

智能电网 关键技术研究与应用丛书

微电网中的 电力电子变换器

Power Electronic Converters
for Microgrids

[英] 苏莱曼 M. 沙克 (Suleiman M. Sharkh)

[英] 穆罕默德 A. 阿巴萨若 (Mohammad A. Abusara)

[英] 乔治斯 I. 欧凡纳达克斯 (Georgios I. Orfanoudakis)

[巴基斯坦] 巴巴尔·侯赛因 (Babar Hussain)

著

刘其辉 译



智能电网关键技术研究与应用丛书

微电网中的电力电子变换器

Power Electronic Converters for Microgrids

[英] 苏莱曼 M. 沙克 (Suleiman M. Sharkh)

[英] 穆罕默德 A. 阿巴萨若 (Mohammad A. Abusara)

[英] 乔治斯 I. 欧凡纳达克斯 (Georgios I. Orfanoudakis)

[巴基斯坦] 巴巴尔·侯赛因 (Babar Hussain)

著

刘其辉 译



机械工业出版社

Copyright © 2014 John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Power Electronic Converters for Microgrids, ISBN 978-0-470-82403-0, by Suleiman M. Sharkh, Mohammad A. Abusara, Georgios I. Orfanoudakis, Babar Hussain, 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 Wiley 独家授权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: 01-2014-5463 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

微电网中的电力电子变换器/ (英) 苏莱曼 M. 沙克 (Suleiman M. Sharkh) 等著; 刘其辉译. —北京: 机械工业出版社, 2017. 7
(智能电网关键技术研究与应用丛书)

书名原文: Power Electronic Converters for Microgrids

ISBN 978-7-111-57319-7

I. ①微… II. ①苏…②刘… III. ①变换器-教材 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 162156 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: 赵玲丽

责任校对: 肖琳 封面设计: 鞠杨

责任印制: 张博

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 16 印张 · 321 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-57319-7

定价: 79.00 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

本书以微电网中的电力电子变换器为主要对象，系统地论述了微电网变换器的拓扑、参数设计、调制技术、损耗特性、数字控制等关键技术内容，结合在微电网中应用广泛的在线互动式 UPS，进一步分析了变换器的应用。此外，考虑电力电子变换器的存在及其对微电网运行特性的影响，归纳了微电网保护中的关键技术问题及解决方案，最后本书还给出了一种用于减少微电网中熔断器动作的自适应保护方案。

本书内容丰富、论述系统，适合作为国内开设新能源发电与并网、智能电网等专业的高等院校教材，也将为从事分布式发电及微电网技术、新能源发电与并网技术相关研究与应用的工程技术人员和科研工作人员提供专业性参考资料或培训教材。

译者序

当今世界能源短缺与环境污染日益严重，开发新能源与分布式能源，优化能源结构、改进能源开发利用方式已经成为世界各国的共识。作为促进新能源和分布式能源接入电力系统的一种理想方案，微电网成为国内外业界关注的热点。微电网是一种由分布式电源、储能装置、电力转换装置、负荷、监控和保护装置等组成，具备自我控制、保护和管理功能的小型发配电系统，它实现了数量庞大而分散的分布式电源的有机整合，有效解决了配电系统管理和调度各种分布式电源的技术难题。微电网中的大部分微源（分布式发电设备和储能装置）采用了电力电子变换器作为并网接口电路，以实现高效、灵活的电能形态变换和功率潮流控制。此外，微电网具有交流、直流、交直流混合三种组网形式，不同形式微电网或者微电网与大电网之间的互联往往离不开电力电子变换器。因此，无论是微源的并网控制还是微电网的组网，电力电子变换器都作为核心设备发挥了极为重要的作用，电力变换是微电网运行控制和能量调控的核心内容和关键技术。近年来，国内外关于微电网及电力电子变换技术的文献如雨后春笋不断涌现，它们分别从建模、拓扑、控制、稳定分析、仿真技术等不同角度进行研究，呈现了很多有价值的成果。

