



国际电气工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

光伏与风力发电系统 并网变换器

Grid Converters for Photovoltaic and
Wind Power Systems

(丹麦) Remus Teodorescu

(意大利) Marco Liserre

(西班牙) Pedro Rodríguez

著

周克亮 王政 徐青山

译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

光伏与风力发电系统 并网变换器

(丹麦) Remus Teodorescu

(意大利) Marco Liserre 著

(西班牙) Pedro Rodríguez

周克亮 王 政 徐青山 译



机械工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏与风力发电系统并网变换器/(丹)特奥多雷斯库 (Teodorescu, R.)
等著;周克亮,王政,徐青山译. —北京:机械工业出版社,2012.5
(国际电气工程先进技术译丛)
书名原文: Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems
ISBN 978-7-111-38320-8

I. ①光… II. ①特…②周…③王…④徐… III. ①太阳能发电-系统工程-变换器-研究②风力发电系统-系统工程-变换器-研究 IV. ①TM615
②TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 093534 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:闫洪庆

版式设计:霍永明 责任校对:樊钟英

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·22.25 印张·445 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-38320-8

定价:88.00 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



并网变换器对于可再生能源接入电网十分重要。随着可再生能源接入电网规模不断扩大,并网所提出的要求也越来越严格。当前并网变换器要求能够具有一些高级功能,如有功功率和无功功率的动态控制、系统能够在较大电压和频率范围内运行、低电压故障穿越、电网故障下无功电流注入、支撑电网电压等。

本书介绍了目前光伏和风力发电并网变换器常用的结构、调制策略和控制方法。除了电力电子方面的知识,本书还涉及了光伏和风力发电系统与电网相关的一些其他技术。根据当前光伏和风力发电系统并网要求,本书主要讨论了以下内容:用于光伏和风力发电的并网变换器拓扑结构;光伏系统的孤岛检测方法;基于广义2阶积分器的电网同步技术;变换器在电网不对称故障下高性能同步技术;用于电流控制和谐波补偿的比例谐振控制器技术;并网滤波器设计及有源阻尼技术;电网故障下包含正、负序分量的功率控制方法。

本书适合电气工程背景的研究生和可再生能源相关专业技术人员阅读。同时本书也可作为高校相关课程教材,如果高校老师有兴趣采用本书进行授课,可从以下网站上下载相关讲义:www.wiley.com/go/grid_converters。

Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems/Remus Teodorescu, Marco Liserre, Pedro Rodríguez © 2011, John Wiley & Sons, Ltd.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley. All right reserved.

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。

本书版权登记号:图字 01-2011-2312 号

译者序

近十年来,风力及光伏并网发电的应用浪潮冲击着全球,相关技术蓬勃发展,并成为引发智能电网技术发展的重要导线。由于风力及光照的间歇性、不可控性,大规模的风力发电及光伏发电并网给电网稳定、电能质量以及用电需求侧管理等带来了重大挑战。风力发电站和光伏发电站均须经过并网变换器接入电网,与电网产生交互作用。风力发电以及光伏发电并网变换器的控制技术自然而然成为了世界研究的热点。虽然有关的论文和书籍汗牛充栋,但系统、全面和深入介绍并网变换器的拓扑和控制技术的专著却是一书难求。2011年Wiley出版社和IEEE出版社联合出版了由丹麦奥尔堡大学(Aalborg University)的Remus Teodorescu教授、巴里理工学院(Politecnico di Bari)的Marco Liserre博士以及加泰罗尼亚理工大学(Technical University of Catalonia)的Pedro Rodríguez博士合著的高质量新书《光伏与风力发电系统并网变换器》恰如及时雨解了燃眉之急。本书有以下极为突出的特点:①围绕并网变换器与电网的相互作用这一关键问题,系统、全面地总结和探讨了无变压器光伏并网逆变器拓扑、孤岛检测、并网变换器的电网同步、风电和光伏并网标准、风电并网变换器的控制与故障穿越控制、电能质量控制等一系列重要和前沿课题;②研究内容深入,对电网接入标准的比较分析,尤其是风电变换器的建模与控制方法等的推导细致入微,有助于读者掌握有关的技术要领;③本书的内容其实源自2005年起在奥尔堡大学能源技术学院所成功开设的一门一年两次的工业/博士课程“用于可再生能源系统的电力电子”,书中大多数内容都经过实验和测试验证,理论结合实际,可操作性强,参考文献完备,示例丰富,很多工程方案的选取和实现可轻易地从书中找到答案。因此本书既可以作为学习和研究风力发电和光伏并网变换器控制技术的教材,也可作为解决工程实际问题的参考手册,并对有关前沿技术的研究有所启迪。

