

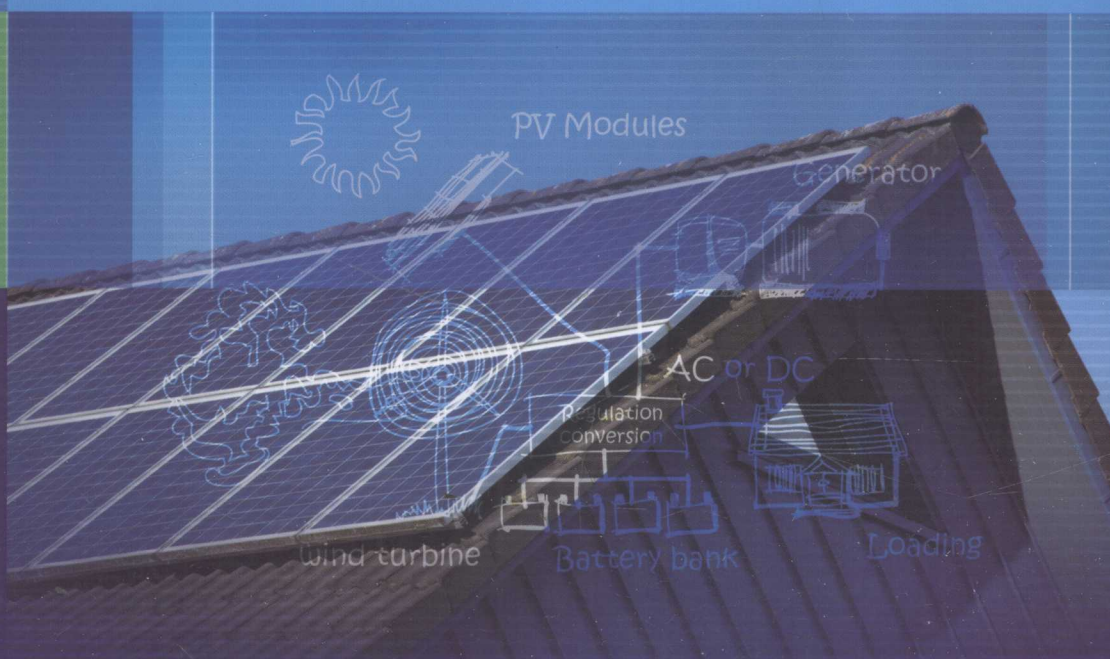


“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

非隔离 光伏并网逆变器 及其控制技术

Transformerless Photovoltaic Inverters
and Their Control Technologies

◆ 谢少军 许津铭 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

非隔离光伏并网逆变器 及其控制技术

**Transformerless Photovoltaic Inverters
and Their Control Technologies**

谢少军 许津铭 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以非隔离光伏并网逆变器为对象,结合作者自身的研究和工作经验,对并网逆变器的漏电流抑制技术及高电能质量电流控制技术进行了系统深入的介绍,包括漏电流抑制技术、进网滤波器设计、直流侧控制技术、进网电流控制技术以及锁相环技术等。此外,深入讨论了实际应用场合中并网逆变器存在的各种非理想因素(包括死区、功率管开通关断延时和导通压降、逆变器桥臂不对称、电网电压谐波、电网阻抗以及电网电压不平衡等)对电能质量与系统可靠性的不利影响及抑制策略。

本书所介绍的新型非隔离逆变器电路拓扑及提出的控制技术都经过了实验验证,除了详细的理论分析,对部分控制方法也给出了仿真结果,方便读者理解并做更为深入的分析 and 验证,可供并网变流器领域的科研工作者和技术开发人员参考,也可作为电力电子相关专业本科生和研究生的教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

非隔离光伏并网逆变器及其控制技术/谢少军,许津铭编著. —北京:电子工业出版社,2017.2

(新能源电能变换与控制技术丛书)

