 正输出升降压变流器	170
8.3.1 降压运行模式	171
8.3.2 升压运行模式	171
8.3.3 升降压运行模式	171
8.3.4 运行控制	171
8.4 变压器型变流器	174
8.4.1 正励变流器	175
8.4.2 反励变流器	178
8.4.3 推挽变流器	178
8.4.4 半桥变流器	178
8.4.5 桥式变流器	179
8.4.6 Zeta 变流器	181
8.5 成熟变流器	181
8.5.1 正输出罗氏变流器 (基本电路)	181
8.5.2 负输出罗氏变流器 (基本电路)	186
8.5.3 双输出罗氏变流器 (基本电路)	188
8.5.4 Cúk 变流器	188
8.5.5 单端初级电感变流器	191
8.6 分接电感式变流器	192
参考文献	194
第9章 电压举升变流器	195
9.1 引言	195
9.2 七种自举变流器	196
9.2.1 自举 Cúk 变流器	197
9.2.2 自举正输出罗氏变流器	201
9.2.3 反向自举正输出罗氏变流器	204

9.2.4	自举负输出罗氏变流器	206
9.2.5	反向自举负输出罗氏变流器	208
9.2.6	自举 SEPIC 变流器	210
9.2.7	增强型自举正输出罗氏变流器	213
9.3	正输出罗氏变流器	214
9.3.1	再举电路	214
9.3.2	三举电路	220
9.3.3	四举电路	222
9.3.4	小结	225
9.4	负输出罗氏变流器	227
9.4.1	再举电路	227
9.4.2	负输出三举电路	231
9.4.3	负输出四举电路	233
9.4.4	小结	235
9.5	改进的正输出罗氏变流器	237
9.5.1	自举电路	237
9.5.2	再举电路	238
9.5.3	多举电路	240
9.6	双输出罗氏变流器	241
9.6.1	自举电路	242
9.6.2	再举电路	247
9.6.3	三举电路	253
9.6.4	四举电路	257
9.6.5	小结	261
9.7	Cúk 电压举升变流器	263
9.7.1	基本自举 Cúk 电路	264
9.7.2	成熟自举 Cúk 变流器	264
9.7.3	再举 Cúk 变流器	265
9.7.4	多举 Cúk 变流器	266
9.7.5	基本自举电路与成熟自举电路的仿真及试验验证	266
9.8	SEPIC 电压举升变流器	267
9.8.1	自举 SEPIC 电路	268
9.8.2	再举 SEPIC 电路	268
9.8.3	多举 SEPIC 变流器	269
9.8.4	再举 SEPIC 变流器的仿真及试验结果	270