承蒙机械工业出版社付承桂编辑的厚爱和耐心,三位译者尽享先睹为快之乐,并有机会尽绵薄之力在第一时间开展本书的翻译工作。希望译作能对国内同行有所裨益。

本书第1、2、4章和附录等的翻译工作主要由周克亮完成,第6、8、9、10章的翻译工作主要由王政完成,第3、5、7、11、12章的翻译工作主要由徐青山完

IV 光伏与风力发电系统并网变换器

成。在译作付梓之际，译者借此机会对本书策划编辑付承桂的辛勤工作致以深深的谢意！

由于译者才疏学浅，书中翻译错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评斧正。

周克亮

(坎特伯雷大学电气与计算机工程系，新西兰)

王政 徐青山

(东南大学电气工程学院，南京)

2012 年 3 月

原 书 序

全球范围内风力和光伏所发出并网电能的比重呈指数增长。各电网运营商为维护电网的稳定性实施了日益严格的标准，限制风电和光伏的接入。风力发电站和光伏发电站均经过并网变换器与电网相连。除了将发出的直流电送往交流电网，并网变换器如今还必须具备一些高级的功能，如有功功率和无功功率的动态控制；一定电压和频率范围内的稳定运行；低电压穿越；故障期间的无功电流注入；发挥诸如频率控制等电网平衡作用等。因而本书旨在介绍光伏和风电并网变换器的拓扑、调制与控制。另外作为经典电力电子手册的补充，本书介绍的内容还包括：依据最新的电网接入标准，光伏和风电并网变换器应具备特殊的控制功能；在传统的电网同步和电流控制策略基础上，增加了包含电网不对称情形的通用电网条件的内容。

本书的内容源自 2005 年 5 月起在奥尔堡大学能源技术学院所开设的一门一年两次的工业/博士课程“用于可再生能源系统的电力电子”。该课程成功举办至今（至 2010 年底为止），已有约 250 名博士或工业工程师参与其中。由于课程约有 40% 的时间用于实验室设计和测试并网变换器控制策略等实践环节，课程取得了成功。巴里理工学院（Politecnico di Bari）的 Marco Liserre 博士、加泰罗尼亚理工大学（UPC）的 Pedro Rodríguez 博士和我一起合著本书的目的正是为该课程提供一本独特的教科书。

本书对于那些具有电气工程背景并打算进入与光伏和风电有关的电气领域工作的研究生，以及光伏与风电行业的专业人员，将是一本不错的参考书。

（译者注：以下为各章及附录的主题，具体可参见目录，此处不再译出。）

原书作者简介

Remus Teodorescu, 1989 年获布达佩斯理工大学硕士学位, 1994 年获加拉茨大学 (University of Galati) 电力电子博士学位。1998 年加入奥尔堡大学能源系电力电子研究组, 现担任教授职务。

Remus Teodorescu 已发表 150 多篇 IEEE 会议及期刊论文、1 本著作和 4 项专利 (待授权)。1998 年 IEEE 工业应用年会 (IAS) 的技术委员会论文奖的获奖者之一。现为 IEEE 高级会员、《IEEE Power Electronics Letters》期刊的前副主编和丹麦 IEEE IES/PELS/IAS 联合分会的主席。其研究兴趣包括: 主要用于风电、光伏系统以及 FACTS/HVDC 等电力设备的并网变换器的设计和控制。Remus Teodorescu 现为 Vestas 一项为期 5 年电力计划项目的负责人 (co-ordinator), 有 10 名电力电子、电力系统与储能领域的博士生从事该项目的研究工作。