由于微源类型的多样性以及微电网在组网、运行、控制等方面的特定需要，微电网中电力变换器的类型很多，它们在拓扑结构、调制策略、控制技术和分析方法等方面各不相同。目前，各种相关专著、教科书虽然数量众多，但是专门立足微电网的特性需求，重点对微电网中几类特定或典型电力电子变换器进行深入分析的专著却不多见。2014年 Wiley 和 IEEE 联合出版的学术专著《Power Electronic Converters for Microgrids》较好地解决了上述问题。该专著由南安普顿大学（Southampton University）的 Suleiman M. Sharkh 教授、埃克塞特大学（University of Exeter）的 Mohammad A. Abusara 高级讲师、南安普顿大学的 Georgios I. Orfanoudakis 博士和 Babar Hussain 博士合作完成。

本书重点选取微电网中应用较为广泛的几类典型电力电子变换器 [传统两电平 PWM 变换器、二极管钳位型（Neutral Point Clamped, NPC）变换器、级联 H 桥型（Cascaded H - Bridge, CHB）变换器、交错并联型变换器] 为主要研究对象，深入地论述了变换器拓扑、调制策略、运行分析与参数设计、损耗特性、直流电压纹波抑制、数字控制等重点技术内容。在此基础上，结合在线互动式 UPS 的应用，系统地介绍了微电网中变换器（包括 AC - DC 变换器和 DC - DC 变换器）运行控制技术和稳定分析方法。此外，本书考虑到电力变换器对微电网保护的影响，还特别梳理了微电网保护的关键技术挑战及解决方案，给出了一种节省熔断器的配电网/微电网自适应保护配合方案。

本书的特点可归纳为：①以微电网中应用广泛的 AC-DC 变换器（逆变器）为主要研究对象，包括传统两电平变换器、二极管钳位型（NPC）变换器、级联 H 桥型（CHB）变换器、交错并联型变换器；相对来说，对 DC-DC 变换器以及 DC-AC 变换器的涉及内容相对较少。②本书研究视角独特，分析过程深入细致，重点研究内容包括 NPC 和 CHB 变换器直流环节电容电流分析及电容设计、两电平和三电平变换器损耗分析及对比、NPC 变换器中点电压低频纹波抑制、变换器数字控制技术、交错并联型并网逆变器设计与控制等。③研究范围全面，内容详实丰富，不但包括电路拓扑、调制、电流计算、损耗分析、电压纹波抑制、数字控制策略等电力电子变换关键技术内容，也包括在线式 UPS 和微电网保护等内容。本书除了理论分析和演绎外，还包括大量的仿真/实验结果、模型、程序代码。本书适合作为高等院校新能源发电与并网、智能电网等专业研究生教材或参考书目，也适合作为从事微电网与分布式发电、新能源发电与并网相关研究的科研或工程人员的参考资料。

本书的翻译工作由刘其辉完成，初稿完成后研究生赵亚男参与了后续完善性工作，帮助译者对初稿进行了仔细的校对，研究生张怡冰参与了部分参考文献的录入工作，在此向她们表示感谢。在译作付梓之际，向机械工业出版社的付承桂编辑表示衷心的感谢，感谢她对该项工作的大力支持和充分理解！

本书的完成得到了国家重点研发计划重点专项项目（项目号：2016YFB0101900）的支持和资助，同时也得到了新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）和电气与电子工程学院各级领导、老师的指导帮助，在此表示感谢。

由于译者水平所限，书中翻译错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

刘其辉
于华北电力大学

原书序言

包括可再生能源和储能在内的微电网和分布式发电 (Distributed Generation, DG), 有助于克服电力系统容量限制、提高效率、减少排放, 便于对各种多样化的可再生能源进行管理。作为发电机或储能与电网之间接口的电力电子装置, 是微电网和分布式发电系统的关键元件, 它需要具有以下功能: 向电网注入符合国家标准的高质量电流; 对储能系统进行可控的充电与放电; 在主网断电的时候实现反孤岛保护, 断开与电网的连接; 电网断电时能对重要负荷继续供电。

本书的目标是对微电网中的电力电子变换器相关的特定问题进行深入分析, 重点针对容量范围为 50 ~ 250kW 的三相变换器。同时, 本书也讨论包括微电网和分布式发电的配电网保护的相关重要问题。本书期望为具有电气工程背景并打算在本领域工作或研究的应届毕业生提供一本教材或参考书。