ISBN 978-7-121-30906-9

I. ①非… II. ①谢… ②许… III. ①逆变器—研究 IV. ①TM464

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第024546号

责任编辑:曲 昕

印 刷:北京京科印刷有限公司

装 订:北京京科印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:294千字

版 次:2017年2月第1版

印 次:2017年2月第1次印刷

定 价:48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88254468。

前 言

能源问题备受世界各国关注。加快发展风能、太阳能、生物质能等可持续能源是我国“十一五”、“十二五”规划明确提出的任务。近年来，光伏并网发电系统的应用虽然发展迅速，但其规模化发展还是受到了一定的制约，其主要原因之一在于经济性仍有待提高。提高光伏发电系统的经济性，除了提高光伏电池的光电转换效率外，发展高效、低成本的逆变器结构和高性能的逆变器控制技术是可行的突破口。

并网逆变器作为光伏发电系统中的核心电能变换装置，其主要组成包括逆变功率模块、进网滤波器以及逆变器控制系统等。特别地，非隔离光伏并网逆变器结构不含变压器，具有变换效率高以及体积小、质量轻和成本低等优势，但是光伏电池板与电网之间存在电气连接，由功率器件高频开关动作以及电路寄生参数导致的共模电流（也称漏电流）可能会大幅增加而造成安全隐患。同时，在实际应用场合中，并网逆变器存在的各种非理想因素（包括死区时间、功率管开通关断延时和导通压降、逆变器桥臂不对称、电网电压谐波、电网阻抗以及电网电压不平衡等）严重影响电能质量与系统可靠性。因此，研究非隔离并网逆变器拓扑与控制技术，包括漏电流抑制技术、进网滤波器设计、直流侧控制技术、进网电流控制技术以及锁相环技术等对提高光伏利用效率、降低成本以及优化电能质量具有重要意义。

本书以非隔离光伏并网逆变器为对象，结合作者自身的研究和工作经验，对并网逆变器的漏电流抑制技术及高电能质量电流控制技术进行了系统深入的介绍。所介绍的新型非隔离逆变器电路拓扑及提出的控制技术都经过了实验验证，书中给出了详细的理论分析并给出了部分控制方法的仿真结果，方便读者理解并做更为深入的分析 and 验证，不仅对科研工作者，对相关领域的工程技术人员也有很好的参考价值。

全书共有 6 章，各章内容安排如下：第 1 章对目前主流的光伏并网发电系统结构及逆变器拓扑结构的发展现状、非隔离并网逆变器的漏电流抑制技术、直流侧控制技术以及并网侧控制技术进行了简要的介绍；第 2 章着重介绍并网逆变器的漏电流抑制技术，建立了适用于桥式拓扑逆变器的漏电流统一分析模型，分析了漏电流抑制的机理总结了一些抑制甚至消除漏电流的方法，推演了一些新型的低漏电流非隔离并网逆变器拓扑结构；第 3 章介绍适用于非隔离光伏并网逆变器的 L、LCL 以及 LLCL 等进网滤波器结构

及其参数设计方法，给出了一些设计实例供读者参考；第 4 章介绍并网逆变器的直流侧控制技术，包括光伏电池最大功率追踪技术和半桥类逆变器的电容电压均衡控制；第 5 章详细介绍并网逆变器的进网电流控制技术，包括基波跟踪及低频谐波抑制技术，尤其针对 LCL 滤波器的谐振问题，深入分析了单电流闭环控制的局限性，分析了可抑制 LCL 滤波器谐振的有源阻尼技术的控制机制，系统地介绍了基于单变量反馈的谐振抑制技术以及基于多变量反馈的零点配置与极点配置谐振抑制技术；第 6 章介绍适用于单相以及三相并网逆变器的锁相技术，尤其针对不平衡电网条件，详细介绍一些具有良好适应性的锁相环，以供读者参考。

本书是在汤雨、许爱国、肖华锋、许津铭、杨晨、钱强、张斌峰等博士研究生及阚加荣、过亮、徐志英、丰瀚麟、黄如海、石祥花、唐婷、张晓蕊、季林等硕士研究生研究工作的基础上总结而成的，由谢少军编写第 1~2 章，许津铭编写第 3~6 章，全书由谢少军负责统筹和定稿。在编写本书过程中，钱强、张斌峰、季林等研究生做了大量编辑和校对工作，除前述提及的参与并网逆变器相关课题具体研究工作的研究生外，作者的其他研究生也在本书相关技术的研究中奉献了智慧和辛勤劳动，在此一并表示感谢。