Marco Liserre, 从事电力电子、工业电子以及电机的教学工作。其研究兴趣包括工业电子在基于可再生能源的分布式发电系统中的应用。

Marco Liserre 曾在丹麦奥尔堡大学 (Aalborg University)、西班牙阿尔卡拉大学 (Alcala de Henares University) 以及德国基尔大学 (Christian-Albrechts University of Kiel) 任访问教授。曾在多所大学授课, 为多次学术会议开办讲座。Liserre 博士现为《IEEE Transactions on Industrial Electronics》和《IEEE Transactions on Sustainable Energy》期刊的副主编。他是《IEEE Industrial Electronics Magazine》杂志的创办人和前主编 (2007—2009)。他还是 IEEE 工业电子学会 (IES) 下属的新能源系统技术委员会的创办人和主席。他获得 IES 2009 Early Career Award 奖, 担任 IEEE-IES 学会出版部副主席。Liserre 博士曾担任 2010 年在意大利巴里 (Bari) 举办的国际工业电子研讨会 (ISIE 2010) 的联合主席。

Pedro Rodríguez, 加泰罗尼亚理工大学 (Technical University of Catalonia) 电气工程硕士学位及博士学位获得者。1990 年加入加泰罗尼亚理工大学任助理教授, 目前任该校电气系副教授以及可再生电能系统研究中心主任。曾在美国弗吉尼亚理工大学 (即弗吉尼亚理工学院和州立大学) 的电力电子系统中心做访问学者。曾在丹麦奥尔堡大学 (Aalborg University) 能源技术系 (DET) 做博士后研究员。目前他作为 DET 的定期客座教授在奥尔堡大学教授博士课程并作为副导师参与 Vestas 电力计划项目。

Pedro Rodríguez 著有 100 多篇技术期刊及会议论文。他拥有光伏及风电系统方面的 4 项授权专利。他曾在世界各地的多所大学教授应用于电力系统的功率变换器方面的课程。其研究领域包括分布式发电系统的电子功率处理装置（侧重并网交互式功率处理装置的控制设计）、为绿色能源发电用电力电子变换装置，以及为改善电网稳定性和电能质量提供新的技术解决方案。**Rodríguez** 博士为 IEEE 高级会员、《IEEE Transactions on Power Electronics》期刊的副主编，以及 IEEE-IES 学生和 GOLD 会员活动委员会的主席。

目 录

译者序

原书序

原书作者简介

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电的进展	1
1.2 光伏发电的进展	3
1.3 并网变换器——风力发电和光伏发电系统并网的关键要素	4
参考文献	4
第 2 章 光伏逆变器结构	5
2.1 简介	5
2.2 由 H 桥拓扑派生出的逆变器结构	7
2.2.1 基本全桥逆变器	7
2.2.2 H5 逆变器 (SMA)	10
2.2.3 HERIC 逆变器 (Sunways)	12
2.2.4 REFU 逆变器	14
2.2.5 带有直流旁路的全桥逆变器——FB-DCBP (Ingeteam)	16
2.2.6 全桥零电压整流器——FB-ZVR	18
2.2.7 派生自 H 桥的拓扑小结	20
2.3 由 NPC 拓扑派生出的逆变器结构	20
2.3.1 中点钳位型 (NPC) 半桥逆变器	20
2.3.2 Conergy NPC 逆变器	22
2.3.3 派生自 NPC 的逆变器拓扑小结	24
2.4 典型光伏逆变器结构	24
2.4.1 带有高频变压器的 H 桥升压型光伏逆变器	24
2.4.2 带有低频变压器的升压型逆变器	24
2.5 三相光伏逆变器	25
2.6 控制结构	26
2.7 结论及未来趋势展望	27

参考文献	28
第3章 光伏并网标准	30
3.1 简介	30
3.2 国际标准	30
3.2.1 IEEE 1547 分布式发电并网标准	30
3.2.2 IEC 61727 电力设备接口特性	31
3.2.3 VDE 0126-1-1 安全	32
3.2.4 IEC 61000 电磁兼容性 (EMC-低频)	32
3.2.5 EN 50160 公共配电系统电压质量	33
3.3 电网异常状态时的响应特性	34
3.3.1 电压偏差	34
3.3.2 频率偏差	34
3.3.3 恢复并网	34
3.4 电能质量	35
3.4.1 直流电流注入	35
3.4.2 电流谐波	35
3.4.3 平均功率因数	36
3.5 反孤岛的要求	36
3.5.1 IEEE 1547/UL 1741 对反孤岛的定義	37
3.5.2 IEC 62116 对反孤岛的定義	38
3.5.3 VDE 0126-1-1 对反孤岛的定義	38
3.6 小结	39
参考文献	39
第4章 单相功率变换器的电网同步	41
4.1 简介	41
4.2 单相系统的电网同步技术	42
4.2.1 采用傅里叶分析的电网同步	42
4.2.2 采用锁相环的电网同步	48
4.3 基于正交信号的相角检测方法	54
4.4 一些基于正交信号发生器的 PLL	58
4.4.1 基于 $T/4$ 传输延时的 PLL	58
4.4.2 基于 Hilbert 变换的 PLL	58
4.4.3 基于反 Park 变换的 PLL	59