第 1 章概述了微电网中的电力电子变换器研究现状与未来挑战; 第 2 章描述了传统两电平变换器、二极管钳位 (Neutral Point Clamped, NPC) 三电平变换器和级联 H 桥 (Cascaded H - Bridge, CHB) 的拓扑结构和调制策略; 第 3 章在对直流环节电容电流有效值及电流谐波频谱进行表达的基础上, 讨论了直流环节电容的容量设计; 第 4 章对两电平和三电平变换器的半导体器件损耗和直流环节电容损耗进行了研究, 并给出了不同拓扑之间的损耗对比; 第 5 章研究了 NPC 变换器中性点的低频电压振荡问题, 并提出了一种抑制振荡的算法; 第 6 章针对带有 LCL 输出滤波器的三相两电平电压源型并网逆变器的数字化电流控制器, 讨论了其设计与应用问题; 第 7 章讨论了交错并联型三相电压源并网逆变器的设计与控制, 并对其实际应用进行了分析; 第 8 章讨论了交错并联型并网逆变器重复控制器的设计及实际应用; 第 9 章讨论了具备从并网模式向独立运行模式无缝切换和管理电池充、放电功能的在线互动式 UPS (Uninterruptible Power Supply, 不间断电源) 系统的设计和实际应用问题; 第 10 章讨论了微电网和 DG 接入电网所带来的保护问题和挑战; 第 11 章讨论了包括微电网和 DG 的配电网中重合器 - 熔断器协调问题, 并提出了一种考虑 DG 状态的减少熔断器动作的方案。附录 A 提供了一些 NPC 变换器 SVM (Space Vector Modulation, 空间矢量调制) 的背景材料, 并对实现第 5 章仿真的 MATALB[®]/Simulink 模型和程序进行了分析; 附录 B 提供了对直流环节电容电流有效值和电压纹波进行数字计算的 MATALB[®]代码。

目 录

译者序	
原书序言	
第1章 绪论	1
1.1 微电网变换器的运行模式	2
1.1.1 并网模式	2
1.1.2 独立模式	3
1.1.3 电池充电模式	
1.2 变换器的拓扑结构	3
1.3 调制策略	6
1.4 控制与系统问题	6
1.5 未来的挑战与解决方法	8
参考文献	9
第2章 变换器拓扑	12
2.1 拓扑	12
2.1.1 两电平变换器	12
2.1.2 NPC变换器	13
2.1.3 CHB变换器	13
2.2 脉冲宽度调制策略	16
2.2.1 基于载波的调制策略	16
2.2.2 SVM策略	20
2.3 建模	23
参考文献	25
第3章 NPC和CHB变换器直流环节电容电流分析及电容设计	26
3.1 概述	26
3.2 变换器直流环节电容设计	27
3.3 直流环节电容电流有效值表达式的理论推导	28
3.3.1 NPC逆变器	29
3.3.2 CHB逆变器	32
3.4 直流环节电容谐波电流的理论推导	33
3.4.1 NPC逆变器	33
3.4.2 CHB逆变器	34
3.5 直流环节电容电流有效值和电压纹波幅值的数值计算	35
3.6 仿真结果	38
3.7 讨论	40
3.7.1 NPC变换器和CHB变换器的电容容值比较	40