本书的部分内容是在国家自然科学基金（项目号：51077070、51477077）的资助下完成的，在此深表谢意。

本书可供光伏、风力等可再生能源并网发电领域的科研工作者和工业实践开发人员参考，也可作为电力电子与电力传动高年级本科生和研究生的学习参考书。

由于作者水平有限，且编写时间仓促，而并网逆变器的拓扑及控制技术仍在快速发展之中，书中难免有不足和错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

2017 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光伏发电.....	1
1.2 光伏并网发电系统.....	2
1.2.1 集中式.....	3
1.2.2 串式和多串式.....	3
1.2.3 交流模块式.....	3
1.3 光伏并网逆变器.....	4
1.3.1 工频隔离型.....	4
1.3.2 高频隔离型.....	4
1.3.3 非隔离型.....	5
1.4 非隔离光伏并网逆变器关键技术.....	6
1.4.1 漏电流抑制技术.....	6
1.4.2 入网滤波器.....	7
1.4.3 直流侧控制技术.....	8
1.4.4 进网电流控制技术.....	10
1.4.5 锁相环技术.....	12
1.4.6 非理想电网的影响.....	13
1.5 本书的主要内容.....	14
第 2 章 光伏并网逆变器的漏电流抑制技术	16
2.1 概述.....	16
2.2 桥式逆变拓扑漏电流系统化分析模型.....	17
2.3 漏电流抑制途径.....	21
2.4 常见单相桥式逆变拓扑漏电流抑制机理分析.....	22
2.4.1 采用抑制途径 A 的桥类逆变拓扑.....	22
2.4.2 采用抑制途径 B 的桥类逆变拓扑.....	31
2.4.3 采用抑制途径 C 的桥类逆变拓扑.....	35

2.4.4	常见单相桥式逆变拓扑小结	42
2.5	单相非隔离桥式逆变拓扑的构造	42
2.5.1	改进型 H5 拓扑	43
2.5.2	改进型 Heric 拓扑	44
2.5.3	H5 变化拓扑 1 的改进	44
2.6	三相并网逆变器的漏电流抑制	45
2.6.1	采用抑制途径 A 的拓扑	45
2.6.2	采用抑制途径 B 的拓扑	46
2.7	本章小结	48
第 3 章	光伏并网逆变器的入网滤波器	49
3.1	概述	49
3.2	L 滤波器及参数设计	49
3.2.1	L 滤波器结构	49
3.2.2	设计依据	50
3.2.3	设计实例	51
3.3	LCL 滤波器及参数设计	52
3.3.1	LCL 滤波器结构	52
3.3.2	设计依据	53
3.3.3	设计实例	55
3.4	LLCL 滤波器及参数设计	63
3.4.1	LLCL 滤波器结构	63
3.4.2	设计依据	64
3.4.3	设计实例	65
3.5	本章小结	68
第 4 章	光伏并网逆变器的直流侧控制技术	69
4.1	概述	69
4.2	最大功率点跟踪 (MPPT) 控制	69
4.2.1	恒定电压法	70
4.2.2	电导增量法	71

4.2.3 扰动观察法	73
4.3 NPC 半桥逆变器直流侧电容电压均衡控制	74
4.3.1 NPC 半桥逆变器等效电路	74
4.3.2 电容电压自平衡机理	77
4.3.3 闭环控制对电容电压均衡的影响	86
4.3.4 电容电压均衡控制	89
4.3.5 半桥并网逆变器均压控制策略	93
4.4 本章小结	94
第 5 章 光伏并网逆变器的电流控制技术	96
5.1 概述	96
5.2 单 L 滤波并网逆变器的电流控制技术	96
5.2.1 电流控制的稳定性	97
5.2.2 基波电流跟踪	99
5.2.3 进网电流谐波失真的原因	101
5.2.4 进网电流低频谐波抑制	106
5.2.5 典型的三相 L 滤波并网逆变器电流控制	108
5.3 LCL 滤波并网逆变器的谐振现象	110
5.3.1 LCL 滤波器固有谐振	110
5.3.2 单进网电流闭环控制	111
5.3.3 单逆变器侧电流闭环控制	113
5.4 LCL 滤波并网逆变器的无源阻尼技术	115
5.5 LCL 滤波并网逆变器的有源阻尼技术	117
5.5.1 有源阻尼控制机制	117
5.5.2 基于附加单变量反馈的有源阻尼	118
5.5.3 前向通路附加数字滤波器的有源阻尼	127
5.6 LCL 滤波并网逆变器的多变量反馈控制技术	128
5.6.1 基于零点配置的控制技术	129
5.6.2 基于极点配置的控制技术	140
5.7 LCL 滤波并网逆变器的低频谐波电流抑制技术	144
5.7.1 低频谐波的抑制方案	144