4.5 一些基于自适应滤波器的 PLL	63
4.5.1 改进型 PLL	64
4.5.2 2 阶自适应滤波器	65
4.5.3 2 阶广义积分器	67
4.5.4 基于 2 阶广义积分器的 PLL	71
4.6 2 阶广义积分器锁频环	73
4.6.1 2 阶广义积分器锁频环的分析	75
4.7 小结	81
参考文献	81
第 5 章 孤岛检测	84
5.1 简介	84
5.2 检测盲区	85
5.3 孤岛检测方法概述	86
5.4 被动式孤岛检测方法	88
5.4.1 过/欠频率和过/欠电压检测法	88
5.4.2 相角跳变检测法 (PJD)	89
5.4.3 谐波检测法 (HD)	89
5.4.4 被动式检测法比较	93
5.5 主动式孤岛检测方法	93
5.5.1 频率漂移法	94
5.5.2 电压漂移法	99
5.5.3 电网阻抗估算法	100
5.5.4 基于锁相环的孤岛检测法	103
5.5.5 主动式孤岛检测法比较	108
5.6 小结	110
参考文献	110
第 6 章 风力发电系统并网变换器结构	112
6.1 简介	112
6.2 风力发电系统结构	113
6.3 并网变换器拓扑	116
6.3.1 单单元变换器 (VSC 或 CSC)	117
6.3.2 多单元变换器 (交错式或级联式)	121
6.4 风力发电系统控制	123

6.4.1 发电机侧控制	124
6.4.2 风力发电系统并网控制	127
6.5 小结	129
参考文献	129
第7章 风机系统的并网要求	131
7.1 简介	131
7.2 并网标准的演变	132
7.2.1 丹麦	134
7.2.2 德国	134
7.2.3 西班牙	135
7.2.4 英国	135
7.2.5 爱尔兰	136
7.2.6 美国	136
7.2.7 中国	136
7.2.8 小结	136
7.3 正常工作情况下的频率和电压偏移	137
7.4 正常工作情况下的有功功率控制	138
7.4.1 功率限制输出	138
7.4.2 频率控制	140
7.5 正常工作情况下的无功功率控制	141
7.5.1 德国	141
7.5.2 西班牙	143
7.5.3 丹麦	143
7.5.4 英国	143
7.5.5 爱尔兰	143
7.5.6 美国	144
7.6 电网扰动下的运行状况	144
7.6.1 德国	144
7.6.2 西班牙	146
7.6.3 美国西部电力协调委员会	149
7.7 并网规范中有关谐波的探讨	150
7.8 未来趋势	150
7.8.1 本地电压控制	151
7.8.2 惯性模拟 (IE)	151

7.8.3 功率振荡阻尼 (POD)	151
7.9 小结	151
参考文献	152
第8章 三相功率变换器的电网同步	153
8.1 简介	153
8.2 电网故障情况下的三相电压矢量	154
8.2.1 电网故障情况下的不对称电网电压	158
8.2.2 瞬时电网故障、电压跌落	160
8.2.3 电压跌落的派生	162
8.3 不对称及畸变电网条件下的同步参考坐标系锁相环	165
8.4 解耦双同步参考坐标系锁相环 (DDSRF-PLL)	169
8.4.1 双同步参考坐标系	169
8.4.2 解耦网络	170
8.4.3 解耦双同步参考坐标系的分析	171
8.4.4 解耦双同步参考坐标系锁相环的结构和响应	174
8.5 双2阶广义积分器锁频环 (DSOGI-FLL)	177
8.5.1 双2阶广义积分器的结构	178
8.5.2 双2阶广义积分器与解耦双同步参考坐标系的关系	178
8.5.3 对应于双2阶广义积分器的锁频环	180
8.5.4 双2阶广义积分器锁频环的响应	181
8.6 小结	183
参考文献	183
第9章 风力发电系统并网变换器控制	185
9.1 简介	185
9.2 变换器的模型	186
9.2.1 L 滤波器逆变器的数学模型	186
9.2.2 LCL 滤波器逆变器的数学模型	189
9.3 交流电压和直流电压控制	190
9.3.1 直流母线电压控制	190
9.3.2 通过交流电流控制实现的直流母线电压级联控制	192
9.3.3 PI 控制器的调节	194
9.3.4 基于PI的电压控制设计实例	196
9.4 电压定向控制和直接功率控制	198