3.7.2	直流环节电容电流分析方法比较	41
3.7.3	向更多电平数变换器的扩展	42
3.8	结论	42
	参考文献	42
第4章	两电平和三电平变换器拓扑的损耗对比	45
4.1	概述	45
4.2	IGBT-二极管模块的选择	46
4.3	开关损耗	47
4.3.1	两电平变换器的开关损耗	48
4.3.2	NPC 变换器的开关损耗	50
4.3.3	CHB 变换器的开关损耗	51
4.4	通态损耗	51
4.4.1	两电平变换器的通态损耗	53
4.4.2	NPC 变换器的通态损耗	54
4.4.3	CHB 变换器的通态损耗	55
4.5	直流环节电容的电流有效值	57
4.6	结果	60
4.7	结论	62
	参考文献	62
第5章	NPC 变换器中点电压低频振荡的抑制	64
5.1	概述	64
5.2	NPC 变换器调制策略	65
5.3	NV 调制策略的最小 NP 电压纹波	67
5.3.1	局部平均 NP 电流	68
5.3.2	开关约束的影响	69
5.3.3	零纹波区域	71
5.3.4	NP 电压纹波的下限	71
5.4	Band-NV 调制策略	72
5.4.1	传统 NV 策略的准则	73
5.4.2	提出的准则	73
5.4.3	工作区域	74
5.4.4	算法	76
5.4.5	Band-NV 策略的开关时序	79
5.5	Band-NV 调制策略的性能	79
5.5.1	NP 电压纹波	79
5.5.2	有效开关频率-输出电压谐波畸变	81
5.6	Band-NV 调制策略的仿真	82
5.7	混合调制策略	87
5.7.1	提出的混合调制策略	88

5.7.2 仿真结果	89
5.8 结论	93
参考文献	93
第6章 三相两电平逆变器的数字控制	96
6.1 概述	96
6.2 控制策略	98
6.3 数字采样策略	100
6.4 时延对稳定性的影响	101
6.5 电容电流观测器	102
6.6 反馈控制器设计	104
6.7 仿真结果	107
6.8 实验结果	110
6.9 结论	112
参考文献	112
第7章 交错并联型逆变器的设计与控制	114
7.1 概述	114
7.2 纹波消除效应	117
7.3 硬件设计	119
7.3.1 硬件设计准则	119
7.3.2 设计准则的应用	125
7.4 控制器结构	128
7.5 系统分析	129
7.5.1 无源阻尼和电网阻抗的影响	130
7.5.2 计算时延的影响	132
7.5.3 电网扰动的抑制	132
7.6 控制器设计	134
7.7 仿真及实验结果	138
7.8 结论	146
参考文献	146
第8章 交错并联型并网逆变器的重复电流控制	149
8.1 概述	149
8.2 控制器及系统建模	151
8.3 系统分析与控制器设计	153
8.4 仿真结果	156
8.5 实验结果	158
8.6 结论	160
参考文献	160
第9章 在线交互式 UPS	162
9.1 概述	162

9.2 系统概况	164
9.3 核心控制器	168
9.4 功率潮流控制器	170
9.4.1 下垂控制方程	170
9.4.2 小信号分析	171
9.4.3 稳定性分析及下垂系数选择	174
9.5 直流环节电压控制器	180
9.6 实验结果	182
9.7 结论	190
参考文献	191
第 10 章 微电网的保护	194
10.1 概述	194
10.2 继电保护面临的主要挑战	194
10.2.1 故障电流水平的变化	194
10.2.2 设备判别	195
10.2.3 阻抗继电器保护范围的减少	196
10.2.4 双向性及电压分布的变化	196
10.2.5 交感性跳闸	197
10.2.6 孤岛	197
10.2.7 对馈线重合闸的影响	197
10.3 保护难题的可能解决方案	197
10.4 案例分析	201
10.4.1 故障水平的变化	203
10.4.2 保护死区	203
10.4.3 交感性跳闸	204
10.4.4 距离保护范围的减小	204
10.4.5 讨论	205
10.5 结论	206
参考文献	206
第 11 章 一种节省熔断器的自适应保护方案	208
11.1 概述	208
11.1.1 文献中的预防性措施	209
11.1.2 文献中的补救性措施	210
11.1.3 本章内容	211
11.2 案例分析	211
11.3 仿真结果及讨论	213
11.4 节省熔断器策略	216
11.4.1 50 元件 I_{pickup} 的选择和注意事项	217
11.4.2 自适应算法	218

11.5 重合器的应用	222
11.6 观察与讨论	222
11.7 结论	223
参考文献	223
附录	225
附录 A NPC 变换器的 SVM—MATLAB [®] —Simulink 模型	225
A.1 最近矢量占空比的计算	225
A.2 对称调制策略	226
A.3 MATLAB [®] —Simulink 模型	226
参考文献	241
附录 B 直流环节电容电流的数值计算	242
关于作者	245