5.7.2	谐波抑制的分析模型	145
5.7.3	电网电压谐波的影响	146
5.7.4	逆变器桥臂输出电压扰动的影响	148
5.8	本章小结	150
第 6 章	光伏并网逆变器的锁相技术	151
6.1	概述	151
6.2	电网电压过零点检测法	152
6.3	数字锁相环技术	152
6.3.1	三相数字锁相环	153
6.3.2	单相数字锁相环	158
6.4	非理想电网下的数字锁相环	162
6.5	本章小结	167
参考文献		168

第 1 章 绪 论

1.1 光伏发电

随着煤、石油、天然气等常规能源的日益枯竭，作为其替代品的多种可持续清洁能源，如太阳能、风能、生物质能等成为研究的热点。其中，太阳能因其储量丰富、无噪声、无污染等优势而被公认为是最理想的可持续、绿色环保能源。广义的太阳能几乎包括除核能、地热能和潮汐能以外的所有能源种类；狭义的太阳能专指太阳以电磁波形式到达地球的辐射能量。本书中所指太阳能为狭义太阳能，即到达地面的辐射能量。

我国幅员辽阔，太阳能资源丰富，75%以上的国土光照充沛，光能资源分布较为均匀，资源优势得天独厚，应用前景十分广阔。其中，西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏和内蒙古等省区太阳能资源较丰富，年辐射总量在 $5 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2$ 以上；四川盆地和贵州的太阳能资源相对较弱，年辐射总量不超过 $4.1 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2$ ；东部、南部和东北等属于中等辐射地区^[1]。

太阳能的利用形式主要有三种：光热利用、光化学利用和光伏（Photovoltaic, PV）利用。太阳能热利用的主要形式为太阳能热水器，一般和建筑物结合利用，商业化程度高；太阳能的光化学利用主要包括太阳能光合作用、太阳能化学储存和太阳能制氢等技术；太阳能的光伏利用则是根据光生伏特效应原理利用太阳能电池将太阳能直接转化为电能，1954年美国贝尔实验室研制出第一块转换率为6%的实用型单晶硅电池，现今多晶硅电池普遍转换率在15%~16%，单晶硅电池转换率普遍在16%~18%，最高可达25%甚至更高。当前，电能为人类能源的最主要的产生、输送和利用形式，太阳能的光伏利用成为了最有应用前景和最主要的利用形式。

20世纪70年代以来，世界上许多国家掀起了开发利用太阳能的热潮，成为各国制定可持续发展战略的重要内容，太阳能利用技术在研究开发、商业化生产和市场开拓方面都获得了长足发展，成为世界范围内快速、稳定发展的新兴产业。20世纪90年代以来，美国、日本及欧洲的一些国家掀起了发展光伏并网的高潮，开始重视开发和应用建筑一体化光伏并网系统（Building-Integrated Photovoltaic System, BIPV）。人们普遍认为屋顶

光伏并网系统不单独占地，将太阳能电池板安装在现成屋顶上非常适合太阳能电池能量密度较低的特点，其灵活性和经济性都优于大型并网光伏电站，有利于普及。美国是最早进行光伏并网发电的国家之一，80年代初就开始实施 PVUSA (PV Utility Scale Application) 计划，即作为规模公共电力应用的光伏发电计划，1996年又宣布实施“百万屋顶计划”。日本政府从1994年开始实施“朝日七年计划”，1997年再次宣布实施“七万屋顶计划”。德国、意大利、荷兰、瑞士和芬兰等发达国家也相应开展了屋顶计划。我国“十五”期间成功实施的“光明工程”、“屋顶光伏示范工程”等项目，为我国光伏发电技术的推广应用奠定了良好的基础。据最新统计资料^[2]显示，2015年在参与 IEA PVPS 组织的国家中共安装 48.1GW 光伏发电设备，其中，99%以上的安装容量为并网应用，这是因为并网应用相对独立光伏系统有成本低和免维护等优势。