9.4.1 同步坐标系电压定向控制: PQ 开环控制	199
9.4.2 同步坐标系电压定向控制: PQ 闭环控制	200
9.4.3 静止坐标系电压定向控制: PQ 开环控制	200
9.4.4 静止坐标系电压定向控制: PQ 闭环控制	202
9.4.5 基于虚拟磁通的控制	202
9.4.6 直接功率控制	203
9.5 离网、微电网、下垂控制和电网支撑	206
9.5.1 无负载分配的并网/离网运行	206
9.5.2 带可控储能装置的微电网运行	208
9.5.3 下垂控制	209
9.6 小结	211
参考文献	212
第 10 章 电网故障情况下的并网变换器控制	214
10.1 简介	214
10.2 不对称电网电压条件下并网变换器的控制技术概述	215
10.3 用于不对称电流注入的控制结构	220
10.3.1 用于不对称电流注入的解耦双同步坐标系电流控制器	220
10.3.2 用于不对称电流注入的谐振控制器	228
10.4 不对称电网条件下的功率控制	231
10.4.1 瞬时有功-无功控制 (IARC)	232
10.4.2 正序和负序控制 (PNSC)	233
10.4.3 平均有功-无功控制 (AARC)	235
10.4.4 对称的正序控制 (BPSC)	236
10.4.5 IARC、PNSC、AARC 和 BPSC 策略的性能比较	237
10.4.6 灵活正序和负序控制 (FPNSC)	240
10.5 带电流限制的灵活功率控制	241
10.5.1 不对称电网条件下的电流矢量轨迹	242
10.5.2 三相电流的瞬时值	244
10.5.3 各相最大电流的估计	245
10.5.4 最大有功功率和无功功率设定点的估计	248
10.5.5 灵活正序和负序控制的性能	249
10.6 小结	254
参考文献	255

第 11 章 并网滤波器设计	257
11.1 简介	257
11.2 滤波器拓扑	258
11.3 设计注意事项	259
11.4 <i>LCL</i> 滤波器与电网相互作用的实例	263
11.5 谐振问题和阻尼方案	267
11.5.1 无阻尼电流控制环的不稳定性	267
11.5.2 电流控制环的无源阻尼	268
11.5.3 电流控制环的有源阻尼	271
11.6 滤波器的非线性特性	273
11.7 小结	277
参考文献	277
第 12 章 并网电流控制	279
12.1 简介	279
12.2 并网电流谐波标准	280
12.3 独立调制的线性电流控制	281
12.3.1 平均化技术	281
12.3.2 PI 控制	282
12.3.3 无差拍控制	285
12.3.4 谐振控制	287
12.3.5 谐波补偿	291
12.4 调制技术	298
12.4.1 单相调制	300
12.4.2 三相调制	301
12.4.3 多电平调制	304
12.4.4 交错调制	308
12.5 电流控制型变换器的运行限制条件	310
12.6 实例	311
12.7 小结	314
参考文献	314
附录	316
附录 A 三相系统的空间矢量变换	316

A. 1 简介	316
A. 2 频域中的对称分量	316
A. 3 时域中的对称分量	317
A. 4 静止参考坐标系下的 $\alpha\beta 0$ 分量	320
A. 5 同步参考坐标系下的 $dq0$ 分量	321
参考文献	322
附录 B 瞬时功率理论	322
B. 1 简介	322
B. 2 时域内单相系统功率定义的起源	324
B. 3 多相系统有功电流的起源	325
B. 4 多相系统功率电流的瞬时计算	327
B. 5 $p-q$ 理论	329
B. 6 任意多相系统的广义 $p-q$ 理论	331
B. 7 改进的 $p-q$ 理论	331
B. 8 三相功率系统的广义瞬时无功功率理论	333
B. 9 小结	334
参考文献	335
附录 C 谐振控制器	336
C. 1 简介	336
C. 2 内模原理	336
C. 3 dq 坐标系下 PI 控制器与 $\alpha\beta$ 坐标系下 PR 控制器的等效性	337