第 1 章 绪 论

化石燃料正逐渐耗尽，而当前使用化石燃料的集中式发电厂却效率低下，导致大量能量以热能的形式散失到环境中，这些发电厂还会排放有害物质和温室气体。此外，目前的电力系统正面临一些瓶颈，比如在现有的电网设施条件下，电网扩展需要巨大成本，效率改善也已达极限，这些问题在发展中国家尤为突出。可再生能源将有助于解决这些问题，但可再生能源的波动性对其并网带来巨大挑战。

含有可再生能源的分布式电源通过接入微电网，能够解决电力系统容量限制的问题，提升效率，减少排放，并且可实现对各种多样性可再生能源的有效管控。微电网是一个相对新颖的概念，作为大电网的一部分，它由一定数量的电力负荷、微电源以及对其进行监控的嵌入式管理与控制系统构成，有时还可能包括储能设备。其中微电源指的是太阳能电池、燃料电池、风力发电机和小型热电联供（CHP）等发电系统。在电力负荷侧就近发电的优点还包括：能够利用当地的废热；节省从大型集中发电厂购电并向用户供电的电网的升级费用；减少输电损耗；为提升可激发创新，降低消费者购电价格的区域竞争创造机会^[1,2]。

在微电网中，使用电力电子变换器来控制功率潮流，并将电能转换成适当的直流或交流形式。一个微电网中，为了实现多种功能，需要不同类型的变换器，但本章或本书的主旨并非介绍所有可能出现的变换器类型，因为其中很多的变换器在有关教材或其他出版物中已有涉及^[3]。本书将重点介绍如图 1.1 所示的使分布式电源系统接入交流电网或为本地交流负荷供电的变换器，其中分布式电源包括微型热电联供系统和可再生能源发电系统。这些变换器将直流电能（来自太阳能电池^[4]、蓄电池、燃料电池^[5]）或变频交流电能（风力发电机和船用涡轮机^[6]）转换成 50/60Hz 的交流电能，并送入电网和/或为当地负荷供电。这些变换器也可用于将飞轮储能系统或高速微型燃气轮机接入电网。