从目前几种主要的新能源发电设备的安装成本来看，光伏发电设备成本仍然最高，在当前太阳能电池成本降低受技术因素制约的情况下，提高光伏并网逆变器的变换效率和输出电能利用效率是一种降低光伏发电成本的有效途径。提高光伏并网发电系统的效率对推进太阳能大规模利用有重要意义。

1.2 光伏并网发电系统

太阳能光伏利用的系统称为光伏发电系统，包括光伏组件和电能变换装置等部件，根据功率等级、安装方式和应用场合等有不同的结构形式。图 1.1 给出了几种常见的光伏发电系统结构^[3]。

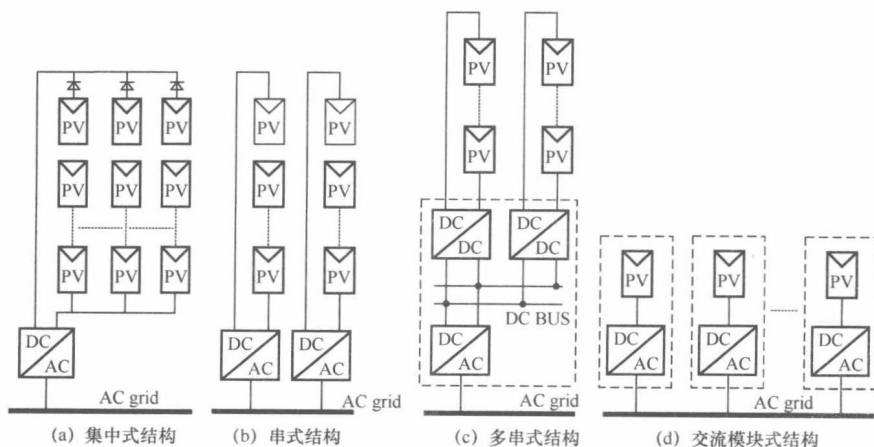


图 1.1 几种常见的光伏发电系统结构

1.2.1 集中式

集中式光伏发电系统是最早投入实际使用的构成方式[图 1.1 (a)], 其容量一般在几十到几百千瓦, 甚至兆瓦及以上。这种系统是将大量的光伏组件先串联到较高的电压等级, 再通过二极管并联到一定的容量后通过集中逆变器并网。集中式结构最主要的优点是采用单级逆变拓扑, 效率高, 但也存在单个光伏阵列利用率低、系统抗局部阴影能力差和维护困难等问题。该集中式结构一般应用于大容量的地面光伏电站、基于大型建筑物的屋顶和幕墙实现的建筑物集成光伏系统等。

1.2.2 串式和多串式

鉴于集中式结构中多个电池串存在不匹配损耗, 串式和多串式系统应运而生, 分别如图 1.1 (b) 和 (c) 所示, 每一串都有独立的最大功率点跟踪 (MPPT) 功能, 其中常规串式结构系统独立, 更适合小功率户用光伏屋顶; 多串式结构采用两级式结构, 前级容易扩展, 适合安装在发电场或建筑物上几个不同的方位。这种系统在实际应用中仍然存在如下问题: ①每个电池串的最大功率点跟踪虽然解决了串之间的不匹配损耗, 但每个串中的电池模块难以保证运行在最大功率点; ②系统维护仍然较为困难。

近些年出现了光伏直流模块技术, 在每个电池组件上采用一个直流变换器, 该直流变换器可以实现单个电池组件的最大功率跟踪, 提高光伏系统的发电效率, 因此该直流变换器也称作“效率优化器”。

1.2.3 交流模块式

交流模块式系统[图 1.1 (d)]为每个光伏组件集成了一个具有 MPPT 功能的并网逆变器, 再由大量的交流模块并联构成系统, 该构成方式的优点是能保证每个光伏组件工作在各自的最大功率点, 抗局部阴影和组件电气参数失配能力强, 易于扩展、支持即插即用和热插拔, 便于检修和维护, 但是单机变换效率较低, 构成大功率系统时存在连接线复杂、成本高、损耗大等问题。