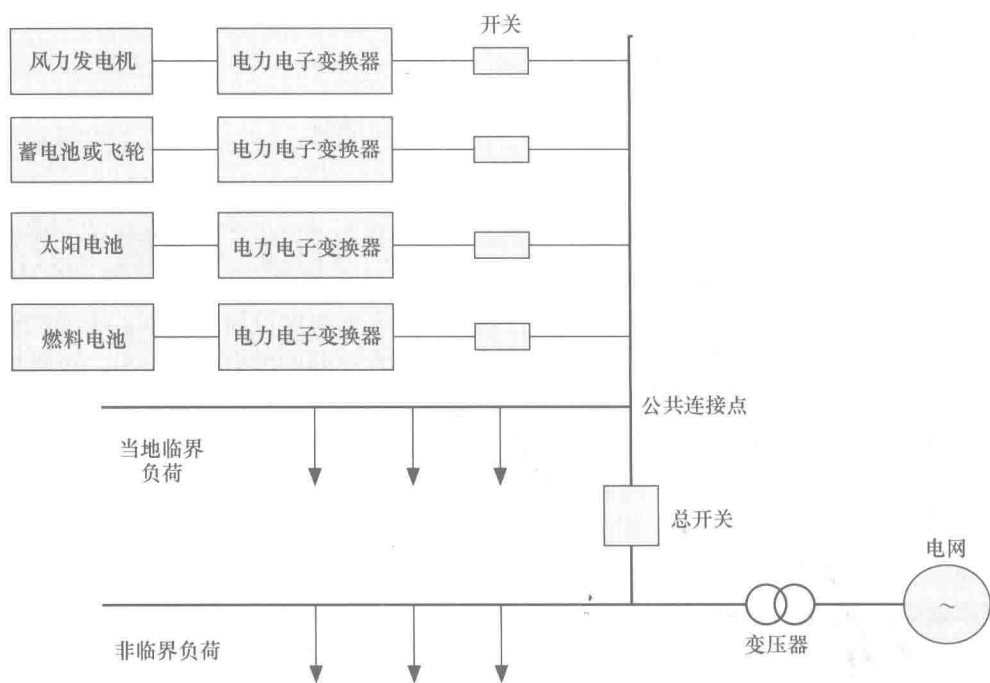


图 1.1 微电网原理图

1.1 微电网变换器的运行模式

一般来说，变换器用于将分布式电源系统与电网或其他电源并联。但是，为了保证对重要负荷的供电，当其他电源不可用时，变换器也可能工作于独立运行模式下。用于蓄电池或其他储能装置上的变换器还需要具备双向特性，以便于这些装置进行充放电。

1.1.1 并网模式

在这种运行模式下，分布式电源通过变换器与其他电源并联，为本地负荷供电或向主网馈送电能。分布式发电设备的并网需要遵循相关的国家标准^[7-9]，这些标准要求分布式发电机不应该改变公共连接点（Point of Common Coupling, PCC）的电压或与之冲突。注入电网的电流要有很高的质量，不能超过电流总谐波畸变率（Total Harmonic Distortion, THD）的上限。此外，注入电网的直流电流也有最大值限制。

注入电网的功率既可以通过直接控制注入电网的电流来控制^[10]，也可以通过控制功率角来间接控制^[11]，后者应控制电压波形为正弦。当电网电压畸变严重时，由于控制功率角的模式不能直接控制输出电流，因此该方法不能有效地降低输出电

流的总谐波畸变率 (THD)。即使对于能够实现高效功率角控制的发电机, 这仍然是一个问题。由此引出的一个疑问是, 在不考虑公共电网电压质量的条件下, 规定电流的 THD 极限是否合理。

实际上, 变换器的输出电流或电压必须与电网保持同步, 这主要是通过锁相环或电网电压过零检测技术来实现^[12]。国家标准规定分布式电源, 包括电力电子变换器, 应该具有防孤岛效应特性, 可在电网断电的情况下从公共连接点断开。防孤岛效应的技术方法很多, 最常见的是频率变化率 (Rate of Change of Frequency, RoCoF)^[13]。

1.1.2 独立模式

当微电网或分布式电源与主网断开时, 例如在防孤岛保护系统的作用下, 一般希望变换器能够持续为本地重要负荷供电。在这种独立运行模式下, 无论负荷平衡及电流质量如何, 变换器均需维持电压和频率为恒定值。如果负荷为非线性负荷, 电流还可能产生严重的畸变。

与主网分离的微电网可能会出现这样的情况: 两个或更多的电力电子变换器切换到独立模式并为本地重要负荷供电, 这就需要各个变换器合理地均分负荷。若要合理分担负荷, 独立运行模式下的并联变换器需要采用附加控制。变换器并联运行方法大致可以分为两类: ①频率及电压下垂法^[14]; ②主从法, 即其中一个变换器作为主变换器, 保持电压和频率, 并通过与其他变换器的通信实现负荷分配^[15]。

1.1.3 电池充电模式

在微电网中, 蓄电池或其他储能装置用来解决负荷扰动和负荷快速变化的问题, 换言之, 储能是为了补偿波动性电源及负荷的变化, 从而提高微电网的可靠性。此时, 电力电子变换器可以看作是一种蓄电池充电器。

1.2 变换器的拓扑结构

目前大多数并网型的商用电力电子变换器都是图 1.2 所示的电压源型两电平 PWM (脉冲宽度调制) 逆变器^[16,17]。滤波电路一般采用 LCL 滤波器, 有时也用 L 滤波器^[18,19]。与单一的 L 滤波器相比, LCL 滤波器尺寸更小, 但为了抑制 LC 谐振, 需要更加复杂的控制系统。此外, 图 1.2 中的 L_2C 的阻抗相对较小, 这为从电网流入的谐波电流提供了一个便捷通道, 因而当电网电压 THD 较高时, 有可能导致电流的 THD 超过限定值。原理上讲, 这个缺陷可以通过在电流控制型并网变换器中增加反馈控制器增益来克服, 但为了保持较好的稳定性, 这在实际中很难实现^[20]。