1.3 光伏并网逆变器

光伏发电系统中的电能变换装置是一个核心部件。在光伏并网应用中，通常采用并网逆变器实现光伏电池到电网的电能传递。并网逆变器的组成主要包括逆变功率电路、入网滤波器及并网控制器等。其中，光伏逆变器的功率电路拓扑结构对光伏发电系统的成本、效率、进网电流质量、安全和可靠性等方面有重要影响。

根据是否带隔离变压器，光伏逆变器可分为工频隔离型、高频隔离型和非隔离型^[3]。

1.3.1 工频隔离型

带工频变压器的并网逆变器先通过 DC/AC 变换，将光伏电池的直流电能转化为交流电能，然后通过工频变压器和电网连接（图 1.2），来实现电网和电池板电气隔离，保障人身安全，同时可以提供电压匹配和进网电流直流分量抑制。但是，低频变压器增加了系统体积、重量和成本，降低了变换效率。带工频隔离的并网逆变器一般应用于大功率或较大功率的三相和单相系统。



图 1.2 带工频隔离变压器的并网逆变器

1.3.2 高频隔离型

工频隔离变压器的体积、重量和成本等方面的劣势限制了其在中小功率光伏并网逆变器中的应用，在 DC/AC 变换环节中插入高频隔离变压器的方法同样可以实现电网与电池板的电气隔离和电压匹配，同时可以大幅降低变压器的体积、重量和成本。根据高频变压器与变换环节的组合方式不同可以分为含直流环节的变换结构、含伪直流环节的变换结构和无直流环节的变换结构，如图 1.3 所示。

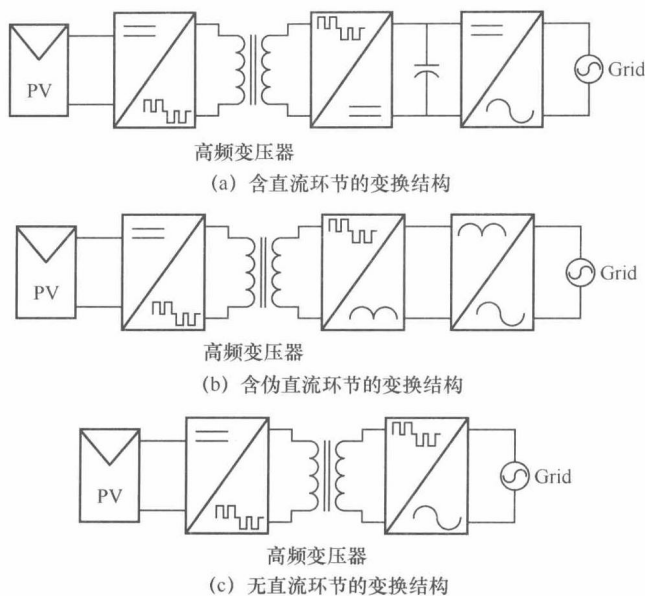


图 1.3 带高频隔离变压器的并网逆变器

高频隔离变压器的引入极大地丰富了中小功率并网逆变器的拓扑形式，广泛应用于家庭单相光伏并网场合。但由于系统变换环节更为复杂，系统效率可能会受到影响。

1.3.3 非隔离型

非隔离型并网逆变器（Transformerless Grid-Connected Inverter, TLGCI）结构不含变压器（包括高频和低频），拥有变换效率高，体积、重量和成本低等优势，得到各国科研人员的重视和工业界的追捧。图 1.4 (a) 和 (b) 分别为非隔离并网逆变器的两种构成方式：单级式和两级式。两级式并网逆变器可以适应宽的输入电压范围，而且两级式系统易于分级优化和控制，因此整个系统设计非常方便；对单级式并网逆变器来说，由于最低输入电压不低于电网电压峰值，因而单级式并网逆变器适用于更高的光伏电池串电压，并且由于功率变换级数少，系统变换效率更高。