也有一些其他类型的滤波器拓扑得到了应用。例如, Guoqiao 等人提出了一种

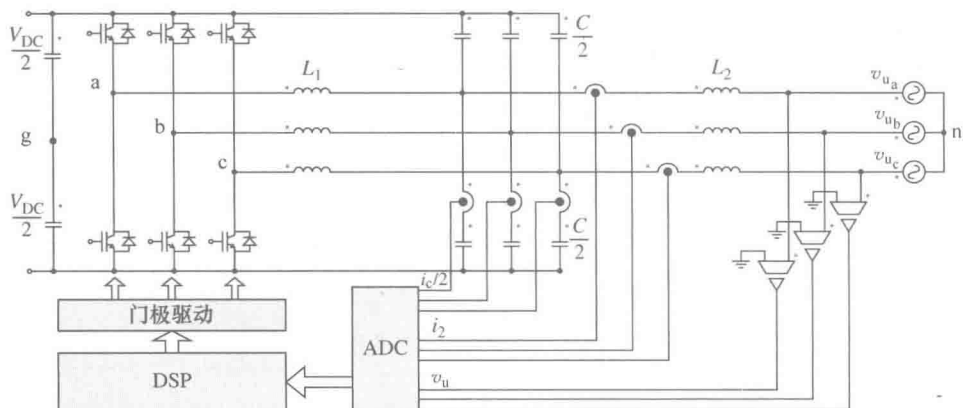


图 1.2 带有 LCL 滤波器的两电平并网逆变器

LCCL 型滤波器方案^[21]，这种滤波器需要反馈在两个电容间检测的电流。通过选择与电感值相匹配的两个电容参数，系统的闭环传递函数不会再存在谐振，这有助于提升控制器的性能，关于控制器的讨论参见 1.4 节。

滤波器的体积可能非常大，成本也比较高。其体积可以通过两种方法来减小：提高变换器的开关频率和降低变换器电压的跃变幅度。由于电力电子装置损耗的限制，随着装置和变换器额定功率的增大，其开关频率会减小，这意味着大功率两电平变换器需要配置不成比例的庞大滤波器。

可减少滤波器尺寸的新型变换器拓扑结构已经成为近期的研究热点。有学者提出了多电平变换器，包括图 1.3a 所示的中点钳位型（NPC）逆变器^[22]和图 1.3b（只显示了一相）所示的 H 桥级联型变换器^[23]。多电平逆变器具有能够减小电压跃变幅度的优点，在电流纹波一定的情况下，其滤波电感的体积和成本更小，但代价是增加了电力电子器件和控制系统的复杂性和成本^[24]。