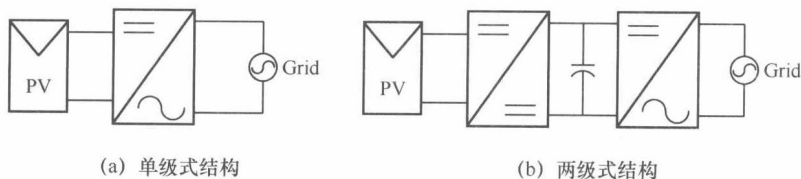


图 1.4 无隔离变压器的并网逆变器

1.4 非隔离光伏并网逆变器关键技术

1.4.1 漏电流抑制技术

由于不含高频或低频变压器，非隔离型并网逆变器具有转换效率高、体积小、重量轻和成本低等优势。然而，非隔离逆变器导致光伏电池板与大电网之间存在电气连接，由于电池板对地寄生电容的存在，在功率器件高频开关时会导致在寄生电容上产生高频共模电压，从而在逆变器、电池板寄生电容以及电网组成的回路中形成高频的漏电流（Leakage Current，也称“共模电流”或“地电流”）。由于光伏电池板面积较大，其对地寄生电容很大，如晶硅电池约为 150nF/kW ，而薄膜电池甚至达到了 $1\mu\text{F/kW}$ 。另外，出于逆变器效率优化的考虑，其本身阻抗较低，加之电网本身阻抗也很低，从而导致共模回路漏电流有可能会超过允许的范围。高频漏电流会带来传导和辐射干扰、进网电流谐波及损耗的增加，甚至危及设备和人员安全。因此，如何消除共模电流成为非隔离式并网逆变器得以普及必须解决的问题，是光伏并网逆变器的研究热点之一。

为消除并网逆变器的漏电流，必须对非隔离逆变拓扑进行改造。除了采用直流电压利用率较低的常规半桥类（包括二电平及三电平）逆变电路外，目前非隔离型光伏并网逆变器产品技术掌握在少数几个厂商手中，如图 1.5 为专利 EP 1369985 B1 的电路结构（简称 Heric 拓扑），属 Sunways 公司拥有；图 1.6 为专利 US 7411802 B2 的电路结构（简称 H5 拓扑），由 SMA Solar 公司拥有。采用这两种专利技术的光伏并网逆变器变换效率均达到 98%。