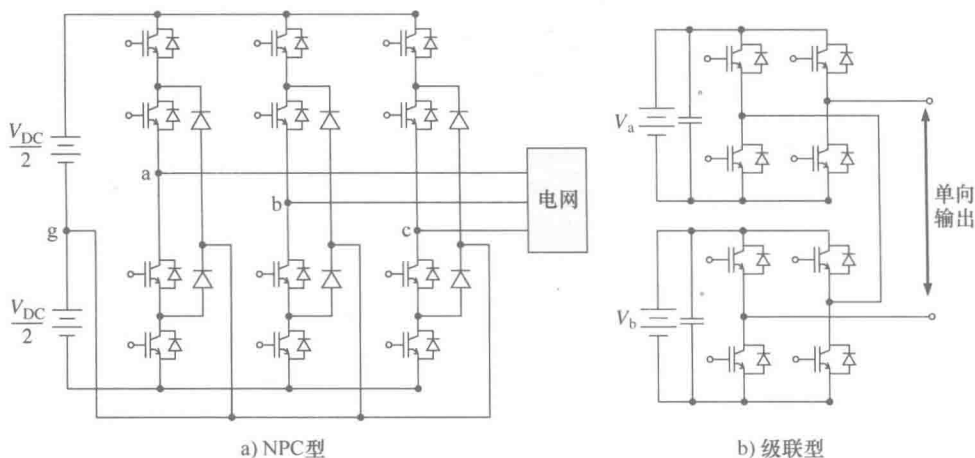


图 1.3 多电平电压源逆变器

另一种多电平变换器拓扑是如图 1.4 所示的交错并联型结构, 图中显示的是一个包括两个(变换)通道的交错并联型变换器。基于这种拓扑, 作者已经设计、开发和测试完成了具有 6 个(变换)通道的交错并联型变换器(见第 7 章)。交错并联式结构是一种在一个开关周期内实现开关时刻移相的并联技术, 通过在并联的功率模块间引入相等的相移产生纹波消除效应, 使滤波器输出纹波减小^[25,26]。此外, 由于每个功率模块电流减少, 可以提高器件开关频率, 从而使得电抗器及整个滤波器的体积比单通道变换器更小。交错并联型变换器的通道数选择需要从复杂性和滤波器体积两个方面进行折中考虑。

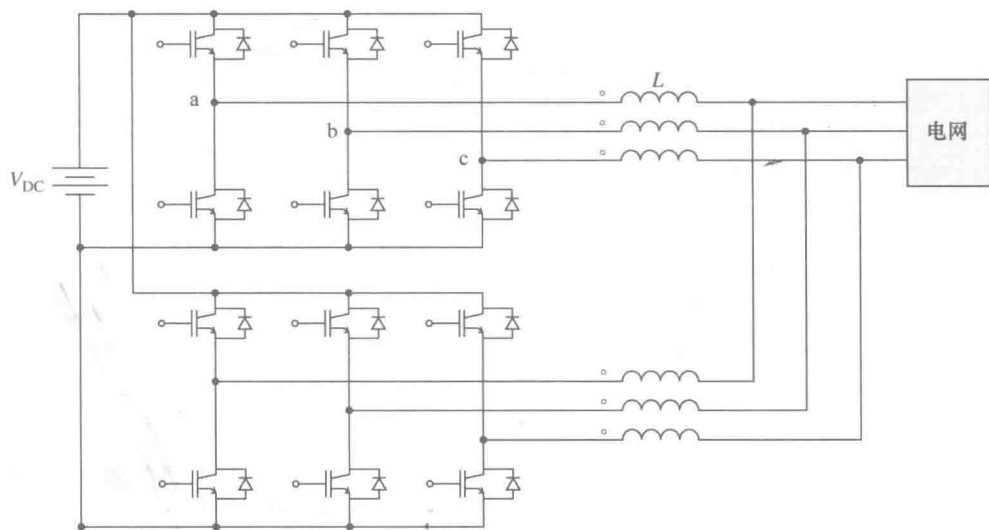


图 1.4 两通道交错并联型变换器

在微电网中得到应用的其他变换器拓扑结构还包括电流源型变换器^[27](见图 1.5a)和矩阵式变换器^[28](见图 1.5b)。矩阵式变换器尤其适用于电源为交流的

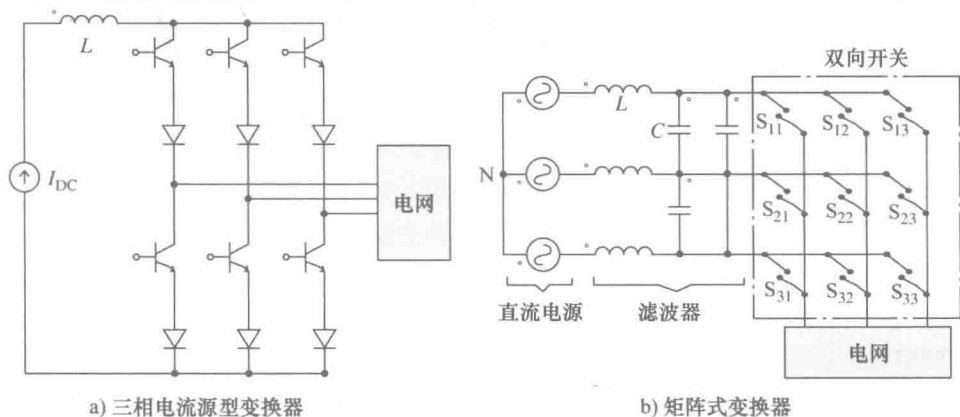


图 1.5 三相电流源型变换器和矩阵式变换器