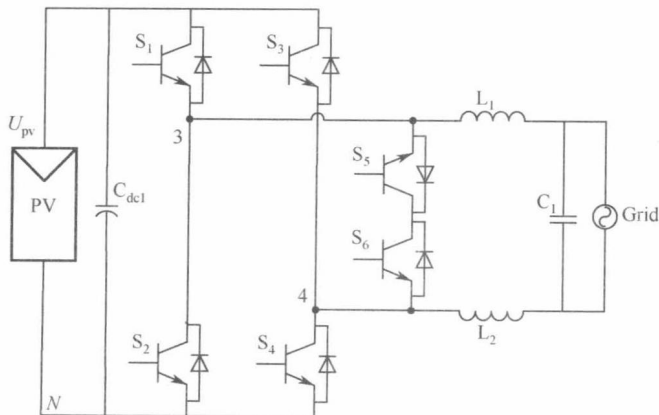


图 1.5 非隔离 Heric 拓扑并网逆变器

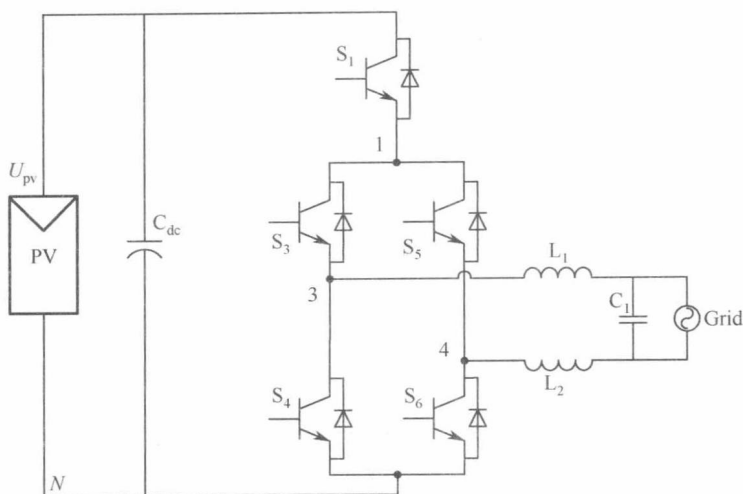


图 1.6 非隔离 H5 拓扑并网逆变器

1.4.2 入网滤波器

由于脉宽调制 (PWM) 技术的使用, 逆变器输出电压 u_{inv} 中含有大量的开关频率及其倍数频率附近的谐波电压, 这些高频谐波电压须经入网滤波器滤除后方可避免对交流电网产生较大的污染。入网滤波器是保证进网电流质量达到总谐波含量和单次谐波含量指标 (见表 1.1) 的关键。目前, 入网滤波器主要有 L 和 LCL 两种类型, 其滤波器形式如图 1.7 所示。相对来说, 由逆变器侧电感 L_1 、滤波电容 C_1 和网侧电感 L_2 组成的 LCL 滤波器可以实现更为优秀的开关频率谐波抑制效果, 降低滤波器体积和重量, 具有较好的应用前景, 是并网逆变器入网滤波器的首选方案。但是, 相较于一阶的单 L 滤波器, LCL 滤波器中滤波元件较多, 系统阶数较高, 其参数设计较为复杂。

表 1.1 进网电流质量的限制指标

总谐波含量	奇次谐波		偶次谐波		直流分量	功率因数
<5%	3~9 次	<4%	2~10 次	<1%	小于额定进网电流的 0.5%	进网功率达到 10% 额定功率时不小于 0.85
	11~15 次	<2%	12~16 次	<0.5%		
	17~21 次	<1.5%	18~22 次	<0.375%		
	23~33 次	<0.6%	24~34 次	<0.15%		
	>33 次	<0.3%	>34 次	<0.075%		

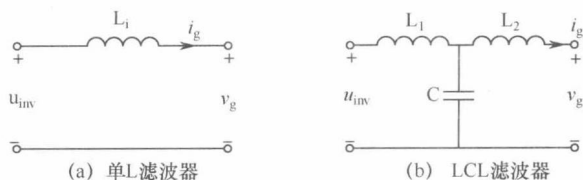


图 1.7 并网逆变器输出电流滤波器

并网逆变器的开关频率一般在几到几十千赫兹 (kHz), 即 PWM 逆变导致的电压谐波次数要高于 33 次, 谐波电压导致的进网电流开关频率次谐波要小于 0.3%。但是, 仅依赖于这样一个要求是无法有效设计 LCL 滤波器的各元件参数的。早些年, LCL 滤波器的参数设计的基本步骤为^[4]: ①依据逆变器侧电感电流 i_{L1} 的开关频率次纹波含量设计电感 L_1 的大小; ②通过限制额定功率下的系统无功容量来获得电容 C_1 的限制条件(并且以最大电容值的一半作为后续计算的起始点); ③依据进网电流开关频率谐波的限制条件设计电感 L_2 的大小; ④通过 LCL 滤波器的自然谐振频率、两电感上的总基波压降以及实际的进网电流谐波衰减程度的反复校验方式调整滤波器参数。该设计方法虽然比较容易入手, 但是各限制条件过于依赖经验并且实际中难以衡量设计的滤波器参数的优化程度。为此, 近年来提出了一些 LCL 滤波器参数优化选取的方法, 各方法的基本设计依据均一致, 区别在于优化准则不同, 主要的优化准则包括滤波器元件总的储能最小以及节约总电感磁芯材料等。

1.4.3 直流侧控制技术

1. 最大功率点跟踪技术

光伏发电系统的效率为电池板的光电转换效率、最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 效率和逆变器效率三部分的乘积, 提高 MPPT 效率对光伏发电系统的效率提高和成本降低同样有重要的意义。在不同的光照强度和电池温度下, 光伏电池的最大输出功率点 (I-V 特性) 是不同的, 为了得到最佳的能量利用率, 必须采取措施使电池的输出自动跟踪环境条件的变化, MPPT 技术就是针对这一问题提出来的。

MPPT 技术是光伏发电技术研究的热点, 每年均有大量的研究论文发表。现阶段常见的 MPPT 算法包括开路电压法、短路电流法、扰动观察法、增量电导法以及基于模糊和神经网络理论的智能跟踪算法等。开路电压法和短路电流法以固定比例产生光伏电池